

ESTRATÉGIA DE DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR DE PAPEL & CELULOSE



Elaboração

Coordenação Geral

Rafael Lourenço Thomaz Favery (AFRY)

AFRY

Romualdo Hirata

Rafael Lourenço Thomaz Favery

Caroline Palacio Montes

Karen Harumy Freitas

Yara Prates Kenappe

Manoel Rodrigues Neves

Maurício Costa Porto

Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID)

Katia Queiroz Fenyves

Walquiria Liz Gomes Campos

Raquel Souza

Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC)

João Francisco Paiva Avelino

Artur Silva Boaretto

Carolina Pereira Pedroso

Gustavo Saboia Fontenele e Silva

André Luis Ribeiro Barbosa

Luiz Camargo De Miranda

Leonardo Povia

Associação Brasileira de Árvores (Ibá)

Adriano Scarpa Tonaco

Marcia Silva de Jesus

Produção Editorial

Dafne Fonseca (Trabuka)



Sobre a AFRY

AFRY é uma empresa internacional de engenharia, projetos e consultoria, que atua em diversos setores industriais, como papel e celulose, energia, mineração, siderurgia, metalurgia, indústrias de base florestal, alimentício, infraestrutura, entre outros. Com origem na Suécia, a AFRY está presente no Brasil desde 1978, e tem como missão desbloquear transições rumo a uma sociedade sustentável e resiliente.



Sobre o BID

O Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), membro do Grupo BID, tem como objetivo melhorar vidas na América Latina e no Caribe. Fundado em 1959, o Banco trabalha com o setor público da região para desenhar e viabilizar soluções inovadoras que gerem impacto para o desenvolvimento sustentável e inclusivo. Por meio de financiamento, experiência técnica e conhecimento, o BID promove o crescimento e o bem-estar em 26 países.



Sobre o MDIC

O Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC) é o órgão do governo federal brasileiro responsável por formular e executar políticas de desenvolvimento industrial, comercial e de serviços. Dentro de sua estrutura organizacional está a Secretaria de Economia Verde, Descarbonização e Bioindústria (SEV), que tem como competência propor, implementar e avaliar políticas públicas que integrem estratégias de descarbonização dos setores produtivos; fomentar a bioindústria no país; desenvolver as cadeias produtivas dos biomas e da Amazônia e que incentivem e apoiem o desenvolvimento de negócios que gerem impacto social e ambiental.



Sobre a Ibá

A Indústria Brasileira de Árvores (Ibá) é a associação responsável pela representação institucional da cadeia produtiva de árvores plantadas, do campo à indústria. Tem como objetivo valorizar os produtos originários dos cultivos de eucalipto, pinus e demais espécies destinadas a fins industriais e de todo o sistema de restauração e plantio de espécies nativas. Atua em defesa dos interesses do setor junto a autoridades e órgãos governamentais, entidades da cadeia produtiva de árvores plantadas e importantes setores da economia, organizações socioambientais, universidades, escolas, consumidores e imprensa – tanto nacional como internacionalmente.

ÍNDICE



13

INTRODUÇÃO



15

OBJETIVO



16

ABRANGÊNCIA E PÚBLICO-ALVO



17

PROCESSO DE ELABORAÇÃO



21

PANORAMA DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE



82

MAPEAMENTO DAS AÇÕES POTENCIAIS DE DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR



96

PRIORIZAÇÃO E PROPOSIÇÃO DE AÇÕES DE DESCARBONIZAÇÃO DE CURTO E LONGO PRAZO



106

CONSIDERAÇÕES FINAIS



107

REFERÊNCIAS



110

ANEXO I - METODOLOGIA



114

ANEXO II - MAPEAMENTO DAS AÇÕES POTENCIAIS DE DESCARBONIZAÇÃO

FIGURAS

Figura 1	Fluxograma do processo de elaboração da Estratégia de Descarbonização do Setor de Papel & Celulose.	18	Figura 16	Percentual de cada categoria de emissões fósseis de GEE dos escopos 1 e 2 do segmento "Papel".	45
Figura 2	Empresas e instituições convidadas a participar da Estratégia de Descarbonização do Setor de Papel & Celulose.	19	Figura 17	Percentual de cada categoria de emissões fósseis de GEE dos escopos 1 e 2 do segmento "Segmento Papel e Celulose".	46
Figura 3	Registros fotográficos de cada painel temático.	19	Figura 18	Percentual de cada categoria de emissões fósseis de GEE do escopo 3 considerando as 18 empresas respondentes do setor de Papel & Celulose. Nota: amostra - 18 empresas respondentes que realizam IGEE.	47
Figura 4	Contribuições para o Crescimento Global (2010 - 2027e). Fonte: Banco Mundial (2025).	24	Figura 19	Status de implantação de uma Política Corporativa de Mudanças Climáticas no setor de Papel & Celulose.	50
Figura 5	Produção Brasileira de Celulose Por tipo. Fonte: AFRY.	25	Figura 20	Diagnóstico das ações de preparo realizadas e preocupações quanto à nova Lei 15.042/2024, citadas pelas empresas do setor de Papel & Celulose no questionário. Nota: amostra 19 empresas (que representam 86% da produção nacional de papel e celulose).	51
Figura 6	Taxa de crescimento da produção brasileira de celulose por destino. Fonte: AFRY.	25	Figura 21	Percentual das empresas do setor de Papel & Celulose respondentes por tipo de compromisso público voltado para a descarbonização assumido. Nota: amostra de 19 empresas respondentes.	52
Figura 7	Estimativa da Produção Brasileira de Celulose. Fonte: AFRY.	26	Figura 22	Principais ações, alavancas e metas do Plano Setorial da Indústria.	54
Figura 8	Produção Brasileira de Papel segundo o Tipo (2024). Fonte: AFRY.	26	Figura 23	Diagnóstico do status das ações de descarbonização voltadas a melhoria da eficiência operacional no setor de Papel & Celulose no Brasil. Nota: amostra 19 empresas (que representam 86% da produção nacional de papel e celulose).	56
Figura 9	Taxa de crescimento da produção brasileira de papel por destino (2005 - 2024). Fonte: AFRY.	26	Figura 24	Frequência das respostas para cada solução técnica voltada para a transição energética no setor de Papel & Celulose, considerando todas as empresas respondentes.	59
Figura 10	Estimativa da Produção Brasileira de Papel (2024 - 2050). Fonte: AFRY.	26	Figura 25	Diagnóstico da adoção atual de ações de descarbonização voltadas a adaptação climática operacional no setor de Papel & Celulose no Brasil.	62
Figura 11	Diagrama das fontes de emissão ao longo da cadeia de valor do setor de Papel & Celulose.	29	Figura 26	Diagnóstico da adoção atual de ações de descarbonização voltadas para a promoção da circularidade e reaproveitamento de resíduos no setor de Papel & Celulose no Brasil.	64
Figura 12	Diagrama dos fluxos de remoção/redução e emissão de GEE ao longo da cadeia de valor da operação florestal.	31			
Figura 13	Diagrama dos fluxos de remoção/redução e emissão de GEE ao longo da cadeia de valor da fabricação de celulose.	35			
Figura 14	Diagrama dos fluxos de remoção/redução e emissão de GEE ao longo da cadeia de valor da fabricação de papel.	40			
Figura 15	Quantidade de empresas respondentes que considera cada tipo de operação em seu IGEE. Nota: amostra - 18 empresas que elaboravam IGEE. Unidade: % em relação ao número total de empresas respondentes.	45			

Figura 27	Diagnóstico da adoção atual de ações de descarbonização voltadas para induzir a captura de carbono da atmosfera.	66	Figura 38	Matriz resultante da priorização das ações estruturantes de descarbonização para o Setor de Papel & Celulose, considerando os prazos de cumprimento de Curto e Longo Prazo, conforme índices de valor gerado e nível de esforço.	104
Figura 28	Diagnóstico do status das ações de descarbonização voltadas criação de novos bioprodutos.	68	Figura 39	Fluxograma do processo de elaboração da Estratégia de Descarbonização do Setor de Papel & Celulose.	111
Figura 29	Diagnóstico da adoção atual de ações de descarbonização de substituição do gás SF ₆ nas subestações de energia elétrica.	70	Figura 40	Empresas e instituições convidadas a participar da Estratégia de Descarbonização do Setor de Papel & Celulose.	112
Figura 30	Priorização das ações de fomento à descarbonização direcionadas ao do setor de Papel & Celulose para realização pelo poder público, de acordo com a percepção das empresas participantes da pesquisa. Nota: amostra 19 empresas (que representam 86% da produção nacional de papel e celulose).	70	Figura 41	Registros fotográficos de cada painel temático.	113
Figura 31	Forma como a percepção pública impacta a estratégia de descarbonização das empresas, na percepção das empresas respondentes.	72	Figura 42	Eixos da estratégia de descarbonização do setor de Papel & Celulose.	115
Figura 32	Diagnóstico da adoção atual de ações de engajamento e comunicação com as partes interessadas realizadas pelo setor de Papel & Celulose para fomento à descarbonização. Nota: amostra 19 empresas (que representam 86% da produção nacional de papel e celulose).	73	Figura 43	Sobrevoos das áreas afetadas pelas chuvas na Região Metropolitana de Porto Alegre.	155
Figura 33	Diagnóstico da adoção atual de ações de fomento à descarbonização do setor de Papel & Celulose realizadas pelas associações e instituições setoriais.	75	Figura 44	Modo de enfrentamento das emissões negligenciadas.	159
Figura 34	Principais desafios na implantação de ações de descarbonização no setor de Papel & Celulose, de acordo a percepção das empresas respondentes.	77	Figura 45	A cadeia do CCUS.	173
Figura 35	Eixos da estratégia de descarbonização do setor de Papel & Celulose.	83			
Figura 36	Matriz resultante da priorização das ações impactantes de descarbonização, considerando os prazos de cumprimento de Curto e Longo Prazo, conforme índices de valor gerado e nível de esforço – Segmento Papel.	100			
Figura 37	Matriz resultante da priorização das ações impactantes de descarbonização, considerando os prazos de cumprimento de Curto e Longo Prazo, conforme índices de valor gerado e nível de esforço – Segmento Papel e Celulose.	101			

TABELAS

Tabela 1	Principais tendências de mitigação do setor de Papel & Celulose, no horizonte de curto prazo (2030-2035) e no longo prazo (2050), conforme Plano Setorial da Indústria (MDIC, 2025).	55
Tabela 2	Status de implementação das ações de descarbonização voltadas a melhoria da eficiência operacional.	57
Tabela 3	Status de implementação das ações de descarbonização voltadas a transição energética.	60
Tabela 4	Status de implementação das ações de descarbonização voltadas a adaptação climática.	63
Tabela 5	Status de implementação das ações de descarbonização voltadas a circularidade e reaproveitamento de resíduos.	65
Tabela 6	Status de implementação das ações de descarbonização voltadas a captura de carbono.	67
Tabela 7	Status de implementação das ações de descarbonização voltadas a criação de novos bioprodutos.	69
Tabela 8	Intensidade de emissões de GEE de empresas de papel e celulose por região global.	80
Tabela 9	Priorização das ações impactantes de descarbonização para o setor de Papel & Celulose, considerando os prazos de cumprimento de Curto e Longo Prazo.	97
Tabela 10	Priorização das ações estruturantes de descarbonização para o setor de Papel & Celulose, considerando os prazos de cumprimento de Curto e Longo Prazo.	102



GLOSSÁRIO

ABTCP	Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel	CO ₂ e	Gás Carbônico Equivalente	GHGRP	Greenhouse Gas Reporting Program	MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços
AFPA	Australian Forest Products Association	CRVE	Certificados e Redução ou Remoção Verificada de Emissões	GRI	Global Reporting Initiative		
APP	Áreas de Preservação Permanente	ECF	Elemental Chlorine Free	GtCO ₂ e	Gigatonelada de Gás Carbônico Equivalente	MMA	Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima
BEKP	Bleached Eucalyptus Kraft Pulp	EMPAPPEL	Associação Brasileira de Embalagens em Papel	HFC	Hidrofluorcarbonos	MME	Ministério de Minas e Energia
BHKP	Bleached Hardwood Kraft Pulp	ENDI	Estratégia Nacional de Descarbonização da Indústria	IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística	NDC	Nationally Determined Contributions
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social	ENEC	Estratégia Nacional de Economia Circular	IFRS	International Financial Reporting Standards	NIB	Nova Indústria Brasil
BSKP	Bleached Softwood Kraft Pulp	ENM	Estratégia Nacional de Mitigação	IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	NIR	National Inventory Report
CAGR	Compound Annual Growth Rate	EPA	Environmental Protection Agency	IPPTA	Indian Pulp and Paper Technical Association	NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
CBE	Cotas Brasileiras de Emissão	EPE	Empresa de Pesquisa Energética	IPPU	Processos Industriais e Uso De Produtos	NRCAN	Natural Resources Canada
CCS	Carbon Capture and Storage	ESG	Environmental, Social and Governance	I-RECs	International Renewable Energy Certificates	OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
CCU	Carbon Capture and Use	ETE	Estação de Tratamento de Efluentes	JPA	Japan Paper Association	OMC	Organização Mundial do Comércio
Cepi	Confederation of European Paper Industries	EUDR	European Union Deforestation Regulation	KtCO ₂ e	Kilotonelada de Gás Carbônico Equivalente	PAG	Potencial de Aquecimento Global
CIF	Climate Investment Funds	GCF	Green Climate Fund	LULUCF	Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas	PATEN	Programa de Aceleração da Transição Energética
CNI	Confederação Nacional da Indústria	GEE	Gases de Efeito Estufa	MAPA	Ministério da Agricultura e Pecuária	PATEN	Programa de Aceleração da Transição Energética
CO ₂	Dióxido de Carbono (Gás Carbônico)	GEF	Global Environment Facility	MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação	PBGHGP	Programa Brasileiro GHG Protocol
						PIB	Produto Interno Bruto

PLANEC	Plano Nacional de Economia Circular	UBSKP	Unbleached Softwood Kraft Pulp
PNDF	Plano Nacional de Desenvolvimento de Florestas Plantadas	UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas para Mudanças Climáticas
PNE	Plano Nacional de Energia	WMO	World Meteorological Organization
PNMC	Política Nacional de Mudança do Clima		
PNPSA	Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais		
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica		
RL	Reserva Legal		
RPPN	Reservas Particulares do Patrimônio Natural		
SBCE	Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões		
SBTi	Science Based Targets initiative		
SIRENE	Sistema de Registro Nacional de Emissões		
TCF	Total Chlorine Free		
TPI	Transition Pathway Initiative		
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket		
UBHKP	Unbleached Hardwood Kraft Pulp		



SUMÁRIO EXECUTIVO

A mudança climática é considerada uma questão desafiadora do nosso tempo e estamos em um momento crucial. O mundo hoje enfrenta desafios ambientais sem precedentes e interconectados. A temperatura média global da Terra: já excedeu os 1,5°C, as concentrações de CO₂ na atmosfera atingiram níveis recórcdes, o consumo de recursos naturais da humanidade equivale ao consumo de 1,75 planeta Terra, o que potencializa o efeito das mudanças climáticas.

O Brasil tem sido pioneiro nas discussões da agenda climática global, atuando historicamente como ponte entre países desenvolvidos e em desenvolvimento. O país foi protagonista em marcos importantes, como a Rio-92, que consolidou o conceito de desenvolvimento sustentável, e manteve influência nas negociações que resultaram no Acordo de Paris.

O setor de Papel & Celulose (P&C) desempenha um papel crucial na promoção da bioeconomia e grande relevância no cenário global, no qual é o maior exportador de celulose do mundo e um dos principais produtores de papel. Nas últimas décadas apresenta uma trajetória de forte expansão estrutural, impulsionada por novos investimentos, vantagens competitivas naturais e crescente demanda global por fibras renováveis. No segmento de celulose, a produção nacional atingiu 25,5 milhões de toneladas em 2024. As projeções indicam

que, entre 2024 e 2035, o país adicionará aproximadamente 0,7 milhão de toneladas por ano de nova capacidade, respondendo por cerca de 70% da expansão mundial celulose de fibra curta. No segmento de papel, a produção nacional alcançou 11,3 milhões de toneladas em 2024 e deve crescer de maneira moderada até 2035, com incremento médio de 0,2 milhão de toneladas por ano, impulsionado pelo *e-commerce*, aumento de renda e consolidação de tendências de consumo mais sustentáveis.

Esse setor é baseado em matéria-prima de origem vegetal e apresenta significativo potencial na contribuição da transição para uma economia de baixo carbono, a partir de:

- Remoções e estoque de carbono pelas árvores por meio da gestão sustentável das florestas



— Emissões evitadas no processo produtivo, pela reutilização de resíduos e subprodutos e autossuficiência energética com o uso de fontes renováveis

— Efeito substituição de produtos intensivos em carbono por produtos renováveis

Apesar das emissões de CO₂ desse setor serem predominantemente de origem não fóssil, ainda continuam a existir emissões fósseis que podem ser mitigadas para contribuir para o alcance dos objetivos climáticos.

Neste sentido, a AFRY foi escolhida pelo MDIC, BID e Ibrá para apoiar a elaboração da estratégia de descarbonização do setor de Papel & Celulose no Brasil, a qual tem como principal objetivo impulsionar a mitigação das emissões de GEE desse setor, promovendo a transição para uma economia de baixo carbono, por meio de ações de curto prazo (no horizonte de 2030-2035) e longo prazo (no horizonte de 2050), incorporando preceitos com base na promoção de um desenvolvimento sustentável e de justiça climática.

Paratanto, essa estratégia foi fundamentada em 4 eixos interconectados (alavancas prioritárias), que abordam os temas prioritários que poderão ser desenvolvidos e implementados pelas empresas em sua jornada de descarbonização até 2050. São eles:

— Eixo I - Governança Corporativa Climática

— Eixo II - Soluções Técnicas (Alternativas de Descarbonização)

— Eixo III - Instrumentos Econômicos e Políticas Públicas

— Eixo IV - Comunicação e Engajamento da Sociedade e da Cadeia de Valor

A estratégia foi construída de forma

participativa, incluindo as principais empresas do setor de P&C, que compreendem mais de 86% da produção nacional de papel e celulose.

As principais emissões fósseis na cadeia produtiva da celulose estão relacionadas à operação de máquinas e equipamentos e à operação logística que correspondem a grande parcela destas emissões fósseis em função da queima de combustíveis. No processo industrial o uso de combustíveis fósseis em situações normais de operação ou em transitórias, impactam significativamente as emissões de GEE. O tratamento de resíduos e efluentes também pode contribuir adicionalmente com as emissões de GEE. Já na cadeia produtiva do papel, as emissões fósseis estão principalmente relacionadas a compra de energia elétrica e à operação de máquinas e equipamentos e à operação logística.

No mapeamento e priorização das ações potenciais de descarbonização foram identificadas 101 ações de descarbonização para o setor de Papel & Celulose, sendo estas divididas em 61 impactantes, que impactam diretamente na redução de emissão ou remoção de GEE ; e 40 estruturantes, que visam estabelecer condições fundamentais para a execução e implementação das ações impactantes.

A partir da priorização das ações tem-se como recomendação que no curto prazo (no horizonte de 2030-2035), o setor deva priorizar ações maduras e de menor esforço, como a substituição de combustíveis fósseis por biomassa ou biocombustíveis, ampliação da cogeração com licor negro e biomassa, modernização de caldeiras e fornos, otimização logística por meio de rotas mais eficientes e frotas de maior capacidade, redução do consumo de água, aumento do uso de aparas e reciclagem interna, e medidas de gestão florestal incluindo prevenção a incêndios, diversificação genética e monitoramento de bacias hidrográficas. Também ganham destaque as iniciativas de expansão de florestas plantadas, restauração de áreas

nativas e fortalecimento do engajamento de fornecedores, clientes, funcionários e comunidades.

Para o longo prazo, até 2050 (no horizonte de 2050), as ações prioritárias são aquelas de maior impacto transformacional, mas que exigem maturidade tecnológica e investimento robusto. Entre elas estão uso de hidrogênio verde e combustíveis sintéticos (como e metanol e amônia), gaseificação da biomassa como alternativa para substituir combustíveis fósseis no forno de cal, produção de biometano a partir de efluentes e resíduos, aplicação em larga escala de soluções baseadas na natureza, desenvolvimento de novos bioprodutos de maior valor (como lignina, bio óleo, viscosa/liocel, nanocelulose e químicos da madeira), integração lavoura-pecuária-floresta e tratamento avançado de emissões fugitivas, incluindo refrigerantes e SF₆. A captura e uso de carbono também surge como possibilidade para aplicações específicas.

Os principais desafios para implantar as ações de descarbonização elencados pelas empresas do setor de P&C foram:

— Econômicos e Regulatórios: o setor enfrenta barreiras, como a manutenção de incentivos aos combustíveis fósseis, ausência de incentivos fiscais e incertezas sobre o SBCE, o que desestimula investimentos em baixo carbono.

— Operacionais: destacam-se dificuldades na mensuração de emissões (escopo 3), limitações técnicas de fábricas antigas, oferta de biocombustíveis e longos prazos de implementação de projetos.

— Mercado de Renováveis e Logística: baixa disponibilidade de energia limpa e infraestrutura insuficiente para biocombustíveis elevam custos e dificultam a substituição de combustíveis fósseis.


— Tecnológicos e de Inovação: necessidade

de altos investimentos em P&D, riscos associados ao pioneirismo e tecnologias ainda imaturas, o que gera cautela nas decisões.

— Engajamento e Conhecimento: Falta de capacitação técnica, resistência interna, necessidade de mudança cultural e desigualdade na preparação de fornecedores para a transição de baixo carbono.

O potencial de mitigação do setor é elevado, pois se apoia em uma base renovável de matéria prima, florestas plantadas altamente produtivas, altas taxas de reciclagem (aparas de papel), emissões evitadas através de circularidade e logística eficiente, uso consolidado de biomassa e licor negro para geração de energia elétrica renovável, efeito de substituição proporcionado pelos bioprodutos que ocupam o lugar de materiais fósseis e participação em mercados voluntários de carbono. O engajamento setorial também se destaca, pois as empresas que representam 86% da produção nacional participaram da elaboração dessa estratégia de descarbonização.

Em comparação com outros setores industriais, como cimento, aço, química e transporte, o segmento de Papel & Celulose apresenta menor intensidade de carbono e maior maturidade tecnológica para descarbonização. Seu uso intensivo de energia renovável está muito acima da média nacional, e sua capacidade de remoção líquida de CO₂ o diferencia significativamente.

Em síntese, o setor de Papel & Celulose brasileiro apresenta elevado potencial de mitigação de emissões, apoiado em uma robusta estrutura florestal, ampla autossuficiência energética renovável e um conjunto diversificado de tecnologias emergentes. Trata-se de um setor que reúne condições únicas para liderar a descarbonização industrial do país e fortalecer a posição do Brasil na economia de baixo carbono. 

INTRODUÇÃO

A mudança climática é considerada uma questão desafiadora do nosso tempo e estamos em um momento crucial. O mundo hoje enfrenta desafios ambientais sem precedentes e interconectados. A principal meta global é manter o aumento da temperatura média global abaixo de 1,5°C em comparação com os níveis pré-industriais (1850-1900), pois ultrapassar esse limite aumentaria drasticamente os riscos de impactos climáticos severos e irreversíveis. Isso requer reduzir pela metade as emissões de gases de efeito estufa a cada década a partir de 2020 para atingir emissões líquidas zero até 2050 (Lei do Carbono).¹

Em 2024 a temperatura média global da Terra já excedeu os 1,5°C (WMO - *World Meteorological Organization*). As concentrações de CO₂ na atmosfera atingiram níveis recordes superiores a 420 ppm, muito superiores aos períodos pré-industriais (NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*). O consumo total de recursos naturais da humanidade equivale ao consumo de 1,75 planeta Terra (*Global Footprint Network*), o que potencializa o efeito das mudanças climáticas. Dos 9 limites planetários, 7 foram ultrapassados, o que aumenta o risco de gerar mudanças ambientais abruptas ou irreversíveis em grande escala (*Stockholm Resilience Centre*). Os pontos de inflexão da biosfera estão aproximando-se mais rapidamente do que previsto (*Global Tipping Points*).

Sem uma maior ambição com uma ação rápida e coordenada para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, os impactos das mudanças climáticas continuarão e se intensificarão. Nesse sentido, governos, instituições públicas e empresas privadas têm tomado medidas para acelerar a transição para uma sociedade mais sustentável e descarbonizada.

O Brasil tem sido pioneiro nas discussões da agenda climática com participação efetiva nas Conferências das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas, Protocolo de Quioto (1997) e Acordo de Paris (2015), bem como na promulgação da Política Nacional sobre Mudança do Clima (2009) e desenvolvimento de políticas públicas para o tema.

A elaboração dos planos setoriais de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas foi estabelecido pelo Decreto nº 7.390/2010, que regulamentou a Política Nacional sobre Mudança do Clima, e tem como principal objetivo integrar o Plano Nacional sobre Mudança do Clima que é parte integrante da estratégia brasileira de mitigação e adaptação à mudança do clima.

Ao longo da última década vários setores elaboraram seus planos de mitigação contando com a participação de representantes dos setores produtivos e da sociedade civil e entidades convidadas pelas coordenações setoriais dos Planos.

Atualmente o esforço brasileiro é expresso por meio de diversas iniciativas regulatórias e econômicas em construção ou implementação, tais como o Plano Clima (aprovado

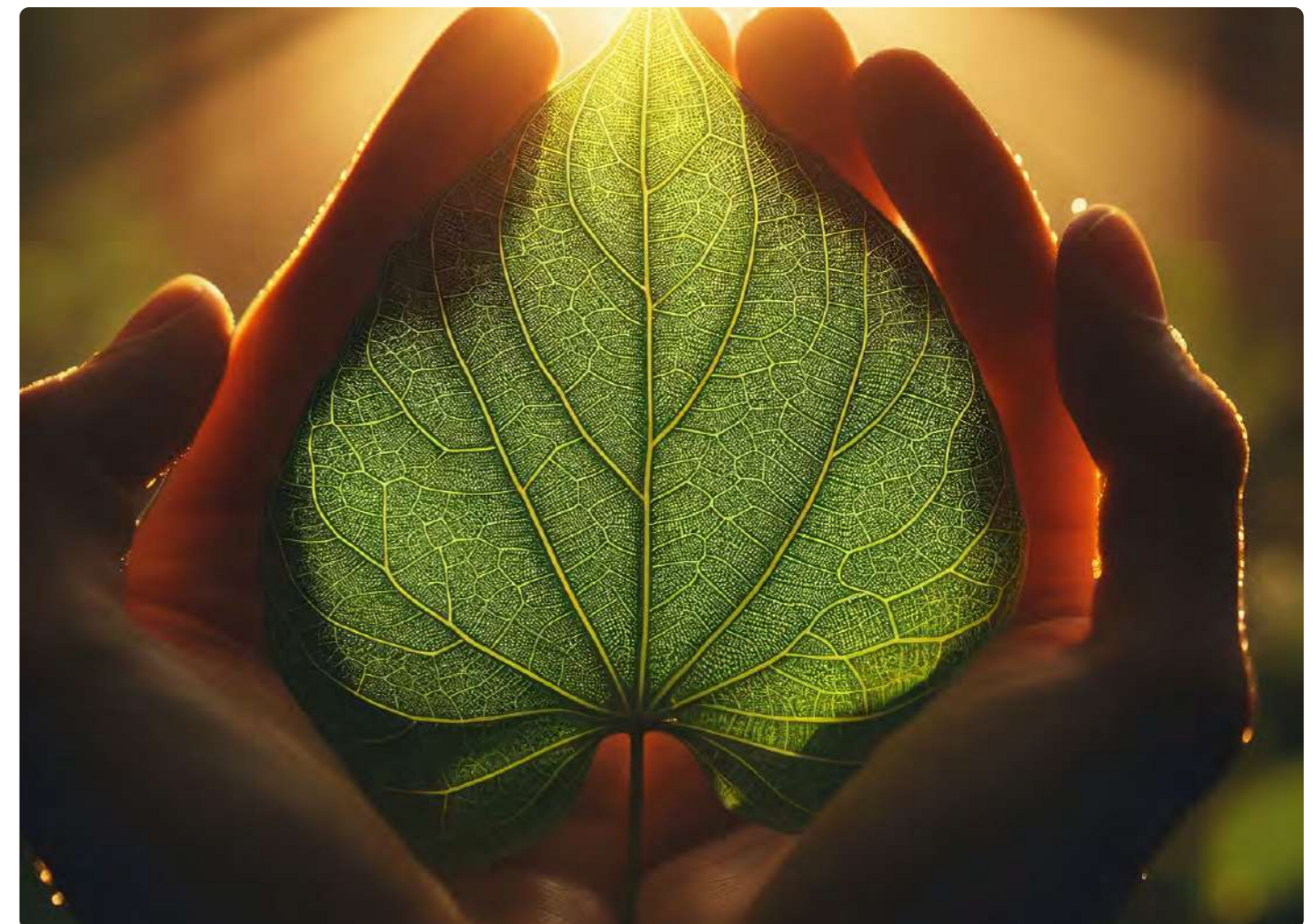
¹ A Lei do Carbono (*Carbon Law*, em inglês) é um conceito proposto para orientar a rápida descarbonização inspirado na Lei de Moore. A Lei do Carbono estabelece que as emissões de gases de efeito estufa (GEE) devem ser reduzidas pela metade a cada década e chegar perto de zero até meados do século para cumprir a meta do Acordo de Paris de limitar o aquecimento global a bem menos de 2 °C em relação aos níveis pré-industriais.

em Dez/2025), Estratégia Nacional de Descarbonização da Indústria (ENDI), Plano de Transformação Ecológica, Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBOE), Taxonomia Sustentável Brasileira, Combustível do Futuro, Fundo Amazônia, Fundos de Investimento Climático (CIF), entre outros.

O setor de Papel & Celulose desempenha um papel crucial na promoção da bioeconomia e o Brasil tem grande relevância neste setor, no qual é o maior exportador de celulose do mundo com produção recorde de 25,5 milhões de toneladas em 2024 e um dos principais produtores de papel com produção de 11,3 milhões de toneladas.

Esse setor é baseado em matéria-prima de origem vegetal, portanto, as emissões de CO₂ desse setor são predominantemente de origem não fóssil. No entanto, continuam a existir emissões fósseis que podem ser mitigadas para contribuir para o alcance dos objetivos climáticos.

De acordo com a IEA (2025), o setor de Papel & Celulose, em nível global, foi responsável por menos de 2% das emissões totais do setor industrial em 2022. Assim, teoricamente,



não teria um papel essencial na redução das emissões globais de GEE. No entanto, esse setor apresenta significativo potencial na contribuição da transição para uma economia de baixo carbono, a partir de:

- Remoções e estoque de carbono pelas árvores por meio da gestão sustentável das florestas;
- Emissões evitadas no processo produtivo, tanto pela reutilização de resíduos, e;
- Subprodutos (circularidade) quanto pela autossuficiência energética com o uso de fontes renováveis; e Efeito substituição de produtos intensivos em carbono por produtos renováveis.


Segundo a Ibá (2025a), o setor atua numa lógica integradora, sistêmica e circular, da árvore ao pós-uso do produto, gerando uma gama de benefícios climáticos. O setor planta, colhe e replanta árvores para fins industriais em 10,52 milhões de hectares, e conserva 7,01 milhões de hectares de nativas.

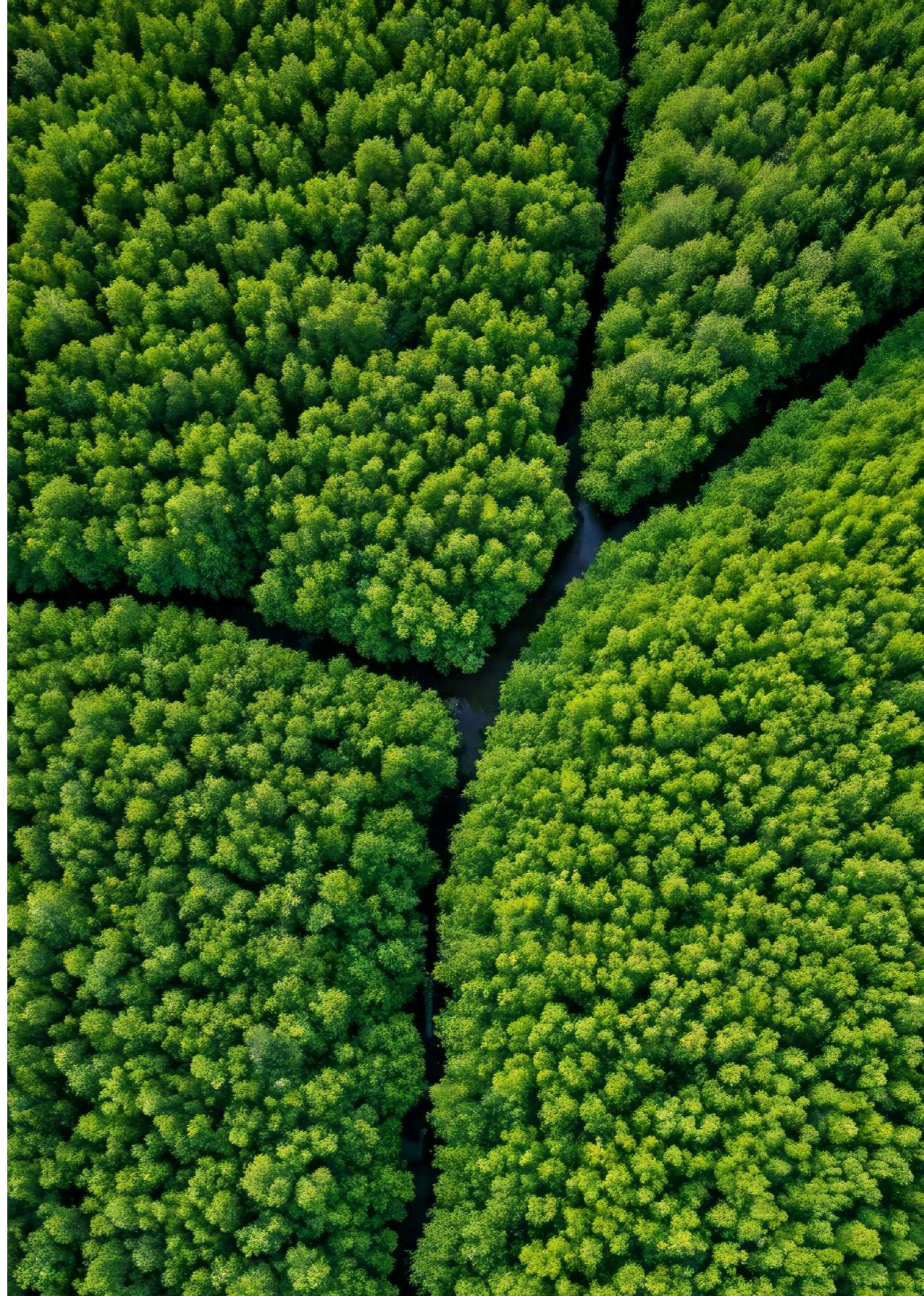
No contexto brasileiro, as florestas plantadas e nativas representam um dos mais relevantes mecanismos de captura e estocagem de carbono, configurando-se como Soluções Baseadas na Natureza (SbN). As florestas atuam como sumidouros ao remover dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera por meio da fotossíntese, e esse carbono é convertido em diversas formas biomassa, tais como troncos, galhos, folhas, raízes, serrapilheira, madeira morta e carbono orgânico no solo.

De acordo com a Ibá (2025), as florestas plantadas de uso produtivo no Brasil armazenam cerca de 1,99 bilhão de toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e). Já as áreas de florestas nativas conservadas pelas empresas do setor apresentam um estoque estimado em 3,10 bilhões de tCO₂e.

No mesmo sentido, a bioindústria tem um papel fundamental na transição para a utilização de matérias-primas renováveis e na atenuação das alterações climáticas, por meio da redução das emissões de GEE, produção sustentável, recuperação de ecossistemas, desenvolvimento de bioprodutos e incentivo a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias.

A indústria de Papel & é uma relevante produtora de biomassa e um dos pilares da construção da bioindústria. Além dos produtos principais, papel e celulose, o setor possui capacidade de gerar uma variedade de bioprodutos derivados da madeira, tais como energia renovável, terebintina, *tall oil*, gás de síntese usado como biocombustível, ácido sulfúrico a partir gases odoríferos, fertilizante e corretivo de acidez de solo a partir de resíduos gerados no processo produtivo, biometano, hidrogênio e e-metanol a partir de carbono biogênico das chaminés das caldeiras, produtos de lignina, bioprodutos a partir do licor verde, bio-óleo, entre outros.

Assim, no contexto das discussões climáticas, este documento contempla a Estratégia de Descarbonização do Setor de Papel & Celulose. 



2 OBJETIVO



A estratégia de descarbonização tem como principal objetivo impulsionar a mitigação das emissões de gases de efeito estufa na indústria do setor de Papel & Celulose, promovendo a transição para uma economia de baixo carbono, por meio de ações e recomendações de curto prazo (no horizonte de 2030-2035) e de longo prazo (no horizonte de 2050), incorporando preceitos com base na promoção de um desenvolvimento sustentável e de justiça climática.

Baseada num diagnóstico das empresas do setor sobre descarbonização, a estratégia foi estruturada em 4 eixos interconectados. Cada eixo aborda temas prioritários que poderão ser desenvolvidos e implementados pelas empresas em sua jornada de descarbonização até 2050.

3 ABRANGÊNCIA E PÚBLICO-ALVO



A estratégia de descarbonização abrange todas as empresas do setor de Papel & Celulose com atuação no Brasil, assim como toda a extensa cadeia de valor associada, reconhecendo seu potencial de contribuir para a jornada de descarbonização do setor até 2050.

4 PROCESSO DE ELABORAÇÃO (MÉTODO)



O processo de elaboração da Estratégia de Descarbonização do Setor de Papel & Celulose consistiu em 3 etapas, mostradas no fluxograma abaixo e detalhadas a seguir.

Figura 1 – Fluxograma do processo de elaboração da Estratégia de Descarbonização do Setor de Papel & Celulose.



4.1 Elaboração de um Panorama da Indústria de Papel & Celulose sobre Descarbonização

4.1.1 Projeção de Crescimento do Setor de Papel & Celulose: Análise do Panorama Global

A partir de informações da Ibá sobre novos investimentos previstos no setor, e de projetos recentes realizados na AFRY, foi realizada uma análise do panorama global do setor, incluindo uma avaliação nas tendências demográficas, geopolíticas, econômicas, ambientais e tecnológicas e seu impacto nos mercados globais de celulose; análise dos dados históricos de produção de celulose e papel no Brasil (no período de 2005 a 2024), e prognóstico de tendência de crescimento de produção no setor, de acordo com os novos projetos previstos e plantas recém instaladas (projeções para cada 5 anos até 2050).

4.1.2 Processos Produtivos e Principais Fontes de Emissão do Setor de Papel & Celulose

A partir do banco de dados da AFRY e pesquisa em literatura, foi realizada uma descrição sucinta dos principais processos e as principais fontes de emissão de GEE em cada um deles, considerando os escopos 1, 2 & 3. Para tanto, a cadeia de valor foi dividida em 4 grupos: florestal, industrial, logística e produtos.

4.1.3 Diagnóstico sobre Descarbonização no Setor

A coleta de informações para a realização do diagnóstico sobre de descarbonização se iniciou por uma extensiva coleta de informações públicas das empresas do setor de Papel & Celulose disponíveis em seus websites, relatórios integrados e de sustentabilidade.

Posteriormente, foi realizado um levantamento de percepção empresarial através de dois métodos de coleta de dados: *workshop* participativo setorial e aplicação de questionário estruturado e semiestruturado às empresas do setor atuantes no Brasil.

Para esta etapa foram selecionadas 28 empresas do setor de Papel & Celulose (figura abaixo), as quais foram convidadas a participar desta estratégia, sendo a seleção realizada em colaboração com a Ibá, por meio da indicação

de suas empresas associadas e respectivas pessoas chaves no assunto de descarbonização. A Ibá também buscou indicações de outras empresas associadas à Associação Brasileira de Embalagens em Papel (EMPAPEL), de modo a se obter uma amostra mais representativa do setor.

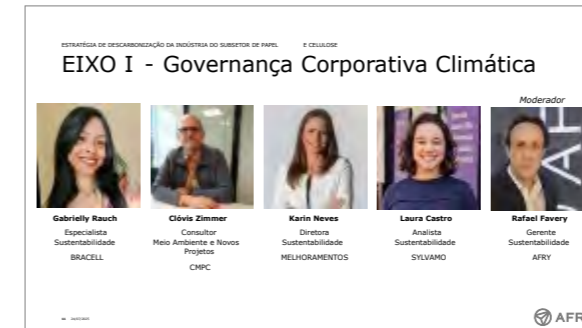
No dia 22 de Maio de 2025 foi realizada a reunião inicial online para divulgação do projeto da estratégia de descarbonização do setor de Papel & Celulose, a qual contou com a participação de profissionais de 18 empresas, bem como representantes do BID, MDIC, Ibá, ABTCP e representantes do corpo técnico da AFRY, somando a participação de 123 pessoas online.

O *workshop* participativo setorial promovido pela AFRY ocorreu no dia 16 de Junho de 2025 nas instalações da própria AFRY em São Paulo, o qual teve a participação de 12 empresas, totalizando 61 pessoas participantes, bem como representantes do BID, MDIC, Ibá, ABTCP e representantes do corpo técnico da AFRY.

A realização deste evento teve como foco principal ouvir das próprias empresas do setor como elas têm enfrentado as questões relacionadas aos temas dos 4 eixos estratégicos (alavancas prioritárias) previstos no mapeamento das ações potenciais de descarbonização.



Figura 2 - Empresas e instituições convidadas a participar da Estratégia de Descarbonização do Setor de Papel & Celulose



Eixo I - Governança Corporativa Climática



Eixo II - Soluções Técnicas de Descarbonização



Eixo III - Instrumentos Econômicos e Políticas Públicas



Eixo IV - Comunicação e Engajamento da Sociedade



Figura 3 - Registros fotográficos de cada painel temático.

O *workshop* foi dividido em 4 painéis, um para cada eixo estratégico: governança corporativa climática; soluções técnicas; instrumentos econômicos e políticas públicas; e engajamento da sociedade e da cadeia de valor.

Complementarmente ao *workshop*, foi enviado um questionário estruturado e semiestruturado às mesmas 28 empresas pré-selecionadas. No total os questionários foram preenchidos por 19 empresas, que representam os principais *players* do setor de Papel & Celulose, abrangendo 86% da produção de papel e celulose do Brasil.

4.1.4 Realização de um *Benchmarking*

A partir de informações disponibilizadas online em sites de associações setoriais, sites governamentais e em literatura, foi realizado um levantamento de dados do setor de Papel & Celulose referente a intensidade de emissões de GEE (tonelada de CO₂ equivalente por tonelada de produto) dos principais países produtores de papel e celulose, bem como sobre a existência de estratégias de descarbonização.

4.2 Mapeamento das Ações Potenciais de Descarbonização do Setor nos Eixos Estratégicos

Esta etapa compreendeu a elaboração de um mapeamento e descrição das ações potenciais de descarbonização aplicáveis ao setor, as quais foram divididas em 4 eixos estratégicos, que são interconectados, e apresentam os principais temas que poderão ser desenvolvidos e implementados pelas empresas em sua jornada de descarbonização até 2050. Os 4 eixos estratégicos são:

- EIXO I – Governança Corporativa Climática: ações para criação/reforço dos arranjos institucionais de governança corporativa climática.
- EIXO II – Soluções Técnicas (Alternativas de Descarbonização): apresentação e descrição das ações de cunho técnico voltadas à descarbonização dos processos e operações do setor.
- EIXO III – Instrumentos Econômicos e Políticas Públicas: potenciais ações do poder público para criar as condições necessárias

para que, juntamente com os compromissos e esforços do setor privado, seja criado um ambiente jurídico e regulatório adequado, assegurando equilíbrio fiscal, para viabilizar a execução e implementação das medidas de mitigação.

- EIXO IV – Comunicação e Engajamento da Sociedade e da Cadeia de Valor: ações de descarbonização voltadas para o estabelecimento de parcerias entre as empresas do setor, os seus fornecedores, a academia, os movimentos sociais e a sociedade civil.

4.3 Priorização e Proposição de Ações de Descarbonização de Curto e Longo Prazo

A etapa final da estratégia de descarbonização refere-se à avaliação das ações potenciais de descarbonização, sua priorização e recomendações quanto a sua implantação, considerando curto prazo (no horizonte de 2030-2035) ou longo prazo (no horizonte de 2050).

Para isso, foi utilizada a metodologia de priorização das ações de acordo com o valor gerado por cada uma (potencial de mitigação e geração de cobenefícios ambientais, econômicos, sociais, operacionais e de governança), e o nível de esforço envolvido para a sua implementação (nível de maturidade tecnológica, custos envolvidos e barreiras existentes, demanda por ações estruturantes e aplicabilidade).

A matriz resultante classifica as ações de descarbonização levantadas em:

- Ações de Curto Prazo: ações de baixo a médio esforço. Prazo recomendado para implementação das ações: até 2030-2035.
- Ações de Longo Prazo: ações que geram alto valor, mas demanda alto esforço. Prazo recomendado para implementação das ações: até 2050.
- Ações Não Priorizadas: ações de baixo a médio valor gerado com alto esforço envolvido, ou ações dependentes da estratégia da empresa sobre seu portfólio.




No total foram levantadas um total de 101 ações de mitigação possíveis para o setor de Papel & Celulose, sendo estas divididas em 61 impactantes e 40 estruturantes.

5 PANORAMA DA INDÚSTRIA DE PAPEL & CELULOSE



O setor de Papel & Celulose desempenha um papel relevante na economia brasileira e global, com destaque para sua contribuição na geração de empregos, exportações e desenvolvimento sustentável.

Diante dos desafios climáticos e da crescente demanda por práticas industriais mais responsáveis, este capítulo apresenta uma análise integrada sobre as perspectivas de crescimento do setor, seus processos produtivos e principais fontes de emissão de gases de efeito estufa (GEE), do estágio de implementação de ações de descarbonização e governança climática.

A man with a beard, wearing a blue button-down shirt, is shown from the chest up. He is interacting with a glowing digital interface. His right hand is touching a bar chart with five bars of increasing height. A white line graph with glowing points is overlaid on the bars, showing an upward trend. The background is dark with blue and white bokeh lights.

5.1 Projeção de Crescimento do Setor de Papel & Celulose

Esta projeção de crescimento foi baseada em dados públicos da Iá, tendências do Banco Mundial (2025), análise e expertise da AFRY no setor de Papel & Celulose.

As tendências demográficas, como a urbanização e o crescimento da classe média, impulsionam a demanda de celulose, enquanto a incerteza política prejudica o comércio global. As preocupações ambientais e as preferências do consumidor por materiais recicláveis estimulam o crescimento das indústrias de base florestal, como a de celulose.

Tendências Demográficas

Crescimento populacional, expansão da classe média e urbanização aumentam a demanda por celulose.

O aumento da urbanização e da classe média tem forte correlação com o aumento das taxas de renda, que, juntamente com o aumento da população, criam uma maior demanda de celulose para vários usos finais. O crescimento populacional por si só não leva necessariamente ao crescimento da demanda de celulose. É necessário que venha em conjunto com o crescimento do poder de compra da população.

A COMPETIÇÃO GLOBAL DESLOCOU O PODER ECONÔMICO PARA REGIÕES EMERGENTES; A SUSTENTABILIDADE DOS PRODUTOS CONTINUA SENDO CRITÉRIO ESSENCIAL ENTRE OS CONSUMIDORES.

Tendências Econômicas

Crescimento da economia mundial combinado com aumento da atividade fabril e do consumo em regiões emergentes.

A demanda por celulose e papel aumenta especialmente nas regiões onde cresce a industrialização e nos mercados emergentes. O aumento da atividade fabril e da riqueza em regiões emergentes se traduz em crescente demanda por embalagens e produtos de higiene.

Tendências Geopolíticas

As tensões e os incidentes geopolíticos entre grandes potências como os EUA, Rússia, Oriente Médio e China, juntamente com os conflitos regionais, podem aumentar o risco.

A intensificação da competição por influência está alimentando tensões geopolíticas e criando um ambiente operacional mais volátil e imprevisível para a indústria de celulose. Mudanças inesperadas, especialmente as decisões do EUA, China e comunidade Europeia, podem rapidamente afetar os estoques globais de celulose.

Tendências do Consumidor

Mudanças nos hábitos de consumo tais como o aumento da consciência ambiental, criam demanda por celulose.

A demanda por embalagens à base de celulose está aumentando. Os serviços de comércio eletrônico e de entrega de alimentos criam uma demanda por novas soluções de embalagem. Apesar da crescente conscientização ambiental, a tendência de consumo excessivo continua.

Tendências Ambientais

As mudanças climáticas estão se tornando mais evidentes, com eventos climáticos extremos ocorrendo com mais frequência.

A demanda por soluções renováveis e recicláveis, incluindo embalagens à base de fibras, está aumentando, impulsionada pela crescente conscientização ambiental. É necessário um maior nível de transparência por parte das empresas.

O AUMENTO DA CONSCIENTIZAÇÃO AMBIENTAL E O DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA INCENTIVAM A MUDANÇA DOS PLÁSTICOS PARA MATERIAIS À BASE DE CELULOSE.

Tendências Tecnológicas

A digitalização reduz a necessidade de impressão, possibilita acelerar a produção e ao mesmo tempo melhora a qualidade.

A digitalização pressiona a mídia/ produtos impressos, o que pode ser observado no declínio do consumo dos papéis de Imprimir e Escrever. Simultaneamente, a digitalização possibilita acelerar a produção e melhorar a qualidade. Inovações em barreiras continuarão a serem estudadas e desenvolvidas.

Impacto nos Mercados Globais de Celulose



O Banco Mundial projeta um crescimento global de 2,3% em 2025, inferior ao crescimento de 2,8% em 2024, e estima que inicie a reversão do ciclo em 2026, prevendo leve alta do crescimento do PIB de 2,4% em 2026 e 2,6% em 2027. A perspectiva é que a inflação caia lentamente e que a pressão inflacionária seja dominada fazendo com que os preços das commodities permaneçam mais estáveis a partir de 2026, porém ainda em níveis acima da média histórica.

A intensificação de conflitos armados, a fragmentação econômica, eventos climáticos extremos e crises políticas que causem redução do comércio internacional podem alterar o cenário projetado pela instituição. O crescimento esperado é principalmente nos países emergentes que apresentam aumento populacional e da classe média.

Com o aumento da renda das famílias, a classe média deixa de focar nos itens de subsistência e passa a ter novas aspirações, tais como viajar de avião, alimentação fora de casa, bens de marcas reconhecidas e consumir produtos e serviços mais sofisticados, o que implica em melhoria nos hábitos de higiene e saúde e embalagens mais complexas.

5.1.1 Panorama Global do Setor

A indústria de celulose teve investimentos significativos na última década, impulsionada

principalmente pelo crescimento constante dos mercados globais de papel *tissue* e papel para embalagens.

Alguns padrões de consumo do pós-pandemia se consolidaram no Brasil e no mundo. A indústria global de celulose continua correspondendo aos incentivos gerados pela sólida demanda por *tissue*, embalagens de papel e corrugados. O *e-commerce* consolidou-se como canal de vendas e continua sendo um importante *driver* para o setor. Essa tendência incentivou decisões de investimentos, adaptações produtivas e inovações para melhorar a experiência de um consumidor cada vez mais exigente. A demanda global de papéis de imprimir e escrever, contudo, segue em queda, em linha com a crescente digitalização em diversos segmentos.

Para o longo prazo, há movimentos de mercado que sugerem um crescimento sustentado do setor: a importância da sustentabilidade e sua associação à urgência climática; o crescimento demográfico global positivo; mudanças no hábito dos consumidores e o surgimento de novas tecnologias. O mercado global de celulose seguirá em expansão, alimentado pelo crescente uso de fibra virgem de madeira em papéis *tissue* e produtos para a higiene. A indústria de fibras têxteis deverá impulsionar o mercado de celulose solúvel.

No período de 2023 a 2024, incluindo o

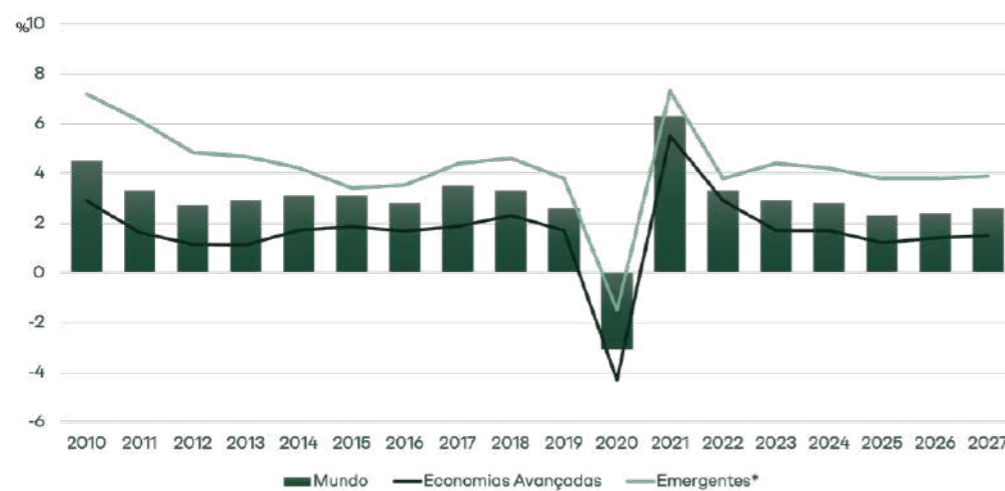


Figura 4 – Contribuições para o Crescimento Global (2010 - 2027e). Fonte: Banco Mundial (2025). *Emergentes = Mercados Emergentes e Economias em Desenvolvimento (inclui China e Índia)

primeiro semestre de 2025, a indústria global de celulose precisou promover ajustes frente à desaceleração da demanda, excesso de oferta, pressão persistente nos custos e elevação das incertezas.

Entretanto, o consumo global de fibras para fabricação de papel deve continuar a crescer nos próximos anos. Essas previsões são baseadas nas projeções mais recentes que consideram o crescimento das populações e do consumo per capita dos países em desenvolvimento (Banco Mundial, 2025).

Nos últimos anos foi possível acompanhar o crescimento do consumo da celulose Kraft branqueada de fibras curtas (BHKP, em inglês), principalmente de eucalipto para a produção dos papéis para embalagens (cartão e ondulado) e nos papéis *tissue*.

Após a pandemia e em meio às adversidades econômicas e políticas os produtores de papel têm buscado por alternativas mais baratas de fibra, estimulando a substituição do consumo da celulose Kraft branqueada de fibra longa (BSKP, em inglês) pela celulose Kraft branqueada de fibra curta (BHKP), mesmo na formulação de papéis que tradicionalmente utilizavam somente celulose Kraft branqueada de fibra longa (BSKP).

Em decorrência da restrição da China à importação das aparas de papel e da busca por fibras mais baratas, ocorreram fortes investimentos em novas capacidades e consequente substituição no tipo de fibra utilizada para produção de papel. Ocorreram grandes investimentos na produção integrada de pasta química de madeira na China e aumento no consumo chinês de celulose Kraft branqueada de fibra curta (BHKP) de mercado.

O crescimento do setor deverá ocorrer principalmente no consumo das celuloses de fibra curta (BHKP).

5.1.2 Panorama do Mercado Brasileiro

A Ibrá identificou no final de 2024 investimentos de aproximadamente R\$ 105 bilhões no período entre 2024 e 2028 no Brasil (Ibrá, 2024).

Em 2024, a Suzano iniciou a operação de

sua nova fábrica de celulose no município de Ribas do Rio Pardo/MS e a Klabin iniciou a operação de sua nova fábrica de embalagens de papelão ondulado em Piracicaba/SP. Em 2025, a Bracell inaugurou sua nova fábrica de papel *tissue* em Lençóis Paulista/SP, a Trombini concluiu a ampliação e modernização de sua unidade industrial de papelão ondulado em Fraiburgo/SC e a Melhoramentos inaugurou sua nova fábrica de embalagens sustentáveis, denominada Biona, em Camanducaia/MG.

A Arauco está em implantação de sua nova fábrica de celulose no município de Inocência/MS, enquanto CMPC em Barra do Ribeiro/RS e Bracell em Bataguassu/MS estão fase de desenvolvendo de seus projetos de novas fábricas de celulose. Ainda há a expectativa de implantação da segunda linha de celulose da Eldorado Brasil em Três Lagoas/MS, projeto que já possui licença ambiental de instalação.

Assim, o setor tem uma ampla perspectiva de novos investimentos no Brasil para os próximos anos, seja para novos empreendimentos, ou para ampliações e modernizações dos empreendimentos existentes.

5.1.3 Projeções de Crescimento

5.1.3.1 Celulose

A produção brasileira de celulose foi de 25 milhões de toneladas em 2024, sendo que 87% do volume produzido foi de celulose Kraft branqueada de fibra curta (BHKP) e 1% de celulose Kraft não branqueada de fibra curta (UBHKP, em inglês).

Do volume produzido, 10% foram de celulose Kraft branqueada de fibra longa (BSKP) e celulose Kraft não branqueada de fibra longa (UBSKP) e 2% foi de pastas de alto rendimento que são em parte feitas com eucalipto e parte com pinus.

As celuloses de pinus (BSKP e UBSKP) e as pastas mecânicas são em sua maioria consumidas pela própria empresa produtora ou vendidas no mercado brasileiro, enquanto as celuloses de eucalipto (BHKP) são muito competitivas no mercado internacional e além de atenderem o mercado nacional, são produzidas principalmente para a exportação.

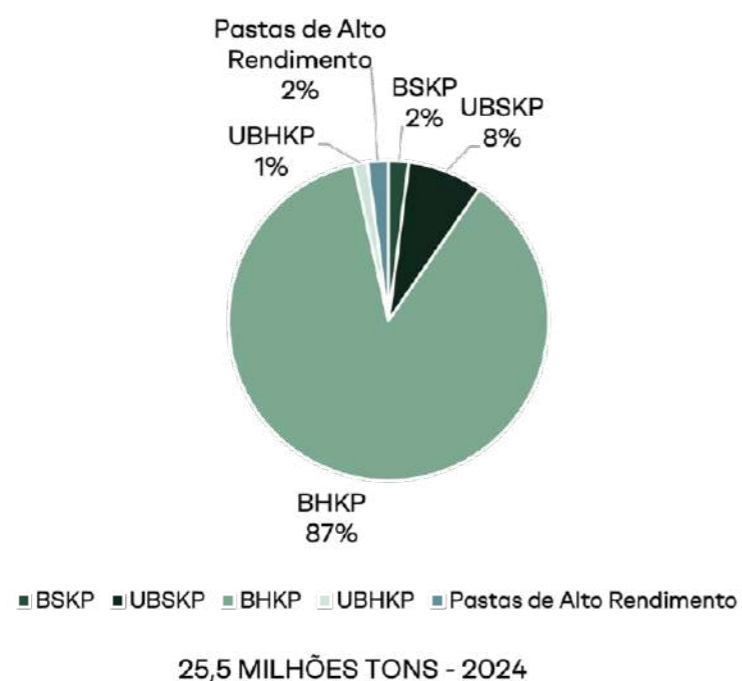


Figura 5 - Produção Brasileira de Celulose Por tipo. Fonte: AFRY. * Inclui Pasta mecânica, não inclui Fluff e Celulose Solúvel

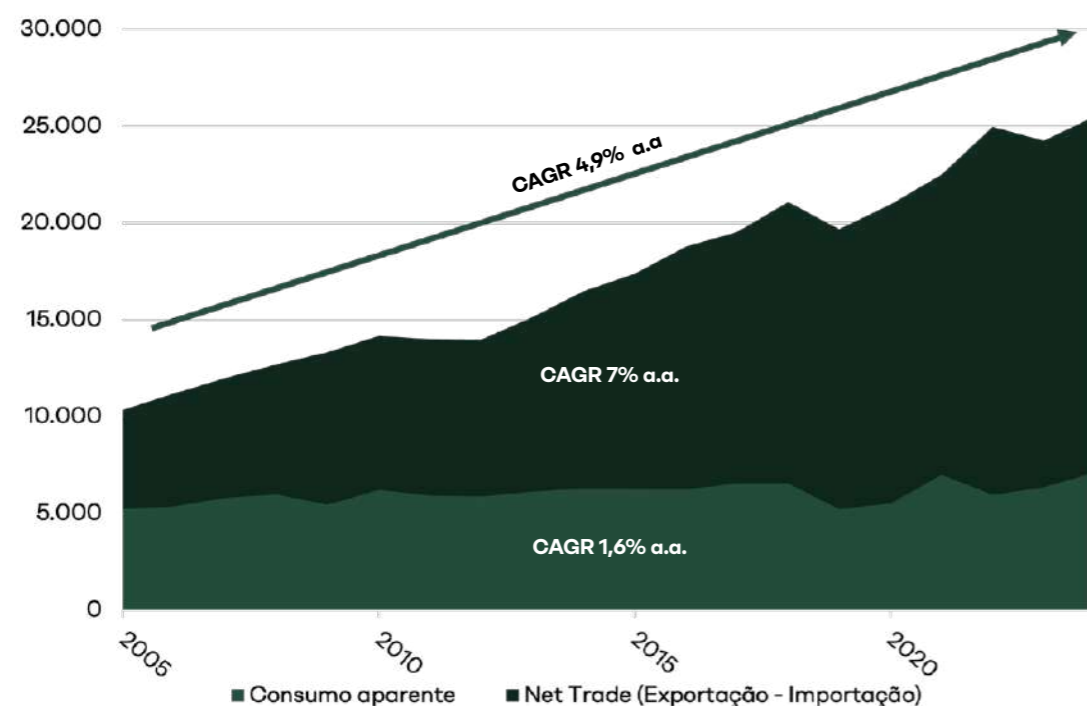


Figura 6 - Taxa de crescimento da produção brasileira de celulose por destino. Fonte: AFRY. * Inclui Pasta mecânica, não inclui Fluff e Celulose Solúvel

Considerando o crescimento do consumo aparente no Brasil, o baixo volume de importações e as exportações crescentes, a produção brasileira cresceu no período de 2005 a 2023 a uma taxa de 4,9% ao ano

O consumo aparente de celulose no Brasil, no período de 2005 a 2023 cresceu a uma taxa de 1,6% ao ano e no mesmo período o superavit da balança comercial (exportação - importação) brasileiro de celulose cresceu a uma taxa de 7% ao ano. O tipo de celulose exportado é em sua maioria a celulose BHKP.

Na figura 6 é apresentada a taxa de crescimento anual composta (CAGR, em inglês) da produção brasileira de celulose.

A demanda global de BHKP de mercado foi de 43 milhões de toneladas em 2024. Os principais direcionadores do crescimento da demanda são o aumento do uso deste tipo de celulose no setor de papéis *tissue*, a redução da disponibilidade de aparas de papel branco e o crescimento do uso de celulose de fibra curta em tipos de papéis para embalagens que tradicionalmente eram produzidos somente a partir de fibra longa.

A estimativa é que no período de 2024 a 2035 a demanda por BHKP de mercado deverá crescer globalmente a uma taxa de 2,7% ao ano, ocorrendo principalmente na Ásia e na América do Norte.

Atualmente a América Latina e os demais países da Ásia diferentes da China são as regiões com maior excedente de exportação de BHKP e a maior parte deste volume é importado pela China, Europa e América do Norte.

Os produtores latino-americanos lideram o fornecimento global com 65% de participação na capacidade de BHKP de mercado. O Brasil é o principal produtor deste tipo de celulose, correspondendo a 47% da capacidade. Atualmente o Brasil possui as maiores e mais modernas fábricas de celulose BHKP.

A capacidade de BHKP de mercado deverá continuar a crescer principalmente na América Latina e neste mesmo período a disponibilidade de celulose de BHKP de mercado na China deverá diminuir, devido à expansão da

produção integrada, aumentando ainda mais a importância do Brasil como fornecedor global.

A estimativa é que a oferta de BHKP de mercado cresça 10 milhões de toneladas na América Latina nos próximos 10 anos, o que corresponde ao crescimento equivalente a 1 milhão de toneladas adicionais por ano. Os novos projetos deverão ocorrer principalmente no Brasil que deve ser responsável por aproximadamente 70% destes novos volumes, correspondendo a um acréscimo médio anual estimado de aproximadamente 0,7 milhão de toneladas.

A produção brasileira de celulose cresceu nos últimos 20 anos a uma taxa de 4,9% ao ano e estima-se que continuará a crescer nas próximas décadas, mas a taxas menores.

A estimativa é que na próxima década ainda permaneça o movimento com crescimento da população mundial e o aumento da renda média da população, impulsionando o consumo mundial de celulose. Estima-se um crescimento do superavit na balança comercial (net trade) a taxas de 3% ao ano até 2035 e de 2% ao ano de 2035 a 2050. O Consumo aparente deve crescer entre 2024 e 2035 a uma taxa de 1,7% ao ano e de 2035 a 2050 a uma taxa de 1,2% ao ano.

5.1.3.2 Papel

A produção total de papéis no Brasil em 2024 foi de 11,3 milhões de toneladas. Desse total, os papéis para Embalagens representam o principal tipo de papel produzido no país, com cerca de 57% do total. Na sequência temos os papéis para Imprimir e Escrever, com cerca de 19% do total (vide figura 8).

A produção brasileira de papéis cresceu nos últimos 20 anos a uma taxa de 1,6% ao ano, em linha com o crescimento de 1,6% do consumo aparente e a produção de papéis para exportação cresceu a uma taxa de 1,9% ao ano. Esta baixa taxa de crescimento decorre principalmente devido à digitalização que reduziu o consumo dos papéis de imprimir e escrever e papel jornal.

Em contrapartida, houve um crescimento dos papéis de embalagem, papel cartão e papéis *tissue*.

Estima-se que o consumo aparente de papéis continue a crescer na próxima década a taxas semelhantes às atuais, com destaque para o segmento de papéis *tissue* que deverá ocorrer através da produção integrada com celulose em substituição às plantas mais antigas e ineficientes.

O maior crescimento é esperado nos projetos para papéis para embalagens para exportação.

Na figura 9 é apresentada a taxa de crescimento anual composta (CAGR, em inglês) da produção brasileira de papel.

Conforme apresentado na figura 10 a seguir, a estimativa é que a produção brasileira de papel cresça 2 milhões de toneladas nos próximos 10 anos, o que corresponde ao crescimento equivalente de 0,2 milhão de tonelada adicional por ano.

A estimativa é que na próxima década permaneça o crescimento da população brasileira e o aumento da renda média da população, impulsionando o consumo brasileiro de papel. Estima-se o crescimento do superavit com o exterior (net trade) a taxas de 1,9% ao ano até 2035 e de 1,4% ao ano de 2035 a 2050.

O Consumo aparente deve crescer entre 2024 e 2035 a uma taxa de 1,6% ao ano e de 2035 a 2050 a uma taxa de 1,1% ao ano.

Entre 2035 e 2050 os estudos do IBGE indicam que a população brasileira cresça a taxas menores e os ganhos de renda da população ocorram de forma menos acentuada, estimando-se para este período um crescimento de 1,1% ao ano.

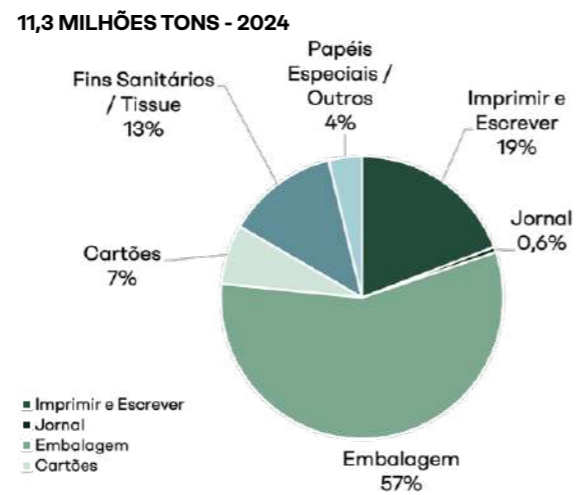


Figura 8 - Produção Brasileira de Papel segundo o Tipo (2024). Fonte: AFRY.

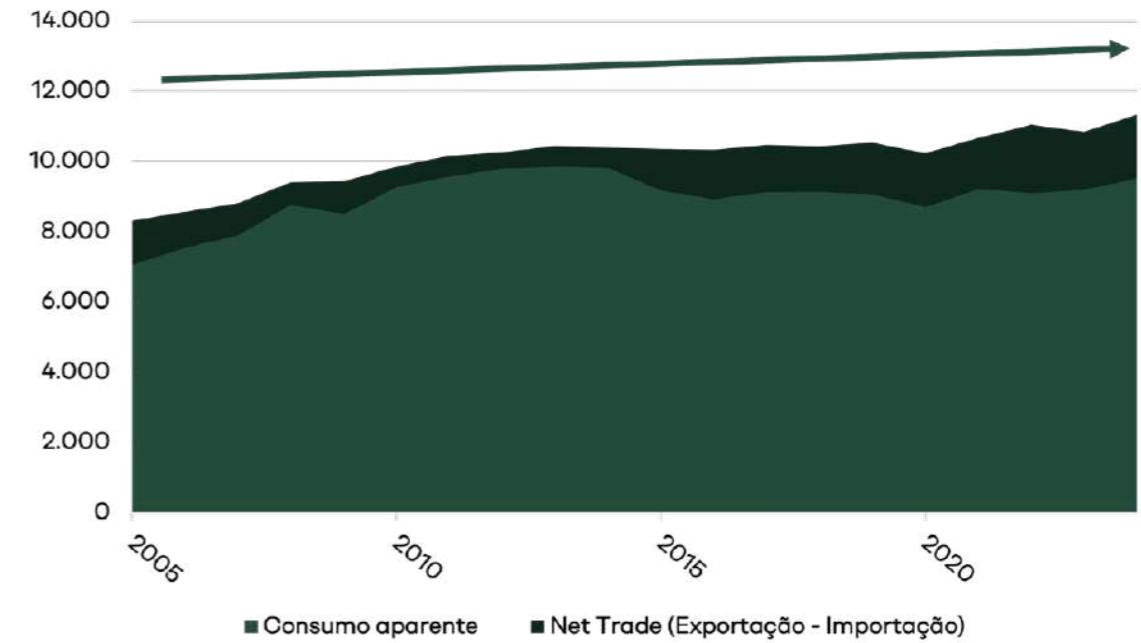


Figura 9 - Taxa de crescimento da produção brasileira de papel por destino (2005 - 2024). Fonte: AFRY.

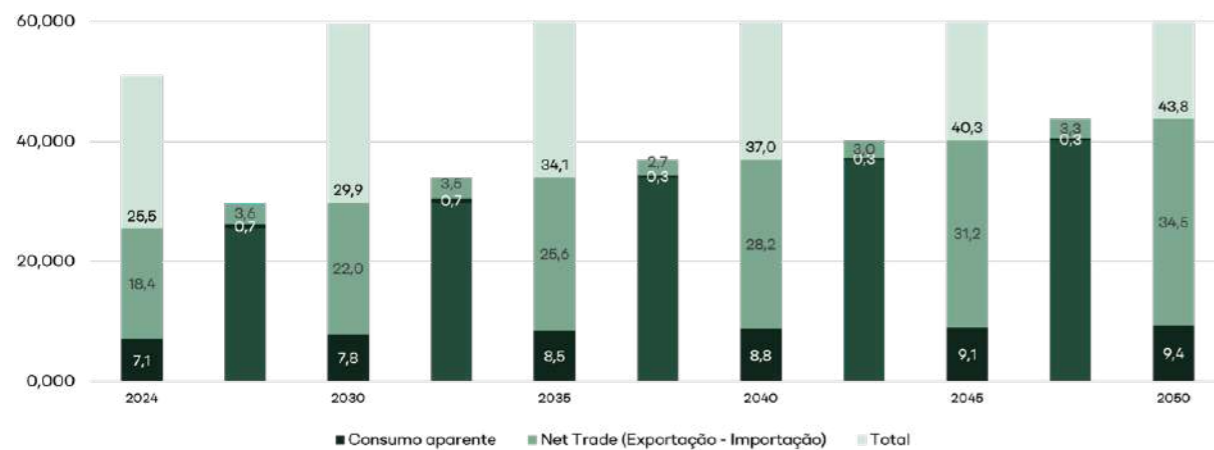


Figura 7 - Estimativa da Produção Brasileira de Celulose. Fonte: AFRY. * Inclui Pasta mecânica, não inclui Fluff e Celulose Solúvel

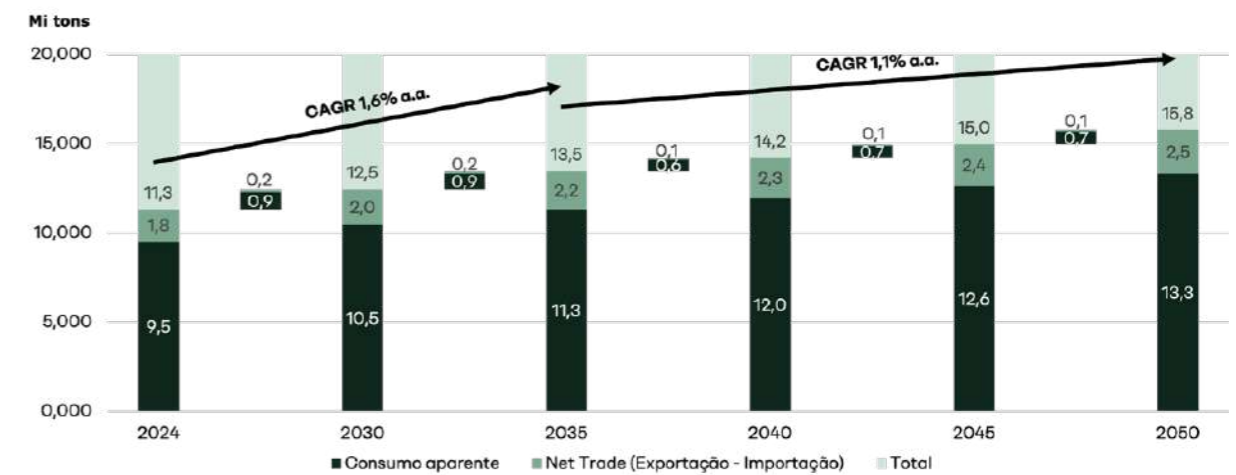


Figura 10 - Estimativa da Produção Brasileira de Papel (2024 - 2050). Fonte: AFRY.



5.2 Processos Produtivos e Principais Fontes de Emissão de GEE

O setor de Papel & Celulose apresenta uma extensa cadeia de valor que compreende uma gama de diferentes processos. Como este setor é baseado em matéria-prima de origem vegetal, existe um potencial significativo na transição para uma economia de baixo carbono, a partir de:

- Remoções e estoque de carbono pelas árvores por meio da gestão sustentável das florestas
- Emissões evitadas no processo produtivo, pela reutilização de resíduos e subprodutos e autossuficiência energética com o uso de fontes renováveis
- Efeito substituição de produtos intensivos em carbono por produtos renováveis

No entanto, as emissões fósseis ainda estão presentes, o que demanda ações para sua mitigação. Desta forma, neste capítulo são descritos os processos e as principais fontes de emissão de GEE em cada um, considerando os escopos 1, 2 & 3. Para tanto, a cadeia de valor foi dividida em 4 grupos:

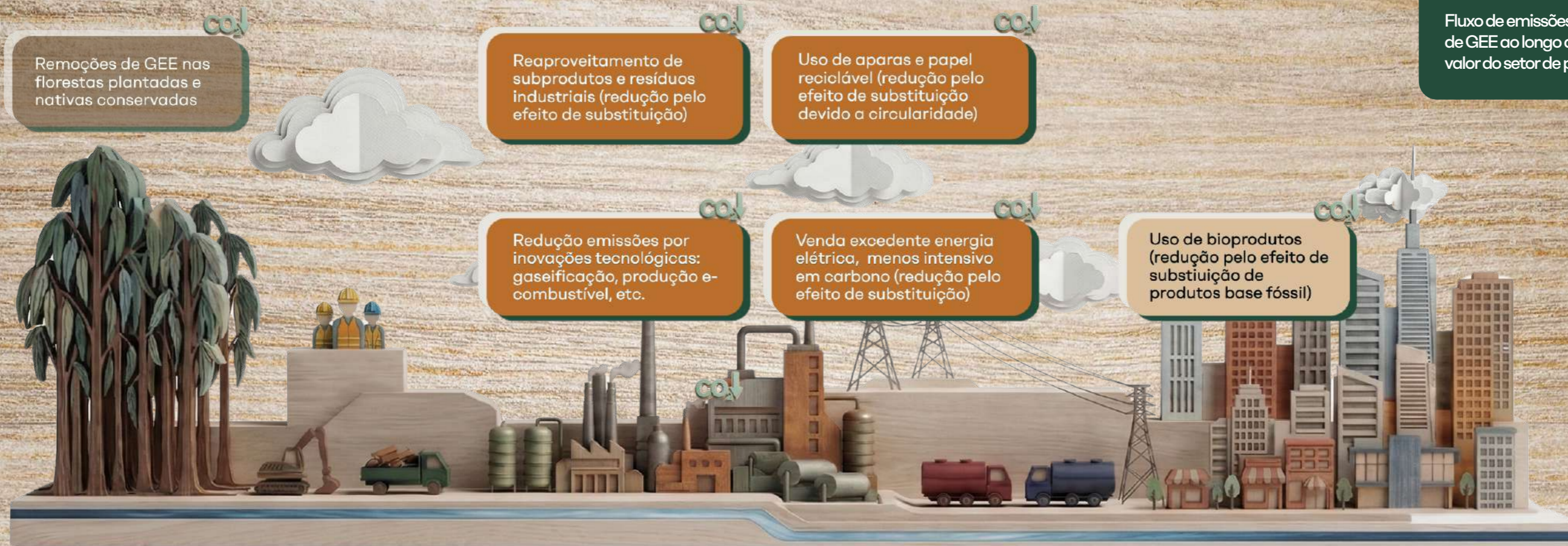
- Florestal;
- Industrial;
- Logística; e
- Produtos.

No caso do escopo 3, são 15 categorias de emissões indiretas (*upstream* e *downstream*). Para algumas categorias não faz sentido o reporte por etapa de processo, uma vez que estão relacionadas ao empreendimento e não a uma etapa de processo específica, como por exemplo, viagens a negócio, deslocamento de funcionários, entre outros. Desta forma, as emissões de escopo 3 citadas neste capítulo referem-se somente as emissões provenientes da produção e transporte de matérias-primas e insumos de cada etapa de processo. Vide figura 11.



Figura 11

Fluxo de emissões e remoções de GEE ao longo da cadeia de valor do setor de papel e celulose



OPERAÇÃO FLORESTAL

CO₂
Emissões Mecanizadas (maquinários e veículos) e Emissões não mecanizadas (Uso de fertilizantes, mudança de uso do solo, áreas queimadas)

LOGÍSTICA À MONTANTE

CO₂
Emissões da logística a montante

OPERAÇÃO INDUSTRIAL

CO₂
Combustão estacionária e móvel, tratamento de resíduos e efluentes, processos industriais, emissões fugitivas, mudança de uso do solo

LOGÍSTICA À JUSANTE

CO₂
Emissões da logística a jusante

USO E TRATAMENTO PRODUTO FINAL

CO₂
Emissões no uso e descarte de bioprodutos

CO₂
Emissões do transporte casa-trabalho

CO₂
Emissões na fabricação de matérias-primas por terceiros

CO₂
Compra energia SIN

CO₂
Emissões do transporte casa-trabalho, de viagens a negócios

CO₂
Emissões na fabricação de matérias primas por terceiros

LEGENDA

CO₂ Emissões de CO₂ equivalente fósseis ou biogênicos

CO₂ Reduções/ remoções de CO₂ equivalente.

5.2.1 Florestal

No Brasil, as florestas plantadas e nativas desempenham papel fundamental na captura e estocagem de carbono, funcionando como sumidouros ao remover CO₂ da atmosfera pela fotossíntese e armazená-lo em diferentes compartimentos, como biomassa aérea, raízes, serrapilheira, madeira morta e solo. Em florestas manejadas, o ciclo de colheita seguido de plantio ou rebrota mantém esse processo continuamente, criando um sumidouro dinâmico e renovável, cujo estoque de carbono tende a aumentar conforme a área plantada ou a produtividade cresce. Além disso, o setor florestal brasileiro prioriza o uso de áreas previamente degradadas, evitando desmatamento de vegetação nativa.

As etapas das operações florestais e suas respectivas emissões são ilustradas no fluxograma mostrado na figura 12 e detalhadas a seguir.



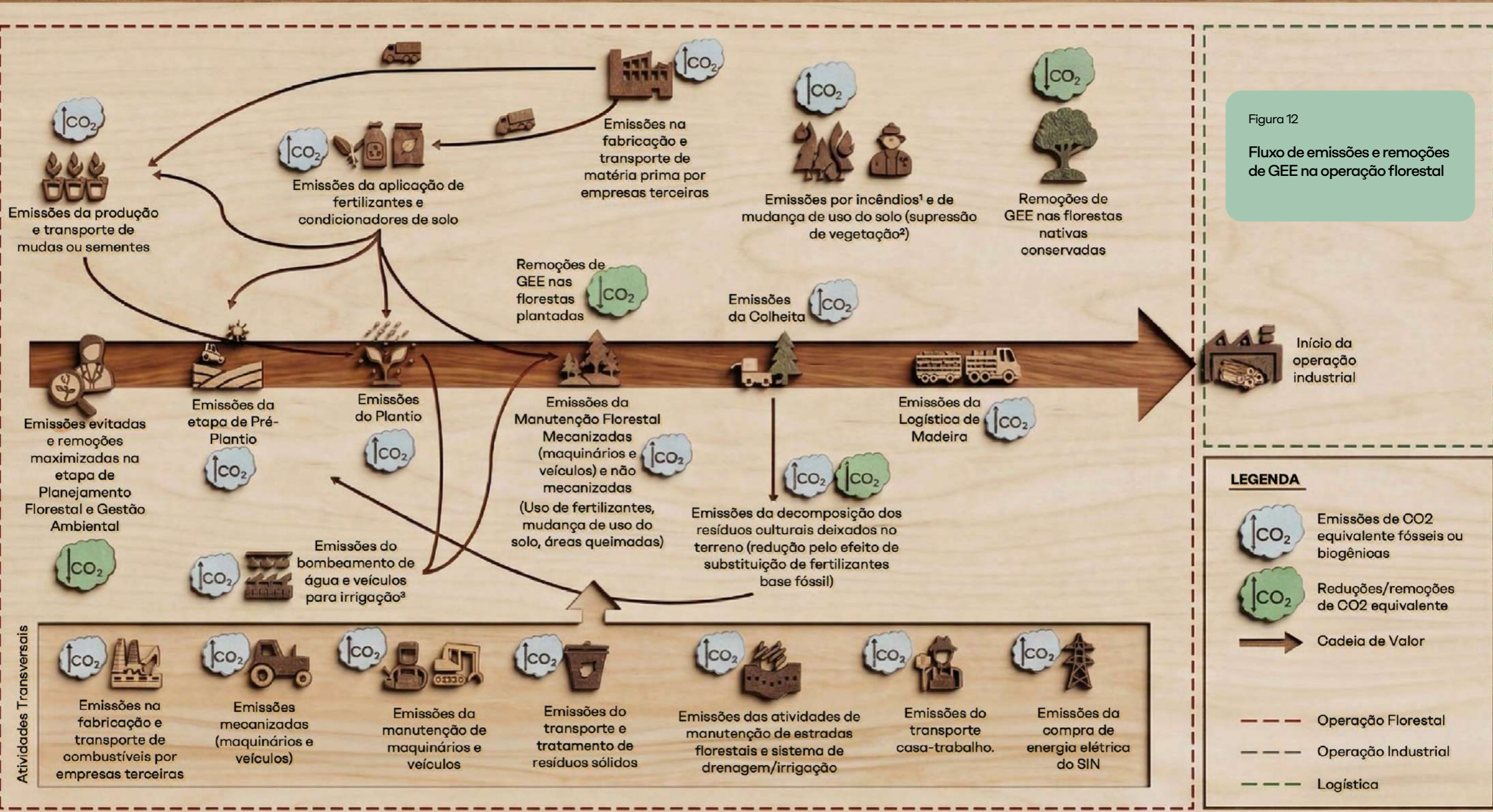


Figura 12
Fluxo de emissões e remoções de GEE na operação florestal



Planejamento Florestal à Colheita da Madeira

O planejamento florestal é essencial para a silvicultura, funcionando como um guia desde a escolha da área até a colheita e transporte da madeira, contemplando as seguintes atividades:

- Organização das etapas: preparo do solo, plantio, manutenção, colheita e transporte.
- Monitoramento e controle: inventário florestal, qualidade e sustentabilidade.
- Conservação ambiental: mapeamento de áreas protegidas conforme legislação e impactos ambientais.
- Infraestrutura: planejamento de estradas internas para minimizar impactos e facilitar o escoamento.
- Inventário florestal: estimativa periódica da quantidade de madeira e crescimento das árvores para definir o melhor momento da colheita.

A produção florestal começa nos viveiros, onde mudas clonais são cultivadas sob controle rigoroso de temperatura, umidade e luz. Esses ambientes asseguram mudas de rápido crescimento, resistência a pragas e boa qualidade de madeira.

No pré-plantio, realizam-se ações para preparar o terreno: limpeza da área, calagem, preparo do solo (subsolagem e adubação), trituração de resíduos de colheita e armazenamento adequado das mudas até o plantio.

O plantio pode ser manual ou semimecanizado, sendo o eucalipto responsável por cerca de 77% das áreas e o pinus por 18%. A manutenção florestal inclui controle de pragas, plantas invasoras e adubações ao longo do ciclo.

A colheita ocorre entre 5 e 7 anos para eucalipto e 8 a 21 anos para pinus, predominantemente mecanizada, com manejo da biomassa residual visando conservação do solo e/ou geração de energia.

Principais emissões de GEE

Escopo 1: As emissões de gases de efeito estufa relacionadas à estas etapas correspondem principalmente a combustão móvel pelo uso de maquinários e veículos (se movidos à combustível fóssil), variação de estoques de carbono em atividades agrícolas (plantio e colheita), aplicação de condicionadores de solo (gesso, calcário, fertilizantes sintéticos ou orgânicos), uso de insumos agrícolas, tratamento do efluente líquido do viveiro, e outras com menor impacto.

A operação de maquinários e veículos agrícolas representam significativa emissão de GEE de escopo 1 nesta etapa (se terceirizado, é escopo 3).

Ocorrência de emissões fugitivas de gases refrigerantes de veículos e equipamentos agrícolas ou em escritórios dos operadores florestais que devem ser contabilizados nos inventários da operação florestal

A aplicação de condicionadores de solo tais como calcário e fertilizantes desempenha papel importante na melhoria da produtividade agrícola, mas também está relacionada à emissão GEE. Na reação química da calagem no solo, por exemplo, parte do carbonato (CaCO_3 ou MgCO_3) reage e libera CO_2 para a atmosfera.

Fertilizantes nitrogenados (ureia, nitrato de amônio, etc.), por sua vez, são as maiores fontes de emissão de N_2O , um gás com elevado potencial de aquecimento global. Na maioria dos solos, um aumento de nitrogênio disponível aumenta as taxas dos processos de nitrificação e desnitrificação, o que aumenta a produção de N_2O .

Escopo 2: Emissões indiretas relacionadas ao consumo de energia elétrica de bases de apoio da equipe operacional, iluminação artificial e climatização de estufas no viveiro, assim como para recarga de veículos e equipamentos, caso sejam elétricos (se terceirizado é escopo 3).

Escopo 3: Emissões indiretas relacionadas à produção e transporte de mudas até o local de plantio, de insumos agrícolas, de resíduos de poda e embalagens, de combustível até os

pontos de abastecimento dos maquinários e veículos agrícolas.

Fatores que impactam nas emissões

Os fatores que podem impactar as emissões de GEE nesta etapa estão relacionados principalmente aos tipos de maquinários e veículos agrícolas utilizados e sua eficiência, ou seja, quanto mais modernos menores são as emissões de GEE, bem como o tipo de combustível utilizado e a eficiência operacional.

O planejamento florestal influencia diretamente as emissões e reduções de gases de efeito estufa (GEE). Decisões como escolher áreas próximas à fábrica, priorizar regiões mais produtivas, optar por terrenos com topografia favorável e utilizar sistemas integrados de produção ajudam a reduzir transporte, insumos e consumo de combustível. A manutenção de áreas de preservação e a localização estratégica de viveiros também contribuem para diminuir emissões.

A realização periódica de inventários florestais é essencial para monitorar o balanço entre remoções e emissões de carbono ao longo dos anos. O melhoramento genético das mudas aumenta produtividade e resistência, reduzindo emissões indiretas associadas às operações.

Aspectos operacionais, como o local de descascamento das árvores (campo ou fábrica), devem ser avaliados, pois influenciam o cálculo das emissões. O uso de condicionadores de solo com baixa ou zero emissão, como fertilizantes feitos a partir de amônia verde, contribui para reduzir GEE. Cabe destacar que a emissão de N_2O , continuam ser relevantes mesmo na amônia verde.

A digitalização das operações — incluindo monitoramento online, telemetria e sensoriamento remoto, melhora a eficiência e reduz emissões. Por fim, a manutenção adequada de máquinas e o manejo correto de gases refrigerantes são fundamentais devido ao alto potencial de aquecimento global desses compostos.

Manutenção de Maquinários e Veículos e Infraestruturas Locais

Grande parte das atividades da operação florestal é mecanizada, executada por máquinas florestais e agrícolas. Além disso, para viabilizar o desenvolvimento das atividades florestais são utilizadas estradas municipais ou internas dentro das áreas de plantio, bem como implantação de aceiros e drenagem de água pluvial. Ainda, em épocas secas, usa-se caminhão pipa ou trator com pipa para a manutenção da umidade no leito das estradas.

Todo equipamento mecânico requer cuidados para que permaneça em operação a maior parte do tempo, contribuindo para aumento da produção, redução de custos operacionais, segurança para os envolvidos e proteção ao meio ambiente.

Principais emissões de GEE

- Escopo 1: As emissões de gases de efeito estufa relacionadas às estas etapas correspondem principalmente a combustão móvel (se movidos à combustível fóssil).

A operação de maquinários e veículos representa significativa emissão de GEE nesta etapa (se terceirizado é escopo 3).

Cita-se ainda a ocorrência de emissões fugitivas de gases refrigerantes de veículos, escritórios da operação florestal e oficinas de manutenção, além da emissão proveniente da combustão de acetileno em maçaricos de solda e corte.

- Escopo 2: Emissões indiretas relacionadas ao consumo de energia elétrica para consumo nas oficinas e escritório da operação florestal (se terceirizado é escopo 3).
- Escopo 3: Emissões indiretas relacionadas à produção e transporte de insumos utilizados para manutenção de maquinários e veículos (exemplos: lubrificantes, óleos, graxas), de combustíveis utilizados para manutenção de maquinários e veículos, e de manutenção de maquinários e veículos (atividades normalmente realizadas por

empresas terceiras).

Fatores que impactam nas emissões

Os fatores que podem impactar as emissões de GEE nesta etapa estão relacionados aos tipos de maquinários e veículos agrícolas utilizados e sua eficiência, ou seja, quanto mais modernos menores são as emissões de GEE, bem como o tipo de combustível utilizado e a eficiência operacional.

A existência e eficiência de sistemas de controle e monitoramento para prevenção a incêndios florestais, e no caso dos veículos, ao tipo utilizado e sua eficiência, quanto mais modernos menores são as emissões de GEE, bem como o tipo de combustível utilizado e a eficiência operacional.

Monitoramento e Controle de Incêndios

A prevenção a incêndios florestais é um tema crítico e estratégico para o setor de Papel & Celulose, especialmente diante do agravamento das mudanças climáticas, pois representam uma das maiores ameaças aos ativos florestais, afetando diretamente a produtividade, os custos operacionais, a segurança das comunidades e a reputação das empresas do setor.

Uma das principais práticas é a conscientização e treinamento dos operadores florestais, dos fornecedores de madeira e das comunidades locais sobre a importância da prevenção de incêndios florestais. No campo operacional, as empresas implantam aceiros (áreas mantidas livres de vegetação para conter e impedir a propagação de incêndios), estruturas de monitoramento e resposta rápida com vigilância 24 horas, torres equipadas com câmeras de alta resolução, equipes treinadas e frotas de veículos especializadas no combate a incêndios.

Principais emissões de GEE

- Escopo 1: As emissões de gases de efeito estufa relacionadas à esta etapa correspondem principalmente a queima de biomassa e combustão móvel (se movidos à combustível fóssil).

A queima de biomassa em decorrência de incêndios em florestas plantadas ou nativas preservadas pelas empresas tem potencial de significativa emissão de GEE, dependendo da extensão e magnitude do incêndio.

A operação de veículos de combate a incêndio e de monitoramento das florestas, da equipe de engajamento e comunicação social e educação ambiental gera emissão de GEE nesta etapa (se terceirizado é escopo 3).

- Escopo 2: Emissões indiretas relacionadas ao consumo de energia elétrica para consumo nos escritórios da operação florestal (se terceirizado é escopo 3).

Fatores que impactam nas emissões

Os fatores que podem impactar as emissões

de GEE nesta etapa estão relacionados a existência e eficiência de sistemas de controle e monitoramento para prevenção a incêndios florestais, e no caso dos veículos, ao tipo utilizado e sua eficiência, quanto mais modernos menores são as emissões de GEE, bem como o tipo de combustível utilizado e a eficiência operacional

5.2.2 Industrial

O processo de obtenção da celulose consiste basicamente em separar a lignina das fibras da madeira, por meio de processos químicos. A celulose pode ser de fibra longa (proveniente de pinus) ou curta (madeira de eucalipto), branqueada ou não branqueada, e pasta de alto rendimento (obtida através de processo mecânico).

O processo químico tipo Kraft, para obtenção de celulose branqueada, é largamente utilizado no mundo todo. No Brasil essa tecnologia é plenamente dominada e utilizada.

No Brasil, as emissões de gases de efeito estufa do processo de obtenção da celulose Kraft são majoritariamente de origem renovável, uma vez que são utilizados o licor preto e a biomassa para geração de vapor e energia a ser consumida na fábrica. Segundo Ibá (2025), cerca de 87% da energia consumida no setor é proveniente de fontes renováveis.

Em sua maioria, as indústrias de papel são indústrias integradas às de celulose, que apesar de serem intensivas em energia, se abastecem com fontes renováveis autogeradas na planta de celulose a partir de biomassa e licor preto (BNDES, 2024).

A matéria-prima principal para fabricação do papel são as fibras de celulose que podem ser provenientes de polpa virgem ou de aparas de papel. Em 2024, o índice de reciclagem de aparas atingiu 59,1% (Ibá, 2025a).

5.2.2.1 Processo de Produção da Celulose

A produção de celulose é constituída de 5 etapas principais: preparo da madeira, cozimento, branqueamento, secagem e enfardamento da celulose, circuito de recuperação química e energética. As principais etapas do processo de produção da celulose são ilustradas no fluxograma abaixo e detalhadas a seguir.



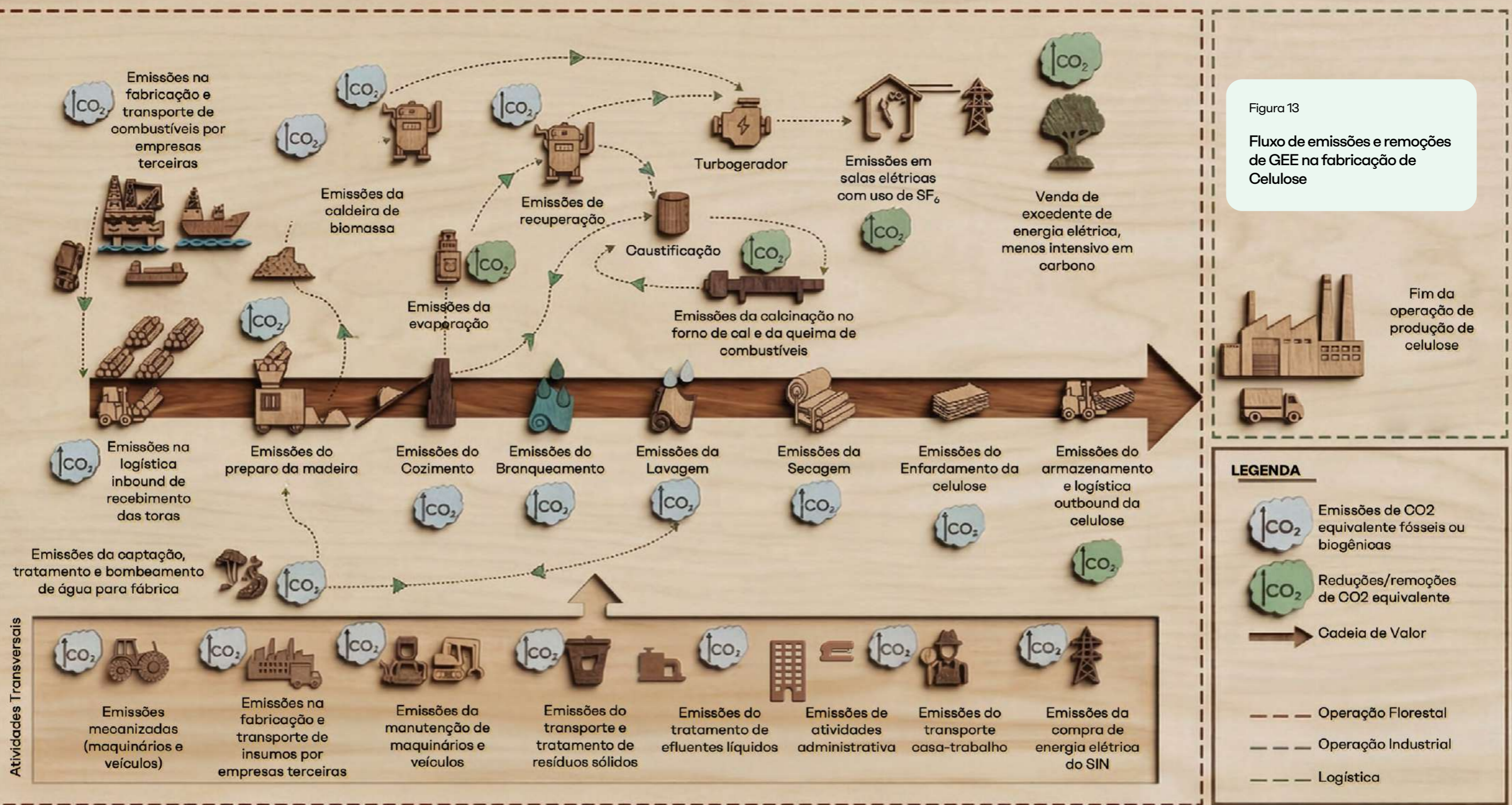


Figura 13
Fluxo de emissões e remoções de GEE na fabricação de Celulose

Preparo da Madeira ao Enfardamento da Celulose

O preparo da madeira se inicia com o recebimento e estocagem de toras, com ou sem casca, que passam por etapas de descascamento com ou sem lavagem das toras, picagem em cavacos e peneiramento, garantindo dimensões adequadas para o cozimento eficiente. Os cavacos aceitos seguem para o cozimento e os cavacos rejeitados vão para biomassa. Os resíduos do pátio podem ser usados na caldeira de biomassa ou compostagem. O transporte das toras é feito por equipamentos móveis do tipo gruas (móveis ou estacionárias) ou por carregadeiras a diesel.

O cozimento tem como objetivo separar as fibras da madeira por meio de reações químicas com licor branco (hidróxido e sulfeto de sódio), sob alta pressão e temperatura no digestor. Após o tempo de reação, a polpa é retirada, lavada com licor preto fraco e enviada para separação de nós e depuração marrom. Em seguida, passa por lavagem e deslignificação com oxigênio, reduzindo o uso de químicos no branqueamento e a carga orgânica no efluente. O licor preto extraído é enviado à evaporação e usado como combustível na caldeira de recuperação, gerando energia e recuperando químicos. Durante o processo, são gerados gases não condensáveis, que são coletados e tratados por incineração.

O branqueamento visa remover impurezas como lignina residual e resinas, aumentando a alvura da celulose.¹ Antes disso, realiza-se a deslignificação, para reduzir o uso de reagentes e minimizar a carga orgânica no efluente. O processo ocorre em múltiplos estágios, com uso de reagentes como dióxido de cloro, peróxido de hidrogênio, hidróxido de sódio e oxigênio. Existem dois tipos principais: ECF (livre de cloro elementar) – comum no processo *Kraft* e o TCF (totalmente livre de cloro) – usado na produção de celulose solúvel.

A secagem tem como objetivo reduzir a umidade da polpa de celulose para cerca de 10%,

¹ A alvura da celulose é a capacidade de refletir a luz azul, sendo uma medida importante da qualidade e do processo de branqueamento, e indica o quão branca e brilhante a celulose está após este processo.

tornando-a adequada para comercialização. O processo começa com a mistura da polpa branqueada com refugos de celulose, seguida de homogeneização, depuração e ajuste de consistência. Na máquina de secagem, a suspensão de fibras é desaguada e formada em folhas. A secagem ocorre através de ar quente aquecido por vapor, sendo a etapa que mais consome energia térmica (70–85% do total da planta). Após a secagem, a folha é resfriada, cortada, empilhada, prensada, encapada e identificada em fardos, que são então enviados ao armazém de celulose.

Principais emissões de GEE

— Escopo 1: As emissões de gases de efeito estufa relacionadas à esta etapa correspondem a categoria de combustão móvel do recebimento e manuseio da madeira.

A operação de máquinas e equipamentos (carregadeiras, empilhadeiras, caminhões) movidos a diesel ou outro combustível fóssil é a principal emissão de CO₂ e outros GEE nesta etapa.

O transporte de madeira se for realizado pela própria empresa (frota de caminhões própria) também podem ser de escopo 1 (se terceirizado é escopo 3).

Nas etapas de cozimento, branqueamento e secagem há consumo de vapor, normalmente gerado a partir das caldeiras de recuperação, biomassa e/ou auxiliares, cujas emissões diretas estão indicadas na descrição destes equipamentos.

— Escopo 2: Emissões indiretas relacionadas ao consumo de energia elétrica de equipamentos. Vale ressaltar que muitas fábricas de celulose são autossuficientes em energia, ou seja, produzem a própria energia para consumo, provenientes em sua maioria de fontes renováveis.

— Escopo 3: Emissões indiretas relacionadas ao transporte de madeira da floresta até a fábrica de celulose, de insumos químicos, e de combustível até os pontos de abastecimento dos caminhões.

Caso o transporte da madeira seja realizado por terceiros, ocorre o consumo de combustíveis pelos caminhões, resultando em emissões de GEE.

Fatores que impactam nas emissões

Os fatores que podem impactar as emissões de GEE nesta etapa estão relacionados a logística de transporte (modal de transporte, distâncias percorridas), eficiência dos equipamentos utilizados, quanto mais modernos menores são as emissões de GEE, eficiência operacional, o tipo de combustível e o controle operacional (qualidade da madeira, tempo de cozimento, temperatura, químicos).

Grande parte do licor branco, que é o insumo químico utilizado no cozimento, é recuperado e utilizado no processo, desta forma a quantidade a ser comprada é menor. No entanto, a escolha de produtos químicos com menor pegada de carbono pode ter grande impacto nas emissões indiretas de GEE, a logística e também a produção in loco pode ser avaliada como forma de reduzir as emissões.

A escolha do modal e rotas para transportar a celulose pode ter grande impacto nas emissões de GEE, geralmente as vias ferroviária e hidroviária possuem menor pegada de carbono quando comparadas com a rodoviária. No entanto, com as novas tecnologias de caminhões elétricos e a biometano, que ainda estão em estágio inicial de desenvolvimento, a pegada de carbono do modal rodoviário será cada vez menor.

Circuito de Recuperação Química e Energética

Faz parte do circuito de recuperação química a planta de evaporação, caldeira de recuperação, caustificação e forno de cal, enquanto o circuito de recuperação energética compreende as caldeiras de recuperação, biomassa e auxiliares, e turbogeradores. A cogeração, que aumenta a eficiência global de recuperação de energia de uma fábrica pode reduzir a emissão de GEE em 50% em comparação com os sistemas convencionais de geração de energia.

A evaporação tem como objetivo concentrar o licor preto gerado no cozimento, para que possa ser queimado na caldeira de recuperação, promovendo a recuperação de energia e químicos. Durante a evaporação, são gerados gases não condensáveis, que são coletados e tratados por incineração. A planta também inclui o tratamento de condensado e retificação de metanol, permitindo o reaproveitamento do condensado no processo e o uso do metanol como combustível auxiliar, geralmente no forno de cal.

A caldeira de recuperação tem como função principal recuperar os produtos químicos do cozimento e gerar vapor para a fábrica por meio da queima do licor preto concentrado, que possui alto poder calorífico. O *smelt* formado no fundo da caldeira (carbonato e sulfeto de sódio) é dissolvido em água, formando o licor verde, que segue para a caustificação, gerando hidróxido de sódio e carbonato de cálcio. Além do licor preto, a caldeira também pode queimar gases não condensáveis do cozimento e evaporação. Os gases de exaustão provenientes da combustão passam por um precipitador eletrostático para remoção de material particulado.

A caustificação transforma o licor verde (carbonato de sódio) em licor branco (hidróxido de sódio), reutilizado no cozimento da madeira. Isso ocorre pela reação com cal (óxido de cálcio), gerando também carbonato de cálcio (lama de cal). Antes da reação, o licor verde é filtrado para remover impurezas (*dregs*), que são lavadas e filtradas. Após a reação, o licor branco é separado da lama de cal, que é lavada e desaguada antes de ir para o forno de cal. Outras impurezas removidas do processo de caustificação são os *grits*.

O forno de cal realiza a calcinação, convertendo o carbonato de cálcio em óxido de cálcio, fechando o ciclo químico. Os gases de exaustão passam por um precipitador eletrostático para remoção de pó, que pode ser reaproveitado ou descartado. O forno pode usar combustíveis auxiliares como gás natural, metanol, hidrogênio ou gás de síntese gerado por gaseificação da biomassa, alternativa adotada em fábricas mais modernas.

A caldeira de biomassa complementa a geração de vapor para produção de celulose e energia elétrica, utilizando como principal combustível a biomassa. Pode também queimar gases não condensáveis e lodos da estação de tratamento de efluentes, aproveitando seu poder calorífico e evitando descarte externo. O vapor gerado em ambas as caldeiras é enviado aos turbogeradores para geração de energia elétrica. O controle de emissões é feito por precipitador eletrostático para remoção de material particulado.

Em situações transitórias de operação (paradas ou partidas de unidades, quedas de energia, testes, etc.), as caldeiras podem usar combustíveis fósseis.

Nos turbogeradores, o vapor de alta pressão gerado pelas caldeiras de recuperação e biomassa é convertido de energia térmica para energia elétrica. As fábricas de celulose são normalmente autossuficientes em energia elétrica, podendo gerar excedente de energia para comercialização. A matriz energética dessas fábricas é majoritariamente renovável, baseada no uso de licor preto e biomassa como combustíveis.

Principais emissões de GEE

— Escopo 1: As emissões de gases de efeito estufa relacionadas à esta etapa correspondem principalmente a queima de combustíveis.

As emissões de GEE da caldeira de recuperação estão relacionadas à combustão estacionária de licor preto (frações de metano e óxido nitroso) e óleo combustível ou gás natural, enquanto as emissões de GEE da caldeira de biomassa estão relacionadas à combustão estacionária de biomassa (frações de metano e

óxido nitroso) e óleo combustível ou gás natural.

Na evaporação há consumo de vapor, normalmente gerado a partir das caldeiras de recuperação, biomassa e/ou auxiliares, cujas emissões diretas estão indicadas na descrição destes equipamentos.

As emissões de GEE no forno de cal estão relacionadas à reação de calcinação (liberação de CO₂ no processo químico) e referente ao consumo de combustível fóssil para aquecer o forno. As emissões de CO₂ oriundas da conversão do carbonato de cálcio em óxido de cálcio não são fósseis, pois contêm carbono proveniente da madeira, que foi enviado para o sistema de recuperação do cálcio através do carbonato de sódio presente no licor verde. No caso do processo produtivo da celulose, a emissão da reação de calcinação é considerada fóssil quando há adição de carbonato de sódio ao sistema de recuperação como um produto químico de reposição (*make-up*).

O forno de cal é uma das principais fontes de CO₂ fóssil, quando utiliza-se óleo combustível, gás natural e/ou metanol, contudo muitas fábricas já estão substituindo por gás de síntese, resultado da gaseificação da biomassa.

— Escopo 2: Emissões indiretas relacionadas ao consumo de energia elétrica de equipamentos.

— Escopo 3: Emissões indiretas relacionadas à produção e transporte de insumos químicos, de biomassa, de combustível até os pontos de abastecimento dos caminhões e de resíduos oleosos e óleo lubrificante.

Fatores que impactam nas emissões

Os fatores que podem impactar as emissões de GEE nesta etapa estão relacionados a eficiência dos equipamentos utilizados, quanto mais modernos menores são as emissões de GEE, eficiência operacional, o tipo de combustível e o controle operacional.

A incorporação de equipamentos de maior eficiência energética tem impacto direto na otimização do consumo de vapor e energia, resultando em ganhos de desempenho operacional e redução das emissões

associadas.

A coleta e queima dos compostos orgânicos voláteis proveniente de emissões fugitivas da evaporação tem grande impacto nas emissões de GEE, principalmente em função do metanol.

A frequência de paradas para manutenção também impacta nas emissões, mais paradas resultam em maior consumo de combustível fóssil nas partidas, por outro lado, a manutenção é essencial para melhoria do desempenho operacional.

A substituição da queima de combustíveis fósseis por alternativas renováveis em situações transitórias de operação (paradas ou partidas de unidades, quedas de energia, testes, etc.) resulta em redução significativa de emissões de GEE.

Com relação ao forno de cal, a incorporação da tecnologia de gaseificação da biomassa nas novas fábricas de celulose, visa produzir gás de síntese a partir de biomassa, que é utilizado como combustível no forno de cal, em substituição aos combustíveis fósseis (óleo combustível ou gás natural). Além dessa, outras alternativas têm sido estudadas para substituição de combustíveis fósseis no forno de cal.

Tratamento de Efluentes Líquidos e de Resíduos Sólidos

As fontes de geração de efluentes líquidos industriais são provenientes das etapas de preparo da madeira, cozimento e lavagem, branqueamento, secagem e da recuperação, entre outras. Este tipo de efluente destaca-se pelas altas concentrações de matéria orgânica e cor. Usualmente, o efluente é coletado e enviado para a ETE para o tratamento dentro da própria fábrica, antes de ser lançado no corpo receptor. O tratamento de efluentes gera lodo, que é adensado e desaguado, podendo ser desidratado, para redução de volume e peso, otimizando o transporte e opções de tratamento/disposição final. As opções de tratamento mais usuais são compostagem e incineração na caldeira.

A fabricação de papel e celulose dá origem a diferentes tipos de resíduos tais como: resíduos inorgânicos da recuperação química; resíduos de madeira; lodo do tratamento de água e de efluentes; material particulado de caldeiras e fornos; cinzas de caldeira e gaseificador; entre outros (BAT, 2015). No entanto, a maioria desses resíduos após algum tipo de tratamento podem gerar subprodutos, como composto orgânico, condicionadores de solo, vapor e energia elétrica.

- Escopo 1: As emissões de gases de efeito estufa relacionadas à esta etapa correspondem principalmente a combustão móvel (se movidos à combustível fóssil) e emissões relacionadas ao tipo de tratamento dos efluentes e dos resíduos (se terceirizado é escopo 3).

A operação de caminhões para transporte dos resíduos representa significativa emissão de GEE nesta etapa.

As emissões diretas de GEE do tratamento de efluentes estão relacionadas à degradação aeróbia da matéria orgânica com geração de CO_2 e anaeróbia da matéria orgânica com geração de metano (CH_4), dependendo do tipo de tratamento. As emissões de metano em tratamentos aeróbios também podem ocorrer em função da formação de possíveis zonas anaeróbias no sistema (IPCC, 2006). As emissões de CO_2 do tratamento de efluentes

geralmente são consideradas não fósseis e não são consideradas nas diretrizes do IPCC.

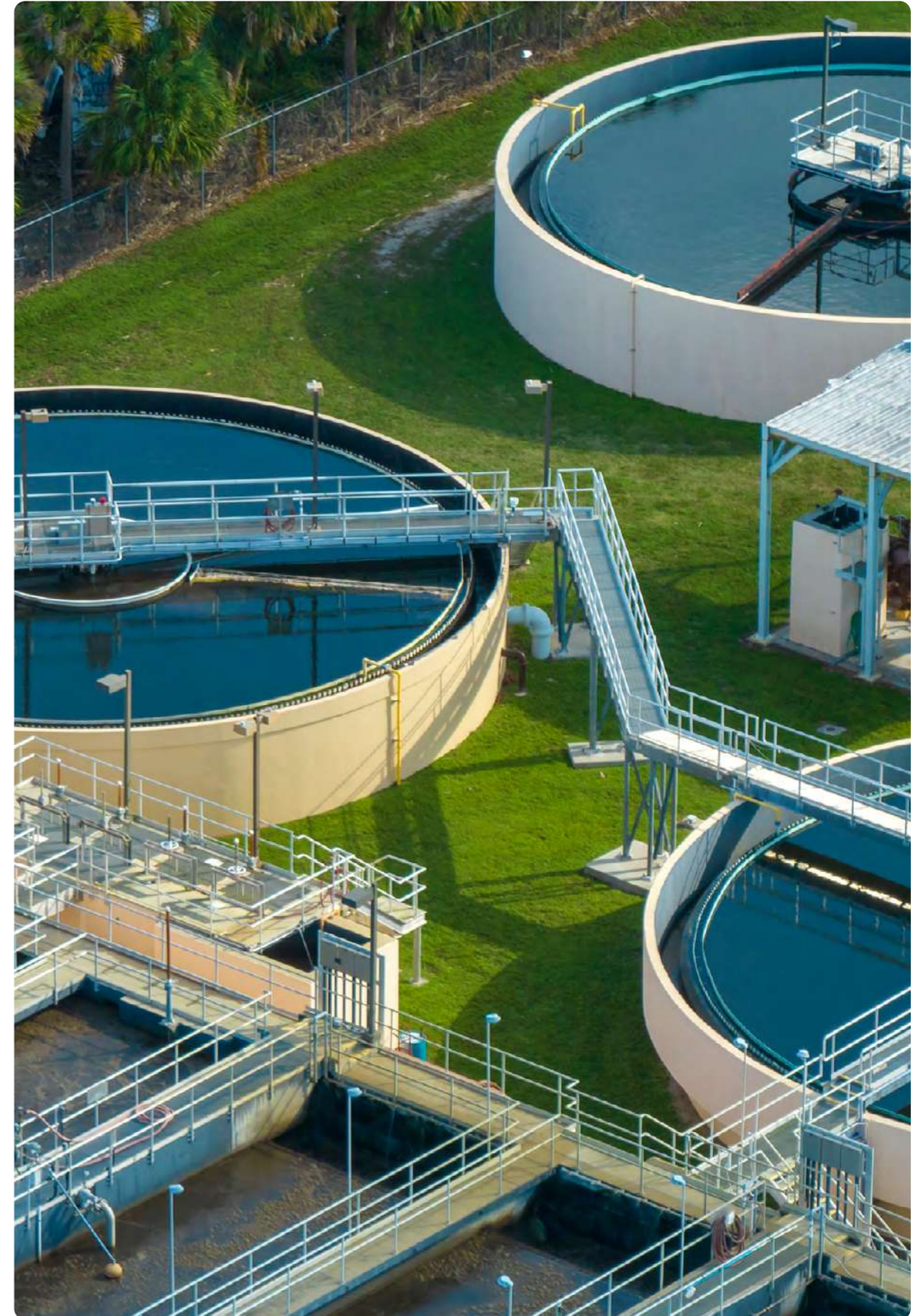
Dependendo do tipo de tratamento dos resíduos (compostagem, produção de condicionador de solo, incineração em caldeira, aterro) pode haver emissões de GEE.

- Escopo 2: Emissões indiretas relacionadas ao consumo de energia elétrica dos equipamentos utilizados para tratamento dos efluentes e dos resíduos.
- Escopo 3: Emissões indiretas relacionadas à produção e transporte de insumos químicos, de combustível até os pontos de abastecimento dos caminhões e de resíduos.

Fatores que impactam nas emissões

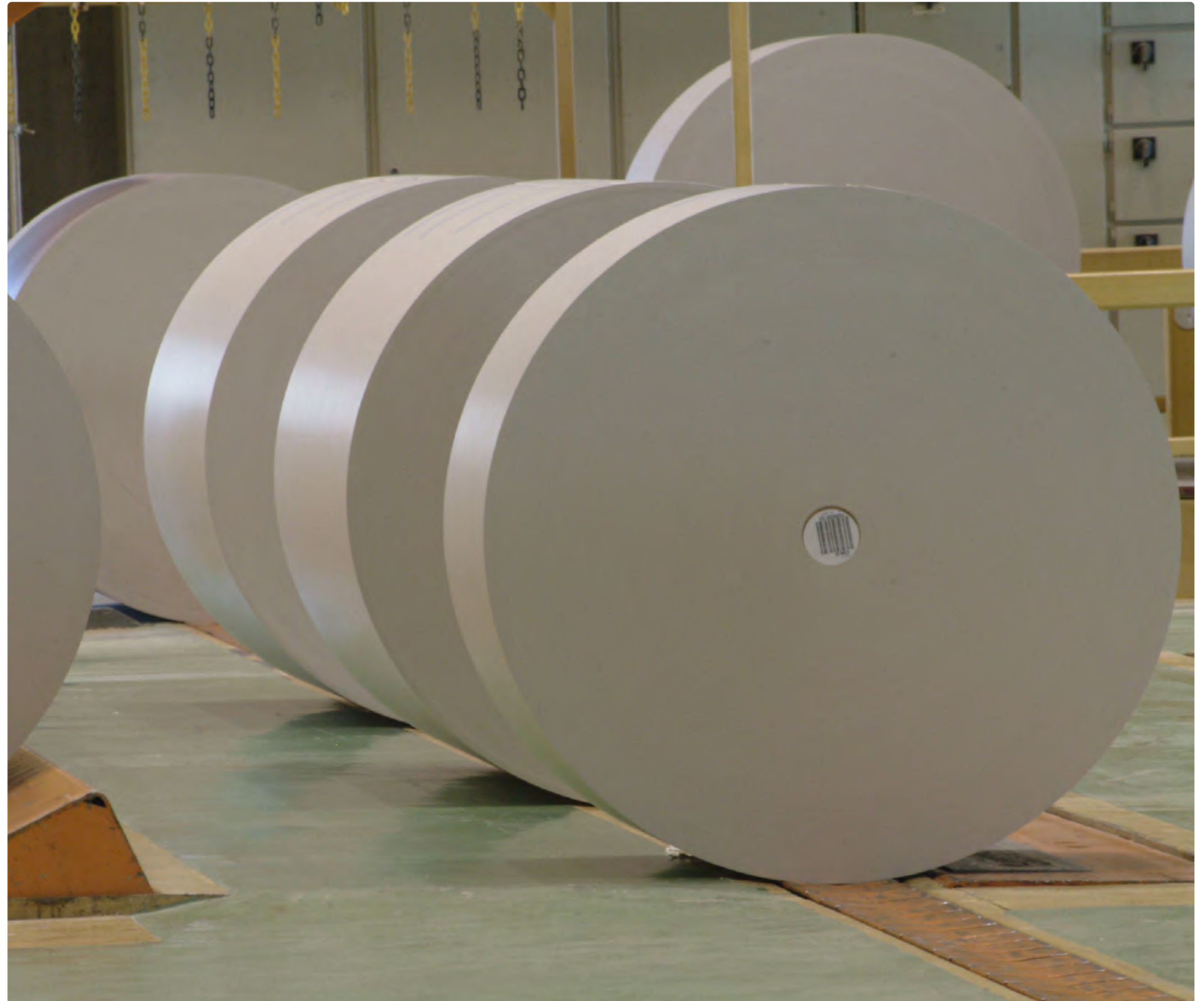
Os fatores que podem impactar as emissões de GEE na etapa de tratamento de efluentes são: composição do efluente, tipo de tratamento, eficiência dos equipamentos e eficiência operacional, controle da operação (temperatura, aeração, retorno de lodo), a produção, consumo e transporte de insumos químicos.

Diversos fatores podem impactar as emissões de GEE no tratamento de resíduos, de acordo com o tipo de tratamento a ser realizado. A disposição de resíduos orgânicos em aterro deve ser evitada, pois há uma preocupação global em virtude da geração de metano, que tem potencial de aquecimento global 28 vezes superior ao CO_2 .



5.2.2.2 Processo de Produção do Papel

A produção de papel é constituída de 5 etapas principais: manuseio da matéria-prima, preparo da massa, sistema de aproximação, máquina de papel propriamente dita, onde ocorre a formação da folha, prensagem e secagem, e o acabamento. As principais etapas do processo de produção do papel são ilustradas no fluxograma abaixo e detalhadas a seguir.



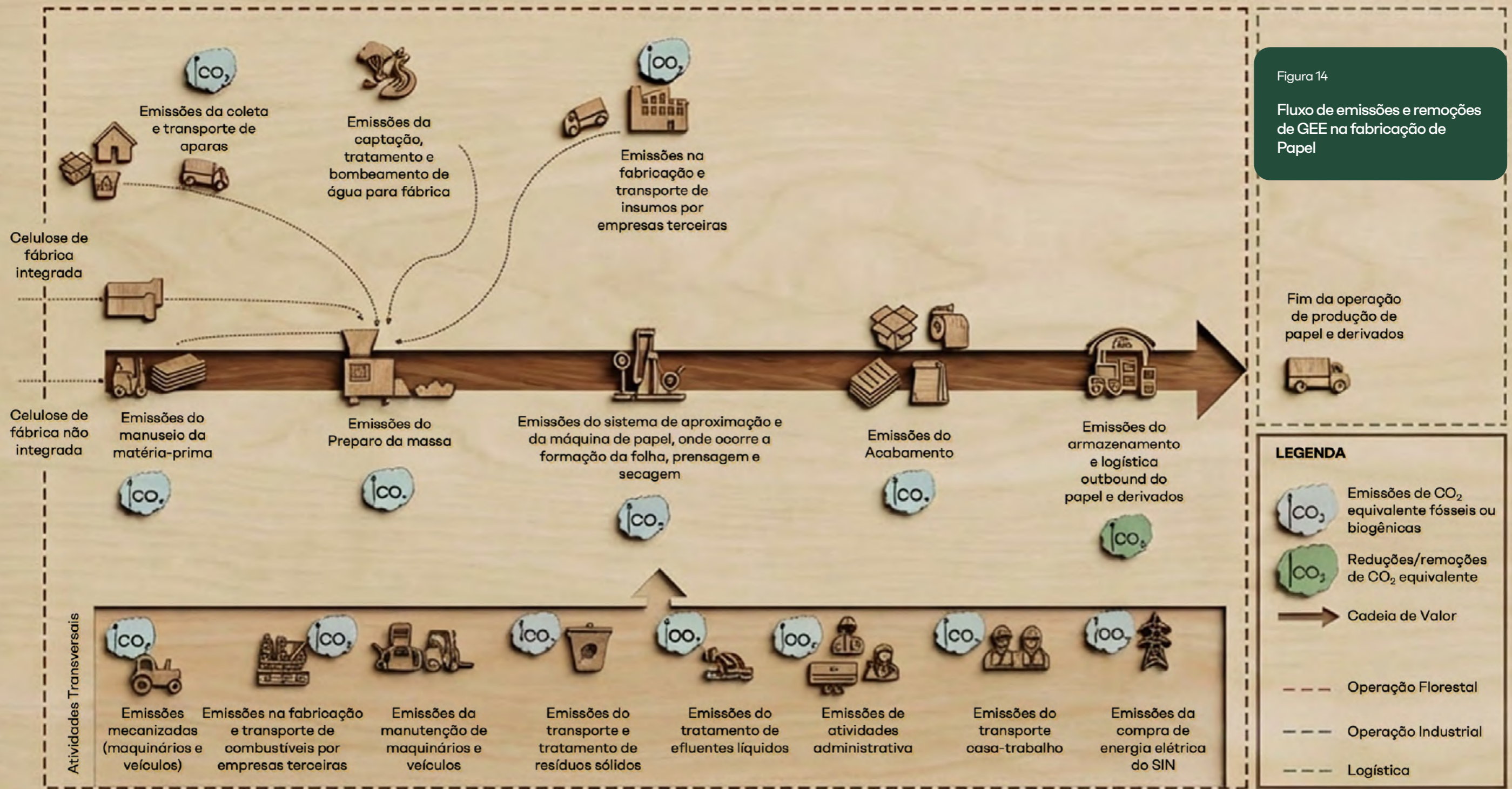


Figura 14
Fluxo de emissões e remoções de GEE na fabricação de Papel

Manuseio da Matéria-Prima ao Acabamento do Papel

A matéria-prima principal para fabricação do papel são as fibras de celulose que podem ser provenientes de polpa virgem ou de aparas de papel.

Nas fábricas com produção de celulose, as fibras chegam à produção de papel em forma de suspensão por meio de tubulações diretamente do processo de produção de celulose. No caso de fábricas sem produção de celulose, as fibras são obtidas a partir da desintegração de fardos de celulose de mercado e/ou de aparas de papel.

As fibras de celulose são convertidas numa "massa" que segue para a máquina de papel. Diversos tipos de polpas podem ser misturados, este processo envolve a desintegração das fibras, remoção de impurezas e geralmente o refino, para modificação das fibras fazendo com que desenvolvam propriedades de resistência. Desta forma, nesta etapa as fibras são misturadas com água e produtos químicos.

Na máquina de papel é onde ocorre a formação da folha, desaguamento e secagem. É na etapa de secagem que ocorre o maior consumo de calor (vapor) do processo de fabricação de papel, esta etapa representa cerca de 70% do consumo de energia do setor (BNDES, 2024).

Após a formação da folha, o papel pode ser rebobinado, cortado em rolos ou em folhas para expedição/distribuição. Alguns tipos de produtos requerem revestimento especial.

Principais emissões de GEE

- Escopo 1: As emissões de gases de efeito estufa relacionadas à esta etapa correspondem principalmente a queima de combustíveis para produção de vapor por meio de caldeiras.

As emissões de GEE de caldeiras estão relacionadas à combustão estacionária de biomassa (frações de metano e óxido nítrico), ou óleo combustível ou gás natural.

Importante destacar que o CO₂ emitido na queima de biomassa são consideradas não

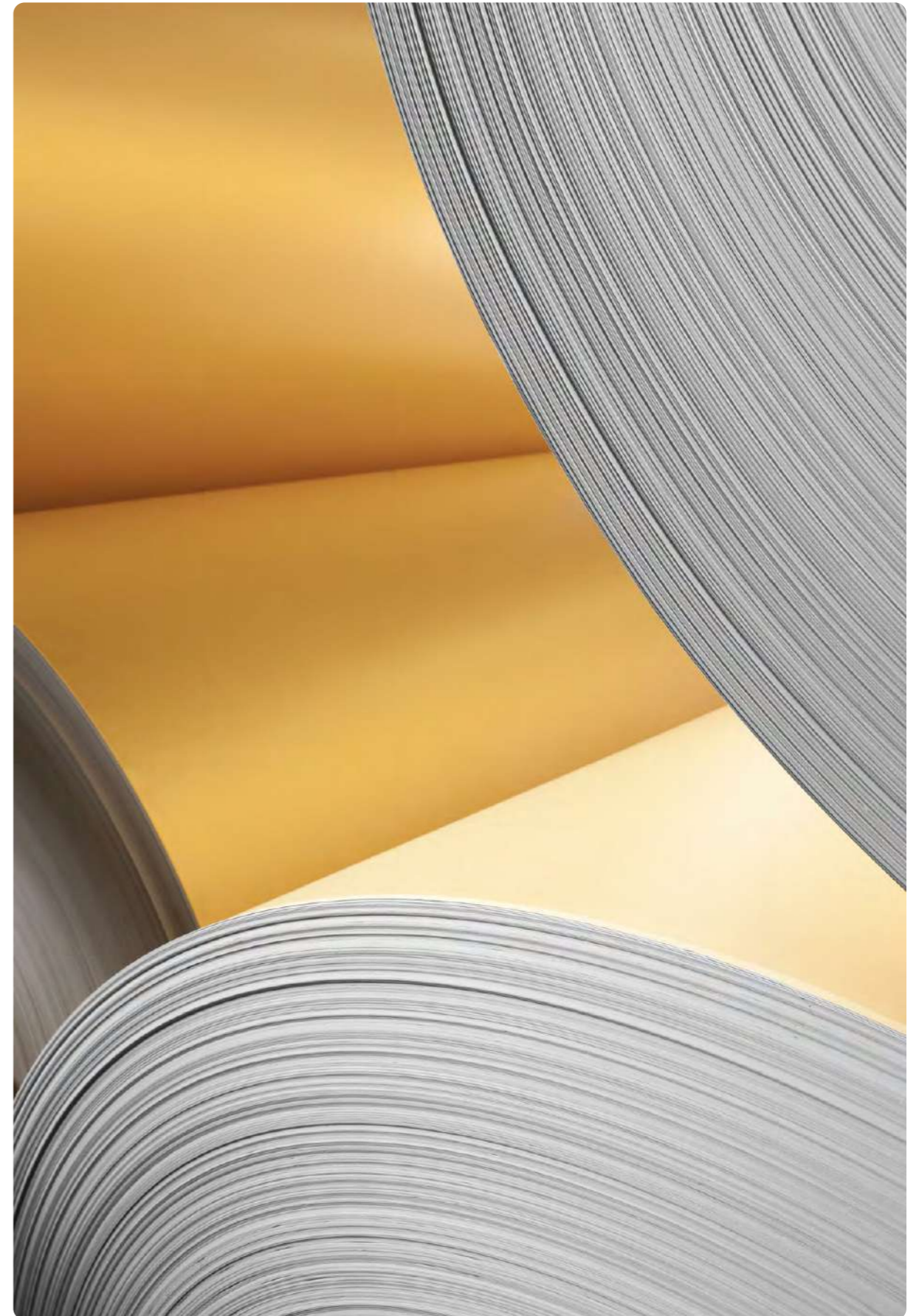
fósseis, pois são resultantes da combustão de material vegetal e fazem parte do ciclo curto do carbono.

- Escopo 2: Emissões indiretas relacionadas ao consumo de energia elétrica da máquina de papel e outros equipamentos, tais como bombas, sistemas a vácuo, motores, secadores, ventiladores, etc.
- Escopo 3: Emissões indiretas relacionadas a produção e transporte de insumos e químicos para a produção do papel (categoria de "bens e serviços comprados"), e de matéria-prima e do produto final.

Fatores que impactam nas emissões

Os fatores que podem impactar as emissões de GEE na produção de papel são eficiência da máquina de papel e equipamentos, fatores operacionais, produção e transporte de insumos e aditivos químicos e o transporte do produto acabado (papel).

No processo de produção de papel, a principal etapa consumidora de energia é a secagem. Desta forma, a maioria das medidas de eficiência energética é relacionada a melhorar a eficiência do processo de secagem, recuperando seu calor residual para utilizar em outras etapas do processo produtivo.





5.2.3 Logística

A cadeia de suprimentos da indústria de Papel & Celulose é uma das mais complexas e integradas do setor industrial, envolvendo diversas etapas que vão desde a produção da matéria-prima até a entrega do produto final ao consumidor. Além disso, envolve grandes volumes, rotas variadas e diferentes modais (rodoviário, ferroviário, hidroviário e marítimo).

A cadeia de logística *inbound* (*upstream* ou logística de entrada) indústria de Papel & Celulose envolve todos os fluxos de matéria-prima (madeira, celulose e aparas de papel), produtos químicos, equipamentos e peças industriais, combustíveis (como biomassa, óleo combustível) e embalagens e materiais auxiliares.

A madeira, de florestas plantadas de eucalipto ou pinus, representa o principal componente da logística *inbound* das fábricas de celulose, em função da distribuição espacial das áreas de plantio (raio médio dezenas de quilômetros distante da fábrica) e do grande volume de madeira necessária para a produção. O ciclo de crescimento de florestas plantadas (cerca de 5-7 anos) exige planejamento de longo prazo. No caso das fábricas de papel não integradas, o recebimento de celulose e, principalmente, de aparas de papel representam o principal componente da logística *inbound*.

O transporte de matéria-prima (madeira, celulose e aparas de papel) é geralmente realizado por modal rodoviário (diversos tipos de caminhão), porém no caso da madeira também há possibilidade de transporte via modal ferroviário, hidroviário ou marítimo (barcaças), ou até mesmo de integração de um ou mais meios de transporte.

A cadeia de logística *outbound* (*downstream* ou logística de saída) na indústria de Papel & Celulose envolve todos os fluxos de entrega de produtos finais, desde as fábricas até os clientes finais, que podem ser indústrias, distribuidores ou portos para exportação.

A celulose, papel e embalagem representam os principais componentes da logística *outbound* das fábricas de papel e celulose. No entanto, é importante observar que as indústrias

de celulose cada vez mais tem produzido diversos tipos de bioprodutos, em sua maioria, consumidos no próprio empreendimento. Existe forte expectativa na produção de produtos de lignina e biocombustíveis, que demandarão logística *outbound* para entrega aos clientes finais.

Para transporte dos produtos finais no mercado interno o modal mais utilizado é o rodoviário, enquanto para transporte em longas distâncias o modal mais utilizado é o ferroviário. No caso da exportação de produtos, o transporte marítimo é o mais utilizado, como é o caso da celulose do Brasil.

Principais emissões de GEE

— Escopo 1: As emissões de GEE relacionadas à esta etapa correspondem a categoria de combustão móvel (se movidos à combustível fóssil) para transporte das matérias-primas, produtos químicos, equipamentos e peças industriais, combustíveis, embalagens e materiais auxiliares, e produtos finais.

A operação de máquinas e equipamentos (guindastes, empilhadeiras e caminhões) movidos a óleo diesel ou outro combustível fóssil é a principal emissão de CO₂ e outros GEE nesta etapa (se terceirizado é escopo 3).

— Escopo 2: Emissões indiretas relacionadas ao consumo de energia elétrica de equipamentos, tais como: pontes rolantes, pórticos, guindastes e empilhadeiras. Vale ressaltar que muitas fábricas de celulose são autossuficientes em energia, ou seja, produzem a própria energia para consumo, provenientes em sua maioria de fontes renováveis.

— Escopo 3: Emissões indiretas relacionadas ao transporte da logística *inbound* e *outbound* e produção e transporte do combustível até os pontos de abastecimento dos caminhões, caso sejam realizados por terceiros.

Fatores que impactam nas emissões

Os fatores que podem impactar as emissões de GEE nesta etapa estão relacionados ao

modal de transporte, distâncias percorridas, eficiência dos equipamentos utilizados, quanto mais modernos menores são as emissões de GEE, o tipo de combustível e o controle operacional.

5.2.4 Produtos

A indústria de Papel & Celulose está passando por uma transformação significativa nas últimas décadas, impulsionada pelas demandas por sustentabilidade, inovação e economia circular. O novo conceito é a evolução dessa indústria tradicional para uma bioindústria, ou seja, uma indústria baseada no uso de matérias-primas renováveis e processos sustentáveis, que oferece muito mais do que celulose e papéis para diferentes finalidades.

Assim, a contribuição do setor não se resume somente a remoção de carbono pelas florestas. Quando produtos de origem fóssil são substituídos por de origem renovável, há o efeito de substituição, ou seja, troca-se uma quantidade de emissão fóssil que seria emitida no ciclo de vida daquele produto por uma emissão majoritariamente biogênica.

Essa bioindústria possui capacidade para produzir uma ampla variedade de bioprodutos derivados da madeira, gerados ao longo de seu processo produtivo. Entre eles, destacam-se: energia sustentável; terebintina; *tall oil*; gás de síntese; ácido sulfúrico obtido a partir de gases odoríferos; fertilizantes e corretivos de acidez do solo produzidos a partir de resíduos do processo; hidrogênio, biometano e e-metanol proveniente do carbono biogênico capturado nas chaminés das caldeiras; produtos à base de lignina; bioprodutos extraídos do licor verde; bio-óleo; nanocelulose; entre outros.

A madeira, recurso natural versátil e renovável, tem se consolidado como uma alternativa promissora aos materiais de origem fóssil utilizados em diversos produtos do cotidiano, da construção civil às embalagens. Essa transformação representa não apenas uma estratégia eficaz para a redução das emissões de carbono, mas também um avanço significativo rumo ao cumprimento das metas climáticas, aproveitando a capacidade intrínseca da madeira de sequestrar carbono da atmosfera.

Embora diversas alternativas sustentáveis estejam em fase de desenvolvimento, a substituição de produtos fósseis por soluções à base de madeira já é uma realidade em muitos setores, sem comprometer a qualidade, a

funcionalidade ou o desempenho dos produtos. Um exemplo marcante é o uso crescente de materiais derivados da madeira para substituir embalagens plásticas em frutas, vegetais e outros alimentos.

Nesses casos, a madeira é transformada em uma pasta de celulose, que serve de base para a produção de embalagens de papelão, oferecendo uma solução biodegradável e ambientalmente responsável.

Assim, o setor de Papel & Celulose exerce um papel estratégico na promoção da bioeconomia, contribuindo de forma significativa para a descarbonização, e sendo essencial na transição para uma economia de baixo carbono.





5.3 Diagnóstico das emissões

Diante da necessidade de se compreender a totalidade das emissões do setor de Papel & Celulose, etapa fundamental para construção de uma estratégia de descarbonização específica para esse setor, foi realizado um diagnóstico das emissões das empresas do setor de Papel & Celulose visando esclarecer qual é o cenário atual de emissões, principalmente com relação as principais fontes de emissão e as possibilidades de remoção.

Salienta-se, portanto, que o diagnóstico de emissões que será apresentado nos itens seguintes buscará estimar as emissões totais oriundas das atividades do setor de Papel & Celulose, considerando desde o plantio da madeira, até a entrega do produto ao cliente, o uso do produto e a sua disposição pós uso, portanto, percorrendo os escopos 1, 2 e 3 da diretriz do PBGHGP.

5.3.1 Resultados

No total os questionários foram preenchidos por 19 empresas, que representam os principais *players* do setor, abrangendo 86% da produção de papel e celulose do Brasil. Dentre estas apenas 1 não elaborava o inventário de GEE.

Dentre o total de 18 empresas que elaboram IGEE, todas relataram seguir o padrão de relato do Programa Brasileiro GHG Protocol, e 67% consideraram as emissões de GEE das operações florestais.

Além disso, as 100% consideraram as emissões das operações industriais, 61% consideraram as emissões da logística à montante ("upstream"), 61% consideraram as emissões da logística à jusante ("downstream"), 67% consideraram as emissões de seus escritórios e centros de distribuição, e apenas 1 delas considerou as emissões de fornecedores e clientes, como ilustrado no gráfico abaixo.

Em relação aos escopos do Programa Brasileiro GHG Protocol, todas as empresas respondentes que realizam inventário de gases do efeito estufa seguem a regra de reporte obrigatório dos escopos 1 e 2 das emissões fósseis, porém das 18 empresas que elaboram IGEE, 89% apresentaram as emissões biogênicas de escopos 1 e 2. Adicionalmente, 78% das empresas respondentes monitoram

as emissões fósseis de GEE do escopo 3, mas 67% reportaram as emissões biogênicas deste escopo.

Para reunir empresas com processos e, conseqüentemente, emissões de GEE semelhantes, optou-se por classificá-las de acordo com os tipos de produtos acabados. Dessa forma, as respondentes foram organizadas em dois segmentos, conforme descrito a seguir:

- Segmento Papel: empresas que produzem e comercializam papel, papelão, embalagens de papel, *tissue*;
- Segmento Papel e Celulose: inclui empresas que produzem e comercializam exclusivamente celulose e empresas integradas, que produzem e comercializam celulose, papel, papelão, embalagens de papel e/ou *tissue*.

Dentre as 18 empresas respondentes que realizavam IGEE, uma apresenta somente operação florestal, assim, para este diagnóstico de emissões, foi considerada uma amostra de 17 empresas respondentes.

A seguir são detalhadas as emissões por segmento, considerando escopos 1 e 2, além de uma análise do nível de reporte das emissões de escopo 3.

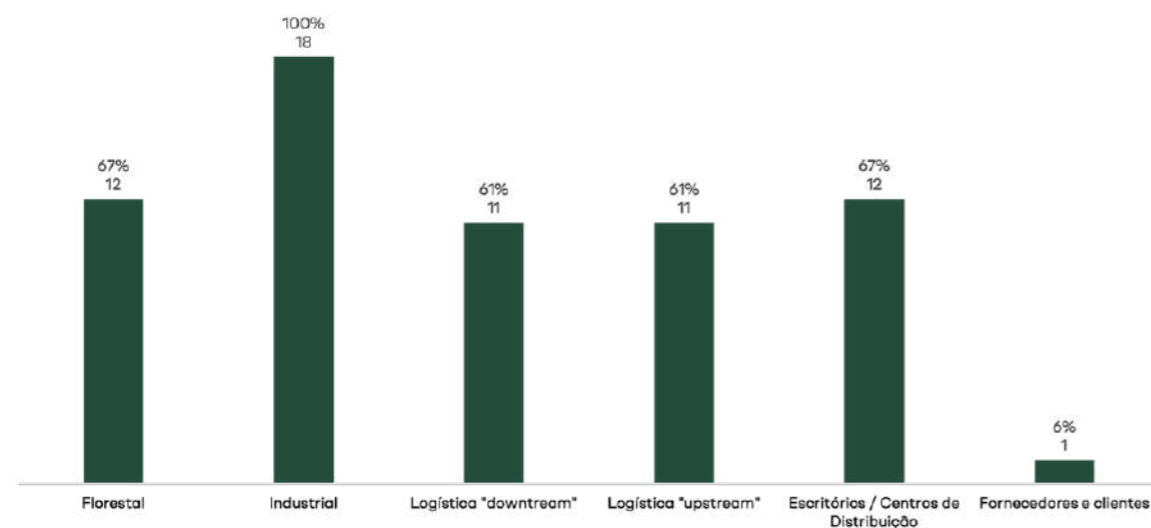


Figura 15 - Quantidade de empresas respondentes que considera cada tipo de operação em seu IGEE. Nota: amostra - 18 empresas que elaboravam IGEE. Unidade: % em relação ao número total de empresas respondentes.

5.3.1.1 Emissões Fósseis de Escopos 1 e 2

O resultado do diagnóstico de emissões de GEE fósseis, considerando a amostra das 17 empresas respondentes compiladas nos dois segmentos em estudo, é apresentado nos itens a seguir.

Nota-se que foram consideradas as emissões de escopo 2 na "abordagem de compra", conforme definição do Programa Brasileiro GHG Protocol, ou seja, considerou-se os abatimentos de carbono conforme as compras de certificados de energia renovável pelas empresas, como uma forma de valorizar os esforços para descarbonização já em voga no setor.

Segmento Papel

O segmento "Papel" compreende as respostas de 6 empresas de produção de papel e outros produtos (papelão, embalagens de papel, *tissue*). Embora cada uma tenha seu portfólio e estratégias próprias, elas compõem um grupo representativo de fabricantes de papel no Brasil, unidas por características produtivas semelhantes. Todas utilizam como matéria-prima tanto a celulose quanto aparas de papel provenientes de outras empresas, promovendo a integração entre produção primária e reciclagem. Essa abordagem contribui para

otimizar recursos, reduzir resíduos e fortalecer a economia circular no setor.

As categorias de emissão fóssil mais representativas do segmento de papel são a combustão estacionária, seguida por tratamento de efluentes e compra de energia elétrica, representando, respectivamente, 55,2%; 15,7% e 15,0% das emissões totais de escopos 1 e 2 desse segmento.

A combustão estacionária é relevante principalmente associada à produção de vapor (caldeira) destinada à secagem do papel. Entretanto, em comparação com o segmento de Papel e Celulose, é inferior, em virtude de não contemplar o processo produtivo da celulose e utilizar como matéria-prima aparas de papel e celulose de mercado.

A categoria de tratamento de efluentes em fábricas que utilizam aparas para produção de papel é relevante devido às características do efluente gerado nesse segmento: efluente com alto teor de matéria orgânica, em decorrência dos resíduos orgânicos (tintas, cola, amido, fibras curtas degradadas) presentes nas aparas de papel, que aumentam a carga orgânica no efluente, exigindo maior eficiência no tratamento, o que gera mais emissões de GEE.

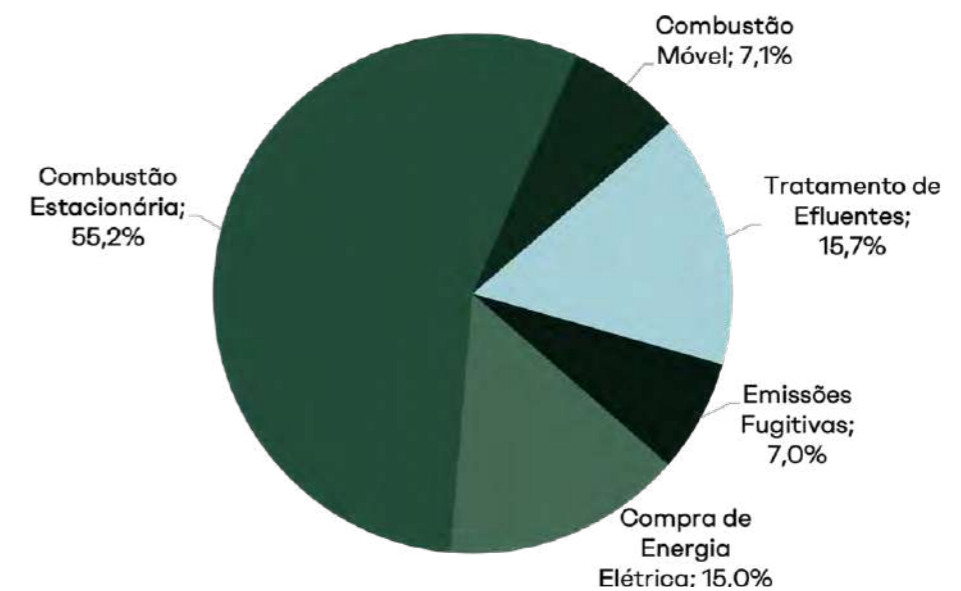


Figura 16 - Percentual de cada categoria de emissões fósseis de GEE dos escopos 1 e 2 do segmento "Papel".

A compra de energia elétrica do Sistema Integrado Nacional é elevada, visto que há grande consumo nas máquinas de papel e outros equipamentos. Neste tipo de fábrica normalmente não há cogeração de energia elétrica, sendo necessária a compra da energia. Entretanto, nota-se que empresas desse segmento já buscam a compra de certificados de origem renovável de energia elétrica, neutralizando assim suas emissões de GEE de escopo 2.

Segmento Papel e Celulose

O segmento chamado "Papel e Celulose" é composto por 11 empresas de papel e celulose que, ou produzem e comercializam exclusivamente celulose, ou atuam de maneira integrada (produzindo e comercializando papel e celulose). Apesar de diferentes em termos de escala de produção, portfólio e posicionamento estratégico, todas possuem suas operações verticalizadas que vão desde o manejo florestal de eucalipto e/ou pinus até a produção final de celulose, ou celulose e papel, além de possuir forte presença internacional, seja por meio de exportações ou de unidades produtivas fora do Brasil.

As categorias de emissão fóssil mais representativas do segmento "Papel e Celulose" são a combustão estacionária, seguida pela combustão móvel e compra de energia elétrica, representando, respectivamente, 60,6%; 20,1% e 7,5% das emissões totais de escopos 1 e 2 desse segmento.

A emissão estacionária é elevada principalmente associada às emissões da caldeira de recuperação, caldeira de força e forno de cal. Apesar da maior parte das emissões da queima de licor negro e biomassa serem consideradas biogênicas, ou seja, sem emissão de carbono adicional na atmosfera, tem-se durante a sua combustão a emissão de frações de metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) presentes na composição da madeira, que apresentam elevado potencial de aquecimento global, significativamente superior ao do dióxido de carbono. A queima de combustíveis fósseis no forno de cal e de combustíveis auxiliares fósseis nas caldeiras (usualmente óleo combustível e/ou óleo diesel) em situações transitórias de operação também é outra fonte significativa de emissão de GEE. Em

comparação com o segmento "papel", tem-se maior emissão em decorrência do processo produtivo da celulose.

Com relação ao forno de cal, as fábricas de celulose implantadas recentemente no Brasil têm optado pela inclusão do gaseificador de biomassa para geração de combustível renovável (gás de síntese), em substituição ao combustível fóssil normalmente utilizado. Além dessa, outras alternativas têm sido estudadas para substituição de combustíveis fósseis no forno de cal.

A categoria de combustão móvel é relevante nas indústrias de celulose do Brasil porque normalmente as empresas optam por verticalizar sua operação, ou seja, se responsabilizam desde o plantio e manejo florestal até a produção de celulose, o que inclui, portanto, o transporte de madeira até a área fabril, além de toda a logística de veículos e maquinários inerente da operação florestal e da industrial (ex. tratores, pás carregadeiras, empilhadeiras). A eletrificação de máquinas e equipamentos (carregadeiras, empilhadeiras, caminhões de menor porte) é uma alternativa para mitigação das emissões dessa categoria. Além disso, o planejamento de rotas, tipos de modais e tipos de combustíveis utilizados tem grande impacto nas emissões de GEE.

A compra de energia elétrica do Sistema Integrado Nacional ainda representa a terceira categoria mais relevante, contemplando 7,5% das emissões fósseis totais do segmento, puxada principalmente pelas indústrias integradas mais antigas, sem a cogeração de energia a partir de biomassa.

Cita-se ainda o quarto lugar, ou seja, as emissões oriundas das atividades de silvicultura, principalmente referente ao alto consumo de óleo diesel em veículos e maquinários móveis utilizados na operação florestal.

Por fim, cita-se ainda a categoria de emissões resultantes do tratamento de resíduos sólidos, que ainda é relevante nesse tipo de indústria (2,8%). Num passado recente, a grande maioria desses resíduos orgânicos e inorgânicos eram destinados para aterros industriais localizados nas próprias indústrias. Atualmente, a maioria das fábricas de celulose já tem

outras destinações para os resíduos, como a produção de condicionadores de solo, queima em caldeira, etc. No entanto, ainda existem fábricas que utilizam aterros para disposição de resíduos, e muitas possuem aterros já encerrados, porém ainda em processo ativo de biodegradação anaeróbia, gerando um biogás composto principalmente de metano e dióxido de carbono, cuja emissão continua por cerca de 30 anos após o ano de encerramento do aterro.

5.3.1.2 Emissões Fósseis de Escopo 3

Um dos principais desafios da descarbonização é que, sozinhas, as empresas privadas conseguem apenas descarbonizar parte das emissões associadas aos seus negócios. O papel de influenciar a descarbonização do Escopo 3 pelas empresas do setor de Papel & Celulose é mais difícil, exigindo diálogo, colaboração e ação conjunta. Visto que o Escopo 3 representa as emissões indiretas, ou seja, emissões que ocorrem de atividades que ocorrem à montante e à jusante das operações das empresas do setor, tais como emissões de terceiros, de fornecedores de matéria prima e insumo e de clientes.

Inclusive, durante o *workshop* foram apontados os desafios encontrados no monitoramento

das emissões de Escopo 3: primeiramente as empresas têm dificuldade em mapear a própria cadeia de valor, que normalmente é vasta e complexa, assim como identificar todas as emissões indiretas. Mitigar então essas emissões, ou seja, influenciar de alguma forma a redução das emissões de GEE de terceiros, é um desafio além.

Mas, apesar de complexo, esse desafio de incluir o Escopo 3 em sua estratégia climática tem cada vez mais mostrado relevância e urgência, já que mudanças nos setores terceiros por novas regulações acabam por impactar diretamente as empresas do setor de Papel & Celulose.

Do total de 18 empresas, 78% das empresas respondentes monitoram as emissões fósseis de GEE do escopo 3, e 67% monitoram as emissões biogênicas deste escopo.

As categorias mais reportadas foram, nessa ordem, Categoria 4 (transporte e distribuição "upstream") relatada por 78% das empresas respondentes; Categoria 1 (bens e serviços comprados) relatada por 67% das empresas respondentes; Categoria 7 (deslocamento

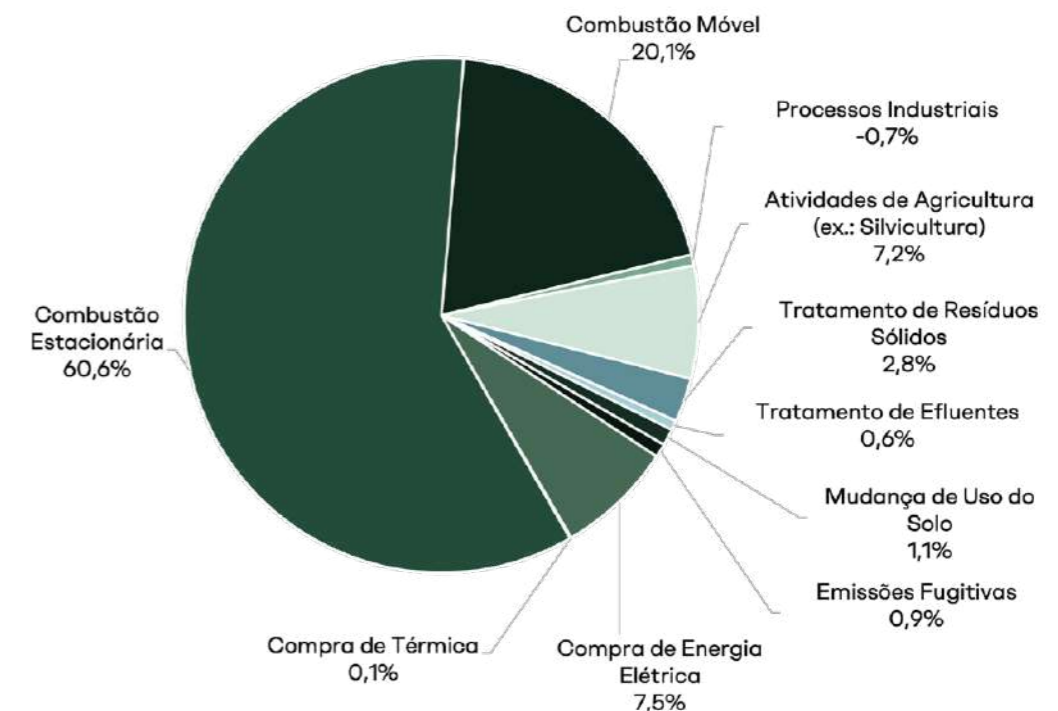


Figura 17 - Percentual de cada categoria de emissões fósseis de GEE dos escopos 1 e 2 do segmento "Segmento Papel e Celulose".

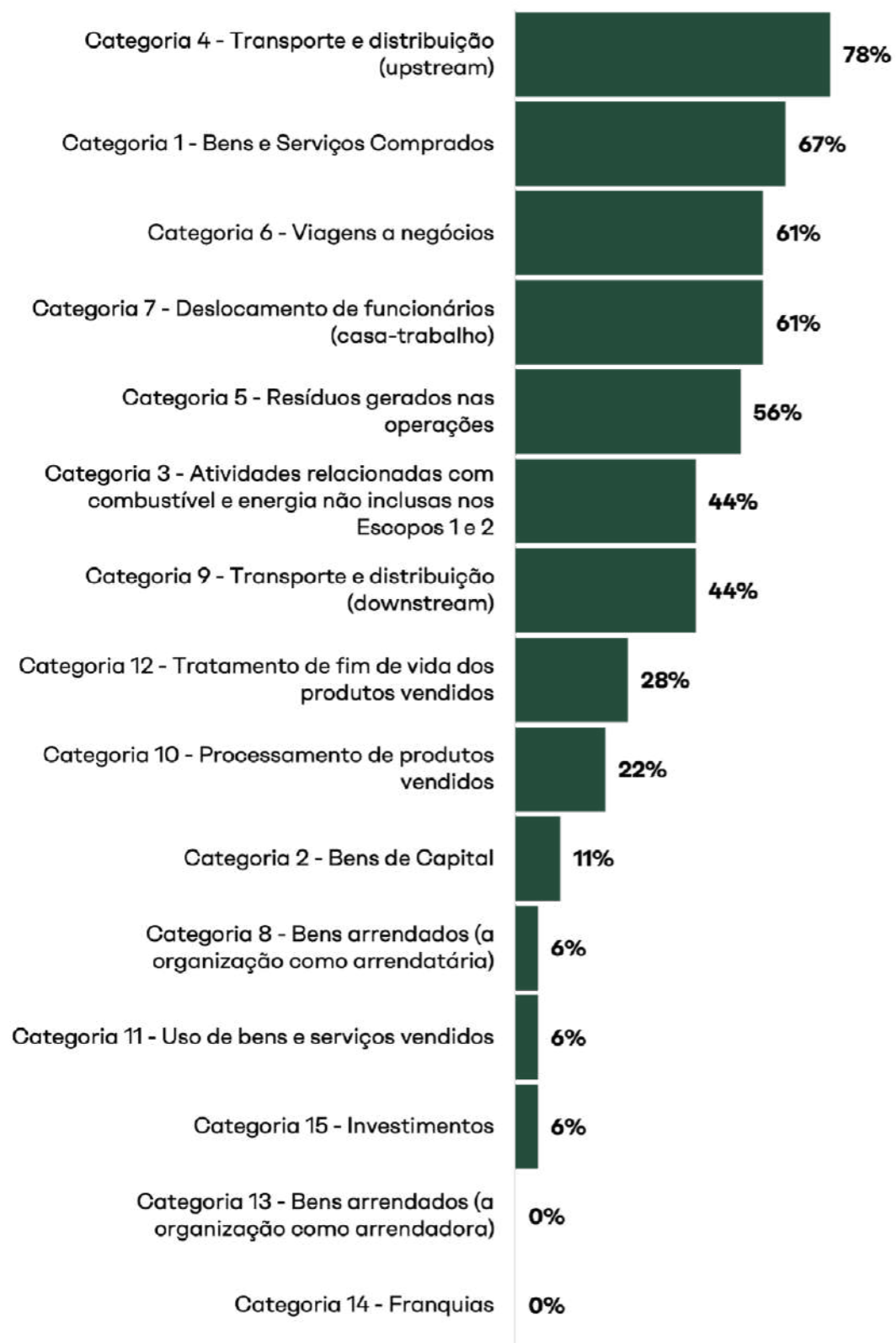


Figura 18 - Percentual de cada categoria de emissões fósseis de GEE do escopo 3 considerando as 18 empresas respondentes do setor de Papel & Celulose. Nota: amostra - 18 empresas respondentes que realizam IGEE.

de funcionários casa-trabalho) e Categoria 6 (viagens a negócios) ambas relatadas por 61% das empresas respondentes; Categoria 5 (resíduos gerados nas operações) relatada por 56% das empresas respondentes; e Categoria 9 (transporte e distribuição "downstream") e Categoria 3 (atividades relacionadas com combustível e energia não incluídas nos Escopos 1 e 2) ambas relatada por 44% das empresas respondentes).

tendências em termos de quantificação das emissões de GEE do setor e aponta os avanços e desafios comuns ao setor de Papel & Celulose, numa visão geral.

5.3.2 Análise Crítica dos Dados Coletados

Quanto aos dados coletados de emissões é importante destacar que o conjunto amostral avaliado apresenta características diversas.

De modo a se minimizar tais diversidades, o conjunto amostral foi separado em 2 grupos por segmento ("papel", "papel e celulose"), agrupando as empresas por processos semelhantes e, emissões de GEE semelhantes.

Muito embora tenha sido realizada essa segmentação, na análise dos resultados deve-se ponderar aspectos como diferenças tecnológicas, por exemplo, o uso de gaseificadores de biomassa em fábricas de celulose; tipos de combustíveis, por exemplo, aqueles usados nas caldeiras como combustíveis auxiliares; tipos de insumo, por exemplo, maior ou menor uso de aparas em fábricas de celulose; queima de lodo de ETE em caldeiras ou sua compostagem; controle operacional das fontes de emissão, por exemplo, no tratamento de resíduos ou logísticas *inbound* e *outbound*, o que pode caracterizá-las como escopo 1 ou escopo 3, etc.

Além disso, salienta-se que pode haver diferenças nas metodologias adotadas na contabilização das emissões de GEE entre as empresas, o que inclusive pode ocorrer entre as unidades da mesma empresa. Cita-se ainda as incertezas inerentes ao processo de elaboração do inventário de GEE, tais como incertezas nos dados coletados.

Neste contexto, embora o conjunto amostral avaliado compreendido pelas 19 empresas respondentes represente os principais *players* do setor, abrangendo 86% da produção de papel e celulose do Brasil, com características diversas, os resultados obtidos refletem



5.4 Diagnóstico sobre descarbonização

A transição para a descarbonização não é um caminho singular, mas uma jornada multifacetada, que requer uma abordagem abrangente envolvendo governança corporativa, soluções técnicas, instrumentos econômicos e políticas públicas, e principalmente engajamento da sociedade e da cadeia de valor.

Neste sentido, com o objetivo de compreender a percepção das empresas do setor de Papel & Celulose e entender qual é o cenário atual em que estão inseridas na temática da descarbonização, foi realizado um diagnóstico sobre descarbonização com os seguintes objetivos específicos:

- Compreender o estágio da governança corporativa climática nas empresas;
- Avanço e ambição das empresas com relação às opções de descarbonização disponíveis;
- Necessidades de suporte (financeiro e técnico), desafios encontrados e expectativas impostas por instrumentos econômicos e políticas públicas; e
- Compreender o estágio de atuação no engajamento das partes interessadas do setor em prol da descarbonização.

O diagnóstico é uma etapa fundamental para construção da estratégia de descarbonização do setor, principalmente na próxima etapa do presente estudo (Capítulo 7) que focará na proposição de recomendações de ações de curto prazo (no horizonte de 2030-2035) e de longo prazo (no horizonte de 2050) para o setor de Papel & Celulose.

5.4.1 Resultados

As contribuições apresentadas no *workshop* participativo setorial, assim como as respostas ao questionário, refletem a experiência prática, os desafios comuns e as inovações em curso no setor, consolidando um panorama atual sobre a governança climática, as ações de descarbonização, as expectativas e tratativas sobre as políticas públicas e instrumentos econômicos, e o engajamento dos diversos públicos internos e externos na temática de mudanças climáticas.

A seguir são apresentados os resultados dessas duas abordagens, o *workshop* participativo setorial (qualitativo) e o questionário (quantitativo e qualitativo), de forma combinada, para ampliar a validade dos resultados, favorecendo uma compreensão mais rica e contextualizada do estágio atual das empresas frente à crise climática.

5.4.1.1 Governança Corporativa Climática

No âmbito corporativo, até o momento, as empresas não são obrigadas a reportar suas emissões ao governo, porém, diante da nova Lei nº 15.042/2024, que institui o Sistema

Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), existe uma previsão de monitoramento e relato das emissões para alguns tipos de empreendimentos. Assim, esse processo de regulamentação impõe a necessidade de preparação das empresas para monitoramento e reporte de suas emissões e remoções de GEE.

Nesse contexto, para realizar um diagnóstico da governança climática corporativa no setor de Papel & Celulose, através do questionário foram feitas perguntas a respeito dos seguintes tópicos:

- Abrangência do setor na elaboração de relatórios de sustentabilidade;
- Abrangência do setor na elaboração de estudos de materialidade e status de priorização do tema descarbonização/mudanças climáticas nesses estudos;
- Existência de comitê de mudanças climáticas responsável pela gestão do tema de Descarbonização;
- Grau de supervisão do conselho de administração sobre o tema de descarbonização/mudanças climáticas;
- Existência de política corporativa de mudanças climáticas;
- Existência de bonificação vinculado às metas de redução de emissões de GEE;
- Existência de treinamento específico relacionado ao tema de descarbonização/mudanças climáticas oferecido aos empregados;
- Existência de “shadow price” (preço interno de carbono) utilizado na tomada de decisão, para medir e verificar o impacto dos novos projetos nas emissões de GEE;
- Existência de metas de redução de emissões de GEE;
- Status do planejamento e desafios para enquadramento à Lei 15.042/2024;

- Participação em posicionamento e/ou compromissos públicos relativo à descarbonização.

Os resultados desse diagnóstico da governança climática corporativa no setor de Papel & Celulose são apresentados e detalhados a seguir.

Dentre as empresas respondentes do questionário, 84% afirmaram elaborar Relatórios de Sustentabilidade. Dentre essas, 87,5% publicaram seu último relatório em 2024 e 12,5% em 2023. Apenas três empresas informaram que ainda não realizam esse tipo de reporte.

Durante o *workshop* foi destacada a crescente preocupação do setor com a adequação dos reportes de sustentabilidade às exigências regulatórias, como os padrões do IFRS e os futuros requisitos da Lei nº 15.042/2024, que exigirão maior transparência das informações climáticas. Ao se compartilhar dados com as partes interessadas — especialmente sobre sustentabilidade e mudanças climáticas — as empresas fortalecem sua marca, protegem sua reputação, ampliam o engajamento dos consumidores e as comunidades locais de suas operações, além de aumentar sua atratividade perante investidores.

Além disso, no questionário, 68% das empresas afirmaram ter elaborado uma matriz de materialidade, e, em todas estas, os temas sobre descarbonização e mudanças climáticas foram considerados prioritários, o que evidencia o avanço no setor na integração da agenda climática à estratégia corporativa.

Quanto à existência de um Comitê de Mudanças Climáticas ou a inclusão do tema de descarbonização sob a gestão de algum outro Comitê existente dentro da empresa, 68% das empresas responderam que possuem o tema sob gestão de algum comitê, e em 63% das empresas respondentes o Conselho de Administração faz parte da gestão sobre o tema de descarbonização/mudanças climáticas na organização.

A importância do envolvimento da alta liderança na gestão da descarbonização foi destacada durante o *workshop* setorial,

especialmente ao se enfatizar que o comitê responsável pelas mudanças climáticas deve estar vinculado diretamente ao Conselho de Administração. Essa estrutura reforça o engajamento efetivo da liderança e assegura que o tema esteja integrado às decisões estratégicas da empresa.

Ainda no *workshop*, a participação ativa da alta liderança nas discussões, no desenvolvimento e na condução das ações de descarbonização foi apontada como fundamental para que a cultura climática seja incorporada de forma consistente por toda a organização, alcançando tanto os níveis estratégicos quanto operacionais.

Sobre colocar “no papel” sua ambição e diretrizes climáticas, 32% das empresas respondentes afirmaram possuir Política Corporativa de Mudanças Climáticas, enquanto 32% afirmaram que o tema é tratado conjuntamente em outras políticas (tais como de Sustentabilidade ou Meio Ambiente). No entanto, outros 32% afirmaram que o tema não está contemplado em nenhuma política da empresa, o que indica um espaço de melhoria no setor. Incluir os temas de mudanças climáticas ou descarbonização em uma política corporativa fortalece o posicionamento estratégico da empresa, garante alinhamento interno, clareza de responsabilidades e integração do tema aos processos de gestão, assegurando que a pauta seja considerada de forma transversal e contínua.

Outro aspecto refere-se à implantação de sistemas de bonificação vinculado às metas de redução de emissões de GEE e/ou outras metas relativas ao tema de descarbonização. Dentre as empresas respondentes 16% afirmaram possuir algum tipo de bonificação vinculado às metas de redução de emissões de GEE e/ou outras metas relativas ao tema de descarbonização. Vincular bonificações às metas de redução de emissões de GEE estimula o engajamento da liderança e dos colaboradores com a agenda climática, alinhando interesses individuais com os objetivos estratégicos da organização, reforçando a cultura colaborativa de sustentabilidade e contribuindo para o alcance mais efetivo das metas climáticas.

Outra boa prática é a oferta de treinamentos específicos sobre descarbonização e

mudanças climáticas para os empregados. Atualmente, apenas 21% das empresas afirmaram oferecer esse tipo de capacitação, o que indica que ainda há espaço significativo para avanços no engajamento e na formação interna sobre o tema, principalmente pois quem irá de fato implementar as ações e mudanças na operação em prol da descarbonização são os funcionários da própria operação, os quais precisam entender o porquê da importância de sua contribuição às metas climáticas da empresa.

Quanto a consideração de critérios climáticos na avaliação de projetos e ações das empresas, durante o *workshop*, foi ressaltada a importância da média gerência de, quando for apresentar um projeto de descarbonização para o conselho de administração ou acionistas, de mostrar não só os benefícios climáticos, mas sim todos os impactos positivos e negativos decorrentes do projeto. Isto, é bem oportuno, pois muitas ações de descarbonização têm benefícios financeiros relevantes, como a diminuição de custos ou riscos operacionais; ou geram impactos positivos secundários importantes, como algum benefício social ou mitigação de algum impacto ambiental secundário (por exemplo, redução de caminhões nas estradas pela adoção do modal ferroviário diminui risco de atropelamento de fauna e incômodo por ruído e poeira nas comunidades locais). Inclusive, 26% afirmaram possuir um "shadow price" (preço interno de carbono) utilizado na tomada de decisão para medir e verificar o impacto dos novos projetos nas emissões de GEE. Dessas, 75% informaram o valor praticado do preço interno de carbono, sendo a média de R\$ 264 por tonelada de CO₂ equivalente (sendo o valor máximo de cerca de R\$ 683 e mínimo, de R\$ 40).

No mesmo contexto, durante o *workshop*, foi discutida a prática comum das empresas considerarem o risco tecnológico na avaliação de novos projetos, mas negligenciarem o chamado "risco de inação" — ou mais comumente conhecido por risco de oportunidade. Foi argumentado que muitas organizações preferem aguardar que outras adotem primeiro tecnologias emergentes, permitindo que estas assumam os riscos iniciais. No entanto, essa postura conservadora pode gerar desvantagens competitivas, já que os benefícios obtidos por empresas pioneiras —

como ganhos de eficiência, reputação e acesso antecipado a incentivos de mercado — têm superado os desafios associados à curva de aprendizado. Com a iminente implementação de instrumentos econômicos como o mercado regulado de créditos de carbono no Brasil, empresas que demorem a agir poderão perder espaço competitivo.

Sobre esses riscos de transição, que se referem aos potenciais impactos financeiros e operacionais que uma empresa pode enfrentar durante a transição para uma economia de baixo carbono, principalmente decorrente de mudanças em políticas públicas e legislação, foi perguntado às empresas como elas têm se preparado para atender à Lei 15.042/2024 e quais são suas preocupações correlatas. As respostas abertas foram categorizadas por temas, e o resultado é apresentado na figura 20 a seguir.

Dentre as empresas respondentes 26% têm buscado aumentar a expertise técnica interna no assunto. Já metade das empresas (53%) destacou que como já realiza a mensuração e o reporte de suas emissões por meio de inventários corporativos, isto contribuirá para sua adequação à nova legislação.

Como antecipação ao artigo 29, inciso III, que demanda que "ficam os operadores das instalações e das fontes reguladas no âmbito do SBCE obrigados a: ... enviar relato de conciliação periódica de obrigações", ou seja, compensar emissões acima da alocação futuramente alocada, pela compra de créditos de carbono (denominados na lei de "Certificado de Redução ou Remoção Verificada de Emissões - CRVE), metade das empresas (53%) citaram que já vêm realizando ou estudam implantar ações de descarbonização, para abater suas emissões de GEE, e assim evitar possíveis necessidades de compra de crédito para compensá-las no âmbito de *compliance* da lei.

Inclusive, um ponto levantado pelas empresas foi o estabelecimento de um limite de emissão de GEE para o setor por parte da Lei e a preocupação que esse limite não faça o reconhecimento de esforços históricos em redução de emissões de GEE, conforme demonstrado pelos resultados da pesquisa feita com as empresas do setor para levantamento do diagnóstico de descarbonização, conforme apresentado no item 5.4 do presente documento.

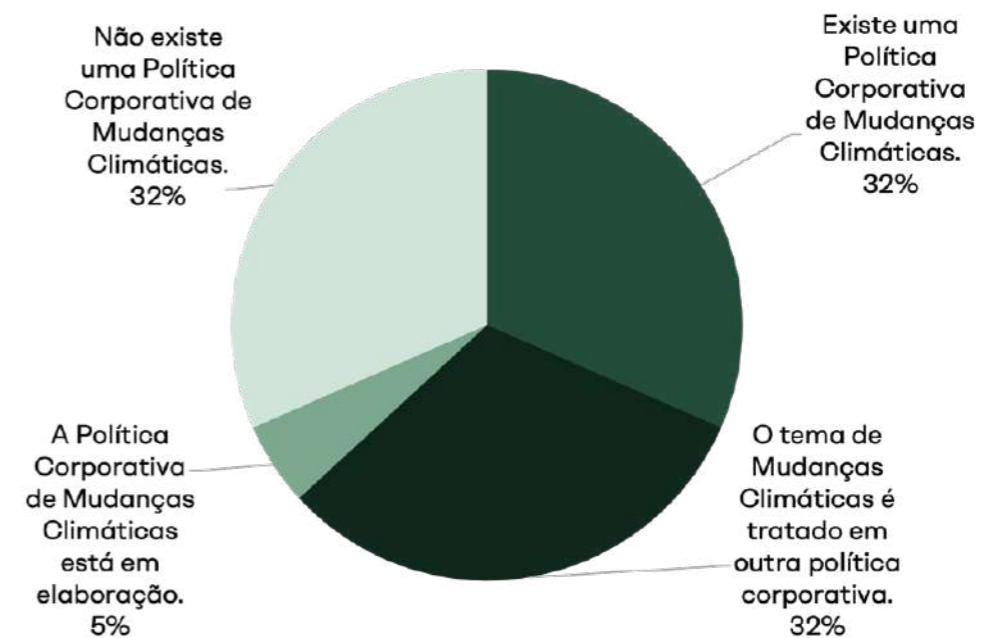


Figura 19 – Status de implantação de uma Política Corporativa de Mudanças Climáticas no setor de Papel & Celulose.

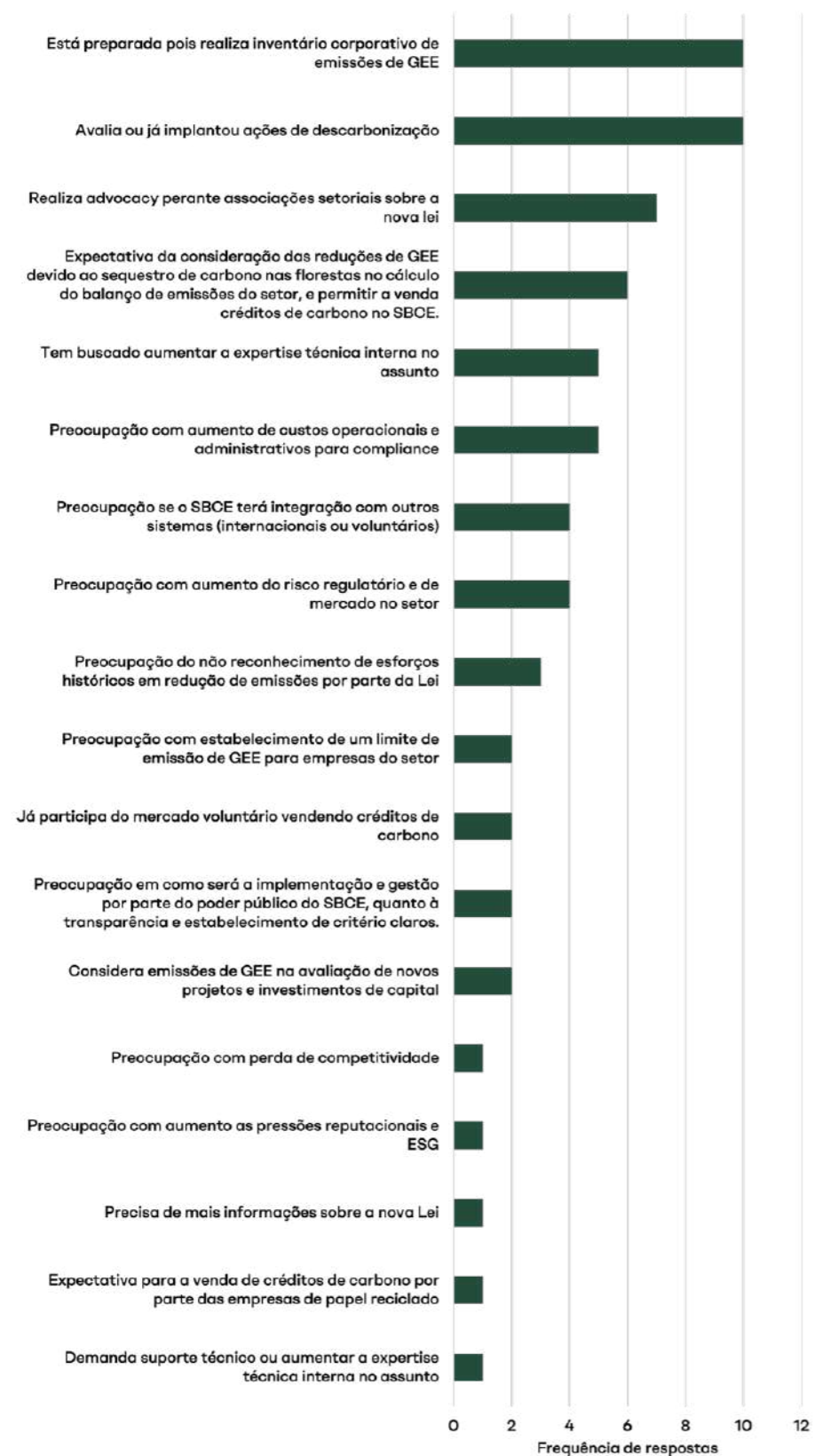


Figura 20 - Diagnóstico das ações de preparo realizadas e preocupações quanto à nova Lei 15.042/2024, citadas pelas empresas do setor de Papel & Celulose no questionário.

Mais além, outros pontos de atenção apresentados pelas empresas foram se a implementação e gestão do SBCE por parte do poder público será bem estruturada, com regras claras e transparentes; o aumento de custos operacionais e administrativos para *compliance* com a nova lei; o aumento do risco regulatório e de mercado no setor e a potencial perda de competitividade consequente; além do aumento das pressões reputacionais e com demandas ESG.

No entanto, algumas empresas já vislumbram oportunidades com a nova lei, e tem a expectativa de venda de créditos de carbono, tanto por parte das empresas de papel reciclado que atuam na economia circular, quanto pela consideração das remoções de GEE devido ao sequestro de carbono nas florestas no cálculo do balanço de emissões do setor. Cabe salientar que a geração destes créditos depende de uma análise criteriosa de diversos parâmetros que validam os benefícios adicionais de cada projeto.

Inclusive, algumas empresas afirmaram já participarem do mercado voluntário vendendo créditos de carbono e mostraram-se preocupadas se haverá integração clara e facilitada com outros sistemas de mercado de carbono (internacionais ou voluntários).

Por fim, para gerenciar esses riscos de transição envolvidos com a nova Lei, um terço das empresas disseram estar fazendo "advocacy" perante associações setoriais e o poder público, para que as peculiaridades do setor sejam consideradas na regulamentação da lei 15.042/2024.

Cabe salientar que o setor de Papel & Celulose é responsável pela proteção e regeneração de 7,01 milhões de hectares de florestas nativas no Brasil, mas que também traz outros benefícios ambientais e sociais, como o citado pelas empresas durante o *workshop*, que reforçaram que o setor, ao proteger e regenerar as florestas nativas, corrobora em assegurar a continuidade do serviço ecossistêmicos de provisão e de regulação (fixação de carbono na conservação ambiental).

Outros riscos de transição recaem sobre o setor. Novas regulações e instrumentos

econômicos vem surgindo, a nível nacional e internacional, em diversos outros setores envolvidos na cadeia de valor do setor de Papel & Celulose. Um exemplo foi citado durante o *workshop*, a respeito do setor logístico marítimo, que vem recebendo novas regulamentações importantes clamando por sua descarbonização. Em maio de 2025, a Organização Marítima Internacional ("IMO", sigla em inglês) aprovou um novo conjunto de medidas regulatórias com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes do setor de transporte marítimo internacional, denominado "IMO Net-zero Framework". Este novo marco regulatório estabelece o primeiro mecanismo mundial de taxaço de emissões, que será aplicado a partir de 2028, com um preço inicial de 100 USD por tonelada de CO₂. Nesse contexto, as empresas do setor de Papel & Celulose inseridas em cadeias de valor globais precisarão iniciar o mapeamento e gerir suas emissões logísticas marítimas com cautela. Isso retira o escopo 3 da categoria de "boa prática voluntária" e torna-se instrumento essencial de gestão e minimização de custos.

Quanto ao monitoramento dos riscos climáticos, não só os de transição são relevantes. Durante o *workshop*, os riscos climáticos foram discutidos sob a perspectiva de sua materialização crescente.

Foi frisado o fato de o setor de Papel & Celulose ser altamente dependente de recursos naturais como florestas e água, e assim estar exposto cada vez mais a uma série de impactos das mudanças climáticas. Foram destacados eventos como incêndios florestais, inundações e ventos extremos que já afetam diretamente operações florestais, industriais, logísticas e o capital humano das empresas de Papel & Celulose no Brasil. Assim, um mapeamento dos riscos físicos não é mais um diferencial, e sim uma ferramenta de gestão necessária. As empresas apontaram a necessidade urgente de mapear esses riscos ao longo da cadeia, valorando financeiramente seus impactos e elaborando planos de contingência.

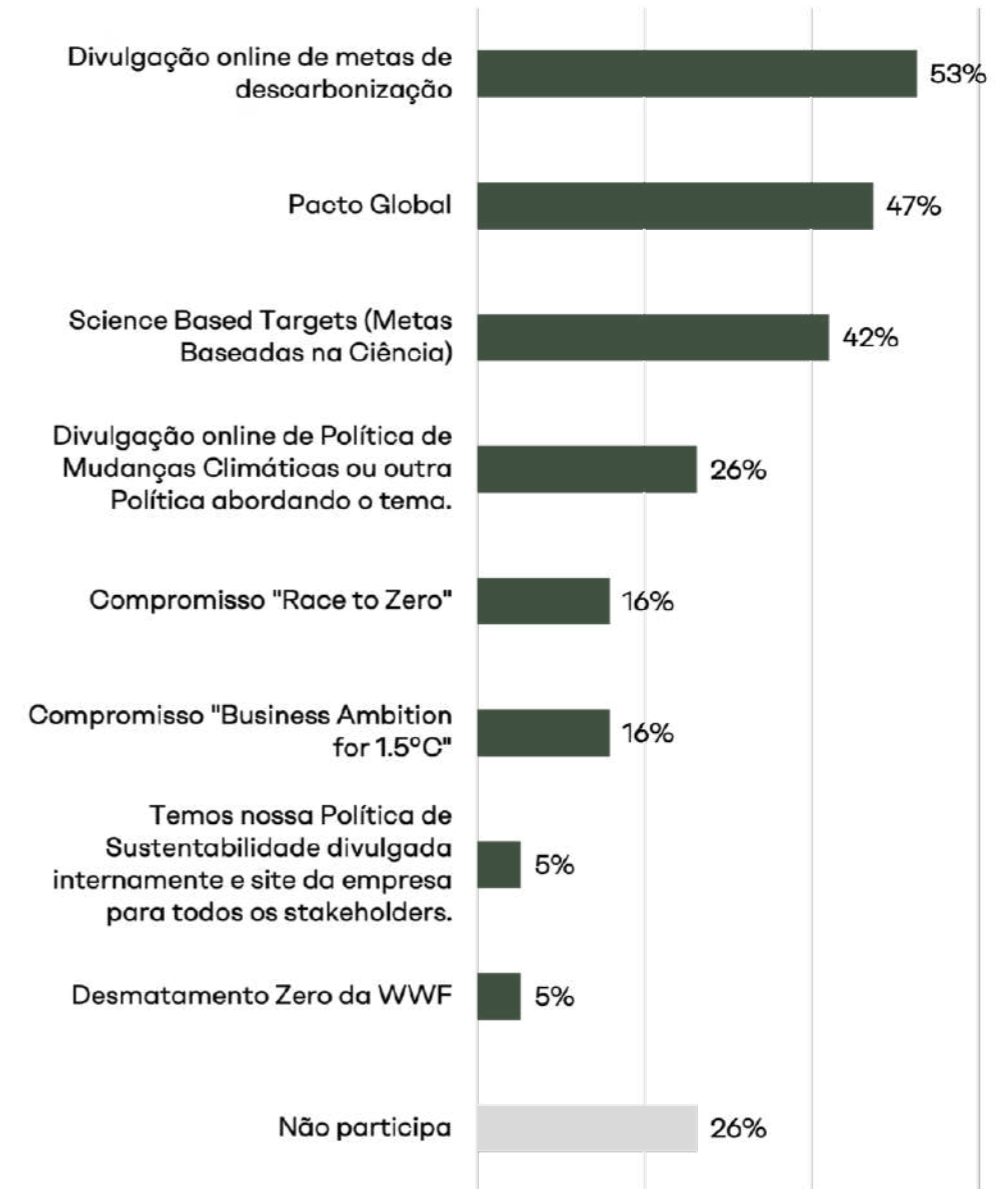
Os painelistas ressaltaram ser fundamental que as empresas integrem os riscos climáticos à sua governança corporativa e às análises de risco, os quais devem ser tratados como ameaças reais tanto operacionais quanto

financeiras, inclusive devendo-se fazer a valoração financeira dos riscos físicos e de transição. Ressaltou-se ainda a importância de se considerar critérios relacionados a descarbonização e aos riscos climáticos, desde a concepção dos novos projetos industriais e operacionais.

Foi ressaltada ainda a importância de empresas com operação global terem uma estrutura de governança corporativa climática local, para poder olhar e tratar tanto os riscos climáticos quanto as oportunidades de descarbonização conforme as especificidades de cada país, e principalmente, do local e comunidade do entorno de suas operações. Assim, ressaltou-se a importância de se elaborar e publicar não somente um IGEE Global, mas sim estratificado por país, dado que o padrão de emissão de GEE difere de acordo com o local da operação assim como as dificuldades e oportunidades de descarbonização são diferentes entre países.

Quanto a ambição climática das empresas do setor, em suas respostas ao questionário, 58% das empresas respondentes afirmaram possuir metas de redução de emissões de GEE. Das empresas respondentes ao questionário, 53% afirmaram possuir metas de redução de emissões de GEE do escopo 1 e 2, enquanto 21% empresas afirmaram possuir metas de redução de emissões de GEE do escopo 3.

Em relação à divulgação de sua ambição climática por meio de compromissos públicos, em resposta ao questionário, 74% assumiram algum posicionamento/compromisso público relativo à descarbonização. Na figura 21 a seguir é apresentado o percentual das empresas respondentes por tipo de compromisso público.



PERCENTUAL DAS EMPRESAS QUE ADOTAM O POSICIONAMENTO/COMPROMISSO PÚBLICO

Figura 21 - Percentual das empresas do setor de Papel & Celulose respondentes por tipo de compromisso público voltado para a descarbonização assumido. Nota: amostra de 19 empresas respondentes.

5.4.1.2 Soluções Técnicas

Em 2026 foi lançado o Sumário Executivo do Plano Nacional sobre Mudança do Clima (Plano Clima 2024-2035) (MMA, 2026) pelo Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, o qual traz as principais ações, alavancas e metas do Plano Setorial da Indústria, como mostrado na figura 22.

Específico para o setor de Papel & Celulose, o Plano Setorial da Indústria (MDIC, 2025) indica as principais tendências de mitigação, no horizonte de curto prazo (2030-2035) e de longo prazo (2050), as quais são apresentadas na tabela abaixo, que inclui a informação sobre potencial de mitigação de cada medida, bem como as principais barreiras, cobenefícios e impactos adversos.

Nesse contexto, visando realizar um diagnóstico do status das ações de descarbonização no setor de Papel & Celulose no Brasil, através do questionário, as empresas respondentes foram convidadas a indicar quais ações de descarbonização elas já implantaram, estão implantando ou estão estudando a sua implantação. As alternativas de descarbonização foram segregadas em 7 grupos temáticos, a saber:

- Ações de melhoria da eficiência operacional
- Soluções técnicas para a transição energética
- Ações visando a adaptação climática
- Ações de circularidade e reaproveitamento de resíduos
- Soluções técnicas de captura de carbono
- Criação de novos bioprodutos
- Solução técnica para redução de emissões fugitivas

A seguir são detalhados esses resultados da pesquisa sobre o estágio de adoção das soluções técnicas de descarbonização no setor de Papel & Celulose do Brasil.

Cabe, no entanto, ressaltar que o questionário foi respondido de forma organizacional pelas empresas, assim, não se levantou o estágio de adoção das ações de descarbonização por unidade operacional. Isso significa que, por exemplo, quando uma empresa respondeu que “já implantou” uma ação, pode ser que seja apenas em uma ou algumas unidades, não na totalidade de unidades onde é possível a implantação daquela ação. Assim, o potencial de descarbonização adicional das emissões de GEE de cada ação (soma dos percentuais de ações em estudo e não implantadas) tende a ser maior do que o apresentado nas tabelas 2 a 7 a seguir, cabendo a cada organização analisar a viabilidade de expandir a adoção das ações de descarbonização para incluir a totalidade de suas operações.

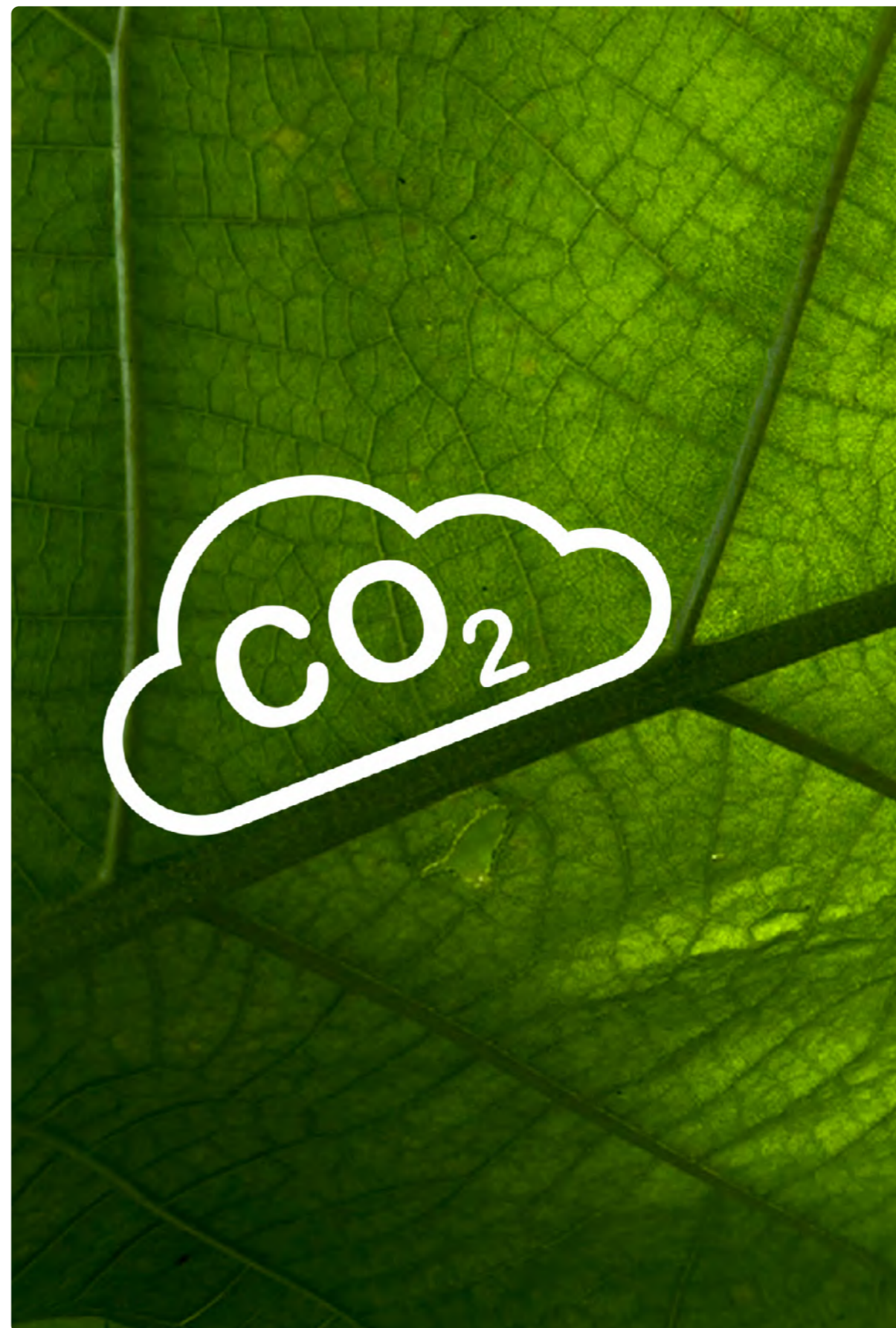


Figura 22

5 AÇÕES IMPACTANTES E 12 AÇÕES ESTRUTURANTES

Principais ações, alavancas e metas do Plano Setorial da Indústria.

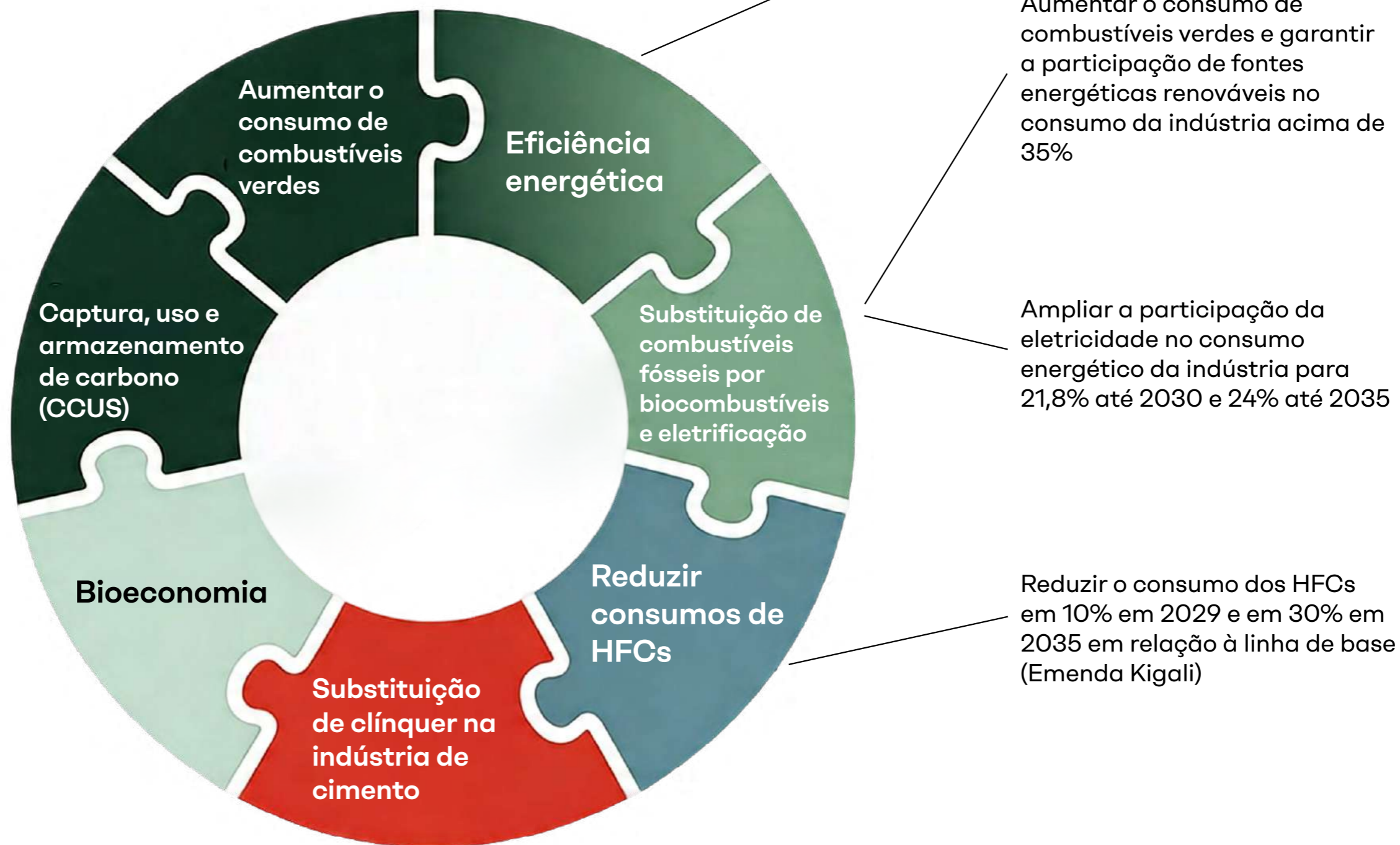


Figura 22 - Fonte: Adaptado de MMA, 2025.

	Principais tendências de mitigação do setor de Papel & Celulose	Potencial de mitigação	Mecanismo climático associado	Principais barreiras	Nível de esforço para implementação
Tendências 2030 - 2035	Expansão de áreas com florestas plantadas e nativas, aumentando as remoções	Alto	Remoção de CO ₂	Disponibilidade: áreas disponíveis para uso Financeiro: concorrência por áreas com culturas mais atrativas	Médio/ Amplamente difundido
	Substituição de combustíveis fósseis por biomassa em caldeiras e fornos	Alto	Redução de emissão de GEE	Maturidade tecnológica e financeira	Médio/ Incipiente
	Sistemas de cogeração para produção de energia renovável, reduzindo o consumo do GRID	Alto	Redução de emissão de GEE	Maturidade tecnológica e financeira	Médio/ Amplamente difundido*
	Reaproveitamento de resíduos de valor agrônomico	Médio	Redução de emissão de GEE	Regulatório, Maturidade tecnológica e financeira	Alto/ Incipiente
	Redução de emissão nos transportes	Médio	Redução de emissão de GEE	Maturidade tecnológica e financeira	Alto/ Incipiente
Tendências 2050	Uso de combustíveis alternativos de fontes renováveis (hidrogênio, entre outros)	Alto	Redução de emissão de GEE	Maturidade tecnológica, financeiro e regulatório: produção de hidrogênio tem evoluído, por meio de parcerias público-privadas e cooperação internacional, o que futuramente auxiliará na viabilidade econômica	Alto/ Incipiente
	Redução de emissão nos transportes	Alto	Redução de emissão de GEE	Maturidade tecnológica e financeiro	Alto/ Incipiente

Tabela 1 - Principais tendências de mitigação do setor de Papel & Celulose, no horizonte de curto prazo (2030-2035) e no longo prazo (2050), conforme Plano Setorial da Indústria (MDIC, 2025). Fonte: MDIC, 2025. Nota*: Amplamente difundido em plantas novas, mas pouco difundido em plantas mais antigas.

5.4.1.2.1 Ações de Melhoria da Eficiência Operacional

As ações que visam promover a melhoria da eficiência operacional se referem àquelas que alteram os parâmetros de intensidade da operação, principalmente aqueles relacionados ao consumo de recursos naturais ou de serviços, tais como: consumo de pesticida por tonelada de madeira, consumo de óleo combustível por tonelada de celulose, consumo de ácido sulfúrico por tonelada de celulose branqueada, consumo de diesel por quilômetro rodado, número de viagens por funcionário por ano.

Na figura 23 a seguir é apresentado o resultado do diagnóstico do status das ações de melhoria da eficiência operacional no setor de Papel & Celulose, considerando todas as empresas respondentes, que indicaram se já implantaram, estão em implantação, estão estudando, ou àquelas soluções as quais não são aplicadas a elas. Nota-se que as ações estão em ordem decrescente de implantação, ou seja, aquela com maior percentual de implantação para aquela com menor percentual.

Análise:

Na figura 23 a seguir faz-se uma análise da figura acima e um detalhamento do status de cada ação de descarbonização voltada para promover a melhoria da eficiência operacional no setor de Papel & Celulose. Nota-se que são apresentados gráficos do percentual das repostas das empresas respondentes para cada estágio de adoção da ação de descarbonização, porém, em relação ao total de empresas para as quais a solução é aplicável. Ainda, ressalta-se que as soluções estão ordenadas iniciando-se pela mais adotada até a menos adotada, assim, as últimas soluções são aquelas com potencial de descarbonização adicional das emissões de GEE do setor.

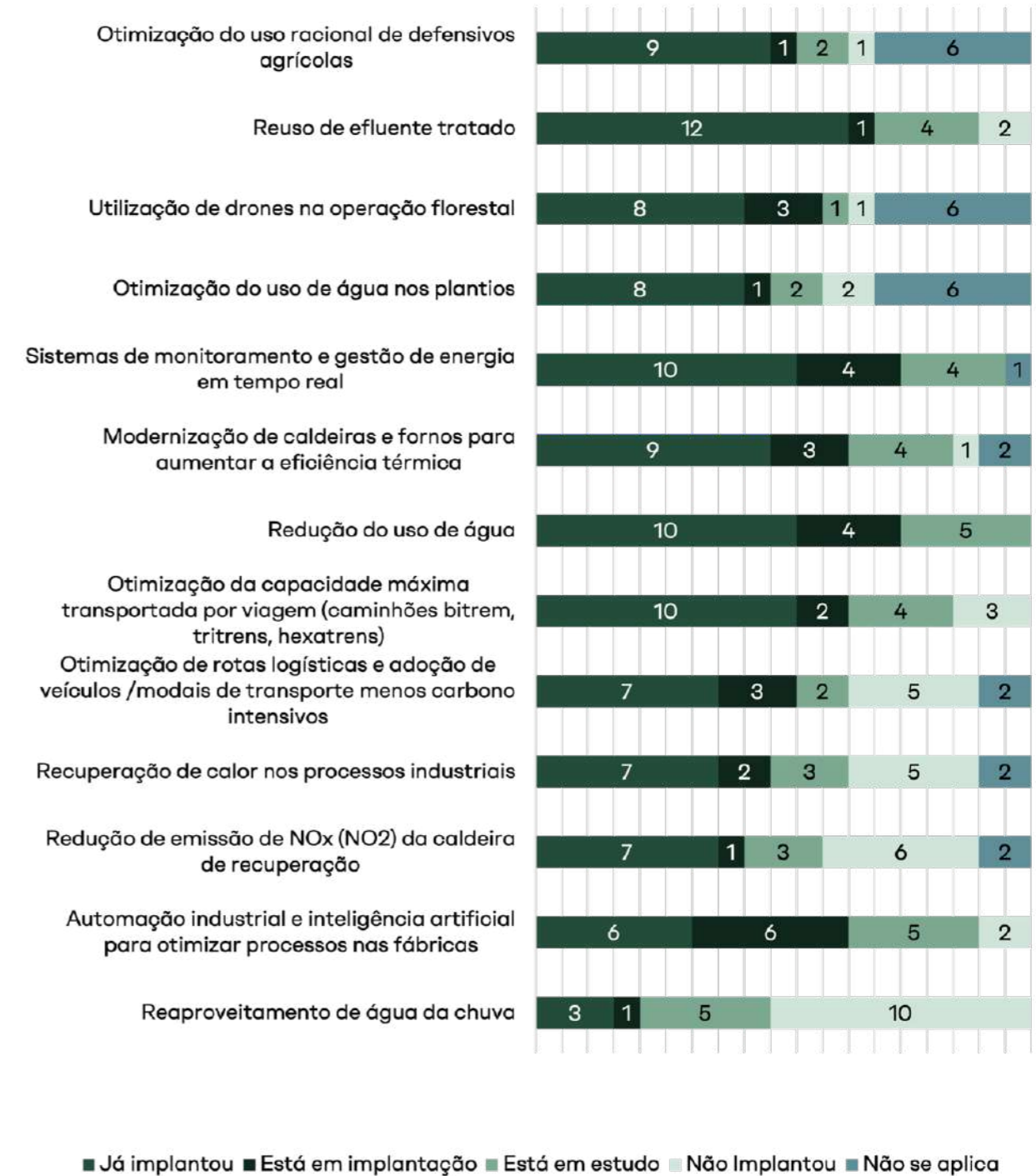
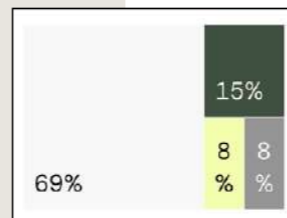


Figura 23 - Diagnóstico do status das ações de descarbonização voltadas a melhoria da eficiência operacional no setor de Papel & Celulose no Brasil. Nota: amostra 19 empresas (que representam 86% da produção nacional de papel e celulose).

TABELA 2 - STATUS DE IMPLEMENTAÇÃO DAS AÇÕES DE DESCARBONIZAÇÃO VOLTADAS A MELHORIA DA EFICIÊNCIA OPERACIONAL.

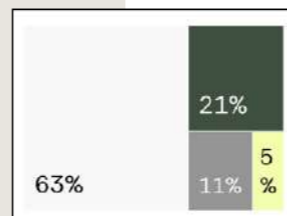
OTIMIZAÇÃO DO USO DE DEFENSIVOS AGRÍCOLAS

Ação já implantada por 69% das empresas, em implantação por 8% das empresas e em estudo por 15% delas, com uma lacuna de implantação em 8% das empresas restantes. Ao se adotar medidas para diminuir o consumo de defensivos agrícolas na operação florestal, as emissões de escopo 1 & 3 associadas à produção, transporte e aplicação de agroquímicos são minimizadas.



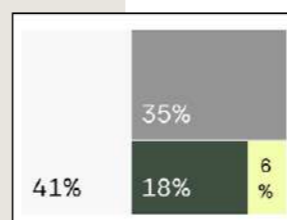
REUSO DE EFLUENTE TRATADO

Ação já implantada por 63% das empresas, em implantação por 5% das empresas e em estudo por 21% delas, com uma lacuna de implantação em 11% das empresas restantes. Essa ação contribui para a redução do consumo de água bruta, de insumos e da energia associada ao seu bombeamento e tratamento, reduzindo emissões correlatas de GEE.



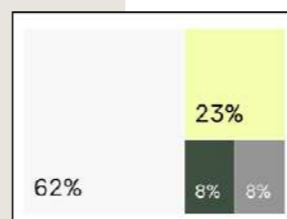
REDUÇÃO DE EMISSÃO DE NOX (NO₂) DA CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO

Ação já implantada por 41% das empresas, em implantação por 6% das empresas e em estudo por 18% das empresas, com uma lacuna de implantação em 35% das empresas restantes. Embora o NO₂ não seja um GEE direto, ele contribui para a formação do ozônio troposférico. Diferentemente do ozônio estratosférico, presente na camada de ozônio, que atua na proteção contra a radiação ultravioleta, o ozônio troposférico absorve radiação infravermelha (calor), contribuindo para o efeito estufa.



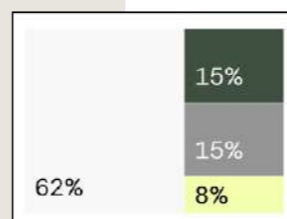
UTILIZAÇÃO DE DRONES NA OPERAÇÃO FLORESTAL

Ação já implantada por 62% das empresas, em implantação por 23% das empresas e em estudo por 8% das empresas, com uma lacuna de implantação em 8% das empresas restantes. A operação florestal tem muito a se beneficiar com novas tecnologias de monitoramento e sensoriamento, tal como o uso de drones. Essa ação reduz emissões de GEE de combustão móvel oriundas de deslocamentos desnecessários e tem o potencial de otimizar a operação florestal em diversos modos, tal como identificação de árvores que demandam desbastes, locais nos plantios atingidos por pragas, incêndios no plantio, entre outras funções. No entanto, cabe pontuar a necessidade de energia ou combustível para operação dos drones, os quais devem vir preferencialmente de fontes renováveis, para potencializar esta ação.



OTIMIZAÇÃO DO USO DE ÁGUA NOS PLANTIOS

Ação já implantada por 62% das empresas, em implantação por 8% e em estudo por outros 15% delas, com uma lacuna de implantação em 15% das empresas restantes. Essa ação reduz a energia necessária para irrigação, além de preservar recursos hídricos, contribuindo para a mitigação de riscos climáticos.



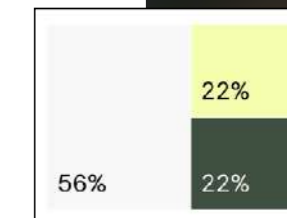
LEGENDA

JÁ IMPLANTOU	ESTÁ EM ESTUDO
ESTÁ EM IMPLANTAÇÃO	NÃO IMPLANTOU

SISTEMAS DE MONITORAMENTO E GESTÃO DE ENERGIA EM TEMPO REAL



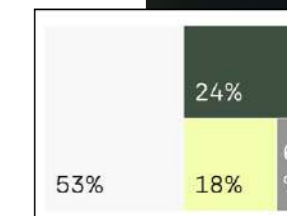
Ação já implantada por 56% das empresas, em implantação por 22% das empresas e em estudo por 22% delas. Esta ação proporciona maior eficiência no uso da energia "na raiz", ou seja, permite a rápida identificação e correção de desperdícios, o que reduz as emissões de GEE associadas.



MODERNIZAÇÃO DE CALDEIRAS E FORNOS PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA TÉRMICA



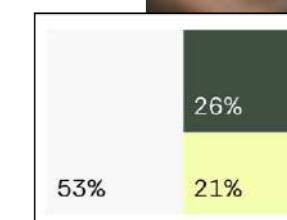
Ação já implantada por 53% das empresas, em implantação por 18% das empresas e em estudo por outros 24% das empresas, com uma lacuna de implantação em 6% das empresas restantes. Equipamentos mais modernos tendem a ter maior eficiência térmica com menor consumo de combustível por unidade de energia gerada, reduzindo significativamente as emissões de GEE diretas, visto demandar a queima de menos combustível por tonelada de vapor gerado.



REDUÇÃO DO USO DE ÁGUA



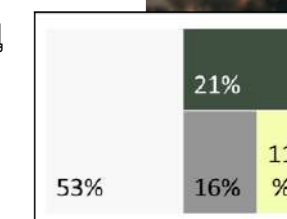
Ação já implantada por 53% das empresas, em implantação por 21% das empresas e em estudo por 26% das empresas. Ao se diminuir a demanda hídrica para sua operação, além de diminuir seu risco climático devido a potencial intensificação da escassez hídrica em algumas regiões do Brasil, esta ação implica em menor consumo de energia e insumos para captação e tratamento de água bruta e para tratamento e descarte de efluente tratado, reduzindo emissões associadas a esses processos.



OTIMIZAÇÃO DA CAPACIDADE MÁXIMA TRANSPORTADA POR VIAGEM (POR EXEMPLO, CAMINHÕES BITREM, TRITRENS, HEXATRENS)



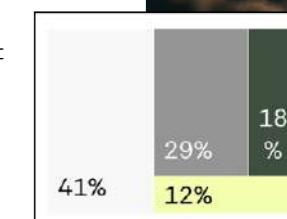
Ação já implantada por 53% das empresas, em implantação por 11% das empresas e em estudo por 21% das empresas, com uma lacuna de implantação em 16% das empresas restantes. Ao se priorizar uma frota com maior capacidade máxima transportada por viagem, aumenta-se diretamente a eficiência da operação logística, reduzindo o número de viagens e, conseqüentemente, custos, consumo de combustível (normalmente diesel) e impactos correlatos, tal como diminui as emissões de CO₂ por tonelada transportada.



RECUPERAÇÃO DE CALOR NOS PROCESSOS INDUSTRIAIS

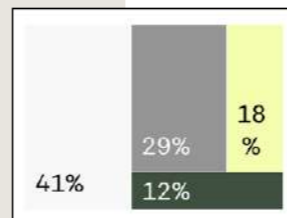


Ação já implantada por 41% das empresas, em implantação por 12% das empresas e em estudo por 18% das empresas, com uma lacuna de implantação em 29% das empresas restantes. Ao se aproveitar o calor residual para outras etapas do processo produtivo, reduz-se a necessidade de geração térmica adicional e as emissões associadas.



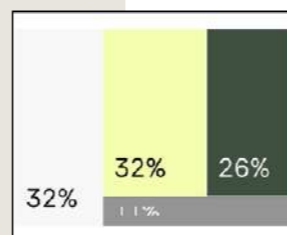
OTIMIZAÇÃO DE ROTAS LOGÍSTICAS E ADOÇÃO DE VEÍCULOS / MODAIS DE TRANSPORTE MENOS CARBONO INTENSIVOS:

Ação já implantada por 41% das empresas, em implantação por 18% das empresas e em estudo por 12% das empresas, com uma lacuna de implantação em 29% das empresas restantes. Quando há a priorização das menores rotas logísticas, há um menor consumo de combustíveis. Adicionalmente, ao se priorizar frotas mais novas, tais veículos apresentam parâmetros de operação melhores em termos de eficiência no consumo de combustível por km rodado, o que reduz as emissões logísticas diretamente. Da mesma forma, as emissões logísticas podem ser mitigadas ao se optar por veículos menos intensivos em carbono, tais como aqueles movidos a gás natural, biocombustíveis ou elétricos, ou ao se optar por modais logísticos alternativos ao rodoviário, como hidroviário ou ferroviário.



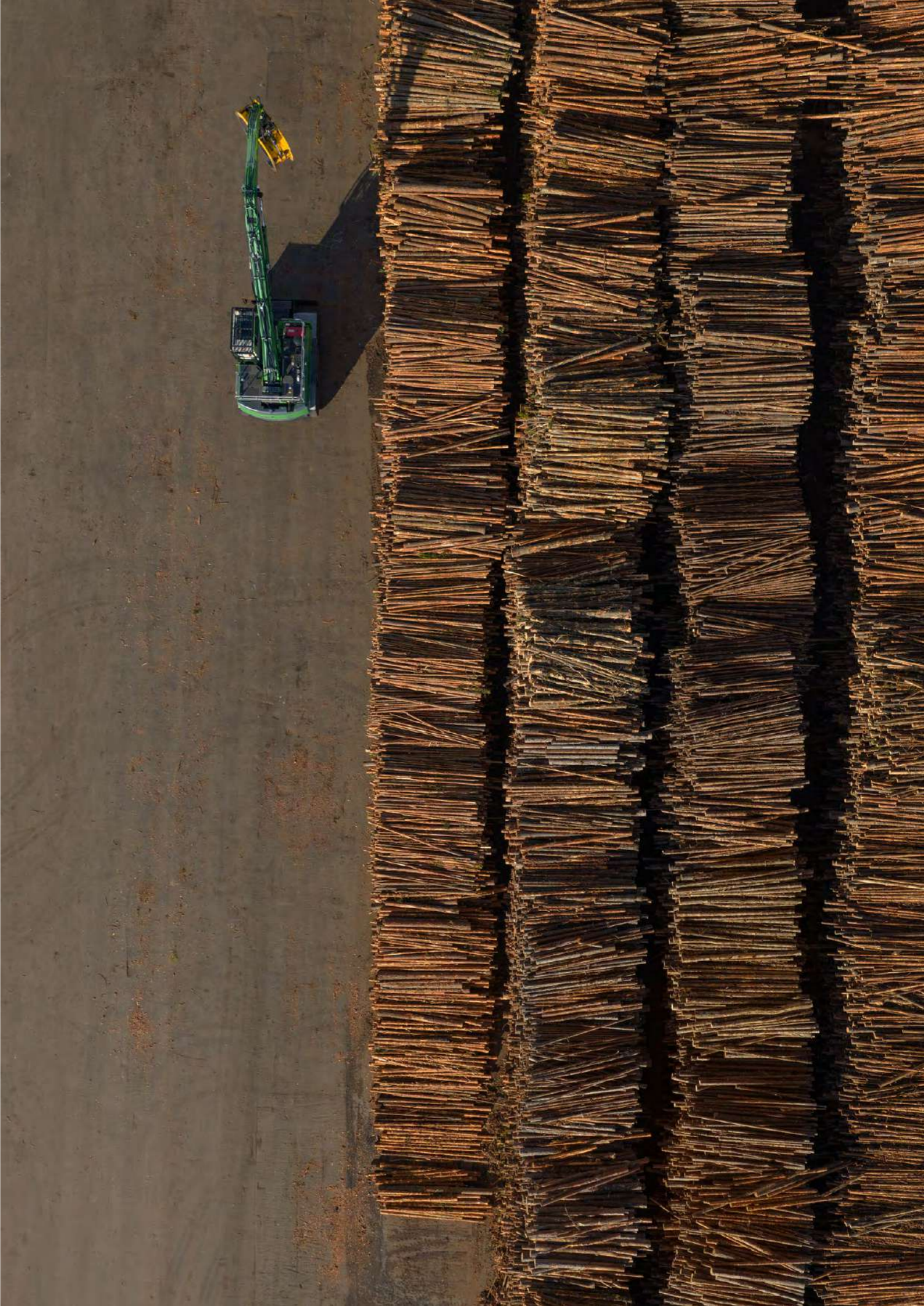
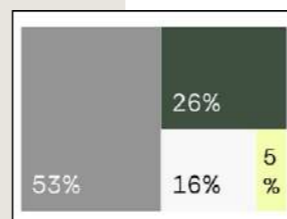
AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA OTIMIZAR PROCESSOS NAS FÁBRICAS

Ação já implantada por 32% das empresas, em implantação por 26% das empresas e em estudo por 11% das empresas, com uma lacuna de implantação em 32% das empresas restantes. Esta ação aumenta a eficiência energética e operacional, reduzindo consumo e desperdício de insumos e energia e, conseqüentemente, as emissões de GEE correlatas.



REAPROVEITAMENTO DE ÁGUA DA CHUVA

Ação já implantada por 16% das empresas, em implantação por 5% das empresas e em estudo por 26% das empresas, com uma lacuna de implantação em 53% das empresas restantes. Esta ação implica em menor consumo de energia e insumos para captação e tratamento de água bruta e para tratamento e descarte de efluente tratado, reduzindo emissões associadas a esses processos.



5.4.1.2.2 Soluções Técnicas para a Transição Energética

As soluções técnicas para transição energética se referem àquelas que visam substituir o consumo de combustível fóssil por alguma fonte de energia renovável. Na figura a seguir é apresentado o resultado do diagnóstico do status das ações voltadas à transição energética no setor de Papel & Celulose, considerando todas as empresas respondentes, que indicaram se já implantaram, estão em implantação, estão estudando, ou àquelas soluções as quais não são aplicadas a elas.

Análise:

Na tabela 3 a seguir faz-se uma análise da figura acima e um detalhamento do estágio de adoção atual de cada ação de descarbonização voltada para a transição energética no setor de Papel & Celulose. Nota-se que são apresentados gráficos do percentual das repostas das empresas respondentes para cada estágio de adoção da ação de descarbonização, porém, em relação ao total de empresas para as quais a solução é aplicável. Ainda, ressalta-se que as soluções estão ordenadas iniciando-se pela mais adotada até a menos adotada, assim, as últimas soluções são aquelas que possuem maior potencial de descarbonização adicional das emissões de GEE do setor.

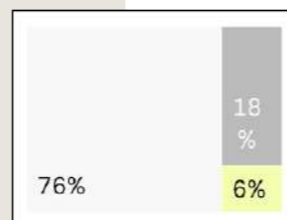


Figura 24 - Frequência das respostas para cada solução técnica voltada para a transição energética no setor de Papel & Celulose, considerando todas as empresas respondentes.

TABELA 3 – STATUS DE IMPLEMENTAÇÃO DAS AÇÕES DE DESCARBONIZAÇÃO VOLTADAS A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA.

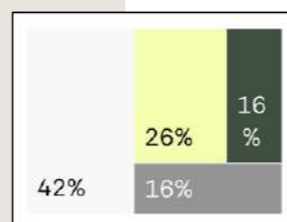
ADOÇÃO DE COGERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE BIOMASSA

Ação já implantada por 76% das empresas e em implantação por 6% delas, com uma lacuna de implantação em 18% das empresas restantes. Esta ação permite o aproveitamento de resíduos orgânicos (como o licor negro, cavacos fora do padrão ou resíduos do pátio de madeira) para geração simultânea de vapor e eletricidade, substituindo fontes fósseis por fontes de emissões de não fósseis.



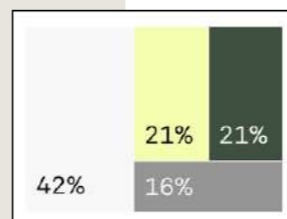
SUBSTITUIÇÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS POR BIOCOMBUSTÍVEIS

Ação já implantada por 42% das empresas, em implantação por 26% das empresas e em estudo por 16% das empresas, com uma lacuna de implantação em 16% das empresas restantes. A troca de fontes fósseis por biocombustíveis (como biodiesel ou etanol substituindo diesel e gasolina em veículos; ou biomassa substituindo carvão ou óleo combustível nas caldeiras e fornos) reduz as emissões de CO₂ fósseis, substituindo por emissões não fósseis. Observa-se no mercado que está em fase experimental o uso de hidrogênio verde para fornos ou caldeiras e o aquecimento por micro-ondas ou indução para secagem de papel.



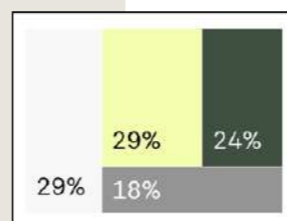
PRODUÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA SOLAR, EÓLICA OU OUTRA RENOVÁVEL

Ação já implantada por 42% das empresas, em implantação por 21% das empresas e em estudo por 21% das empresas, com uma lacuna de implantação em 16% das empresas restantes. A geração de eletricidade a partir de fontes renováveis emite significativamente menos gases do efeito estufa, podendo substituir o consumo de eletricidade da rede do Sistema Interligado Nacional, que ainda possui parcela fóssil significativa, que varia conforme a necessidade de operar as termelétricas do país conforme a disponibilidade hídrica.



SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES E EQUIPAMENTOS À COMBUSTÃO FÓSSIL POR ELÉTRICOS

Ação já implantada por 29% das empresas, em implantação por 29% delas e em estudo por outros 24%, com uma lacuna de implantação em 18% das empresas restantes. A eletrificação de equipamentos a combustão fóssil reduz diretamente as emissões de CO₂ fóssil. Mesmo se a demanda elétrica for atendida pelo Sistema Interligado Nacional, ainda que este possua parcela fóssil na matriz energética, a intensidade de emissões de GEE da rede nacional será mais vantajosa em comparação à combustão fóssil. Há potencial da adoção da eletrificação em várias frentes do setor de Papel & Celulose, tanto na operação florestal, pela adoção de maquinários elétricos, quanto pelo uso de empilhadeiras elétricas nas unidades fabris.



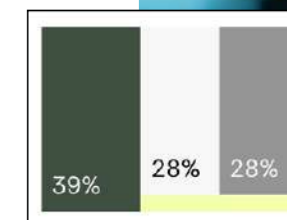
LEGENDA

JÁ IMPLANTOU	ESTÁ EM ESTUDO
ESTÁ EM IMPLANTAÇÃO	NÃO IMPLANTOU

ADOÇÃO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS NA FROTA (EX: BIODIESEL, CAMINHÕES ELÉTRICOS OU HÍBRIDOS)



Ação já implantada por 28% das empresas, em implantação por 6% delas e em estudo por 39% das empresas, com uma lacuna de implantação em 28% das empresas restantes. A substituição na operação logística de combustíveis fósseis por fontes com menor pegada de carbono (combustíveis renováveis, gás natural ou energia elétrica) reduz-se significativamente as emissões de CO₂ fóssil.

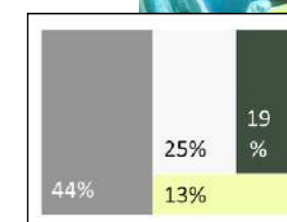


Durante o *workshop* ressaltou-se que o uso de caminhões elétricos já se mostrou viável, tanto técnica quanto economicamente, para o transporte de cargas menores e em trajetos de curta distância. No entanto, ainda há desafios para o uso de caminhões a GNV e elétricos para cargas maiores e traslados mais distantes, como a baixa autonomia dos veículos, a escassez de pontos de recarga e o peso das baterias. A expectativa é que a adoção de células de hidrogênio transforme esse cenário no médio prazo.

UTILIZAÇÃO DE GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA (GÁS DE SÍNTESE)



Ação já implantada por 25% das empresas, em implantação por 13% delas e em estudo por outros 19%, com uma lacuna de implantação em 44% das empresas restantes. Ao converter a biomassa em gás de síntese, é possível utilizá-lo como substituto de combustíveis fósseis em processos industriais, como no forno de cal, reduzindo assim as emissões de origem fóssil e substituindo-as por emissões não fósseis.

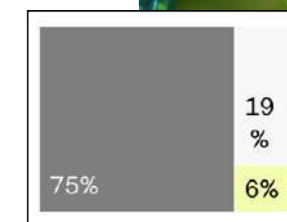


Observa-se um grande potencial de adoção dessa ação, dado que 44% das empresas cuja ação é potencialmente aplicável, responderam ainda não a ter implantado.

REAPROVEITAMENTO DA ENERGIA HIDRÁULICA DO EFLUENTE TRATADO



Ação já implantada por 19% das empresas e em implantação por 6% das empresas, com uma lacuna de implantação em 75% das empresas restantes. Ao se reaproveitar a energia potencial hidráulica do efluente tratado, normalmente lançado em corpo hídrico em uma cota inferior ao local de seu tratamento, pode-se recuperar a energia cinética da água, reduzindo a demanda por energia externa do SIN e, conseqüentemente, as emissões de GEE associadas de escopo 2.



PRODUÇÃO DE BIOMETANO



Ação não foi implantada por nenhuma empresa, mas está sendo estudada por 38% das empresas. O biometano gerado a partir da biodigestão de efluente líquido ou resíduos orgânicos, tem potencial de substituir o gás natural fóssil em caldeiras, fornos e veículos, com redução considerável das emissões de GEE.

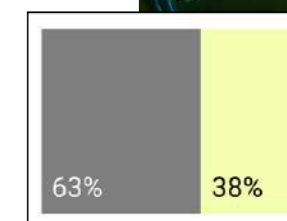
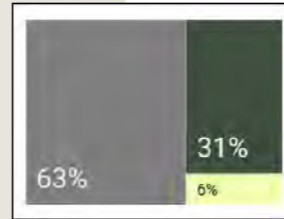


TABELA 3 - STATUS DE IMPLEMENTAÇÃO DAS AÇÕES DE DESCARBONIZAÇÃO VOLTADAS A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA.

PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE OU OUTRO POWER-TO-X (P2X)



Ação está em implantação por apenas 1 empresa no Brasil e em estudo por 31% das empresas, com uma lacuna de implantação em 63% das empresas restantes. A produção de hidrogênio requer grande quantidade de energia elétrica, e, para ser considerado um hidrogênio sustentável (conhecido como hidrogênio verde) necessita de energia renovável. Assim, as fábricas de celulose que usualmente possuem produção excedente de energia renovável são potenciais produtoras de hidrogênio verde.

Além disso, como as fábricas de celulose geram grande quantidade de CO₂ biogênico provenientes da caldeira de recuperação e biomassa existe potencial de produção de combustíveis sintéticos tais como e-metanol ou e-amônia.



5.4.1.2.3 Ações visando a Adaptação Climática

As ações que visam promover a adaptação climática no setor de Papel & Celulose indicadas a seguir referem-se aquelas que visam, além de preparar, proteger e apoiar a gestão das empresas sobre os riscos climáticos físicos aplicáveis às suas operações, mas também que garantam a continuidade de suas operações (e conseqüentemente, melhoria da eficiência operacional, e, em última instância, mitigação das emissões de GEE). Assim, a lista de ações de adaptação climática não é extensiva, sendo o tema de adaptação climática a ser tratado de forma aprofundada nos Planos Setoriais de Adaptação Climática.

Na figura 25 a seguir é apresentado o resultado do diagnóstico do status das ações voltadas a adaptação climática do setor de Papel & Celulose, considerando todas as empresas respondentes, que indicaram se já implantaram, estão em implantação, estão estudando, ou àquelas soluções as quais não são aplicadas a elas.

Análise:

Na tabela 4 a seguir faz-se uma análise da figura acima e um detalhamento do estágio de adoção atual de cada ação de descarbonização voltadas a adaptação climática no setor de Papel & Celulose. Nota-se que são apresentados gráficos do percentual das repostas das empresas respondentes para cada estágio de adoção da ação de descarbonização, porém, em relação ao total de empresas para as quais a solução é aplicável. Ainda, ressalta-se que as soluções estão ordenadas iniciando-se pela mais adotada até a menos adotada, assim, as últimas soluções são aquelas com potencial de descarbonização adicional das emissões de GEE do setor.

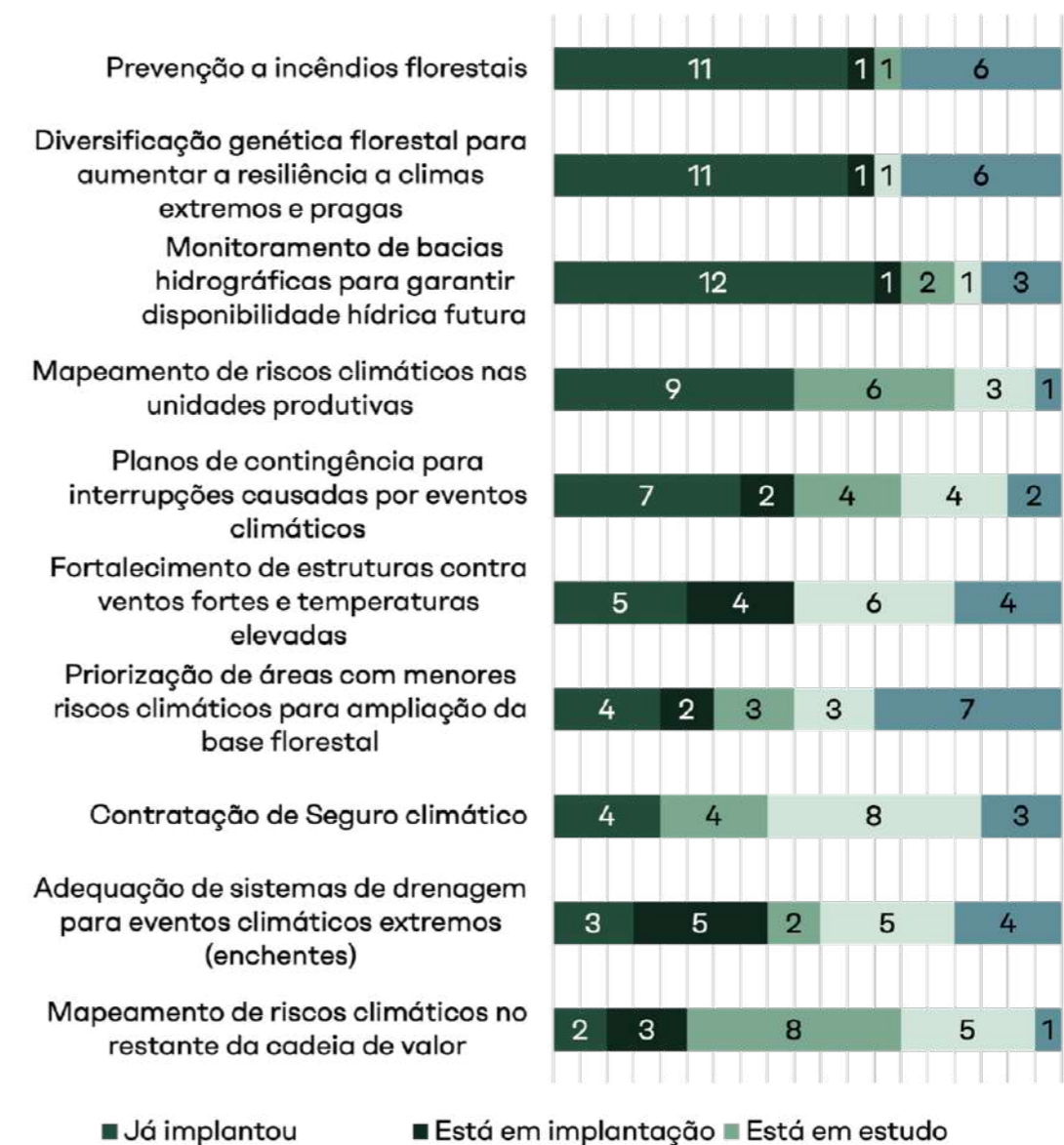
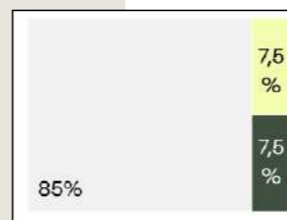


Figura 25 - Diagnóstico da adoção atual de ações de descarbonização voltadas a adaptação climática operacional no setor de Papel & Celulose no Brasil.

TABELA 4 - STATUS DE IMPLEMENTAÇÃO DAS AÇÕES DE DESCARBONIZAÇÃO VOLTADAS A ADAPTAÇÃO CLIMÁTICA.

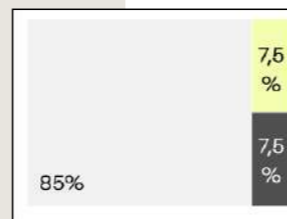
PREVENÇÃO A INCÊNDIOS FLORESTAIS

Ação já implantada por 85% das empresas, em implantação por 7,5% delas, e em estudo por outros 7,5%. A prevenção a incêndios florestais é de responsabilidade comum ao poder público, setor privado e sociedade, conforme a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo. Ações de prevenção a incêndios florestais protegem os ativos florestais e mantém o carbono capturado na biomassa vegetal, assim como protege o carbono do solo. Incêndios florestais liberam esse carbono para a atmosfera, além de prejudicarem as propriedades químicas e físicas do solo.



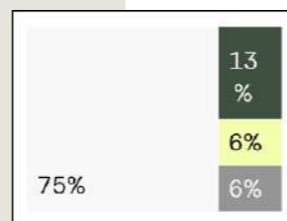
DIVERSIFICAÇÃO GENÉTICA FLORESTAL PARA AUMENTAR A RESILIÊNCIA A CLIMAS EXTREMOS E PRAGAS

Ação já implantada por 85% das empresas e em implantação por 7,5% delas, com uma lacuna de implantação em 7,5% das empresas restantes. Esta ação reduz perdas florestais causadas por eventos climáticos ou biológicos (pragas), mantendo o sequestro de carbono das florestas e garantindo a estabilidade do sequestro de CO₂.



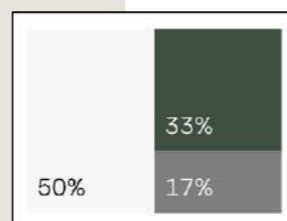
MONITORAMENTO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS PARA GARANTIR DISPONIBILIDADE HÍDRICA FUTURA

Ação já implantada por 75% das empresas, em implantação por 6% delas e em estudo por outros 13%, com uma lacuna de implantação em 6% das empresas restantes. As mudanças climáticas tendem a modificar os padrões de precipitação por todo o globo terrestre, inclusive o Brasil. Regiões ficarão mais secas e outras mais úmidas, enquanto eventos climáticos críticos, tendem a ter sua frequência aumentada. Dados que as empresas do setor de Papel & Celulose dependem do recurso água, elas necessitam monitorar as localidades das suas operações.



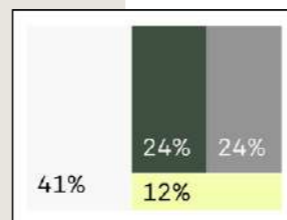
MAPEAMENTO DE RISCOS CLIMÁTICOS NAS UNIDADES PRODUTIVAS

Ação já implantada por 50% das empresas e em estudo por 33% delas, com uma lacuna de implantação em 17% das empresas restantes. Antecipar riscos climáticos permite que as empresas possam adaptar suas operações e evitar perdas que resultariam em emissões (como incêndios, queda de produtividade ou degradação florestal).



PLANOS DE CONTINGÊNCIA PARA INTERRUPÇÕES CAUSADAS POR EVENTOS CLIMÁTICOS

Ação já implantada por 41% das empresas, em implantação por 12% delas e em estudo por outros 24%, com uma lacuna de implantação em 24% das empresas restantes. Estabelecer previamente procedimentos de emergências em situações de eventos climáticos, permite que as empresas possam prevenir ou diminuir os impactos negativos sofridos em tais situações, prevenindo as melhores saídas para que tais eventos afetem o menos possível suas operações e seu capital (estruturas, pessoas).

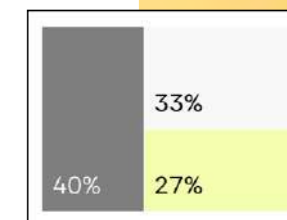


LEGENDA

JÁ IMPLANTOU	ESTÁ EM ESTUDO
ESTÁ EM IMPLANTAÇÃO	NÃO IMPLANTOU

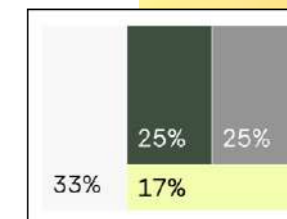
FORTALECIMENTO DE ESTRUTURAS CONTRAVENTOS FORTES E TEMPERATURAS ELEVADAS

Ação já implantada por 33% das empresas e em implantação por 27% delas, com uma lacuna de implantação em 40% das empresas restantes. Esse tipo de ação evita danos físicos às infraestruturas industriais e ativos florestais, prevenindo interrupções das operações, reconstruções de infraestruturas e consequentes emissões de GEE associadas.



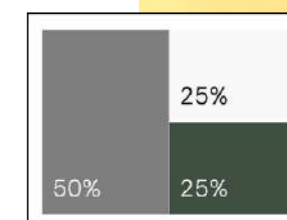
PRIORIZAÇÃO DE ÁREAS COM MENORES RISCOS CLIMÁTICOS PARA AMPLIAÇÃO DA BASE FLORESTAL

Ação já implantada por 33% das empresas, em implantação por 17% delas e em estudo por outros 25%, com uma lacuna de implantação em 25% das empresas restantes. Uma consequente ação do mapeamento de riscos climáticos nas unidades produtivas é a possibilidade de escolher os locais para expansão ou até remanejamento da base florestal para áreas com menores possibilidade de impactos climáticos.



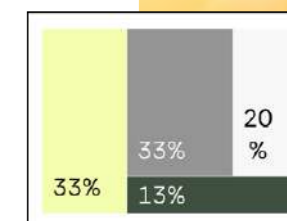
CONTRATAÇÃO DE SEGURO CLIMÁTICO

Ação já implantada por 25% das empresas e em estudo por outros 25%, com uma lacuna de implantação em 50% das empresas restantes. Embora não reduza emissões diretamente, incentiva a gestão ativa de riscos climáticos e pode viabilizar recursos financeiros necessários em momentos de emergências climáticas para minimizar os impactos decorrentes (por exemplo, em incêndios florestais oriundos de estiagens prolongadas e altas temperaturas, necessitando de recursos para combate ao fogo), o que pode sim evitar emissões de GEE desnecessárias.



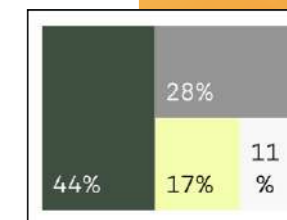
ADEQUAÇÃO DE SISTEMAS DE DRENAGEM PARA EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS

Ação já implantada por 20% das empresas, em implantação por 33% delas e em estudo por outros 13%, com uma lacuna de implantação em 33% das empresas restantes. Esse tipo de ação evita danos físicos às infraestruturas industriais e ativos florestais, prevenindo interrupções das operações, reconstruções de infraestruturas ou replantios e consequentes emissões de GEE associadas.



MAPEAMENTO DE RISCOS CLIMÁTICOS NO RESTANTE DA CADEIA DE VALOR

Ação já implantada por 11% das empresas, em implantação por 17% delas e em estudo por outros 44%, com uma lacuna de implantação em 28% das empresas restantes. Ao se realizar o mapeamento de riscos climáticos no restante da cadeia de valor, é possível identificar pontos vulneráveis onde eventos climáticos poderiam gerar perdas ou interrupções na produção de insumos, produção e serviços de transmissão e distribuição de energia ou interrupções de estradas e rodovias ou mesmo de meios de transporte.



5.4.1.2.4 Ações de Circularidade e Reaproveitamento de Resíduos

As ações de descarbonização voltadas para a promoção da circularidade de materiais e reaproveitamento de resíduos no setor de Papel & Celulose no Brasil se referem a ações que visam a minimização da geração de resíduos através da utilização do princípio dos 3R's (Reduzir, Reutilizar, Reciclar); ou a destinação final ambientalmente adequada (reutilização, reciclagem, compostagem, aproveitamento energético, etc.) e/ou disposição final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos gerados no empreendimento (aterro sanitário com coleta de biometano).

Na figura 26 a seguir é apresentado o resultado do diagnóstico do status das ações voltadas a circularidade e reaproveitamento de resíduos do setor de Papel & Celulose, considerando todas as empresas respondentes, que indicaram se já implantaram, estão em implantação, estão estudando, ou àquelas soluções as quais não são aplicadas a elas.

Análise:

Na tabela 5 a seguir faz-se uma análise da figura acima e um detalhamento do estágio de adoção atual de cada ação de descarbonização voltada a circularidade e reaproveitamento de resíduos no setor de Papel & Celulose. Nota-se que são apresentados gráficos do percentual das repostas das empresas respondentes para cada estágio de adoção da ação de descarbonização, porém, em relação ao total de empresas para as quais a solução é aplicável. Ainda, ressalta-se que as soluções estão ordenadas iniciando-se pela mais adotada até a menos adotada, assim, as últimas soluções são aquelas com potencial de descarbonização adicional das emissões de GEE do setor.

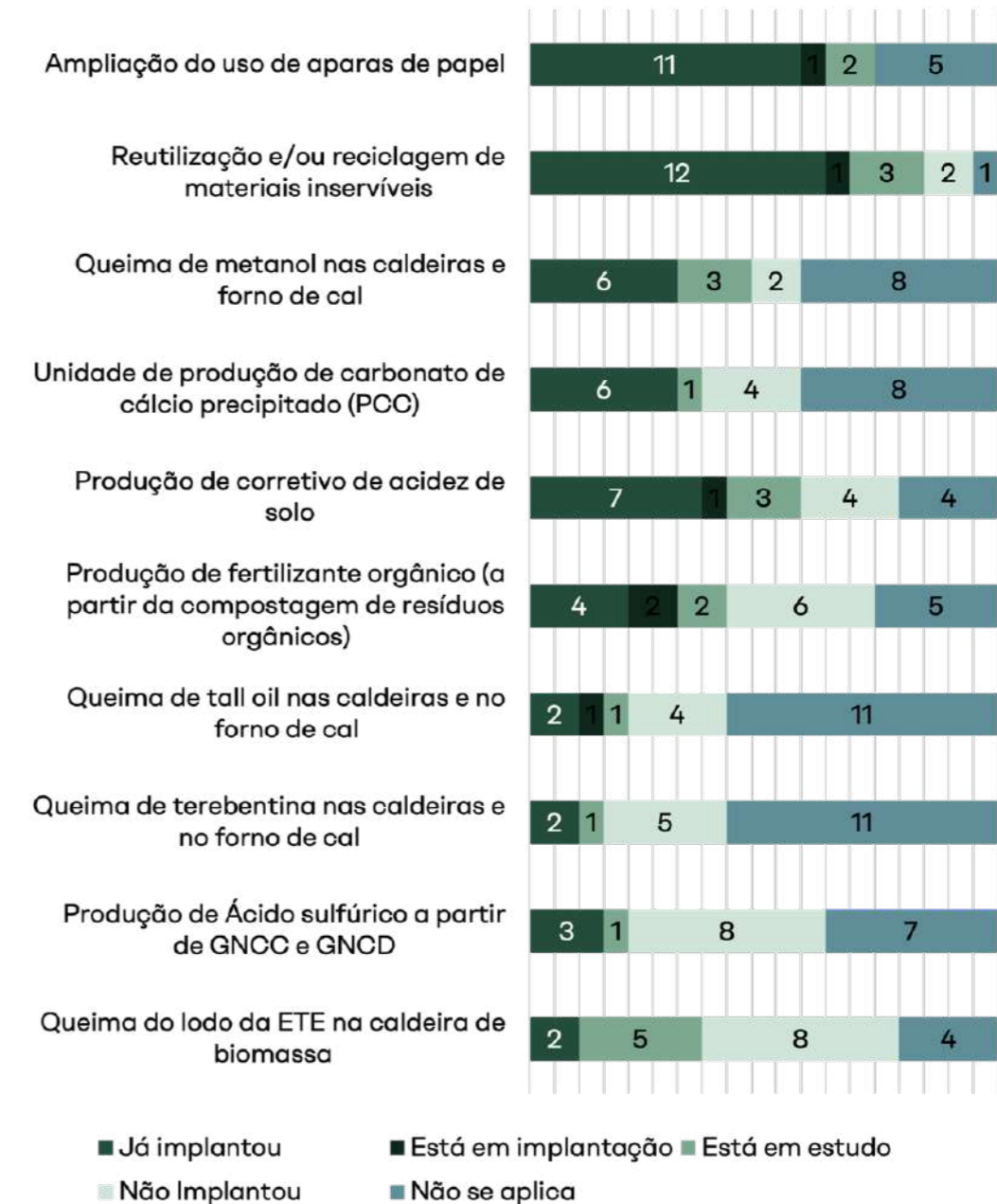
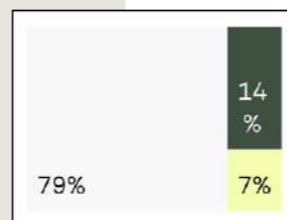


Figura 26 - Diagnóstico da adoção atual de ações de descarbonização voltadas para a promoção da circularidade e reaproveitamento de resíduos no setor de Papel & Celulose no Brasil.

TABELA 5 - STATUS DE IMPLEMENTAÇÃO DAS AÇÕES DE DESCARBONIZAÇÃO VOLTADAS A CIRCULARIDADE E REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS.

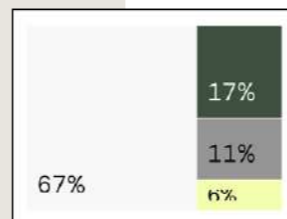
AMPLIAÇÃO DO USO DE APARAS DE PAPEL

Ação já implantada por 79% das empresas, em implantação por 7% delas e em estudo por outros 14%. Essa ação reduz a necessidade de produção de celulose virgem nas indústrias de papel, diminuindo o consumo de energia, água e insumos químicos. Além disso, evita o envio de resíduos para aterros, onde haveria a geração de metano pela degradação da matéria orgânica do papel.



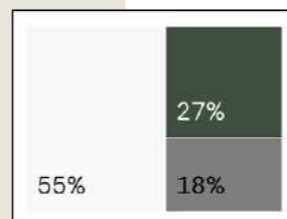
REUTILIZAÇÃO E/OU RECICLAGEM DE MATERIAIS INSERVÍVEIS

Ação já implantada por 67% das empresas, em implantação por 6% delas e em estudo por outros 17%, com uma lacuna de implantação em 11% das empresas restantes. Essa ação visa diminuir a demanda por novos materiais, e o conseqüente consumo de recursos naturais, assim como reduzir as emissões indiretas associados à sua produção, transporte e destinação final.



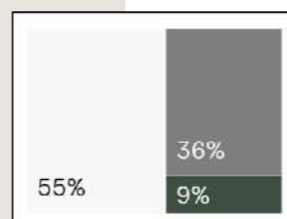
QUEIMA DE METANOL NAS CALDEIRAS E FORNO DE CAL

Ação já implantada por 55% das empresas e em estudo por 27% delas, com uma lacuna de implantação em 18% das empresas restantes. O uso como combustível do metanol gerado como subproduto do processo industrial reduz a necessidade de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, as emissões de gases de efeito estufa associadas.



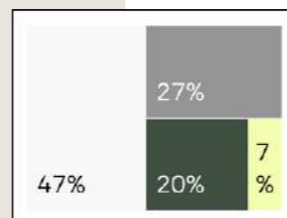
UNIDADE DE PRODUÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO PRECIPITADO (PCC)

Ação já implantada por 55% das empresas e em estudo por 9%, com uma lacuna de implantação em 36% das empresas restantes. Produzir carbonato de cálcio localmente reduz as emissões de GEE associadas ao transporte desse material, assim como se beneficia da otimização do uso de recursos locais, como calcário, matéria-prima do carbonato de cálcio, e água, reduzindo a pegada de carbono associada ao transporte desses insumos até o ponto da produção do carbonato de cálcio.



PRODUÇÃO DE CORRETIVO DE ACIDEZ DE SOLO

Ação já implantada por 47% das empresas, em implantação por 7% delas e em estudo por outros 20%, com uma lacuna de implantação em 27% das empresas restantes. A produção de corretivo de acidez de solo a partir de resíduos industriais inorgânicos do processo fabril, tais como pó do precipitador eletrostático, dregs e gritz, substitui produtos convencionais (como calcário agrícola), o que reduz as emissões associadas à extração, beneficiamento e transporte desses corretivos minerais convencionais.

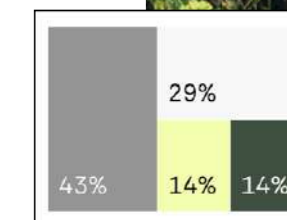


LEGENDA

JÁ IMPLANTOU	ESTÁ EM ESTUDO
ESTÁ EM IMPLANTAÇÃO	NÃO IMPLANTOU

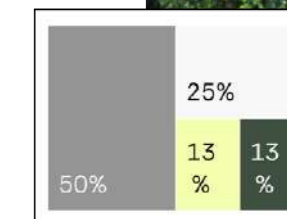
PRODUÇÃO DE FERTILIZANTE ORGÂNICO (A PARTIR DA COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS ORGÂNICOS)

Ação já implantada por 29% das empresas, em implantação por 14% delas e em estudo por outros 14%, com uma lacuna de implantação em 43% das empresas restantes. A produção de fertilizante orgânico a partir da compostagem dos resíduos orgânicos do processo fabril, tais como lodos primários e secundário da ETE, reduz as emissões de GEE associadas à extração e transporte de suas matérias primas, ao seu beneficiamento e ao seu transporte.



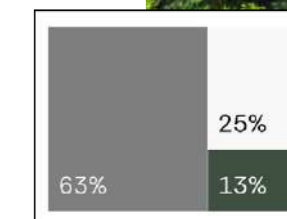
QUEIMA DE TALL OIL NAS CALDEIRAS E NO FORNO DE CAL

Ação já implantada por 25% das empresas, em implantação por 13% das empresas e em estudo por 13% das empresas, com uma lacuna de implantação em 50% das empresas restantes. O uso como combustível do tall oil gerado como subproduto do processo industrial reduz a necessidade de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, as emissões de gases de efeito estufa associadas.



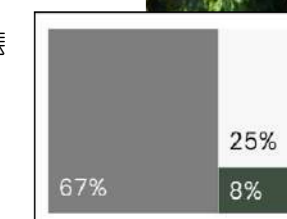
QUEIMA DE TEREVENTINA NAS CALDEIRAS E NO FORNO DE CAL

Ação já implantada por 25% das empresas e em estudo por 13% delas, com uma lacuna de implantação em 63% das empresas restantes. O uso como combustível da terebentina gerada como subproduto do processo industrial reduz a necessidade de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, as emissões de gases de efeito estufa associadas.



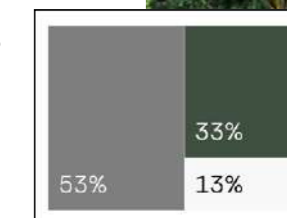
PRODUÇÃO DE ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE GNCC

Ação já implantada por 25% das empresas e em estudo por 8% das empresas, com uma lacuna de implantação em 67% das empresas restantes. Essa prática converte gases não-condensáveis concentrados (GNCC), ricos em enxofre, em ácido sulfúrico, evitando a queima direta desses compostos e reduzindo assim emissões de gases do efeito estufa. Além disso, permite a reutilização do ácido na fábrica, diminuindo a necessidade de produção externa, o que reduz as emissões de produção e transporte correlatas.



QUEIMA DO LODO DA ETE NA CALDEIRA DE BIOMASSA

Ação já implantada por 13% das empresas e em estudo por 33% das empresas, com uma lacuna de implantação em 53% das empresas restantes. Essa ação permite o aproveitamento energético do lodo orgânico, além de reduzir o volume de resíduos enviados a compostagem ou aterros.



5.4.1.2.5 Soluções Técnicas de Captura de Carbono

As ações de descarbonização voltadas para induzir a captura de carbono podem ser realizadas seja por processo natural (fotossíntese) ou tecnológico. Na figura 27 a seguir é apresentado o resultado do diagnóstico do status das ações voltadas a captura de carbono no setor de Papel & Celulose, considerando todas as empresas respondentes, que indicaram se já implantaram, estão em implantação, estão estudando, ou àquelas soluções as quais não são aplicadas a elas.

Análise:

Na tabela 6 a seguir faz-se uma análise da figura acima e um detalhamento do estágio de adoção atual de cada ação de descarbonização voltada para induzir a captura de carbono no setor de Papel & Celulose. Nota-se que são apresentados gráficos do percentual das repostas das empresas respondentes para cada estágio de adoção da ação de descarbonização, porém, em relação ao total de empresas para as quais a solução é aplicável. Ainda, ressalta-se que as soluções estão ordenadas iniciando-se pela mais adotada até a menos adotada, assim, as últimas soluções são aquelas com potencial de descarbonização adicional das emissões de GEE do setor.

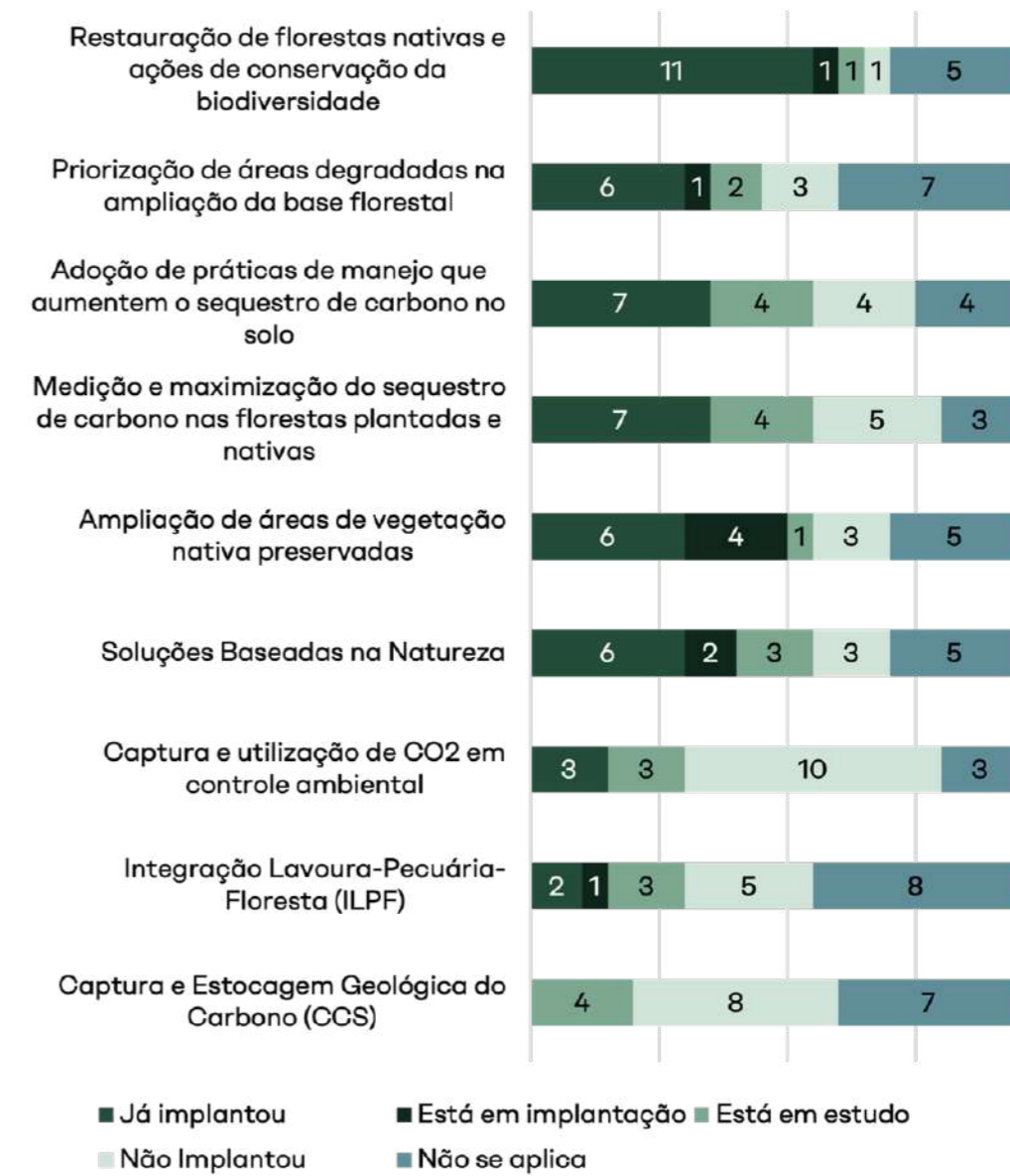
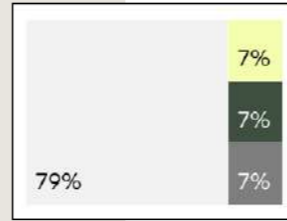


Figura 27 - Diagnóstico da adoção atual de ações de descarbonização voltadas para induzir a captura de carbono da atmosfera.

TABELA 6 - STATUS DE IMPLEMENTAÇÃO DAS AÇÕES DE DESCARBONIZAÇÃO VOLTADAS A CAPTURA DE CARBONO.

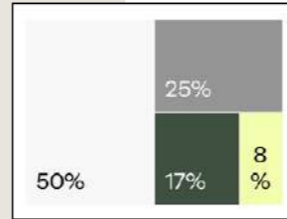
RESTAURAÇÃO DE FLORESTAS NATIVAS E AÇÕES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE

Ação já implantada por 79% das empresas, em implantação por 7% delas e em estudo por outros 7%, com uma lacuna de implantação em outros 7% das empresas restantes. Esta ação promove a continuidade do sequestro do carbono pela vegetação e pelo solo, além de proteger serviços ecossistêmicos promovidos pelas florestas nativas, que dão suporte a biodiversidade.



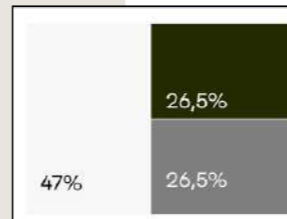
PRIORIZAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS NA AMPLIAÇÃO DA BASE FLORESTAL

Ação já implantada por 50% das empresas, em implantação por 8% delas e em estudo por outros 17%, com uma lacuna de implantação em 25% das empresas restantes. Ao se priorizar áreas degradadas para expansão da base florestal, promove-se a recuperação de serviços ecossistêmicos pela transformação de solos degradados em sumidouros de carbono ao reativar a vegetação e a atividade biológica do solo.



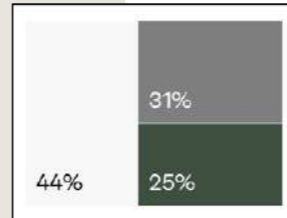
ADOÇÃO DE PRÁTICAS DE MANEJO QUE AUMENTEM O SEQUESTRO DE CARBONO NO SOLO

Ação já implantada por 47% das empresas com florestas, e em estudo por 26,5% delas, com uma lacuna de implantação em 26,5% das empresas restantes. Técnicas de silvicultura com o manejo mínimo, adubação orgânica e cobertura vegetal constante promovem o acúmulo de carbono no solo, aumentando sua capacidade de armazenamento e remoção de CO₂ da atmosfera.



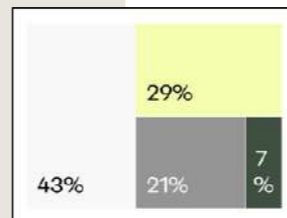
MEDIÇÃO E MAXIMIZAÇÃO DO SEQUESTRO DE CARBONO NAS FLORESTAS PLANTADAS E NATIVAS

Ação já implantada por 44% das empresas e em estudo por 25% das empresas, com uma lacuna de implantação em 31% das empresas restantes. Medidas como aplicação de fertilizante orgânico no solo; integração com outras atividades (agropecuária) no mesmo terreno da silvicultura, ou optar-se pelo descascamento das toras e distribuição dos resíduos no solo, maximizam a remoção (sequestro) de carbono atmosférico pelas florestas.



AMPLIAÇÃO DE ÁREAS DE VEGETAÇÃO NATIVA PRESERVADAS

Ação já implantada por 43% das empresas, em implantação por 29% delas e em estudo por outros 7%, com uma lacuna de implantação em 21% das empresas restantes. Ao se ampliar a base de florestas nativas conservadas e regeneradas pelo setor, os estoques de carbono já existentes na vegetação e no solo são conservados e ampliados e os serviços ecossistêmicos ofertados por elas são preservados, tal como a remoção de carbono da atmosfera.

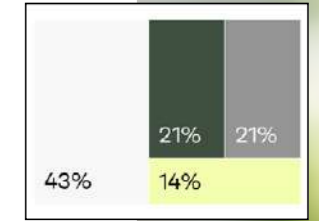


LEGENDA

JÁ IMPLANTOU	ESTÁ EM ESTUDO
ESTÁ EM IMPLANTAÇÃO	NÃO IMPLANTOU

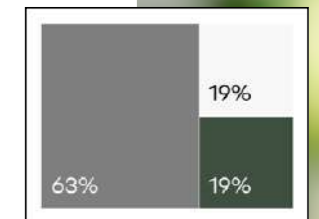
SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA

Ação já implantada por 43% das empresas, em implantação por 14% delas e em estudo por outros 21%, com uma lacuna de implantação em 21% das empresas restantes. Implementar soluções baseadas na natureza podem resultar em aumento do sequestro de carbono pela regeneração ou manutenção do estoque já sequestrado em áreas de florestas preservadas.



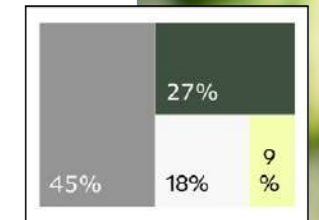
CAPTURA E UTILIZAÇÃO DE CO₂ EM CONTROLE AMBIENTAL

Ação implantada apenas por 19% das empresas e em estudo por outros 19%, com uma lacuna de implantação em 63% das empresas restantes. Ações que visam a retirada de CO₂ de processos industriais e sua reutilização em aplicações como fertilização de estufas, produção de carbonatos ou insumos industriais, reduzindo o lançamento direto do gás na atmosfera.



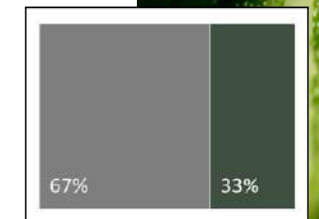
INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA (ILPF)

Ação implantada por 18%, em implantação por uma empresa, e em estudo por outros 27%, com uma lacuna de implantação em 45% das empresas restantes. Ao se integrar os plantios da silvicultura e os plantios da agricultura ou criação de animais da pecuária, se aumenta o sequestro de carbono no solo e na vegetação por unidade de área, além de se aumentar ganhos financeiros com o uso em comum da mesma porção de terra. Adicionalmente, ações de ILPF reduzem a disputa por terra. Cita-se ainda que é uma ação de alto engajamento da comunidade local, visto trazer benefícios para a população.



CAPTURA E ESTOCAGEM GEOLÓGICA DO CARBONO (CCS)

Ação não implantada no setor, mas em estudo por 33% das empresas. Nessa ação de descarbonização, o objetivo é retirar o CO₂ de fontes industriais e realizar sua injeção em reservatórios subterrâneos seguros (como formações salinas ou campos de petróleo exauridos), promovendo a remoção permanente de GEE da atmosfera.



Essa tecnologia é mais utilizada em países nórdicos, no Brasil essa prática não é comum. Além disso, essa prática é recomendada para setores considerados "difíceis de abater" ("hard-to-abate"), em que a mitigação das emissões de GEE é desafiadora, o que não é o caso da indústria de Papel & Celulose.

5.4.1.2.6 Criação de Novos Bioprodutos

O desenvolvimento de novos bioprodutos a partir de subprodutos ou resíduos do setor de Papel & Celulose não apenas cria fluxos de receita para as empresas, como também maximiza o uso dos recursos naturais, ao possibilitar a fabricação de diversos produtos a partir dos mesmos insumos. Além disso, esses bioprodutos, na maioria dos casos, substitui outros que são carbono intensivos (plásticos de origem fóssil, combustível fóssil, tecidos sintéticos ou carbono intensivos etc.) o que resulta diretamente na redução de emissões de GEE.

Na figura 28 a seguir é apresentado o resultado do diagnóstico do status de produção de novos bioprodutos no setor de Papel & Celulose, considerando todas as empresas respondentes, que indicaram se já implantaram, estão em implantação, estão estudando, ou àquelas soluções as quais não são aplicadas a elas.

Na tabela 7 a seguir faz-se uma análise da figura acima e um detalhamento do estágio de adoção atual de cada ação de descarbonização voltada a criação de novos bioprodutos no setor de Papel & Celulose. Nota-se que são apresentados gráficos do percentual das repostas das empresas respondentes para cada estágio de adoção da ação de descarbonização, porém, em relação ao total de empresas respondente. Ainda, ressalta-se que as soluções estão ordenadas iniciando-se pela mais adotada até a menos adotada, assim, as últimas soluções são aquelas com potencial de descarbonização adicional das emissões de GEE do setor.

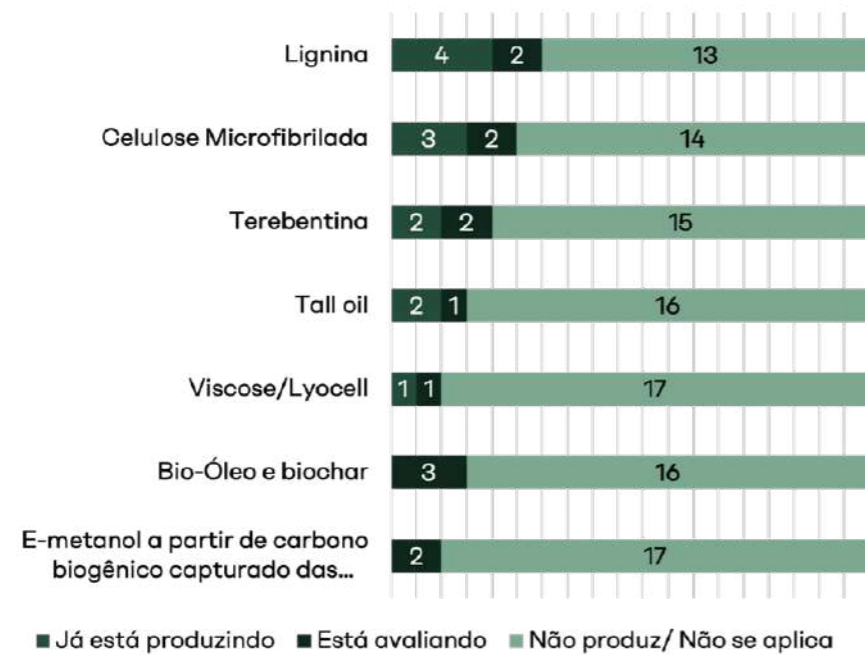


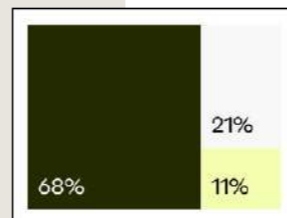
Figura 28 - Diagnóstico do status das ações de descarbonização voltadas criação de novos bioprodutos.

TABELA 7 - STATUS DE IMPLEMENTAÇÃO DAS AÇÕES DE DESCARBONIZAÇÃO VOLTADAS A CRIAÇÃO DE NOVOS BIOPRODUTOS.

LIGNINA

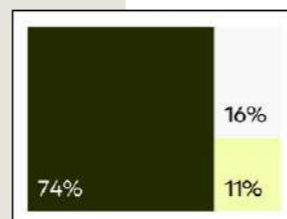
Bioproduto produzido por 4 empresas respondentes e está em avaliação por outras 2 empresas.

A obtenção de lignina a partir do licor negro é viável comercialmente, e um total de 10% a 15% da lignina (EMBRAPA, 2022). Possui grande potencial para diversas aplicações industriais, como dispersantes para corantes ou agroquímicos, aditivo para concreto, etc, (EMBRAPA, 2022), evitando emissões associadas a produtos petroquímicos. Além de uso para produção de energia.



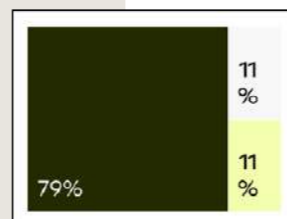
CELULOSE MICROFIBRILADA

Bioproduto produzido por 16% das empresas respondentes em avaliação por uma quarta empresa. Material composto por micropartículas de celulose obtidas a partir da polpa celulósica, através de um processo de fibrilação mecânica. Sendo um produto de base renovável e com aplicação em diversos setores, possui potencial de substituir materiais sintéticos derivados de fósseis (como plásticos e aditivos industriais), contribuindo para a redução de emissões em diversos setores.



TEREBENTINA

Bioproduto produzido por 11% das empresas respondentes e em avaliação por outras duas. A terebentina é obtida durante o processo de cozimento da madeira, principalmente de cavacos de pinus, na produção de celulose Kraft. Pode ser aproveitado como biocombustível, substituindo parcialmente o uso de combustíveis fósseis na fábrica. Também, por ser rica em terpenos, pode ser utilizada pela indústria química para fabricação de solventes, perfumes e outros produtos químicos, reduzindo a dependência de materiais de fontes fósseis e as emissões associadas na indústria química.



LEGENDA

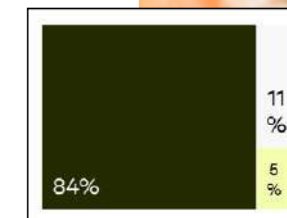
JÁ ESTÁ PRODUZINDO

NÃO PRODUZ/NÃO SE APLICA

ESTÁ AVALIANDO

TAIL OIL

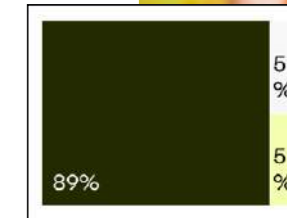
Bioproduto produzido por 11% das empresas respondentes e em avaliação por uma terceira empresa. Subproduto do processo de polpação Kraft, extraído do licor negro gerado no cozimento da madeira, principalmente de cavacos de pinus. Pode ser aproveitado como biocombustível, substituindo parcialmente o uso de combustíveis fósseis na fábrica. Também, por conter ácidos graxos, resinas e outros compostos, após refinamento, o ácido graxo de *tall oil* (TOFA) pode ser utilizado na fabricação de resinas, lubrificantes, aditivos para combustíveis e plastificantes, reduzindo a dependência de materiais de fontes fósseis e as emissões associadas na indústria química.



VISCOSE/LYOCELL

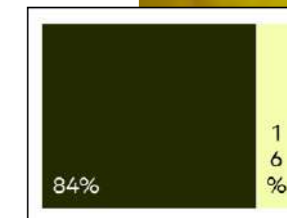
Bioproduto produzido por 21% das empresas respondentes e em avaliação por outras duas.

São fibras têxteis renováveis derivadas da celulose que podem substituir fibras sintéticas (como poliéster) com base fóssil, maior intensidade de carbono e menor biodegradabilidade.



BIO-ÓLEO E BIOCHAR

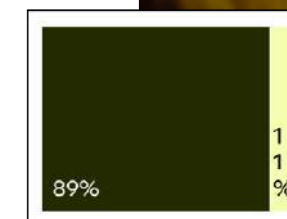
O bio-óleo ainda não é produzido pelas empresas respondentes, mas está sob avaliação de 16% das empresas respondentes. A pirólise da biomassa, realizada na ausência de oxigênio, resulta em líquida (bio-óleo), sólida (biochar) e gasosa (composta por CO, CO₂, H₂ e CH₄). O bio-óleo pode ser utilizado diretamente como combustível em caldeiras e fornos industriais (EMBRAPA, 2021), podendo ser refinado com a geração de combustíveis avançados, como gasolina e querosene de aviação. O extrato ácido, subproduto da produção do bio-óleo, é uma solução aquosa que pode ser aplicada na agricultura como bioestimulante. Já o biochar, pode ser usado como condicionador de solo, para aumentar a fertilidade, a retenção de umidade e nutrientes, além de favorecer o sequestro de carbono no solo.



E-METANOL A PARTIR DE CARBONO BIOGÊNICO CAPTURADO DAS CHAMINÉS DAS CALDEIRAS

Este bioproduto ainda não é produzido pelas empresas respondentes, mas está sob avaliação de 11% das empresas respondentes.

Como as fábricas de celulose geram grande quantidade de emissão de CO₂ não fóssil em fonte pontual e concentrada (chaminé), pode-se realizar o processo de produção de combustíveis sintéticos a partir da junção de hidrogênio verde com o carbono capturado biogênicos e produzir, por exemplo, e-metanol ou e-amônia.



5.4.1.2.7 Solução Técnica para Redução de Emissões Fugitivas

As soluções técnicas voltadas a redução de emissões fugitivas no setor são aquelas referente à manutenção de salas elétricas de subestações elétricas, dado ao uso comum do gás SF₆.

Equipamentos como ar-condicionado e extintores de CO₂ são fontes de emissões fugitivas presentes em todas as etapas operacionais. Para minimizar essas emissões, é essencial que sua gestão e manutenção sigam as normas vigentes. Empresas terceirizadas devem ser treinadas para fornecer informações sobre o balanço de carga dos gases refrigerantes, e deve-se priorizar aquelas que reutilizam os gases retirados de equipamentos obsoletos, evitando sua liberação na atmosfera.

Na figura 29 a seguir é apresentado o resultado do diagnóstico do status das ações voltadas a substituição do gás SF₆ nas subestações de energia elétrica do setor de Papel & Celulose. Nota-se que apenas 16% das empresas já optaram por outras soluções de isolamento elétrico sem o uso de gás hexafluoreto de enxofre (SF₆).

Segundo IPCC (2006), o hexafluoreto de enxofre (SF₆) é usado para isolamento elétrico e interrupção de corrente em equipamentos usados na transmissão e distribuição de eletricidade. A substituição do SF₆ é crucial para a descarbonização, pois ele tem um potencial de aquecimento global 24.300 vezes maior que o do CO₂.

5.4.1.3 Instrumentos Econômicos e Políticas Públicas

Dada a complexidade e o impacto da descarbonização em todos os setores da economia e ecossistemas brasileiros, é essencial a atuação do poder público para criar um ambiente jurídico e regulatório adequado. Isso inclui garantir equilíbrio fiscal e promover ações como fortalecimento institucional, criação de políticas públicas, assistência técnica e aprimoramento de sistemas de monitoramento.

Para entender a visão do setor de Papel & Celulose, foi solicitado às empresas que classificassem ações de fomento à descarbonização conforme sua relevância, permitindo identificar as prioridades que, segundo o setor privado, devem ser assumidas pelo governo. Os resultados são apresentados na figura 30 abaixo e detalhados a seguir.

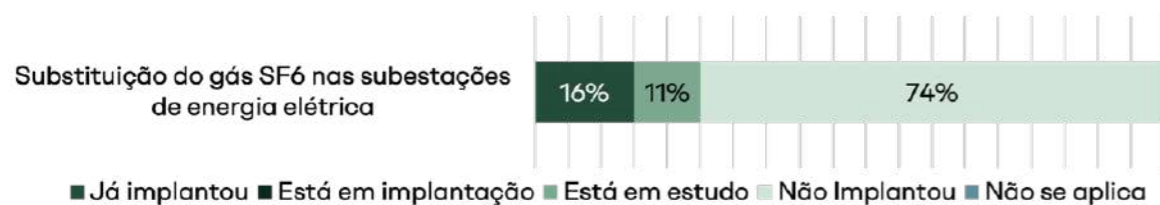


Figura 29 - Diagnóstico da adoção atual de ações de descarbonização de substituição do gás SF₆ nas subestações de energia elétrica.



Figura 30 - Priorização das ações de fomento à descarbonização direcionadas ao do setor de Papel & Celulose para realização pelo poder público, de acordo com a percepção das empresas participantes da pesquisa. Nota: amostra 19 empresas (que representam 86% da produção nacional de papel e celulose).

As ações de fomento à descarbonização que deveriam ser priorizadas pelo poder público, na visão das empresas do setor de Papel & Celulose, são detalhadas a seguir:

- Linhas de crédito verdes com juros reduzidos via BNDES ou bancos públicos para projetos de eficiência energética e substituição de combustíveis fósseis: considerada como “prioritária” por 68% das empresas respondentes e “muito importante” por 21% delas, esta ação visa reduzir as barreiras financeiras de projetos de eficiência energética e substituição de combustíveis fósseis, visto que tais projetos muitas vezes exigem investimentos iniciais elevados (ex.: retrofit de caldeiras, troca de óleo combustível por biomassa ou gás natural, automação de sistemas energéticos, cogeração avançada, eletrificação de processos, captura de calor residual). Os desafios são garantir acesso amplo e simplificação dos processos de financiamento e coordenar esforços entre governo, empresas e instituições financeiras.
- Inclusão no mercado de carbono regulado de uma política de incentivos para empresas que reduzirem emissões de GEE além das metas: considerada como “prioritária” por 42% das empresas respondentes e “muito importante” por outros 42%, essa ação geraria estímulo econômico direto para que empresas invistam em eficiência energética, inovação tecnológica e substituição de combustíveis fósseis, já que reduções adicionais poderiam, por exemplo, ser convertidas em créditos comercializáveis ou em benefícios fiscais. O desafio é evitar fraudes e assegurar metodologias robustas de comprovação de redução de emissões de GEE além das metas.
- Créditos fiscais e deduções para empresas que investem em tecnologias de baixo carbono, como caldeiras a biomassa mais eficientes ou eletrificação de processos: considerada como “prioritária” por 37% das empresas respondentes e “muito importante” por outros 37%, essa medida reduz o custo de capital e o tempo de retorno do investimento, tornando projetos sustentáveis mais atrativos.

Além disso, estimula a adoção rápida de tecnologias limpas, acelera a substituição de equipamentos dependentes de combustíveis fósseis e promove a inovação tecnológica da indústria nacional de soluções sustentáveis e menos intensivas em carbono.

- Investimentos em ferrovias e hidrovias para transporte de madeira e produtos: considerada como “prioritária” por 47% das empresas respondentes e “muito importante” por 16% delas, tem como principal benefício a redução do uso de caminhões a diesel, que são altamente intensivos em emissões de CO₂ e outros poluentes. O transporte ferroviário e hidroviário é mais eficiente energeticamente e gera menos emissões por tonelada transportada, além de trazer benefícios ambientais e sociais, como redução da poluição, do tráfego e de acidentes. Também foi destacada a importância de investir em dutovias para biocombustíveis, com apoio público, para ampliar o acesso a combustíveis menos intensivos em carbono. No entanto, desafios como o alto custo das obras, diferenças nas metas climáticas entre estados e a necessidade de integração multimodal exigem planejamento estratégico e coordenação entre governo e setor privado.
- Investimentos em rede de abastecimento de frota elétrica ao longo das principais rodovias do país: considerada como “prioritária” por 16% das empresas respondentes e “muito importante” por outros 16%, a ação de investimentos ou incentivos do governo para aumentar e espalhar pelo território nacional uma rede de abastecimento para frotas elétricas ao longo das principais rodovias trazem benefícios importantes para a descarbonização do setor industrial. Eles facilitariam a transição do transporte rodoviário de cargas, tradicionalmente movido a diesel, para veículos elétricos, reduzindo diretamente as emissões de CO₂ e outros poluentes atmosféricos.
- Estímulo à economia circular, promovendo a articulação entre setores fornecedores e recebedores potenciais de resíduos industriais: considerada como “prioritária”

por 37% das empresas respondentes e “muito importante” por outros 32%, a articulação entre setores que podem fornecer e receber resíduos industriais traz benefícios relevantes para a descarbonização do setor industrial como um todo. Essa medida contribui para a eficiência no uso de recursos, reduz custos de produção, cria oportunidades de negócio e fortalece cadeias de valor mais sustentáveis ao integrar setores distintos em um modelo produtivo mais colaborativo e resiliente. As empresas respondentes também destacaram a importância de o governo estruturar a coleta seletiva em âmbito nacional ou estadual, promovendo a integração entre empresas e cooperativas de catadores em cadeias formais, com a garantia de direitos trabalhistas, estabilidade econômica e regularidade no fornecimento de materiais circulares. Sendo ações fomentadas pela esfera pública, elas assegurariam confiança nas relações comerciais e forneceriam meios da criação de possíveis incentivos para tais empresas e associações participantes de um programa de economia circular.

- Campanhas de conscientização para a sociedade civil para estimular a demanda por produtos com menor pegada de carbono: consideradas como “prioritárias” por 32% das empresas respondentes e “muito importantes” por outros 37%, campanhas de conscientização voltadas à sociedade civil para estimular a demanda por produtos com menor pegada de carbono fortalecem a pressão de mercado para que as empresas adotem práticas mais sustentáveis e invistam em tecnologias de baixo carbono. Além disso, contribuem para diferenciar e valorizar produtos sustentáveis, ampliando sua competitividade frente a alternativas intensivas em emissões.
- Fomento à pesquisa e desenvolvimento de processos menos intensivos em carbono: considerado como “prioritário” por 32% das empresas respondentes e “muito importante” por outros 32%, o fomento à pesquisa e desenvolvimento de processos menos intensivos em carbono promove a inovação tecnológica, acelerando a “prontidão” de novas tecnologias,

reduzindo seus riscos e custos, além de acelerar sua adoção em escala. Pode-se fomentar também o desenvolvimento de bioprodutos e fortalecimento de seu mercado, por exemplo, através de linhas de crédito verdes específicas, incentivos e articulação da pesquisa de bioprodutos em universidades, *startups* e empresas.

- Parcerias público-privadas (PPPs) para testar tecnologias emergentes: considerada como “prioritária” por 21% das empresas respondentes e “muito importante” por outros 21%, essa ação permite o compartilhamento de riscos e custos de desenvolvimento e implantação de tecnologias inovadoras, acelerando a validação em escala real, garantindo que sejam rapidamente incorporadas à produção industrial. Essas parcerias também estimulam a colaboração entre governo, indústria e centros de pesquisa, promovendo transferência de conhecimento, inovação tecnológica e fortalecimento da academia voltada a inovações de baixo carbono.
- Fomento ao mapeamento de locais para armazenamento geológico de CO₂ capturado: considerada como “prioritária” por 5% das empresas respondentes e “muito importante” por outros 11%, o fomento do governo ao mapeamento de locais para armazenamento geológico de CO₂ capturado permitiria a identificação de áreas seguras e adequadas para injeção do carbono capturado no solo em larga escala, viabilizando projetos de captura e armazenamento de carbono (em inglês, essa tecnologia é chamada de “carbon capture and storage - CCS”). Importante fomentar a continuidade desse mapeamento, pois a solução de armazenamento geológico poderia ser uma saída para mitigar as emissões residuais do setor industrial como um todo. Além disso, cria segurança jurídica e técnica para investidores e empresas que desejam investir em tecnologias de CCS, acelerando a implantação de projetos inovadores.

Além das ações pré-mapeadas acima, as empresas respondentes também sugeriram algumas outras ações para o poder público, para fomento da descarbonização do setor. São elas:

- Desoneração de energias renováveis e biocombustíveis industriais: uma possível redução de encargos sobre o uso de energia renovável e biocombustíveis, ou aumento de encargos para combustíveis fósseis tornaria a adoção mais competitiva das alternativas sustentáveis em relação a alternativas fósseis.
- Reconhecimento de créditos de carbono por reflorestamento e manejo florestal sustentável: Essa medida permite monetizar serviços ambientais prestados por florestas plantadas e pelas florestas nativas preservadas e manejadas de forma responsável pelas empresas do setor, valorizando a base florestal brasileira e as boas práticas do setor. O desafio envolve criar regras claras, padronizar a metodologia de cálculo, evitar dupla contagem de emissões e reduções de GEE, simplificar o processo de certificação e implantar processos de fiscalização seguros contra fraudes.
- Apoio à rastreabilidade contra desmatamento e certificação de origem da madeira de reflorestamento: sistemas público-privados de rastreabilidade de madeira e clareza e simplificação nos processos de certificação de origem aumentariam a transparência e credibilidade da produção florestal brasileira, compartilhando os custos operacionais e diminuindo inseguranças no mercado quanto ao cumprimento de requisitos de diversas regulações, nacionais e internacionais, quanto a garantia de que produtos baseado em madeira do Brasil não venham de áreas sob desmatamento.
- Promoção de compras públicas sustentáveis: a preferência por papel certificado e de baixa pegada de carbono nas esferas públicas criaria uma demanda estável e fortaleceria o mercado verde. O objetivo seria gerar escala para produtos sustentáveis, com a necessidade de alinhar regras de licitação e fiscalização da

rastreabilidade dos produtos adquiridos.

- Fortalecimento do diálogo setorial-governo: criação de fóruns de discussão setorial para garantir que políticas públicas climáticas considerem especificidades da indústria de Papel & Celulose.

5.4.1.4 Comunicação e Engajamento da Sociedade e da Cadeia de Valor

Uma das diretrizes da Estratégia Nacional de Mitigação é a "Participação social ampla na formulação, implementação, monitoramento e avaliação da ENM", que estabelece como critério a ser seguido para a formulação das ações de descarbonização o estabelecimento de parcerias entre as esferas federal, estadual e municipal, setor produtivo, academia, movimentos sociais e sociedade civil.

Um dos principais desafios da descarbonização é que, sozinhas, as empresas privadas conseguem apenas descarbonizar parte das emissões associadas aos seus negócios: as chamadas emissões dos escopos 1 e 2. Essas categorias de emissões de GEE são definidas de acordo com a metodologia do Programa Brasileiro GHG Protocol. Emissões de escopo 1 referem-se a emissões diretas de GEE são as provenientes de fontes que pertencem ou são controladas pela organização. Já emissões de escopo 2 referem-se a emissões de GEE provenientes da aquisição de energia elétrica e térmica que é consumida pela empresa.

O "Escopo 3", ou seja, emissões indiretas consequentes das atividades da empresa, mas que ocorrem em fontes que não pertencem ou não são controladas pela empresa, englobando as emissões de todos os parceiros de negócios e clientes da empresa, até a disposição final do produto.

Por não pertencerem ou não terem controle sobre as emissões de Escopo 3, o papel de influenciar a sua descarbonização pelas empresas do setor de Papel & Celulose é mais difícil, exigindo diálogo, colaboração e ação conjunta.

Inclusive, durante o *workshop*, foram apontados os desafios encontrados no monitoramento das emissões de Escopo 3: primeiramente

as empresas têm dificuldade em mapear a própria cadeia de valor, que normalmente é vasta e complexa, assim como identificar todas as emissões indiretas. Mitigar então essas emissões, ou seja, influenciar de alguma forma a redução das emissões de GEE de terceiros, é um desafio além.

Mas, apesar de complexo, esse desafio de incluir o Escopo 3 em sua estratégia climática tem cada vez mais mostrado relevância e urgência, já que mudanças nos setores terceiros por novas regulações acabam por impactar diretamente as empresas do setor de Papel & Celulose.

Paralelamente, cresce a cada ano a demanda das partes interessadas por um posicionamento claro e pela divulgação dos resultados climáticos das empresas do setor industrial. Durante o *workshop*, foi destacada a importância da transparência e do compartilhamento de informações sobre sustentabilidade especialmente em relação às questões climáticas. Ao reportar dados climáticos por meio de diferentes padrões, diretas e índices de sustentabilidade, as empresas tornam visível sua performance no tema, o que fortalece a confiança dos *stakeholders*, protege a reputação, valoriza a marca e aumenta sua atratividade perante investidores.

A percepção pública tem se tornado um fator estratégico decisivo na forma como empresas estruturam suas ações de descarbonização. Cada vez mais, organizações reconhecem que a opinião da sociedade, dos consumidores e dos investidores influencia diretamente sua reputação e competitividade.

No questionário, foi solicitado a cada empresa que classificasse de 1 a 5 o grau de impacto da percepção pública na sua estratégia de descarbonização, sendo a classe 1 "sem impactos relevantes" e "5" "gera impacto na estratégia climática da organização". Os resultados são apresentados na figura abaixo.

Das 19 empresas que responderam ao questionário, 37% apontaram que a percepção pública impacta de forma muito alta sua estratégia climática. Outras 16% avaliaram esse impacto como alto, enquanto 26% consideraram o impacto médio. Já 10% indicaram um impacto baixo, e outros 11% atribuíram pouca relevância à percepção pública em relação à sua estratégia climática.

Também via questionário, as empresas do setor de Papel & Celulose foram convidadas a indicar quais ações de engajamento e comunicação com as partes interessadas visando fomento da descarbonização são realizadas ou estão

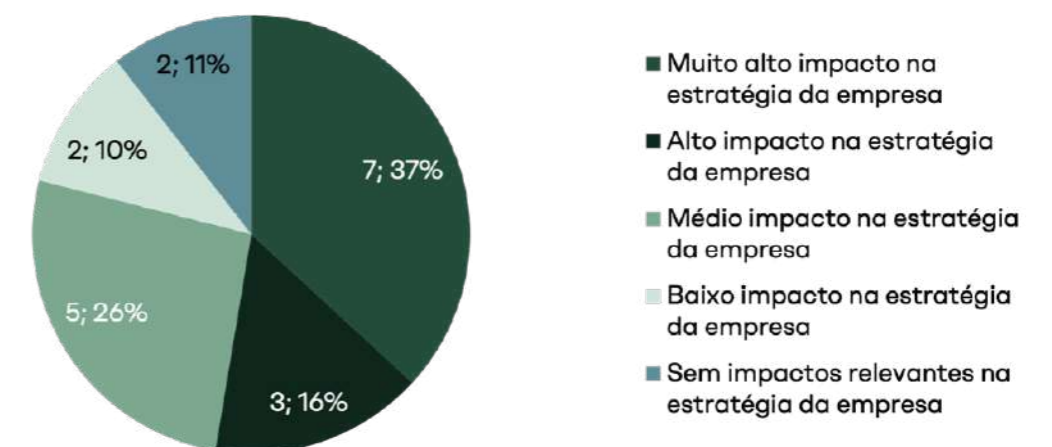


Figura 31 - Forma como a percepção pública impacta a estratégia de descarbonização das empresas, na percepção das empresas respondentes.

em estudos por elas. Com base em uma lista de iniciativas previamente identificadas, cada empresa foi solicitada a classificar as ações em: "Ação realizada", "Ação em estudo" e "Ação não realizada". Na figura 32 a seguir é apresentado o resultado do diagnóstico da atuação do setor no engajamento e comunicação com as partes interessadas visando fomento da descarbonização.

Como evidencia a pesquisa, cada vez mais, organizações têm incorporado critérios socioambientais na avaliação e seleção de fornecedores, como parte do engajamento de partes interessadas, reconhecendo que o alinhamento com metas climáticas exige uma cadeia de suprimentos comprometida e transparente. Muitas empresas já estabelecem indicadores ambientais obrigatórios, exigindo que seus parceiros adotem práticas sustentáveis e reportem regularmente suas emissões.

A comunicação exerce um papel central como força mobilizadora na agenda climática, atuando como elo estratégico para engajar partes interessadas em torno de causas reais e urgentes. Quando bem estruturada, ela não apenas informa, mas inspira, conecta e gera confiança, elementos essenciais para o avanço

de compromissos ambientais.

Comprometidas com a economia circular e a educação ambiental as organizações têm investido em projetos que promovam o fortalecendo a sustentabilidade ao longo de toda a cadeia de valor. Esse compromisso se traduz em um relacionamento próximo com seus clientes.

Embora ainda adotadas em menor escala, as práticas de manejo florestal mais sustentáveis e menos intensivas em carbono, assim como as parcerias voltadas à inovação, têm sido reconhecidas pelo setor de Papel & Celulose como fatores relevantes para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Essas iniciativas, mesmo que não predominantes, representam caminhos promissores para acelerar a transição para uma economia de baixo carbono.

Além disso, o setor tem estimulado o consumo responsável e menos intensivo em carbono, no entanto, ainda persiste uma lacuna significativa na ausência de rotulagem clara que identifique produtos com menor pegada de carbono.



Figura 32 - Diagnóstico da adoção atual de ações de engajamento e comunicação com as partes interessadas realizadas pelo setor de Papel & Celulose para fomento à descarbonização. Nota: amostra 19 empresas (que representam 86% da produção nacional de papel e celulose).



Todos os critérios apontados na pesquisa estão percentualmente detalhados abaixo para melhor compreensão do tema.

- Critérios socioambientais na avaliação de fornecedores: ação realizada por 84% das empresas respondentes, estimula práticas de baixo carbono em toda a cadeia de suprimentos, reduzindo emissões indiretas (escopo 3).
- Apoio à alguma campanha ou movimento da sociedade civil sobre consumo consciente: ação realizada por 79% das empresas respondentes, fortalece mudanças de hábitos de consumo, incentivando escolhas por produtos mais sustentáveis e de menor impacto climático.
- Educação ambiental em escolas e comunidades com o tema de combate às mudanças climáticas: ação realizada por 68% das empresas respondentes, forma cidadãos mais conscientes sobre a relação entre consumo, reciclagem e emissões de carbono.
- Campanhas de conscientização voltadas a fomentar na sociedade a preferência por produtos reciclados ou recicláveis, como papel reciclado ou embalagens reutilizáveis e de conscientização sobre a importância da reciclagem, ensinando a população a segregar os resíduos corretamente: ações realizadas por 74% e 68% das empresas respondentes, respectivamente, com objetivo de incluir a população na economia circular, aumentando a demanda por produtos circulares, ao passo que reduz emissões associadas à extração e produção de matérias-primas virgens e à destinação inadequada de resíduos.
- Apoio técnico/financeiro voltado para os catadores de recicláveis ou cooperativas de catadores: ação realizada por 63% das empresas respondentes, fortalece a cadeia da reciclagem, ampliando a recuperação de materiais circulares e reduzindo a necessidade de produção primária intensiva em carbono.
- Parcerias com *startups* e universidades para inovação voltada à descarbonização

do setor de Papel & Celulose: ação realizada por 47% das empresas respondentes, impulsiona o desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono, beneficiando a academia e o setor como um todo.

- Oferta de assessoria técnica aos proprietários terceiros de plantios de silvicultura sobre práticas de manejo mais sustentáveis e menos intensivas em carbono: ação realizada por 42% das empresas respondentes, visa engajar e ofertar conhecimento a produtores terceiros de madeira, que poderiam enfrentar barreiras de acesso a esse conhecimento por outros meios.
- Comercialização de produtos com rotulagem que mostre ser um produto de menor pegada de carbono: ação realizada por 11% das empresas respondentes, estimula o consumo responsável e menos carbono intensivo e pressiona o mercado a adotar processos mais descarbonizados.

Ações para as associações e instituições setoriais

As associações e instituições setoriais têm desempenhado papel relevante na promoção da descarbonização no setor Papel & Celulose. Entre as iniciativas mais destacadas, a elaboração de guias técnicos e protocolos para descarbonização foi considerada como muito importante por 74% dos respondentes, evidenciando a valorização de instrumentos práticos e orientativos para a transição para uma economia de baixo carbono. Outras ações também foram reconhecidas como estratégicas e consideradas "muito importantes", de acordo com os percentuais atribuídos pelos respondentes, conforme apresentado a seguir:

- Fomento de parcerias com instituições de pesquisa e *startups*, para inovação em processos e produtos de baixo carbono (63%);
- Criação de plataformas de compartilhamento de boas práticas e *benchmarking* entre empresas do setor (42%);
- Realização de campanhas de conscientização setorial sobre os benefícios econômicos e reputacionais da descarbonização, fortalecendo o engajamento das empresas (58%);
- Oferta de treinamentos, *workshops* e capacitação técnica em temas como inventário de emissões de GEE, mercado de carbono, eficiência energética e economia circular, ampliando o conhecimento técnico nas organizações (63%);
- Promoção de acordos voluntários de metas climáticas, como compromissos de neutralidade de carbono até 2040 ou 2050, reforçando o alinhamento com agendas globais de sustentabilidade (42%).
- Elaboração de guias técnicos e protocolos para descarbonização voltados ao setor, visando oferta de apoio educacional voltado à padronização de metodologia entre as empresas do setor (74%).

Essas iniciativas refletem o esforço coletivo do setor Papel & Celulose em avançar na agenda climática, por meio de ações que combinam orientação técnica, capacitação, inovação e colaboração interinstitucional. O engajamento das associações e instituições setoriais é fundamental para acelerar a transição para modelos de produção mais sustentáveis, garantindo competitividade, responsabilidade socioambiental e alinhamento com os compromissos globais de redução de emissões.



Figura 33 – Diagnóstico da adoção atual de ações de fomento à descarbonização do setor de Papel & Celulose realizadas pelas associações e instituições setoriais.

5.4.1.4.1 Transição justa e inclusiva

Os impactos oriundos das mudanças climáticas não são observados de forma uniforme nas diferentes regiões de, municípios, estados e países. Grupos socialmente marginalizados, especialmente comunidades pobres em áreas com altos índices de vulnerabilidade, são desproporcionalmente afetados. Suas condições socioeconômicas, aliadas a um contexto de desenvolvimento desigual, limitam a capacidade de adaptação e resposta aos diversos efeitos das mudanças climáticas.

Segundo o Relatório de Mudanças Climáticas 2022 do IPCC (IPCC, 2022b), especialmente em seu capítulo 8, os efeitos adversos das mudanças climáticas, os déficits de desenvolvimento e a desigualdade social estão profundamente interligados, agravando-se mutuamente. À medida que os eventos climáticos extremos se intensificam, as vulnerabilidades estruturais e as desigualdades existentes tornam-se ainda mais evidentes, ampliando disparidades e dificultando o avanço rumo ao desenvolvimento sustentável em todas as regiões.

Mais ainda, o avanço das mudanças climáticas representa uma ameaça crescente à estabilidade socioeconômica das populações vulneráveis, especialmente quando seus impactos se somam a fatores estruturais como salários estagnados, elevação do custo de vida, obstáculos à mobilidade social entre tantos outros. Esses elementos intensificam a exposição das comunidades mais pobres aos riscos climáticos.

O Brasil, ao mesmo tempo que é uma potência mundial na produção de papel e celulose, é um país de grandes desigualdades sociais e econômicas. Segundo o IBGE (2024), em 2023, quase metade dos moradores de domicílios rurais (48,9%) vivia em situação de pobreza, e nas áreas urbanas esse percentual foi de 24,2%. Em relação a extrema pobreza, a disparidade entre zonas rurais e urbanas também é evidente: cerca de 9,9% da população rural brasileira encontrava-se em situação de extrema pobreza; nas áreas urbanas, esse índice atingiu 3,6%.

O IPCC (2022b) destaca ainda que os riscos

climáticos não atuam isoladamente; eles frequentemente agravam estressores não climáticos (fatores que afetam negativamente sistemas sociais), como instabilidade política, degradação ambiental e acesso precário a serviços básicos. Essa interação complexa tem implicações profundas, especialmente em comunidades vulneráveis, pois esses riscos se somam a desigualdades sociais e econômicas já existentes.

Diante do cenário atual, é imperativo que estratégias de descarbonização estejam alinhadas a políticas de inclusão social, redução das desigualdades e fortalecimento da resiliência comunitária, permitindo uma melhora das condições socioeconômica de bolsões de pobreza que enfrentam as consequências causadas pelos efeitos das mudanças climáticas.

Inclusive, uma das diretrizes da Estratégia Nacional de Mitigação (MMA, 2025) é a “Transição justa e inclusiva”, que estabelece alguns critérios que devem ser seguidos para a formulação das ações que objetivam a redução de emissões de GEE:

- “Promoção de ações de mitigação climática com uma visão sistêmica e de longo prazo que não deixe ninguém para trás, e que considere o impacto e a capacidade de resposta de grupos sociais distintos na adoção e implementação de medidas de redução de emissões de GEE.
- Valorização dos conhecimentos tradicionais e as culturas locais, assim como dos cobenefícios da ação climática, para impactos positivos socioeconômicos regionais e/ou setoriais decorrentes dos esforços de transição.
- Foco na redução das desigualdades, em suas múltiplas dimensões (de renda, de gênero, racial e regional, dentre outras), na garantia de direitos, da segurança alimentar e nutricional, hídrica e energética da população, na melhoria da qualidade da saúde das populações, na universalização do saneamento básico e erradicação humanizada dos lixões e no combate à pobreza, bem como a alocação justa dos incentivos e custos da transição.”

Sem uma transição efetiva para modelos econômicos e energéticos de baixo carbono, os efeitos da crise climática tendem a se intensificar, perpetuando desigualdades sociais e ambientais. Por isso, a descarbonização não é apenas uma resposta técnica, é uma ação urgente e estruturante para garantir um futuro mais justo e sustentável.

Sendo o setor de Papel & Celulose altamente dependente tanto de capital natural quanto social, ambos sob ameaça dos impactos das mudanças climáticas, a presente estratégia de descarbonização visando o setor não tem como se abster de levar em consideração seus *stakeholders* mais vulneráveis. Muitas vezes situadas em municípios de pequeno a médio porte, baseados anteriormente numa economia primária (agropecuária), as empresas do setor acabam influenciando fortemente o desenvolvimento regional onde se estabelecem, sendo assim corresponsáveis em guiar tal desenvolvimento para um futuro sustentável menos intensivo em carbono.

O setor de Papel & Celulose pode assumir uma postura ativa diante das mudanças climáticas e dos fatores que intensificam seus impactos. Nesse contexto, as questões sociais ocupam

uma posição central, exigindo atenção e responsabilidade por parte das empresas.

Conscientes ou não, as empresas já têm realizado algumas ações nesse sentido. Ações sociais voltadas à redução da pobreza contribuem, de forma indireta, para a descarbonização e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. Ao fortalecer comunidades vulneráveis, essas iniciativas reduzem práticas ambientalmente prejudiciais e aumentam a resiliência social frente aos impactos climáticos. Alguns exemplos de ações de descarbonização que podem ser exercidas e fomentadas para esse público são hortas urbanas e comunitárias que reduzem a pegada de carbono do transporte de alimentos e promovem segurança alimentar, captação de água da chuva, bem como a reutilização e reciclagem que se apresentam como práticas comuns em comunidades de baixa renda e contribuem diretamente para a economia circular, entre outras inúmeras iniciativas de baixo carbono com impacto social.

No entanto, para compreender verdadeiramente os impactos sobre as pessoas, especialmente aquelas em situação de vulnerabilidade e pobreza, é necessário que

as empresas do setor realizem estudos sobre riscos climáticos avançando além da análise da probabilidade de eventos físicos isolados. Essa abordagem ampliada exige a integração de conhecimentos sobre vulnerabilidade, capacidade adaptativa e exposição, através de um mapeamento de todos os *stakeholders* sob algum tipo de ameaça climática. É uma tarefa ainda árdua e incipiente, visto que o setor depende de uma complexa e extensa cadeia de partes interessadas, seja de funcionários próprios que moram nas redondezas, seja de funcionários terceiros, seja de empresas de fornecimento de insumos ou serviços para a empresa ou seus funcionários, ou seja pelas infraestruturas públicas necessárias para dar suporte as suas operações e a qualidade de vida de sua força de trabalho.

Feito esse mapeamento, o setor pode apoiar a população de suas regiões a estimar o quanto as mudanças climáticas tendem a aumentar a probabilidade de ocorrência de eventos extremos ou mudar os padrões climáticos regionais. Apesar de ser responsabilidade pública, a elaboração de uma análise de risco climático regional pode ser favorecida com conhecimentos e avaliações empresariais realizadas para mensurar o próprio risco corporativo, permitindo estimativas mais precisas sobre os custos envolvidos de ações, e potencialmente, fomentando a criação de ações de parceria público-privado no contexto.

Já na elaboração de ações de descarbonização (e de adaptação), o setor precisa incluir em sua análise saberes locais, que oferecem perspectivas valiosas sobre como diferentes comunidades enfrentam e respondem a eventos extremos. Incorporar essas dimensões humanas é fundamental para capturar as perdas reais e os desafios enfrentados por populações afetadas.

Ações individuais e locais podem contribuir para a descarbonização e, segundo as percepções de Robinson (2023), tendem a gerar mudança na postura para o desenvolvimento de práticas sustentáveis. Robinson (2023) ainda menciona que as comunidades vulneráveis buscam informações para responder as necessidades ambientais de seu território. O potencial das empresas de influenciar as comunidades do seu entorno em prol da descarbonização é enorme.

A contribuição das comunidades vulneráveis para a descarbonização é muitas vezes subestimada, mas pode ser profundamente transformadora, especialmente quando essas comunidades são envolvidas como protagonistas da transição ecológica. Apesar de enfrentarem desafios socioeconômicos, elas têm potencial para gerar soluções sustentáveis, adaptadas ao território e com forte impacto social.

Conhecimento tradicional e local também são fortes aliados às práticas de descarbonização, saberes comunitários sobre manejo sustentável, preservação de biomas e convivência com o clima são valiosos para estratégias de adaptação e mitigação. Esses conhecimentos ajudam a construir soluções de baixo custo, culturalmente adequadas e ambientalmente eficazes. A descarbonização pode fortalecer comunidades vulneráveis ao gerar empregos sustentáveis, melhorar a qualidade do ar e reduzir doenças respiratórias, criando um ciclo virtuoso de saúde, renda e inclusão.



5.4.2 Principais Desafios para Implantar Ações de Descarbonização na Visão das Empresas do Setor de Papel e Celulose

Os desafios de descarbonização que recaem sob todos os setores, segundo o Plano Setorial da Indústria (MDIC, 2025), referem-se à necessidade de capacitação da força de trabalho; os altos custos de modernização e operação de novas tecnologias; e as barreiras de acesso ao financiamento, especialmente para segmentos industriais altamente intensivos em energia e "difíceis de abater" ("hard-to-abate"), e por empresas de menor porte. No âmbito de ameaças externas à descarbonização, o Plano Setorial da Indústria (MDIC, 2025) cita mudanças no comportamento do consumidor, exigências do mercado financeiro, evolução regulatória, exposição às restrições de políticas de comércio internacional, como o Mecanismo de Ajuste de Carbono na Fronteira (CBAM) da União Europeia, políticas tarifárias e instabilidades geopolíticas que impactam a dinâmica industrial.

Visando compreender a percepção das empresas do setor de Papel & Celulose, no questionário, as empresas participantes foram questionadas sobre quais os principais

desafios atualmente para a implantação de ações de descarbonização pelas empresas do setor de Papel & Celulose. As respostas foram categorizadas em temas, e o resultado é apresentado no gráfico 34 a seguir

Figura 34 (dir.) - Principais desafios na implantação de ações de descarbonização no setor de Papel & Celulose, de acordo a percepção das empresas respondentes.



5.4.2.1 Desafios Econômicos e Regulatórios

O setor de Papel & Celulose enfrenta barreiras econômicas significativas para avançar em sua agenda de descarbonização. A manutenção de incentivos aos combustíveis fósseis torna difícil equilibrar a competitividade das alternativas renováveis, enquanto a ausência de incentivos fiscais específicos desestimula investimentos em soluções de baixo carbono. Soma-se a isso a escassez de linhas de crédito e a limitação de recursos próprios das empresas, o que restringe a capacidade de financiar projetos de grande porte, especialmente aqueles que demandam retrofits complexos ou a aquisição de novos equipamentos, geralmente de alto custo.

No campo regulatório, a incerteza em torno da Lei nº 15.042/2024, que institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBOE), gera insegurança nas decisões estratégicas, já que não há clareza sobre os impactos mercadológicos e obrigações futuras. Esse cenário cria um ambiente de cautela, onde as empresas ponderam riscos financeiros e regulatórios antes de assumir compromissos mais ambiciosos de descarbonização, atrasando a transição para uma indústria mais sustentável.

5.4.2.2 Desafios Operacionais

Sobre os desafios operacionais para avançar na descarbonização, a mensuração das emissões ainda é uma barreira, seja pela dificuldade de compreensão da metodologia de cálculo de emissões, ou pela dificuldade de se obter dados detalhados, automatizados e contínuos; ou ainda pela complexidade de contabilizar emissões indiretas de escopo 3. Além disso, a idade das fábricas impõe limitações técnicas e operacionais, dificultando a incorporação de novas tecnologias e exigindo adaptações complexas e custosas para alcançar maior eficiência energética.

Outro entrave é a oferta irregular de biocombustíveis, que compromete a previsibilidade e a segurança do abastecimento, reduzindo a confiabilidade de estratégias de substituição de combustíveis fósseis. Soma-se a isso o longo tempo necessário para implementar ações de descarbonização, que envolve desde a adaptação de processos

até o treinamento de equipes, atrasando os resultados esperados e aumentando os riscos de retorno financeiro mais lento.

5.4.2.3 Desafios de Mercado de Renováveis e Logísticos

O setor de Papel & Celulose enfrenta desafios relevantes ligados ao mercado de renováveis e a sua logística na implantação de ações de descarbonização. A baixa disponibilidade de fontes de energia limpa em determinadas regiões e a oferta limitada de combustíveis alternativos dificultam a substituição dos combustíveis fósseis em atividades específicas, comprometendo a viabilidade de metas de redução de emissões no curto e médio prazo. Outro aspecto a ser pontuado é o fenômeno conhecido como curtailment, que consiste na limitação da geração de energia renovável por restrições na rede elétrica ou falta de capacidade de armazenamento, o que impacta num fornecimento contínuo e confiável.

Além disso, a infraestrutura de distribuição de biocombustíveis ou de abastecimento de energia renovável em veículos no país ainda é pouco desenvolvida e recebe baixos investimentos, o que gera complexidade logística e custos adicionais para as empresas que buscam adotar alternativas mais sustentáveis. Essa limitação estrutural cria barreiras à escala e à confiabilidade do fornecimento, tornando a transição energética mais lenta e desigual entre diferentes localidades.

5.4.2.4 Desafios Tecnológicos e de Inovação

Existem importantes desafios tecnológicos na busca pela descarbonização, especialmente pela necessidade contínua de investir em pesquisa e inovação para otimizar processos e reduzir emissões residuais. A pressão por resultados rápidos se soma ao longo tempo de maturação de novas soluções, exigindo recursos financeiros e técnicos em um cenário de incerteza sobre a efetividade das tecnologias emergentes.

Outro obstáculo é o risco associado ao pioneirismo, já que ser a primeira indústria a adotar uma nova tecnologia pode gerar custos elevados, falhas operacionais ou perda

de competitividade caso a solução não se consolide no mercado. Além disso, muitas tecnologias ainda se encontram em fase de desenvolvimento, sem estarem totalmente prontas para aplicação em escala industrial ou comercial, o que aumenta a cautela das empresas na tomada de decisão e retarda a implementação de medidas mais transformadoras.

5.4.2.5 Desafios de Engajamento e Lacuna de Conhecimento

Também foi citado como desafio na implantação de ações de descarbonização a lacuna de conhecimento técnico e operacional. Ainda há falta de capacitação específica sobre o tema, tanto nas operações industriais quanto nas florestais, além de incertezas sobre alternativas viáveis para substituir combustíveis fósseis em equipamentos críticos, como os fornos de cal. Essa ausência de clareza também se estende aos custos e impactos das medidas de descarbonização, o que limita a tomada de decisão estratégica e pode gerar resistência dentro das empresas.

Outro ponto central é o desafio de engajamento interno, que exige mudança cultural e alinhamento entre diferentes áreas da organização para priorizar a agenda climática. Além disso, a dependência de fornecedores com distintos níveis de maturidade e capacidade tecnológica aumenta a complexidade de implementação, já que nem todos estão preparados para atender às exigências da transição para uma economia de baixo carbono.



5.5 *Benchmarking*

Um *benchmarking* consiste basicamente num processo de comparação de desempenho, processos ou práticas de uma organização com os de outras — geralmente líderes do setor ou concorrentes diretos — com o objetivo de identificar oportunidades de melhoria.

No contexto da descarbonização, a intensidade de emissões de GEE é um importante indicador de desempenho, que expressa a quantidade de emissões de GEE por unidade de atividade, produção ou qualquer outra métrica específica da organização.

Em conjunto com outras métricas da organização, como por exemplo emissões absolutas de GEE, ajudam a contextualizar o desempenho da organização.

Para este relatório foram levantados dados do setor de Papel & Celulose referentes a intensidade das emissões de GEE (Escopo 1 & 2) por unidade de produto celulose e papel (tonelada de CO₂ equivalente por tonelada de produto acabado) dos principais mercados produtores de papel e celulose, bem como sobre a existência de estratégias de descarbonização desse setor em outros países. A divulgação de intensidade de emissões está presente em diversas formas de relatos voluntários de empresas ou associações do setor.

O foco principal deste *benchmarking* foi concentrado nos principais países e regiões produtoras do setor (Estados Unidos, Brasil, China, Canadá, Suécia, Finlândia, Japão, Alemanha, Índia e Indonésia), não limitado a estes.

Sabe-se que a análise comparativa de dados de diferentes empresas/nações tem muitos desafios, principalmente àqueles relacionados a uniformização dos dados. Muitas variáveis podem influenciar nesta uniformização, como premissas, exclusões, incertezas, tecnologia e tipos de produto produzido, como por exemplo, os diferentes tipos de papel. Desta forma, este *benchmarking* deve ser considerado apenas como uma referência de dados do setor.

— Global

A plataforma da *Transition Pathway Initiative (TPI)*, uma iniciativa independente criada em 2017, sobre o progresso alcançado por entidades corporativas na transição para uma economia de baixo carbono, apresenta a intensidade de emissões de GEE de 25 empresas de papel e celulose ao redor do mundo, conforme detalhado na tabela a seguir.

A partir dos dados observa-se que as regiões da Europa e Ásia Central e América Latina e Caribe apresentaram as menores faixas de intensidade de emissões. Na América Latina destaca-se o Brasil com alto potencial de produção de energia e vapor a partir de fontes renováveis, o que impacta diretamente na

redução das emissões de GEE. Na Europa tem-se a fábrica com a menor intensidade de emissões registrada e na América do Norte tem-se fábricas com baixas intensidades de emissão registrada. Na região da Ásia Oriental e Pacífico ainda se encontra fábricas com altas intensidades de emissão registradas.

— Europa

A Europa é um dos grandes produtores de celulose e papel do mundo. Segundo a Confederação Europeia da Indústria de Papel (*Cepi - Confederation of European Paper Industries*), que representa 91% da indústria europeia de celulose e papel em termos de produção, a intensidade de emissões diretas de GEE do setor na Europa decresceu entre 1991 e 2023, de 0,54 para 0,25 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de produto acabado, enquanto a intensidade de emissões diretas de GEE (compra de energia), decresceu de 0,19 a 0,10 no mesmo período (Cepi, 2024).

Região	Amostra (empresas)	Faixa de intensidade de emissões ¹
Ásia Oriental e Pacífico	10	0,48 - 1,70
Europa e Ásia Central	7	0,04 - 0,48
América Latina e Caribe	3	0,14 - 0,33
América do Norte	4	0,26 - 0,85
África Subsariana	1	0,80
TOTAL	25	0,04 - 1,70

Tabela 8 - Intensidade de emissões de GEE de empresas de papel e celulose por região global. ¹ toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de produto acabado. Fonte: TPI (2025).

A Cepi publicou “The Forest Fibre Industry. 2050 Roadmap to a low-carbon bio-economy” sobre a estratégia de descarbonização do setor na Europa.

— Estados Unidos

Os Estados Unidos é um dos maiores produtores de celulose e papel do mundo. De acordo com os dados disponíveis no *Greenhouse Gas Reporting Program (GHGRP)*, da *Environmental Protection Agency (EPA)* as emissões de GEE do setor de Papel & Celulose variaram no período entre 2011 e 2023, de 44,4 para 32,0 milhões de toneladas de CO₂ equivalente (GHGRP, 2025). A partir destes dados de emissão e de dados de produção do setor, fez-se uma simples estimativa da intensidade de emissões de GEE do setor entre 2011 e 2023, na qual verificou-se que a intensidade de emissões estimadas de GEE do setor decresceu de 0,59 para 0,53 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de produto acabado. Destaca-se que as emissões de GEE referente ao tratamento de efluentes líquidos e resíduos sólidos não estão incluídas.

O departamento de Energia do governo dos Estados Unidos publicou em 2022 o “Industrial Decarbonization Roadmap” com caminhos tecnológicos necessários para atingir as emissões líquidas zero até 2050 no setor industrial, a análise foi feita para 5 subsetores (metais e aço, químicos, alimentício, refinaria e cimento), o setor de Papel & Celulose não fez parte.

— China

A China é o maior produtor de papel do mundo, e o setor de Celulose & Papel é categorizado como uma das 8 industriais chaves para controle das emissões de carbono. Segundo Man et al. (2020), estudo de transição energética de baixo carbono da indústria de Papel & Celulose na China, realizado pela Universidade de Tecnologia no Sul da China, a intensidade de emissões da produção de papel varia de 1,95 a 6,52 CO₂ equivalente por tonelada de produto acabado, a depender do tipo de papel produzido.

— Canadá

O Canadá é o quarto maior produtor de celulose

do mundo. A partir de dados de emissão total de GEE do *Natural Resources Canada (NRCAN, 2025)* e de dados de nacionais de produção fez-se uma simples estimativa da intensidade de emissões de GEE do setor em 2000, e entre 2018 e 2022, na qual verificou-se que a intensidade de emissões estimadas de GEE do setor decresceu de 0,94 (2000) para 0,36 (2022) toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de produto acabado.

— Suécia

A Suécia é o quinto maior produtor de celulose do mundo. De acordo com a Federação Sueca das Indústrias Florestais (*Swedish Forest Industries Federation*), que representa 220 empresas, sendo 40 fábricas de celulose e papel, entre 2001 e 2020, a intensidade de emissões estimadas de GEE do setor decresceu de 0,120 para 0,015 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de produto acabado (*Forest Industries, 2020*).

— Japão

O Japão é o terceiro maior produtor de papel do mundo. A partir de dados de produção e de emissão de GEE da Associação de Papel do Japão (*JPA - Japan Paper Association*) fez-se uma simples estimativa da intensidade de emissões de GEE do setor entre 2013 e 2022, na qual verificou-se que a intensidade de emissões estimadas de GEE do setor decresceu de 0,78 para 0,67 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de produto acabado (adaptado de *JPA, 2023*).

A JPA publicou “Technology Roadmap for Transition Finance in Pulp and Paper Sector” e “Carbon Neutrality Action Plan” sobre a descarbonização do setor no Japão.

— Alemanha

A Alemanha é o quarto maior produtor de papel do mundo. A partir de dados de produção e de emissão de GEE do Centro de Competência para a Proteção Climática em Indústrias com Alto Consumo Energético (*KEI - Kompetenzzentrum Klimaschutz in Energieintensiven Industrien*), fez-se uma simples estimativa da intensidade de emissões de GEE do setor em 2020, na qual verificou-se que a intensidade de emissões

estimadas de GEE do setor foi de 0,67 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de produto acabado (KEI, 2025).

— Índia

A Índia está entre os maiores produtores de papel do mundo. Segundo a Associação Técnica Indiana de Celulose e Papel (*IPPTA - Indian Pulp and Paper Technical Association*), a intensidade de emissões de GEE do setor em 2019 foi de 1,58 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de papel e embalagem. Um estudo realizado pela IPPTA estimou o potencial de redução de emissão para 2040, num cenário de *business as usual* a intensidade cairia para 1,26 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de produto acabado, enquanto para um cenário mais ambicioso, a intensidade cairia para 0,62 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de produto acabado (IPPTA, 2023).

A IPPTA publicou “The Forest Fibre Industry. 2050 Roadmap to a low-carbon bio-economy” e “Carbon Neutrality Possibilities in Pulp & Paper Sector” sobre a estratégia de descarbonização do setor na Índia.

— Austrália

De acordo com a Associação Australiana de Produtos Florestais (*AFPA - Australian Forest Products Association*), entre 2020 e 2021 as emissões médias considerando os escopos de emissão 1 e 2 foram de 1,08 tonelada de CO₂ equivalente por toneladas de produto acabado (AFPA, 2021).



6 MAPEAMENTO DAS AÇÕES POTENCIAIS DE DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR



A transição para a descarbonização não é um caminho singular, mas uma jornada multifacetada envolvendo várias tecnologias e estratégias. A transição energética a partir de fontes renováveis está no centro dessa mudança.

Oferecendo alternativas sustentáveis e de baixa emissão, as fontes renováveis fornecem a espinha dorsal de um sistema de energia livre de combustíveis fósseis.

No entanto, a transição vai além da simples substituição de uma forma de energia por outra, ou de um material por outro; requer uma revisão de toda a nossa infraestrutura energética e principalmente da nossa forma de consumo. Alcançar essa transição requer uma abordagem abrangente envolvendo governos, *stakeholders* do setor, sociedade civil e comunidades. Medidas políticas como precificação de carbono e incentivos às energias renováveis, juntamente com a cooperação internacional, são essenciais para o sucesso.

Nesse sentido, foi realizado um mapeamento das ações potenciais de descarbonização aplicáveis ao setor de Papel & Celulose, as quais foram segregadas em 4 eixos estratégicos (alavancas prioritárias), que são interconectados, e apresentam os principais temas que poderão ser desenvolvidos e implementados pelas empresas em sua jornada de descarbonização até 2050.

A seguir, para cada eixo, são apresentadas as ações, soluções e iniciativas potenciais para se alcançar os objetivos de implementação da estratégia de descarbonização do setor de Papel & Celulose até 2050.

Estas recomendações foram agrupadas em:

- Ações Impactantes: apresentam impacto direto na redução de emissões ou remoção/captura de GEE); e
- Ações Estruturantes: estabelecem condições fundamentais para a execução e implementação das ações impactantes.



Figura 35 – Eixos da estratégia de descarbonização do setor de Papel & Celulose.

6.1 Eixo I – Governança Corporativa Climática

A governança corporativa climática engloba não somente a gestão do carbono em termos de identificação das fontes, monitoramento, mitigação e compensação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), mas toda uma estrutura corporativa de gestão do tema de mudanças climáticas como um todo, que envolve ações para monitoramento, avaliação e valoração dos riscos climáticos, estabelecimento de uma política corporativa de mudanças do clima e de um comitê de mudanças climáticas, para um efetivo engajamento dos *stakeholders* contemplando inclusive remuneração variável de executivos relacionada a essa temática, bem como o estabelecimento de compromissos, de metas e de indicadores, inclusão do carbono nas análises de viabilidade de novos projetos, relatos das emissões de GEE, etc.

O setor privado é uma peça fundamental na transição para uma sociedade mais sustentável. Assim, gerenciar a convergência da descarbonização com metas de ESG (*Environmental, Social e Governance*) ou sustentabilidade mais amplas requer estruturas de governança robustas e mecanismos de relatórios transparentes nesse setor.

Para o alcance de resultados a governança das empresas deve incluir as questões climáticas em sua estratégia de negócio, de tal forma que haja envolvimento e comprometimento da alta direção, a qual deve estabelecer, implementar e manter uma política de sustentabilidade que inclua ações para combate às mudanças climáticas.

Toda a alta direção, assessorada por um comitê de sustentabilidade ou ESG ou climático, deve estar envolvida na supervisão e nas decisões relacionadas a essa temática. Além disso, a criação de uma área específica relacionada às mudanças climáticas e/ou carbono com um centro de custo dedicado para desenvolvimento de projetos nessa área é essencial



para estabelecimento de uma estrutura de governança climática forte e independente.

A participação em iniciativas e compromissos nacionais e internacionais relacionados às mudanças climáticas são essenciais e base para a governança climática, bem como para a comunicação e engajamento dos *stakeholders*.

Empresas que não possuem uma governança estruturada, ou que tenham falta de verba e pessoal especializado para criar e manter estruturas formais de governança (como comitês, auditorias, *compliance*, ou elaboração e revisão de políticas); ou que tenham uma cultura de gestão centralizada nos sócios, com pouca separação entre gestão e propriedade; ou que tenham foco apenas em prioridades de curto prazo devido a necessidade em manter o fluxo de caixa e as operações diárias, acabam por deixar a governança em segundo plano, incluindo a governança corporativa climática.

O estabelecimento de metas de mitigação de emissão de GEE e indicadores de desempenho é peça-chave para o desenvolvimento de uma estratégia climática bem-sucedida, bem como o relato das ações no combate às mudanças climáticas, que traz maior transparência sobre os resultados da estratégia climática.

Assim, este capítulo tem como objetivo apresentar as principais ações estruturantes relacionadas a governança corporativa climática, distribuídas nos seguintes tópicos:

- A. Estruturar a governança corporativa climática
- B. Monitorar a governança corporativa climática
- C. Estratégia climática corporativa

Esse capítulo resume as diferentes ações potenciais relacionadas a governança corporativa climática. A descrição detalhada de cada uma das ações é apresentada no Anexo III.



A. Estruturar a governança corporativa climática

A governança corporativa climática engloba não somente a gestão do carbono em termos de identificação das fontes, monitoramento, mitigação e compensação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), mas toda uma estrutura corporativa de gestão do tema de mudanças climáticas como um todo, que envolve ações para monitoramento, avaliação e valoração dos riscos climáticos, estabelecimento de uma política corporativa de mudanças do clima e de um comitê de mudanças climáticas, etc.

Esse grupo inclui ações potenciais relacionadas a governança corporativa climática.

- A1. Criar um Comitê de Mudanças Climáticas (GVN.1)
- A2. Estabelecer uma Política Corporativa de Mudanças Climáticas (GVN.2)

B. Monitorar, verificar e reportar impactos climáticos gerados pelas operações da empresa

O monitoramento, a verificação e o reporte dos impactos climáticos deixaram de ser iniciativas voluntárias para se tornarem partes essenciais da governança corporativa e da competitividade empresarial. Esses processos garantem transparência, reduzem riscos, melhoram a tomada de decisão e fortalecem a relação com *stakeholders*.

Esse grupo inclui ações potenciais relacionadas ao monitoramento, verificação e reporte de impactos climáticos.

- B1. Contemplar o Risco Climático na Análise de Risco Integrado da Empresa (GVN.3)
- B2. Elaborar anualmente relatório de sustentabilidade (GVN.4)
- B3. Elaborar Anualmente Relatório de Inventário Corporativo Climático (GVN.5)
- B4. Realizar Análise de Ciclo de Vida (GVN.6)
- B5. Estabelecer metas de mitigação e de indicadores de desempenho e monitorar sua performance (GVN.7)

C. Estratégia climática corporativa

A estratégia climática corporativa é o conjunto de políticas, metas, práticas e investimentos que uma empresa adota para reduzir emissões, mitigar riscos climáticos, adaptar operações e gerar valor de longo prazo. Ela não é mais opcional: tornou-se um componente central da competitividade e da governança empresarial moderna.

Esse grupo inclui ações potenciais relacionadas a estratégia climática corporativa.

- C1. Adotar Precificação Interna do Carbono (GVN.8)
- C2. Compensar as Emissões (GVN.9)
- C3. Pagamentos por Serviços Ambientais (GVN.10)
- C4. Comprar Certificado de Origem Renovável (RECs) (GVN.11)



6.2 Eixo II – Soluções Técnicas (Alternativas de Descarbonização)

As emissões líquidas zero de CO₂ do setor industrial são possíveis, mas desafiadoras. A eficiência energética continuará a ser importante. A redução da demanda de materiais, a eficiência dos materiais e as soluções de economia circular podem reduzir a necessidade de produção primária. As opções de produção primária incluem a mudança para novos processos que usam energia e matérias-primas de baixa a zero emissão de GEE (por exemplo, eletricidade, hidrogênio, biocombustíveis e captura e utilização de carbono (CCU) para matéria-prima de carbono e captura e armazenamento de carbono (CCS) para o CO₂ restante). Essas opções exigem um aumento substancial da eletricidade, hidrogênio, reciclagem, CO₂ e outras infraestruturas, bem como a eliminação ou conversão das plantas industriais existentes (IPCC, 2022b).

Em suma, reduzir significativamente as emissões da indústria requer uma reorientação do foco histórico em melhorias importantes, mas incrementais (por exemplo, eficiência energética) para mudanças transformacionais no fornecimento de energia e matéria-prima, eficiência de materiais e fluxos de materiais mais circulares (IPCC, 2022b).

Assim, este capítulo tem como objetivo apresentar as principais ações impactantes referentes às soluções técnicas para a descarbonização, distribuídas nos seguintes tópicos:

- A. Eficiência operacional
- B. Transição energética
- C. Adaptação climática em prol da mitigação climática

- D. Circularidade e uso eficiente de recursos
- E. Remoção de carbono
- F. Bioprodutos
- G. Gestão de emissões fugitivas

Esse capítulo resume as diferentes ações potenciais relacionadas a soluções técnicas de descarbonização. A descrição detalhada de cada uma das ações é apresentada no Anexo III.



Os esforços atuais para combater as mudanças climáticas têm focado principalmente no papel essencial da energia renovável e das medidas de eficiência energética. No entanto, cumprir as metas climáticas também exigirá o enfrentamento de 45% de emissões restantes associadas à fabricação de produtos (Fundação Ellen MacArthur, 2019), ou seja, ao uso eficiente dos recursos naturais.

Esse grupo inclui ações potenciais relacionadas a eficiência na operação florestal, na operação industrial e na operação logística.

- A1. Eficiência na operação florestal
 - A1.1. Manejo florestal sustentável (EOF.01)
 - A1.2. Otimização do ciclo de rotação de corte (EOF.02)
 - A1.3. Uso de drones para monitorar o desenvolvimento dos plantios (EOF.03)
- A2. Eficiência na operação industrial
 - A2.1. Modernizar caldeiras e fornos para aumentar a eficiência térmica (EOI.01)
 - A2.2. Reduzir consumo de água, reaproveitar água da chuva, reusar efluente tratado (EOI.02)
 - A2.3. Implantar sistemas de monitoramento e gestão de energia em tempo real (EOI.03)
- A3. Eficiência na operação logística
 - A3.1. Otimizar rotas logísticas por sistemas de gestão de transporte (TMS), IoT e sensores inteligentes na frota (EOL.01)
 - A3.2. Considerar intensidade de carbono na logística na etapa de planejamento estratégico de novas unidades (EOL.02)
 - A3.3. Alterar modal rodoviário para ferrovias, hidrovias/cabotagem (EOL.03)
 - A3.4. Aumentar a capacidade de caminhões pesados (EOL.04)
 - A3.5. Renovação da frota e manutenção preventiva (EOL.05)
 - A3.6. Aumentar a eficiência energética nas operações associadas a logística (em centros de distribuição, em terminais logísticos, em terminais portuários) (EOL.06)
 - A3.7. Otimizar coleta de aparas com roteirização de rotas e fortalecimento de parcerias (EOL.07)
 - A3.8. Realizar monitoramento remoto de máquinas e veículos para otimizar consumo de combustível e reduzir emissões (EOL.08)



B. Transição energética

As emissões de GEE associadas à energia correspondem a 55% das emissões totais (Fundação Ellen MacArthur, 2019). Neste sentido, a mudança de combustíveis fósseis e materiais de base fóssil para alternativas renováveis e de baixo carbono representa um dos desafios mais significativos dos tempos atuais.

Esse grupo inclui ações potenciais relacionadas ao consumo de energia renovável, eletrificação e combustíveis com baixa emissão de carbono fóssil.

- B1. Consumo de energia renovável
 - B1.1 Aumentar autogeração de energia solar e eólica (TER.01)
 - B1.2 Reaproveitamento da energia hidráulica do efluente tratado (TER.02)
 - B1.3 Implantar sistemas de cogeração para produção de energia a partir de biomassa (TER.03)
- B2. Eletrificação
 - B2.1 Trocar caldeiras a combustíveis fósseis por caldeiras elétricas (TEL.01)
 - B2.2 Substituir equipamentos/maquinários móveis (empilhadeiras, pás carregadeiras), e veículos (leves e utilitários operacionais e caminhões pequenos e médios) da operação industrial movidos a combustíveis fósseis por elétricos (TEL.02)
 - B2.3 Substituir equipamentos/maquinários e veículos (tratores, plantadeiras, colheitadeiras, caminhões internos aos talhões) da operação florestal movidos à combustíveis fósseis por elétricos (TEL.03)
 - B2.4 Substituir equipamentos/maquinários (guindastes, transpaleteiras) e veículos (leves e utilitários operacionais e caminhões pequenos e médios; exceto navios e barcaças) da operação logística movidos à combustíveis fósseis por elétricos (TEL.04)
- B3. Combustíveis com baixa emissão de carbono fóssil
 - B3.1 Trocar caldeiras à combustíveis fósseis por caldeiras à biomassa (TBC.01)
 - B3.2 Utilizar caminhões de pequeno e médio portes movidos a gás natural veicular (TBC.02)
 - B3.3 Substituir combustíveis fósseis mais intensivos em carbono por gás natural (TBC.03)
 - B3.4 Produzir etanol celulósico (TBC.04)
 - B3.5 Aumentar consumo de etanol em veículos leves e semi-leves (TBC.05)
 - B3.6 Aumentar o consumo de biodiesel na logística (TBC.06)
 - B3.7 Produzir e/ou consumir biometano no setor (TBC.07)



- B3.8 Produzir e/ou consumir bio-óleo e biochar no setor (TBC.08)
- B3.9 Produzir e consumir Gás de Síntese (Syngas) (TBC.09)
- B3.10 Aumentar o consumo de Diesel Verde (HVO) (TBC.10)
- B3.11 Produzir e/ou consumir Metanol Verde (TBC.11)
- B3.12 Produzir e/ou consumir Amônia Verde (TBC.12)
- B3.13 Incentivar o uso de caminhões com motor bifuel diesel-etanol (TRA.01)
- B3.14 Produzir e/ou consumir hidrogênio de baixo carbono (TRA.02)

C. Adaptação climática em prol da mitigação climática

A adaptação à mudança do clima é o processo de ajuste de sistemas naturais e humanos ao comportamento do clima no presente e no futuro e seus efeitos, buscando reduzir e evitar potenciais danos e explorar oportunidades apresentadas pela mudança do clima. Contudo, essas ações de preparo dos ecossistemas e comunidade para os efeitos das mudanças climáticas também ajudam a reduzir as emissões de gases de efeito estufa (mitigação).

Esse grupo inclui ações potenciais relacionadas a adaptação climática em prol da mitigação climática.

- C1. Diversificação genética florestal para aumentar a resiliência a climas extremos e pragas (ADP.01)
- C2. Priorização de áreas com menores riscos climáticos para ampliação da base florestal (ADP.02)
- C3. Monitoramento de bacias hidrográficas para garantir disponibilidade hídrica futura (ADP.03)
- C4. Adequação de sistemas de drenagem para eventos climáticos extremos (enchentes) (ADP.04)
- C5. Fortalecimento de estruturas contraventos fortes e temperaturas elevadas (ADP.05)
- C6. Planos de contingência para interrupções causadas por eventos climáticos (ADP.06)
- C7. Contratação de Seguro climático (ADP.07)

D. Circularidade e uso eficiente de recursos

O cumprimento das metas climáticas exigirá o enfrentamento de 45% de emissões associadas à fabricação de produtos (Fundação Ellen MacArthur, 2019), ou seja, ao uso eficiente dos recursos naturais. Nossa economia linear atual está nos conduzindo para um aumento de 3 a 6 °C até 2044. Se os países do Acordo de Paris cumprirem seus compromissos de redução de emissões, teremos aumento de 2 a 3 °C. Se o índice de circularidade global for dobrado (17%), manteremos a temperatura global inferior a 2°C (CGR, 2021). Desta forma, o uso eficiente dos recursos naturais é fundamental no processo de combate às mudanças climáticas.

Esse grupo inclui ações potenciais relacionadas a circularidade e uso eficiente de recursos.

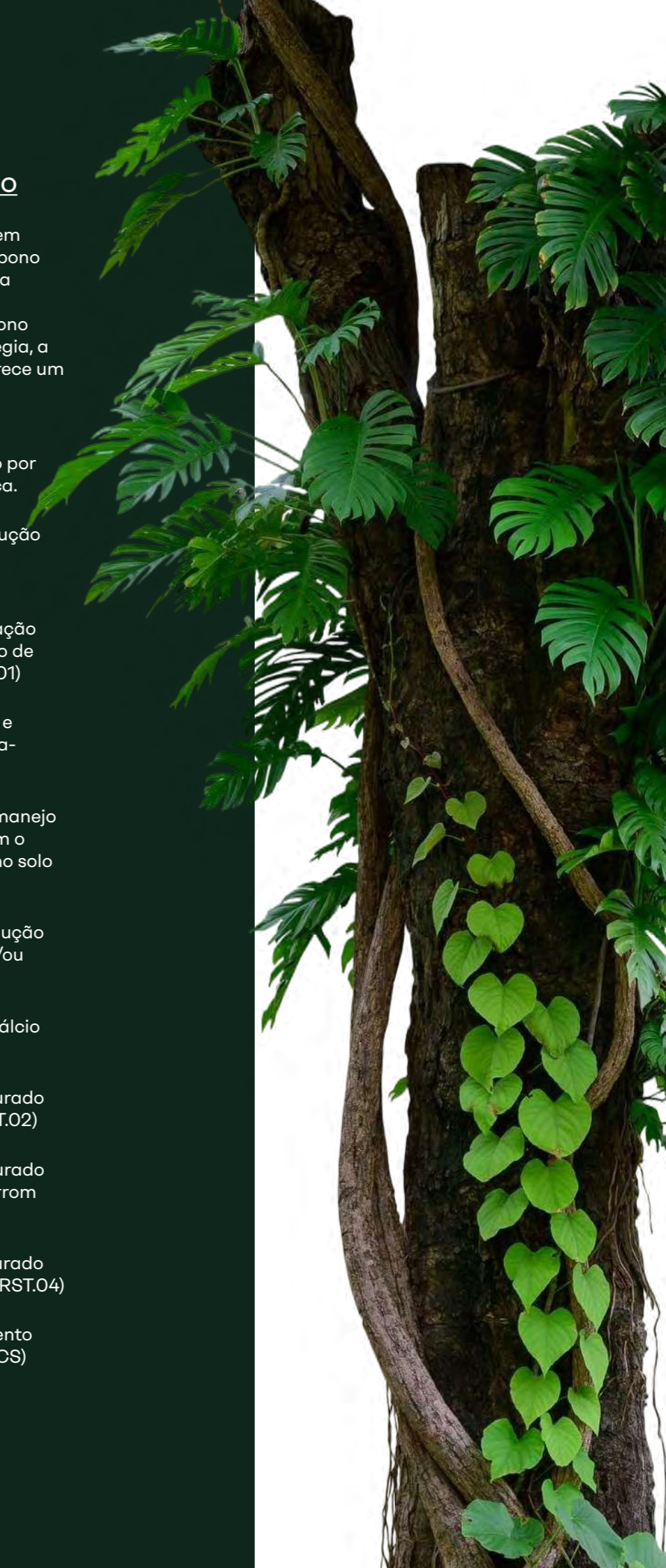
- D1. Realizar recuperação de potássio das cinzas da caldeira de recuperação para produção de sulfato de potássio (CIN.01)
- D2. Realizar Recuperação de Enxofre para Produção de Ácido Sulfúrico (CIN.02)
- D3. Realizar Recuperação de Hidrogênio a partir da Produção de Clorato de Sódio (CIN.03)
- D4. Realizar Recuperação de Alumínio e Fósforo do Tratamento de Efluentes Líquidos e de Alumínio do Tratamento de Água (CIN.04)
- D5. Reduzir o Uso de Aterro através do aproveitamento energético de lodo do tratamento de efluentes líquidos (CIN.05)
- D6. Reduzir o uso de aterro através da compostagem e produção de condicionadores de solo, tais como corretivos de acidez do solo e/ou fertilizantes orgânicos (CIN.06)
- D7. Produzir briquetes a partir de cinzas de caldeira (CIN.07)
- D8. Recuperação energética de metanol residual (oriundo de processamento de madeira) nas caldeiras e forno de cal (CIN.08)
- D9. Aumentar o uso de aparas de papel (CTE.01)
- D10. Realizar a recuperação (energética, extrusão) de aparas de plástico misto (CTE.02)

E. Remoção de carbono

Para atingir as metas líquidas zero em toda a economia, a remoção de carbono baseada na natureza e na tecnologia é essencial. Embora as reduções significativas das emissões de carbono continuem sendo a principal estratégia, a remoção de dióxido de carbono oferece um complemento essencial.

Esse grupo inclui ações potenciais relacionadas a remoção de carbono por solução natural e por solução técnica.

- E1. Remoção de carbono por solução natural (soluções baseadas na natureza)
 - E1.1 Ampliar área de restauração de florestas nativas e criação de corredores ecológicos (SBN.01)
 - E1.2 Sistemas Agroflorestais e Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) (SBN.02)
 - E1.3 Adoção de práticas de manejo na silvicultura que aumentem o estoque de carbono médio no solo e na biomassa (SBN.03)
- E2. Remoção de carbono por solução técnica de captura, utilização e/ou armazenamento de carbono
 - E2.1 Produzir carbonato de cálcio precipitado (PCC) (RST.01)
 - E2.2 Utilização do CO₂ capturado na separação da lignina (RST.02)
 - E2.3 Utilização do CO₂ capturado para lavagem de massa marrom (RST.03)
 - E2.4 Utilização do CO₂ capturado no tratamento de efluentes (RST.04)
 - E2.5 Captura e Armazenamento Geológico do Carbono (BECCS) (RST.01)



F. Bioprodutos

Os bioprodutos são importantes no combate às emissões de GEE porque podem substituir materiais derivados do petróleo, permitindo a redução de emissões associadas à extração, refino e queima de combustíveis fósseis, que são grandes fontes de CO₂.

Esse grupo inclui ações potenciais relacionadas a produção potencial de diferentes bioprodutos pelo setor de Papel & Celulose.

- F1. Produzir lignina (RES.01)
- F2. Produzir embalagem a partir de lignina (RES.02)
- F3. Produzir/consumir celulose microfibrilada ou MFC (RES.03)
- F4. Produzir fibra têxtil à base de celulose solúvel (viscose, modal e liocel) (RES.04)
- F5. Produzir breu (RES.05)
- F6. Produzir terebentina (RES.06)
- F7. Produzir *tall oil* (RES.07)

G. Gestão de emissões fugitivas

O aquecimento global não depende apenas das emissões de CO₂, mas também na contribuição de outros gases com potencial de aquecimento global, incluindo os aerossóis e outros GEE, como por exemplo, N₂O, CH₄ e os gases fluorados (gases-F) (IPCC, 2022b). Esses gases geralmente têm altos potenciais de aquecimento global, milhares ou até dezenas de milhares de vezes maiores que o dióxido de carbono (CO₂), embora sejam emitidos em quantidades menores.

Esse grupo inclui ações potenciais relacionadas a gestão de emissões fugitivas.

- G1. Reduzir ou eliminar emissões fugitivas em equipamentos de refrigeração e climatização (REF.01)
- G2. Eliminação Gradual de SF₆ em Equipamentos Elétricos (REF.02)
- G3. Instalar sensores IoT e sistemas automáticos para detectar vazamentos de gases fluorados (REF.03)



6.3 Eixo III – Instrumentos Econômicos e Políticas Públicas

A redução dos gases de efeito estufa e das mudanças climáticas requer transformações econômicas, sociais e estruturais. Para isso, os instrumentos econômicos e as políticas públicas são essenciais, pois orientam essas mudanças de forma justa, eficiente e sustentável. Neste contexto os instrumentos econômicos são utilizados para internalizar custos ambientais, incentivar a inovação para uma economia verde, estimular investimentos e gerar recursos para financiar políticas de mitigação e adaptação climática. As políticas públicas por sua vez visam estabelecer metas e diretrizes a uma economia de baixo carbono, estabelecer leis, planos e regulamentações que orientam o governo, empresas e sociedade para o desenvolvimento sustentável, além de criar condições para o uso de instrumentos econômicos.

As finanças sustentáveis referem-se ao processo considerar aspectos ambientais, sociais e de governança (ESG) ao tomar decisões de investimento no setor financeiro, levando a mais investimentos de longo prazo em atividades e projetos sustentáveis. Os aspectos ambientais podem incluir a atenuação das mudanças climáticas e medidas de adaptação climática, bem como, a preservação da biodiversidade, a prevenção da poluição e a economia circular. Os aspectos sociais podem referir-se a questões de desigualdade, inclusão, relações laborais, investimento nas pessoas e nas suas competências e comunidades, bem como questões de direitos humanos. A governança de instituições públicas e privadas – incluindo estruturas de gestão, relações com funcionários e remuneração de executivos – desempenha um papel fundamental para garantir a inclusão de considerações sociais e ambientais no processo de tomada de decisão (EC, 2025b).

O principal objetivo das finanças sustentáveis é a alocação de recursos públicos e privados em atividades sustentáveis, inovadoras e inclusivas, reduzindo os riscos ambientais e climáticos, de tal forma a aumentar os investimentos em atividades econômicas e soluções tecnológicas voltadas para a redução do impacto ambiental, abrindo caminho para o desenvolvimento sustentável.

As finanças sustentáveis desempenham um papel crucial na construção de um futuro mais sustentável, principalmente no combate às mudanças climáticas e alcance das metas de redução de emissão de gases de efeito estufa. São essenciais para empresas que desejam se tornar sustentáveis, mas precisam fazê-lo em etapas ao longo do tempo - em outras palavras, empresas com diferentes pontos de partida que desejam financiar sua jornada em direção a um futuro sustentável.

Assim, este capítulo tem como objetivo apresentar as ações estruturantes referente aos principais instrumentos econômicos e políticas públicas relacionados à descarbonização, distribuídas nos seguintes tópicos:

- A. Estratégias e políticas nacionais
- B. Planos, programas e iniciativas
- C. Marcos regulatórios e instrumentos normativos
- D. Finanças, fundos e mecanismos de investimento

Esse capítulo resume os diferentes instrumentos econômicos e políticas públicas relacionadas a descarbonização. A descrição detalhada de cada um é apresentada no Anexo III.



A. Estratégias e políticas nacionais

As políticas públicas visam estabelecer metas e diretrizes a uma economia de baixo carbono, estabelecer leis, planos e regulamentações que orientam o governo, empresas e sociedade para o desenvolvimento sustentável, além de criar condições para o uso de instrumentos econômicos.

Esse grupo inclui mecanismos relacionados a estratégias e políticas nacionais voltadas à descarbonização.

- A1. Política Nacional de Mudança do Clima (PNMC)
- A2. Plano Clima
- A3. Nova Indústria Brasil (NIB)
- A4. Estratégia Nacional de Descarbonização da Indústria (ENDI)
- A5. Estratégia Nacional de Mitigação (ENM)
- A6. Plano de Transformação Ecológica
- A7. Política Nacional de Transição Energética (PNTE)
- A8. Política Nacional de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono
- A9. Estratégia Nacional de Economia Circular (ENEC)
- A10. Plano Nacional de Economia Circular (PLANEC)
- A11. Estratégia Nacional de Bioeconomia
- A12. Plano Nacional de Desenvolvimento de Florestas Plantadas (PNDF)
- A13. Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA)

B. Planos, programas e iniciativas

Os planos, programas e iniciativas tem como principal objetivo viabilizar a execução das metas e diretrizes estabelecidas nas políticas públicas.

Esse grupo inclui mecanismos relacionados a planos, programas e iniciativas voltadas à descarbonização.

- B1. Plano de Retomada da Indústria
- B2. Plano Nacional de Energia (PNE)
- B3. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL)
- B4. Programa de Aceleração da Transição Energética (PATEN)
- B5. Programa Nacional de Biometano
- B6. Programa Brasileiro de Redução do Consumo de HFCs
- B7. Plano Floresta+ Sustentável (F+S)

C. Marcos regulatórios e instrumentos normativos

Os marcos regulatórios e instrumentos normativos, assim como planos, programas e iniciativas, tem como principal objetivo viabilizar a execução das metas e diretrizes estabelecidas nas políticas públicas, no entanto com caráter mandatório.

Esse grupo inclui marcos regulatórios e instrumentos normativos voltados à descarbonização.

- C1. Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE)
- C2. Taxonomia Sustentável Brasileira
- C3. Combustível do Futuro
- C4. Nova Lei do Gás
- C5. Marco Legal do Hidrogênio

D. Finanças, Fundos e Mecanismos de Investimento

O principal objetivo das finanças sustentáveis é a alocação de recursos públicos e privados em atividades sustentáveis, inovadoras e inclusivas, reduzindo os riscos ambientais e climáticos, de tal forma a aumentar os investimentos em atividades econômicas e soluções tecnológicas voltadas para a redução do impacto ambiental, abrindo caminho para o desenvolvimento sustentável. Neste sentido, desempenham um papel crucial na construção de um futuro mais sustentável, principalmente no combate às mudanças climáticas e alcance das metas de redução de emissão de gases de efeito estufa.

Esse grupo inclui mecanismos relacionados a planos, programas e iniciativas voltadas à descarbonização.

- D1. Fundo Nacional sobre Mudança do Clima
- D2. Fundo Verde para o Clima (GCF - Green Climate Fund)
- D3. Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF - Global Environment Facility)
- D4. Fundos de Investimento Climático (CIF - Climate Investment Funds)
- D5. Programa Eco Invest Brasil - Mobilização de Capital Privado Externo e Proteção Cambial
- D6. Títulos Soberanos Sustentáveis
- D7. Instrumentos de Financiamento Sustentável
- D8. Letras de Crédito do Desenvolvimento (LCDs) e Debêntures
- D9. Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT)
- D10. Plataforma Brasil de Investimentos Climáticos e para Transformação Ecológica (BIP)



6.4 Eixo IV – Comunicação e Engajamento da Sociedade e da Cadeia de Valor

No âmbito da estratégia de descarbonização da indústria de Papel & Celulose, o principal objetivo é identificar as possibilidades de mitigação de emissões de GEE. Adicionalmente, serão avaliadas barreiras, cobenefícios e potenciais efeitos adversos à adoção de tais medidas de mitigação.

Nesse contexto, a comunicação transparente e o engajamento efetivo com a sociedade e com os diversos elos da cadeia de valor tornam-se pilares fundamentais para a construção de uma operação sustentável e socialmente responsável.

Engajamento na cadeia de valor se desdobra em conexões que geram impacto. Engajar *stakeholders*, como clientes, fornecedores, investidores e colaboradores fortalece a reputação e a sustentabilidade do negócio. O engajamento dos clientes, por exemplo, amplia o impacto positivo das ações ESG e reforça a fidelidade à marca. Investidores valorizam empresas transparentes e comprometidas com causas sociais e ambientais, o que acaba influenciando diretamente decisões de investimento.

A indústria de Papel & Celulose tem adotado estratégias robustas para engajar sua cadeia de valor nas ações contra as mudanças climáticas. E neste eixo estão descritos os principais pilares dessa abordagem.

Estratégias de engajamento climático na cadeia de valor e na sociedade se traduzem em ações concretas que



contribuem para o amadurecimento do setor. As empresas têm desenvolvido seus planos de descarbonização, investido em desenvolvimento de produtos de baixo carbono e comunicado o que vem sendo desenvolvido às partes interessadas.

As organizações não se limitam à aplicação formal da matriz de materialidade, mas se dedicam intensamente a compreender quais temas são críticos para sua operação e reputação. Esse esforço envolve analisar como cada questão afeta seus públicos internos e externos, identificar os riscos e oportunidades associados, e alinhar esses temas com seus compromissos de descarbonização e sustentabilidade.

A pergunta que se impõe é: como migrar para sistemas de baixo ou zero carbono, promovendo simultaneamente melhorias nos indicadores sociais? A resposta passa, necessariamente, pela comunicação estratégica e pelo engajamento ativo da sociedade e da cadeia de valor.

A transição para uma economia de baixo carbono precisa ser sinérgica com medidas de justiça social. Isso significa que os esforços de descarbonização devem contribuir para a redução das desigualdades socioeconômicas; geração de empregos verdes e decentes; fortalecimento da participação social nos processos decisórios e proteção dos direitos humanos e dos territórios tradicionais.

A comunicação no contexto da transição justa não se limita à divulgação de metas e resultados. Ela deve ser dialógica, acessível e inclusiva, permitindo que diferentes públicos compreendam os impactos, benefícios e riscos das mudanças propostas. No setor de Papel & Celulose, isso significa envolver comunidades locais, trabalhadores, consumidores e parceiros comerciais em conversas sobre todo o processo de descarbonização e os efeitos socioambientais das novas tecnologias utilizadas para tal.

A transparência na comunicação fortalece a confiança e legitima as ações empresariais, especialmente quando se trata de decisões que afetam diretamente territórios e modos de vida. Comunicar com responsabilidade é, portanto, um ato de respeito e um passo essencial para garantir que ninguém seja deixado para trás na transição.

A descarbonização com justiça social é um desafio complexo, mas absolutamente necessário. Para que ela se concretize, é essencial que as empresas do setor de Papel & Celulose adotem uma postura proativa de comunicação transparente e engajamento profundo com a sociedade e a cadeia de valor.

Assim, este capítulo tem como objetivo apresentar as principais ações estruturantes relacionadas a comunicação e engajamento da sociedade e da cadeia de valor, distribuídas nos seguintes tópicos:

- A. Fornecedores
- B. Clientes
- C. Público interno (funcionários)
- D. Sociedade
- E. Comunidade local
- F. Organizações e associações setoriais

Esse capítulo resume as diferentes ações potenciais relacionadas a comunicação e engajamento da sociedade e da cadeia de valor. A descrição detalhada de cada uma das ações é apresentada no Anexo III.



A. Fornecedores

O controle das emissões de GEE, associadas à logística de insumos e produtos finais classificadas como escopo 3 (emissões indiretas), representa um dos maiores desafios na gestão de gases de efeito estufa no setor de Papel & Celulose, devido à amplitude da cadeia de fornecedores e à complexidade operacional. Apesar disso, as empresas exercem influência significativa para promover o engajamento de seus fornecedores na mitigação dessas emissões.

Esse grupo inclui ações potenciais relacionadas à comunicação e engajamento com fornecedores.

— A1. Critérios Socioambientais na Avaliação de Fornecedores (FOR.01)

— A2. Oferta de assessoria técnica aos proprietários terceiros de plantios de silvicultura (FOR.02)

— A3. Capacitar Fornecedores para que Adotem Inventários de GEE e Estratégias de Mitigação (FOR.03)

— A4. Incentivar nos fornecedores a Inovação em Processos Industriais (FOR.04)

— A5. Apoiar a rastreabilidade e certificação da cadeia de valor (FOR.05)

B. Clientes

Estratégias de engajamento com clientes podem envolver os consumidores e parceiros no enfrentamento das mudanças climáticas, com ações como transparência e rastreabilidade, informando por exemplo a pegada de carbono dos produtos. Para isso, as organizações desenvolvem iniciativas colaborativas com seus clientes, promovendo o engajamento contínuo por meio de reuniões periódicas e eventos dedicados à sustentabilidade.

Esse grupo inclui ações potenciais relacionadas à comunicação e engajamento com clientes.

— B1. Comercializar Produtos com Rotulagem Ambiental (CLI.01)

C. Público interno (funcionários)

Programas voltados ao público interno, com foco na redução de emissões, representam uma vertente essencial na jornada de descarbonização. Transformar colaboradores em agentes climáticos exige mais do que informação, requer ações práticas, inspiradoras e integradas à cultura organizacional.

Esse grupo inclui ações potenciais relacionadas à comunicação e engajamento com funcionários.

— C1. Estabelecer Bonificação Vinculada às Metas de Redução de Emissões de GEE (FUN.01)

— C2. Oferecer Treinamento Interno sobre Descarbonização/ Mudanças Climáticas (FUN.02)

D. Sociedade

A percepção pública tem se consolidado como um fator estratégico decisivo na forma como empresas estruturam suas ações de descarbonização. Em um cenário de crescente conscientização ambiental, organizações reconhecem que a opinião da sociedade, dos consumidores e dos investidores influencia diretamente sua reputação, valor de marca e competitividade no mercado. Esse movimento tem gerado pressão por transparência, exigindo das empresas informações claras e acessíveis sobre suas emissões de GEE, metas climáticas e práticas sustentáveis.

Esse grupo inclui ações potenciais relacionadas à comunicação e engajamento com a sociedade.

— D1 Promover a Conscientização Pública sobre a Mitigação Climática (SOC.01)

— D2 Campanhas de Conscientização Voltadas a Produtos Reciclados ou Recicláveis (SOC.02)

— D3. Parcerias com Startups e Universidades para Inovação (SOC.03)

E. Comunidade local

O avanço rumo à descarbonização vai além da adoção de tecnologias inovadoras e do cumprimento de metas empresariais ambiciosas, ele exige um compromisso com a justiça climática. Esse conceito reconhece que os efeitos da crise climática atingem de forma desproporcional as comunidades mais vulneráveis, e que essas mesmas comunidades têm o potencial de liderar soluções transformadoras.

Esse grupo inclui ações potenciais relacionadas à comunicação e engajamento com a comunidade local.

— E1. Incentivar o Envolvimento das Comunidades na Adoção de Práticas Sustentáveis com Educação Ambiental (COM.01)

— E2. Oferecer suporte técnico e financeiro a catadores autônomos e cooperativas de reciclagem (COM.02)

F. Organizações e associações setoriais

As organizações e associações setoriais desempenham um papel estratégico na promoção da descarbonização, especialmente por sua capacidade de articular políticas públicas, mobilizar atores locais e fomentar práticas sustentáveis. Sua atuação pode acelerar a transição para uma economia de baixo carbono ao integrar ações voltadas à inovação tecnológica, à qualificação profissional e ao fortalecimento de cadeias produtivas mais limpas.

Esse grupo inclui ações potenciais relacionadas à comunicação e engajamento com as organizações e associações setoriais.

— F1. Oferta de Treinamentos, Workshops e Capacitação Técnica (SET.01)

— F2. Elaboração de Guias Técnicos e Protocolos para Descarbonização Voltados ao Setor (SET.02)

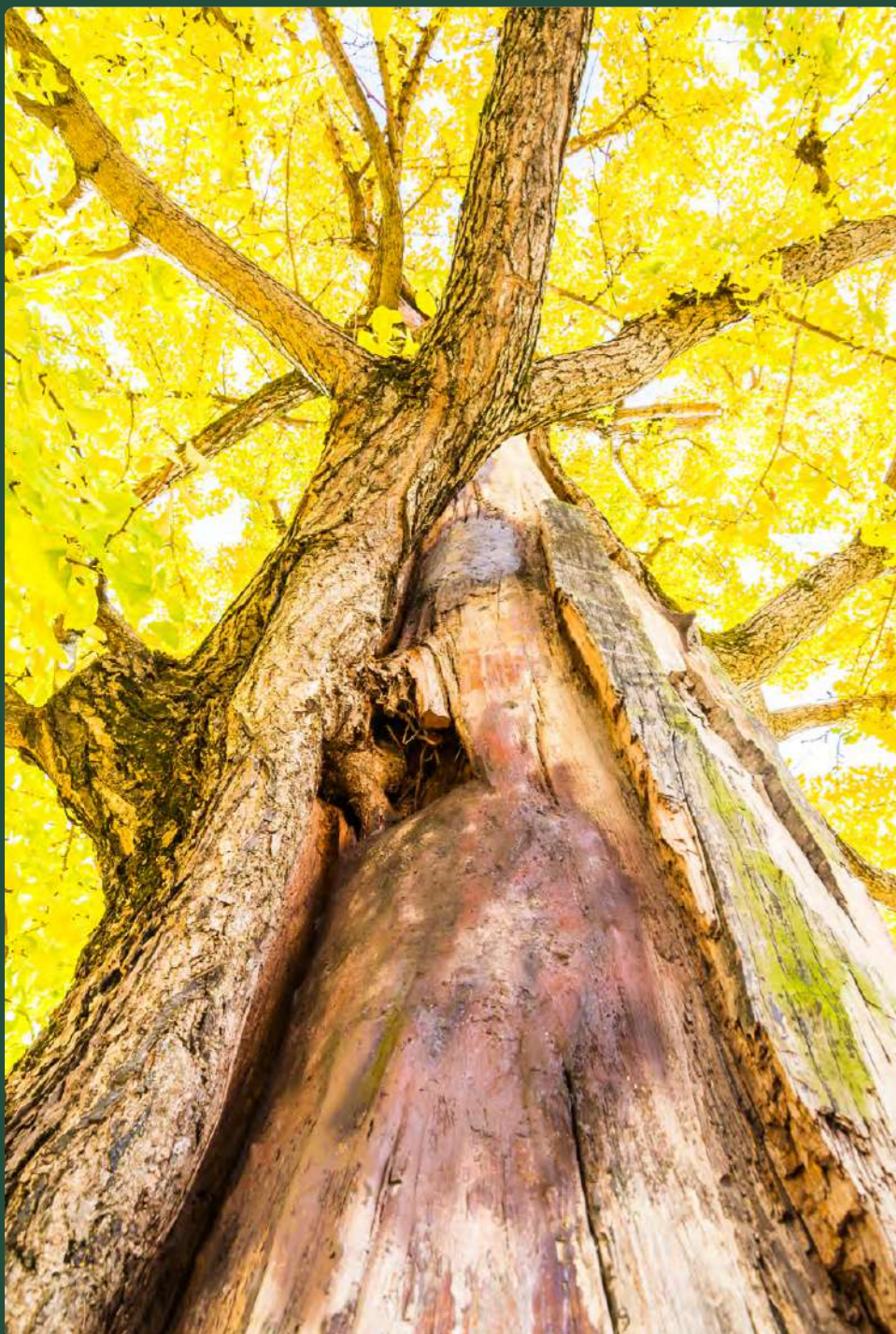
— F3. Parcerias com ONGs e Instituições Científicas Para Monitoramento Ambiental e Reflorestamento (SET.03)

— F4. Promoção de acordos voluntários de metas climáticas, como compromissos de neutralidade de carbono até 2040 ou 2050 (SET.04)

— F5. Criação de Plataformas de Compartilhamento de Boas Práticas e Benchmarking entre Empresas do Setor (SET.05)

— F6. Realização de Campanhas de Conscientização Setorial sobre os Benefícios Econômicos e Reputacionais da Descarbonização (SET.06)

7 PRIORIZAÇÃO E PROPOSIÇÃO DE AÇÕES DE DESCARBONIZAÇÃO



A etapa final da estratégia de descarbonização do setor de Papel & Celulose consistiu na avaliação das ações potenciais de descarbonização, sua priorização e recomendações quanto a sua implantação, considerando curto prazo (no horizonte de 2030-2035) e longo prazo (no horizonte de 2050).

Destaca-se que a mitigação dos GEE requer transformações econômicas, sociais e estruturais. Para tanto, são essenciais instrumentos econômicos e políticas públicas que impulsionem as medidas de mitigação. Nesse sentido, para cada uma das ações potenciais de descarbonização existem instrumentos econômicos e políticas públicas aplicáveis, as quais foram listadas no capítulo 7.3.

A seguir, são apresentadas as tabelas e matrizes resultantes da priorização das ações impactantes e estruturantes de descarbonização para o Setor de Papel & Celulose.

TABELA 9 - PRIORIZAÇÃO DAS AÇÕES IMPACTANTES DE DESCARBONIZAÇÃO PARA O SETOR DE PAPEL & CELULOSE, CONSIDERANDO OS PRAZOS DE CUMPRIMENTO DE CURTO E LONGO PRAZO. -

EIXO II - SOLUÇÕES TÉCNICAS (ALTERNATIVAS DE DESCARBONIZAÇÃO)

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OPERACIONAL

EFICIÊNCIA NA OPERAÇÃO FLORESTAL

CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	PAPEL	PAPEL E CELULOSE	CORRELAÇÃO COM AÇÕES ESTRUTURANTES
EOF.01	Manejo Florestal Sustentável	N.A.	CURTO PRAZO	FOR.02 FOR.05 SBN.04 ADP.01 ADP.02 GVN.10 SET.01
EOF.02	Otimização do ciclo de rotação de corte	N.A.	CURTO PRAZO	ADP.01 ADP.02
EOF.03	Uso de drones para monitorar o desenvolvimento dos plantios	N.A.	CURTO PRAZO	FOR.02 FOR.04

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OPERACIONAL / CIRCULARIDADE E USO RACIONAL DOS RECURSOS NATURAIS

EFICIÊNCIA NA OPERAÇÃO INDUSTRIAL

CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	PAPEL	PAPEL E CELULOSE	CORRELAÇÃO COM AÇÕES ESTRUTURANTES
EOI.02	Reduzir consumo de água, reaproveitar água da chuva, reusar efluente tratado	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	ADP.03 FUN.02 SET.01

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OPERACIONAL

EFICIÊNCIA NA OPERAÇÃO INDUSTRIAL

CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	PAPEL	PAPEL E CELULOSE	CORRELAÇÃO COM AÇÕES ESTRUTURANTES
EOI.01	Modernizar caldeiras e/ou fornos para aumentar a eficiência técnica	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	FUN.02
EOI.03	Sistemas de monitoramento e gestão de energia em tempo real (Indústria 4.0)	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	GVN.4 GVN.5 GVN.7 FUN.02

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OPERACIONAL

EFICIÊNCIA NA LOGÍSTICA

CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	PAPEL	PAPEL E CELULOSE	CORRELAÇÃO COM AÇÕES ESTRUTURANTES
EOL.01	Otimizar rotas logísticas por sistemas de gestão de transporte (TMS), IoT e sensores inteligentes na frota	NÃO PRIORIZADO	CURTO PRAZO	GVN.4 GVN.5 GVN.7 FUN.02
EOL.02	Considerar intensidade de carbono na logística na etapa de planejamento estratégico de novas unidades	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	GVN.8
EOL.03	Alterar modal rodoviário para ferrovias, hidrovias/cabotagem	NÃO PRIORIZADO	LONGO PRAZO	-
EOL.04	Aumentar a capacidade de caminhões pesados	NÃO PRIORIZADO	CURTO PRAZO	-
EOL.05	Renovação da frota e manutenção preventiva	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	-
EOL.06	Aumentar a eficiência energética nas operações associadas a logística (em centros de distribuição, em terminais logísticos, em terminais portuários)	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	-

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OPERACIONAL / CIRCULARIDADE E USO RACIONAL DOS RECURSOS NATURAIS

EFICIÊNCIA NA LOGÍSTICA

CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	PAPEL	PAPEL E CELULOSE	CORRELAÇÃO COM AÇÕES ESTRUTURANTES
EOL.07	Otimização da coleta de aparas com roteirização de rotas e fortalecimento de parcerias	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	COM.02

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OPERACIONAL

EFICIÊNCIA NA LOGÍSTICA

CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	PAPEL	PAPEL E CELULOSE	CORRELAÇÃO COM AÇÕES ESTRUTURANTES
EOL.08	Monitoramento remoto de máquinas e veículos para otimizar consumo de combustível e reduzir emissões	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	-

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

AMPLIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA RENOVÁVEL

CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	PAPEL	PAPEL E CELULOSE	CORRELAÇÃO COM AÇÕES ESTRUTURANTES
TER.01	Aumentar autogeração de energia solar e eólica	NÃO PRIORIZADO	NÃO PRIORIZADO	SET.01
TER.02	Reaproveitamento da energia hidráulica do efluente tratado	NÃO PRIORIZADO	NÃO PRIORIZADO	SET.01

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA / CIRCULARIDADE E USO RACIONAL DOS RECURSOS NATURAIS

AMPLIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA RENOVÁVEL

CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	PAPEL	PAPEL E CELULOSE	CORRELAÇÃO COM AÇÕES ESTRUTURANTES
TER.03	Implantar sistemas de cogeração para produção de energia a partir de biomassa	LONGO PRAZO	CURTO PRAZO	SET.01

TABELA 9 - PRIORIZAÇÃO DAS AÇÕES IMPACTANTES DE DESCARBONIZAÇÃO PARA O SETOR DE PAPEL & CELULOSE, CONSIDERANDO OS PRAZOS DE CUMPRIMENTO DE CURTO E LONGO PRAZO. -

EIXO II - SOLUÇÕES TÉCNICAS (ALTERNATIVAS DE DESCARBONIZAÇÃO)

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

ELETRIFICAÇÃO

CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	PAPEL	PAPEL E CELULOSE	CORRELAÇÃO COM AÇÕES ESTRUTURANTES
TEL.01	Trocar caldeiras a combustíveis fósseis por caldeiras elétricas	NÃO PRIORIZADO	NÃO PRIORIZADO	SET.01
TEL.02	Substituir equipamentos/maquinários móveis (empilhadeiras, pás carregadeiras), e veículos (leves e utilitários operacionais e caminhões pequenos e médios) da operação industrial movidos a combustíveis fósseis por elétricos	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	SET.01
TEL.03	Substituir equipamentos/maquinários e veículos (tratores, plantadeiras, colheitadeiras, caminhões internos aos talhões) da operação florestal movidos à combustíveis fósseis por elétricos	N.A.	CURTO PRAZO	SET.01
TEL.04	Substituir equipamentos/maquinários (guindastes, transpaletas) e veículos (leves e utilitários operacionais e caminhões pequenos e médios; exceto navios e barcas) da operação logística movidos à combustíveis fósseis por elétricos	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	SET.01

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEL FÓSSIL POR COMBUSTÍVEIS COM BAIXA EMISSÃO DE CARBONO FÓSSIL

CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	PAPEL	PAPEL E CELULOSE	CORRELAÇÃO COM AÇÕES ESTRUTURANTES
TBC.01	Trocar caldeiras à combustíveis fósseis por caldeiras à biomassa	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	SET.01
TBC.02	Utilizar caminhões de pequeno e médio portes movidos à gás natural veicular	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	SET.01
TBC.03	Substituir combustíveis fósseis mais intensivos em carbono por gás natural	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	SET.01
TBC.04	Produzir etanol celulósico	N.A.	LONGO PRAZO	SET.01 SOC.03
TBC.05	Aumentar consumo de etanol em veículos leves e semi-leves	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	SET.01
TBC.06	Aumentar o consumo de biodiesel na logística	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	SET.01

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA / CIRCULARIDADE E USO RACIONAL DOS RECURSOS NATURAIS / BIOPRODUTOS

SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEL FÓSSIL POR COMBUSTÍVEIS COM BAIXA EMISSÃO DE CARBONO FÓSSIL

CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	PAPEL	PAPEL E CELULOSE	CORRELAÇÃO COM AÇÕES ESTRUTURANTES
TBC.07	Produzir e/ou consumir biometano no setor	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	SET.01
TBC.08	Produzir e/ou consumir bio-óleo e biochar no setor	LONGO PRAZO	LONGO PRAZO	SET.01
TBC.09	Produzir e consumir Gás de Síntese (Syngas)	N.A.	CURTO PRAZO	SET.01
TBC.10	Aumentar o consumo de Diesel Verde (HVO)	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	SET.01

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA / CIRCULARIDADE E USO RACIONAL DOS RECURSOS NATURAIS / BIOPRODUTOS / REMOÇÃO DE CARBONO DIRETO DA ATMOSFERA

SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEL FÓSSIL POR COMBUSTÍVEIS COM BAIXA EMISSÃO DE CARBONO FÓSSIL

CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	PAPEL	PAPEL E CELULOSE	CORRELAÇÃO COM AÇÕES ESTRUTURANTES
TBC.11	Produzir e/ou consumir Metanol Verde	NÃO PRIORIZADO	LONGO PRAZO	SET.01 SOC.03
TBC.12	Produzir e/ou consumir Amônia Verde	N.A.	LONGO PRAZO	SET.01

CIRCULARIDADE E USO RACIONAL DOS RECURSOS NATURAIS

AÇÕES DE CIRCULARIDADE VOLTADAS PARA AS OPERAÇÕES INDUSTRIAIS

CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	PAPEL	PAPEL E CELULOSE	CORRELAÇÃO COM AÇÕES ESTRUTURANTES
CIN.01	Realizar recuperação de potássio das cinzas da caldeira de recuperação para produção de sulfato de potássio	N.A.	CURTO PRAZO	-
CIN.02	Realizar Recuperação de Enxofre para Produção de Ácido Sulfúrico	N.A.	CURTO PRAZO	-
CIN.03	Realizar Recuperação de Hidrogênio a partir da Produção de Clorato de Sódio	N.A.	CURTO PRAZO	-
CIN.04	Realizar Recuperação de Alumínio e Fósforo do Tratamento de Efluentes Líquidos e de Alumínio do Tratamento de Água	NÃO PRIORIZADO	NÃO PRIORIZADO	-
CIN.05	Reduzir o Uso de Aterro através do aproveitamento energético de lodo do tratamento de efluentes líquidos	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	-
CIN.06	Reduzir o uso de aterro através da compostagem e produção de condicionadores de solo, tais como corretivos de acidez do solo e/ou fertilizantes orgânicos	NÃO PRIORIZADO	CURTO PRAZO	-
CIN.07	Produzir briquetes a partir de cinzas de caldeira	NÃO PRIORIZADO	LONGO PRAZO	SOC.03
CIN.08	Recuperação energética de metanol residual (oriundo de processamento de madeira) nas caldeiras e forno de cal	N.A.	CURTO PRAZO	-

TABELA 9 - PRIORIZAÇÃO DAS AÇÕES IMPACTANTES DE DESCARBONIZAÇÃO PARA O SETOR DE PAPEL & CELULOSE, CONSIDERANDO OS PRAZOS DE CUMPRIMENTO DE CURTO E LONGO PRAZO. -

EIXO II - SOLUÇÕES TÉCNICAS (ALTERNATIVAS DE DESCARBONIZAÇÃO)

CIRCULARIDADE E USO RACIONAL DOS RECURSOS NATURAIS

AÇÕES DE CIRCULARIDADE VOLTADAS PARA AS OPERAÇÕES INDUSTRIAIS, MAS COM ENVOLVIMENTO DE TERCEIROS

CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	PAPEL	PAPEL E CELULOSE	CORRELAÇÃO COM AÇÕES ESTRUTURANTES
CTE.01	Aumentar o uso de aparas de papel	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	COM.03
CTE.02	Realizar a recuperação (energética, extrusão) de aparas de plástico misto	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	SOC.03

REMOÇÃO DE CARBONO DIRETO DA ATMOSFERA

REMOÇÃO DE CARBONO POR SOLUÇÃO NATURAL (SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA)

CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	PAPEL	PAPEL E CELULOSE	CORRELAÇÃO COM AÇÕES ESTRUTURANTES
SBN.01	Ampliar área de restauração de florestas nativas e criação de corredores ecológicos	N.A.	CURTO PRAZO	SET.01
SBN.02	Sistemas Agroflorestais e Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF)	N.A.	LONGO PRAZO	SET.01
SBN.03	Adoção de práticas de manejo na silvicultura que aumentem o sequestro de carbono no solo	N.A.	CURTO PRAZO	SET.01 FOR.01 FOR.02 FOR.04

REMOÇÃO DE CARBONO DIRETO DA ATMOSFERA

REMOÇÃO DE CARBONO POR SOLUÇÃO TÉCNICA E REDUÇÃO POR EFEITO DE SUBSTITUIÇÃO

CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	PAPEL	PAPEL E CELULOSE	CORRELAÇÃO COM AÇÕES ESTRUTURANTES
RST.01	Produzir carbonato de cálcio precipitado (PCC)	N.A.	CURTO PRAZO	-
RST.02	Utilização do CO ₂ capturado na separação da lignina	N.A.	NÃO PRIORIZADO	SOC.03
RST.03	Utilização do CO ₂ capturado para lavagem de massa marrom	N.A.	NÃO PRIORIZADO	SOC.03
RST.04	Utilização do CO ₂ capturado no tratamento de efluentes	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	SOC.03
RST.05	Captura e Armazenamento Geológico do Carbono (CCS)	NÃO PRIORIZADO	NÃO PRIORIZADO	SOC.03

REDUÇÃO DE GEE POR EFEITO DE SUBSTITUIÇÃO

BIOPRODUTOS

CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	PAPEL	PAPEL E CELULOSE	CORRELAÇÃO COM AÇÕES ESTRUTURANTES
RES.01	Produzir Lignina	N.A.	NÃO PRIORIZADO	SOC.03
RES.02	Produzir embalagem a partir de Lignina	N.A.	NÃO PRIORIZADO	SOC.03
RES.03	Produzir/Consumir Celulose Microfibrilada ou MFC	N.A.	NÃO PRIORIZADO	SOC.03
RES.04	Produzir Fibra Têxtil à base de celulose solúvel (Viscose, Modal e Liocel)	N.A.	NÃO PRIORIZADO	SOC.03
RES.05	Produzir Breu	N.A.	NÃO PRIORIZADO	SOC.03
RES.06	Produzir Terebentina	N.A.	NÃO PRIORIZADO	SOC.03
RES.07	Produzir Tall Oil	N.A.	NÃO PRIORIZADO	SOC.03

REDUÇÃO DE EMISSÕES FUGITIVAS

AÇÕES PARA DIMINUIÇÃO DE EMISSÕES FUGITIVAS NA OPERAÇÃO INDUSTRIAL

CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	PAPEL	PAPEL E CELULOSE	CORRELAÇÃO COM AÇÕES ESTRUTURANTES
REF.01	Reduzir ou eliminar emissões fugitivas em equipamentos de refrigeração e climatização	CURTO PRAZO	CURTO PRAZO	-
REF.02	Eliminação Gradual de SF ₆ em Equipamentos Elétricos	NÃO PRIORIZADO	NÃO PRIORIZADO	FOR.01
REF.03	Instalar sensores IoT e sistemas automáticos para detectar vazamentos de gases fluorados	NÃO PRIORIZADO	NÃO PRIORIZADO	GVN.4 GVN.5 GVN.7 FUN.02



FIGURA 36 - MATRIZ RESULTANTE DA PRIORIZAÇÃO DAS AÇÕES IMPACTANTES DE DESCARBONIZAÇÃO, CONSIDERANDO OS PRAZOS DE CUMPRIMENTO DE CURTO E LONGO PRAZO, CONFORME ÍNDICES DE VALOR GERADO E NÍVEL DE ESFORÇO - SEGMENTO PAPEL.

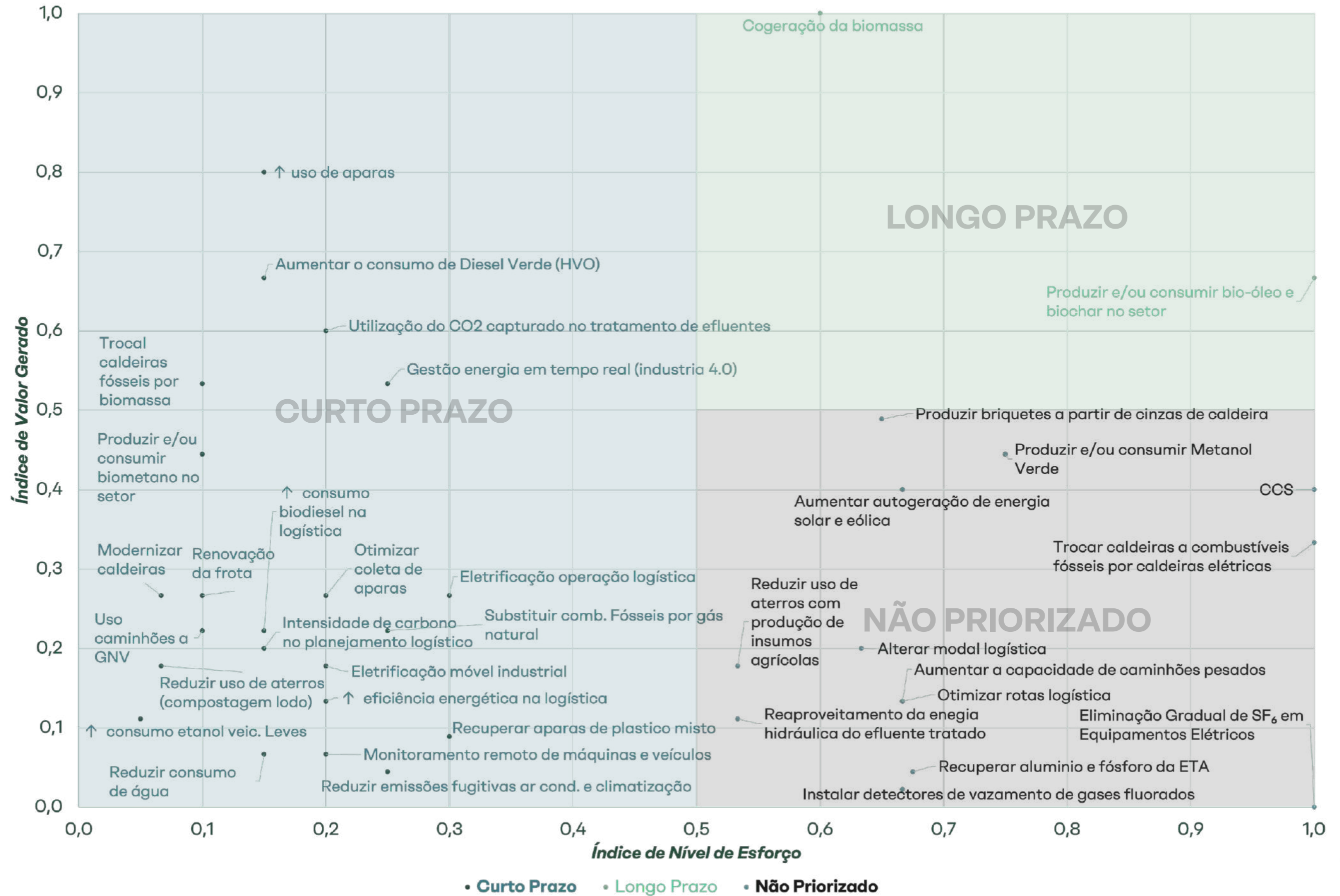


FIGURA 37 - MATRIZ RESULTANTE DA PRIORIZAÇÃO DAS AÇÕES IMPACTANTES DE DESCARBONIZAÇÃO, CONSIDERANDO OS PRAZOS DE CUMPRIMENTO DE CURTO E LONGO PRAZO, CONFORME ÍNDICES DE VALOR GERADO E NÍVEL DE ESFORÇO - SEGMENTO PAPEL E CELULOSE.



TABELA 10 - PRIORIZAÇÃO DAS AÇÕES ESTRUTURANTES DE DESCARBONIZAÇÃO PARA O SETOR DE PAPEL & CELULOSE, CONSIDERANDO OS PRAZOS DE CUMPRIMENTO DE CURTO E LONGO PRAZO.

EIXO I - GOVERNANÇA CORPORATIVA CLIMÁTICA

TEMAS (ALAVANCAS)	CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	RESULTADO PRIORIZAÇÃO
Estruturar a Governança Corporativa Climática	GVN.1	Criar um comitê de mudanças climáticas responsável pela gestão do tema de descarbonização, com representantes capacitados e com pelo menos 1 representante do conselho de administração	CURTO PRAZO
	GVN.2	Estabelecer uma Política Corporativa de Mudanças Climáticas	CURTO PRAZO
Monitorar, Reportar e Verificar impactos climáticos gerados pelas operações da empresa	GVN.3	Realizar avaliação de risco climático e contemplar na análise de risco integrada da empresa	CURTO PRAZO
	GVN.4	Elaborar anualmente relatório de sustentabilidade (incluindo estudo de dupla materialidade e priorização do tema de descarbonização/mudanças climáticas)	CURTO PRAZO
	GVN.5	Elaborar anualmente relatório de inventário GEE baseado na metodologia do PBGHGP	CURTO PRAZO
	GVN.6	Realizar Análise de Ciclo de Vida (ACV), com foco na pegada de carbono	CURTO PRAZO
	GVN.7	Estabelecer metas de mitigação e de indicadores de desempenho e monitorar sua performance	CURTO PRAZO
Estratégia climática corporativa	GVN.8	Adotar precificação Interna do Carbono	CURTO PRAZO
	GVN.9	Compensar as emissões	LONGO PRAZO
	GVN.10	Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA)	NÃO PRIORIZADO
	GVN.11	Comprar Certificado de Origem Renovável (RECs) para abatimento de emissões de escopo 2	CURTO PRAZO

EIXO II - SOLUÇÕES TÉCNICAS (ALTERNATIVAS DE DESCARBONIZAÇÃO)

TEMAS (ALAVANCAS)	CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	RESULTADO PRIORIZAÇÃO
Transição energética	TRA.01	Incentivar o uso de caminhões com motor bi-fuel diesel-etanol	NÃO PRIORIZADO
	TRA.02	Produzir e/ou consumir hidrogênio de baixo carbono	LONGO PRAZO
Adaptação Climática em prol da Mitigação Climática	ADP.01	Diversificação genética florestal para aumentar a resiliência a climas extremos e pragas.	LONGO PRAZO
	ADP.02	Priorização de áreas com menores riscos climáticos para ampliação da base florestal.	CURTO PRAZO
	ADP.03	Monitoramento de bacias hidrográficas para garantir disponibilidade hídrica futura.	CURTO PRAZO
	ADP.04	Adequação de sistemas de drenagem para eventos climáticos extremos (enchentes).	CURTO PRAZO
	ADP.05	Fortalecimento de estruturas contraventos fortes e temperaturas elevadas.	CURTO PRAZO
	ADP.06	Planos de contingência para interrupções causadas por eventos climáticos.	CURTO PRAZO
	ADP.07	Contratação de Seguro climático.	NÃO PRIORIZADO
Remoção de Carbono	SBN.04	Adotar medidas de prevenção a incêndios florestais.	CURTO PRAZO

EIXO IV - COMUNICAÇÃO E ENGAJAMENTO DA SOCIEDADE E DA CADEIA DE VALOR

TEMAS (ALAVANCAS)	CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	RESULTADO PRIORIZAÇÃO
Engajamento com Fornecedores	FOR.01	Critérios Socioambientais na Avaliação de Fornecedores	CURTO PRAZO
	FOR.02	Oferta de assessoria técnica aos proprietários terceiros de plantios de silvicultura	CURTO PRAZO
	FOR.03	Capacitar Fornecedores para que Adotem Inventários de GEE e Estratégias de Mitigação	CURTO PRAZO
	FOR.04	Incentivar nos fornecedores a Inovação em Processos Industriais	LONGO PRAZO
	FOR.05	Apoiar a rastreabilidade e certificação da cadeia de valor	CURTO PRAZO
Engajamento com Clientes	CLI.01	Comercializar Produtos com Rotulagem Ambiental	CURTO PRAZO

TABELA 10 - PRIORIZAÇÃO DAS AÇÕES ESTRUTURANTES DE DESCARBONIZAÇÃO PARA O SETOR DE PAPEL & CELULOSE, CONSIDERANDO OS PRAZOS DE CUMPRIMENTO DE CURTO E LONGO PRAZO.

EIXO I - GOVERNANÇA CORPORATIVA CLIMÁTICA E EIXO IV - COMUNICAÇÃO E ENGAJAMENTO DA SOCIEDADE E DA CADEIA DE VALOR

TEMAS (ALAVANCAS)	CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	RESULTADO PRIORIZAÇÃO
Engajamento com Público Interno (Funcionários)	FUN.01	Estabelecer Bonificação Vinculada às Metas de Redução de Emissões de GEE	CURTO PRAZO
	FUN.02	Oferecer Treinamento Interno sobre Descarbonização/Mudanças Climáticas	CURTO PRAZO

EIXO IV - COMUNICAÇÃO E ENGAJAMENTO DA SOCIEDADE E DA CADEIA DE VALOR

TEMAS (ALAVANCAS)	CÓDIGO	AÇÃO (O QUE É?)	RESULTADO PRIORIZAÇÃO
Sociedade	SOC.01	Promover a Conscientização Pública sobre a Mitigação Climática	CURTO PRAZO
	SOC.02	Campanhas de Conscientização Voltadas a Produtos Reciclados ou Recicláveis	CURTO PRAZO
	SOC.03	Parcerias com <i>Startups</i> e Universidades para Inovação	CURTO PRAZO
Comunidade Local	COM.01	Incentivar o Envolvimento das Comunidades na Adoção de Práticas Sustentáveis com Educação Ambiental	CURTO PRAZO
	COM.02	Oferecer suporte técnico e financeiro a catadores autônomos e cooperativas de reciclagem	LONGO PRAZO
Organizações e Associações Setoriais	SET.01	Oferta de Treinamentos, <i>Workshops</i> e Capacitação Técnica	CURTO PRAZO
	SET.02	Elaboração de Guias Técnicos e Protocolos para Descarbonização Voltados ao Setor	NÃO PRIORIZADO
	SET.03	Parcerias com ONGs e Instituições Científicas Para Monitoramento Ambiental	NÃO PRIORIZADO
	SET.04	Promoção de acordos voluntários de metas climáticas, como compromissos de neutralidade de carbono até 2040 ou 2050	LONGO PRAZO
	SET.05	Criação de Plataformas de Compartilhamento de Boas Práticas e <i>Benchmarking</i> entre Empresas do Setor	NÃO PRIORIZADO
	SET.06	Realização de Campanhas de Conscientização Setorial sobre os Benefícios Econômicos e Reputacionais da Descarbonização	CURTO PRAZO



FIGURA 38 - MATRIZ RESULTANTE DA PRIORIZAÇÃO DAS AÇÕES ESTRUTURANTES DE DESCARBONIZAÇÃO PARA O SETOR DE PAPEL & CELULOSE, CONSIDERANDO OS PRAZOS DE CUMPRIMENTO DE CURTO E LONGO PRAZO, CONFORME ÍNDICES DE VALOR GERADO E NÍVEL DE ESFORÇO.



Ao todo, foram mapeadas 101 ações potenciais de mitigação, sendo 61 ações impactantes — com efeito direto na redução, remoção ou captura de GEE — e 40 ações estruturantes, voltadas à criação das condições necessárias para sua implementação.

No segmento de Papel foram priorizadas 22 ações impactantes de curto prazo e 2 de longo prazo, enquanto no segmento de Papel & Celulose foram priorizadas 38 ações de curto prazo e 7 de longo prazo. Essas ações concentram-se principalmente na substituição de combustíveis fósseis, na eficiência logística, industrial e florestal, na eletrificação, na circularidade, na ampliação do uso de energia renovável e em soluções de remoção e substituição de carbono.

No que se refere às ações estruturantes, foram priorizadas 28 ações de curto prazo e 6 de longo prazo, abrangendo temas como adaptação climática, monitoramento, reporte e verificação (MRV), governança e estratégia climática corporativa, além do engajamento com fornecedores, funcionários, comunidades, clientes, sociedade e associações setoriais. Destaca-se que muitas das ações de descarbonização já foram implantadas, estão em implantação ou em estudo/planejamento pelas empresas do setor.

No item 5.4 são apresentados os gráficos do Nível de Implementação de algumas das ações de descarbonização acima priorizadas, fruto da etapa de diagnóstico de descarbonização do setor, quando se realizou a pesquisa com o setor e questionou-se sobre o nível de implementação.

As tabelas e os gráficos no item 5.4 mostram que o setor já capturou ganhos relevantes ao substituir combustíveis fósseis por biomassa (TER.03 - Implantar sistemas de cogeração para produção de energia a partir de biomassa e TBC.01 - Trocar caldeiras à combustíveis fósseis por caldeiras à biomassa) e ao aprimorar práticas florestais que elevam o sequestro de carbono no solo. Essas frentes combinam impacto alto com maturidade tecnológica e aderência operacional, o que explica a penetração superior. Ainda existe margem de expansão (24-53%) nessas mesmas ações, sobretudo no manejo de solo, que concilia mitigação e cobenefícios (produtividade e

resiliência florestal).

Algumas medidas muito difundidas no setor, como aumento de uso de aparas (CTE.01, 79% implementado), e ampliação da área de restauração de florestas nativas e criação de corredores ecológicos (SBN.01, 79% implementado), apesar do alto grau de implementação, seguem como estratégicas no papel do setor no front da circularidade e da valorização da manutenção da floresta de pé.

Nota-se que há um pipeline robusto de alternativas de alto impacto ainda pouco ou nada implementadas, principalmente e-combustíveis e insumos verdes (biometano, metanol, bio-óleo/biochar) e bioprodutos de substituição (MFC, lignina, *tall oil*, terebentina). Em paralelo, iniciativas nature-based (ILPF) também exibem alto espaço de escala. O desafio aqui tende a ser infraestrutura, CAPEX, cadeias de suprimento e, em alguns casos, regulação/mercado para viabilizar a captura plena do potencial.

De toda forma, há muitas oportunidades disponíveis de descarbonização e espera-se que o presente estudo estimule ainda mais à ação o setor que tem muito a colaborar com a descarbonização do país.





CONSIDERAÇÕES FINAIS

A estratégia de descarbonização do setor de Papel & Celulose tem como objetivo central impulsionar a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e apoiar a transição para uma economia de baixo carbono. Fundamentado no uso de matéria-prima de origem vegetal, o setor exerce papel estratégico na agenda climática ao contribuir simultaneamente para a redução de emissões e para a remoção de CO₂ da atmosfera, por meio da fotossíntese, da manutenção de estoques de carbono em florestas plantadas, da proteção e regeneração de florestas nativas, e por meio de emissões evitadas no processo produtivo — como a reutilização de resíduos e a elevada autossuficiência energética — e do desenvolvimento da bioeconomia, com destaque para o efeito de substituição de produtos intensivos em carbono por bioprodutos renováveis.

Em razão dessas características, as emissões do setor são predominantemente de origem não fóssil, integrando o ciclo curto do carbono. Ainda assim, permanecem emissões fósseis relevantes ao longo da cadeia de valor, associadas às etapas de produção florestal e industrial, às operações logísticas, bem como

ao uso e à destinação final dos produtos.

Historicamente, o setor vem implementando medidas consistentes de redução de emissões, com destaque para o aumento da eficiência energética e a substituição progressiva de combustíveis fósseis por fontes renováveis. Soma-se a isso a ampliação de iniciativas baseadas na natureza, como a proteção de florestas nativas mantidas pelo setor em 2025 (Ibá, 2025). Para o futuro, despontam oportunidades adicionais relacionadas à produção de combustíveis sintéticos renováveis a partir de emissões biogênicas, impulsionadas pela crescente demanda de alternativas de menor intensidade de carbono para setores de difícil abatimento, como a aviação e o transporte marítimo.

O potencial de mitigação do setor é elevado e se apoia em fatores estruturais como a base renovável de matéria-prima, florestas plantadas altamente produtivas, altas taxas de reciclagem de aparas de papel, emissões evitadas por meio da circularidade e da eficiência logística, uso consolidado de biomassa e licor negro para geração de energia renovável, efeito de substituição dos

bioprodutos e participação em mercados voluntários de carbono. Em comparação com outros setores industriais, como cimento, aço, química e transportes, o setor de Papel & Celulose apresenta menor intensidade de carbono, maior maturidade tecnológica para a descarbonização, uso de energia renovável significativamente superior à média nacional e capacidade diferenciada de remoção líquida de CO₂.

Esta estratégia foi estruturada em quatro eixos interconectados, que orientam as ações a serem desenvolvidas pelas empresas do setor em sua trajetória até 2050. O foco recai sobre recomendações de curto prazo (2030–2035) e de longo prazo (2050). Ao todo, foram mapeadas 101 ações potenciais de mitigação, sendo 61 ações impactantes — com efeito direto na redução, remoção ou captura de GEE — e 40 ações estruturantes, voltadas à criação das condições necessárias para sua implementação.

As ações foram avaliadas por meio de metodologia multicritério, considerando o valor gerado (potencial de mitigação e cobenefícios) e o nível de esforço necessário para sua implementação, incluindo maturidade tecnológica, custos, barreiras e aplicabilidade aos diferentes segmentos. Como resultado, no segmento de Papel foram priorizadas 22 ações impactantes de curto prazo e 2 de longo prazo, enquanto no segmento de Papel & Celulose foram priorizadas 38 ações de curto prazo e 7 de longo prazo. Essas ações concentram-se principalmente na substituição de combustíveis fósseis, na eficiência logística, industrial e florestal, na eletrificação, na circularidade, na ampliação do uso de energia renovável e em soluções de remoção e substituição de carbono.

No que se refere às ações estruturantes, foram priorizadas 28 ações de curto prazo e 6 de longo prazo, abrangendo temas como adaptação climática, monitoramento, reporte e verificação (MRV), governança e estratégia climática corporativa, além do engajamento com fornecedores, funcionários, comunidades, clientes, sociedade e associações setoriais.

De forma geral, a grande maioria tem como horizonte de implantação o curto prazo e com baixo esforço de implantação. A operação de

máquinas e equipamentos e as atividades logísticas respondem por parcela significativa das emissões fósseis remanescentes, podendo ser mitigadas por meio de ações de transição energética. A aplicação de princípios de economia circular é igualmente relevante, ao promover o uso eficiente de recursos naturais e a redução de emissões ao longo do ciclo de vida dos produtos. A produção de bioprodutos desempenha papel fundamental na transição para uma economia de baixo carbono, assim como destaca-se a relevância das florestas plantadas e nativas, que constituem mecanismos dinâmicos e escaláveis de captura e estocagem de carbono.

Na cadeia produtiva do papel, as emissões fósseis estão majoritariamente associadas à compra de energia elétrica, à operação de máquinas e equipamentos e às atividades logísticas. Essas emissões podem ser mitigadas por meio da geração ou aquisição de energia renovável e de ações de transição energética. O uso de aparas de papel contribui significativamente para a redução de emissões, ao demandar menos água, energia e produtos químicos, embora existam limites técnicos para sua incorporação e para a reciclabilidade da fibra.

Muitas das ações mapeadas já foram implementadas, estão em implantação ou em fase de planejamento pelas empresas do setor. Ainda assim, permanece um amplo conjunto de oportunidades para avançar na descarbonização de um segmento com elevado potencial de mitigação. Trata-se de um setor que reúne condições singulares para liderar a descarbonização industrial no Brasil e fortalecer a posição do país na economia de baixo carbono.

Por fim, cabe às empresas avaliar a viabilidade de implementação das ações recomendadas, considerando suas ambições climáticas e estratégias corporativas. Ao governo brasileiro compete fomentar esse processo por meio de instrumentos econômicos, políticas públicas e mecanismos de financiamento sustentável, de modo a assegurar que a velocidade de ação do setor esteja alinhada à urgência climática. A sociedade, por sua vez, desempenha papel relevante ao direcionar padrões de consumo e demandar soluções baseadas em bioprodutos e modelos produtivos de baixo carbono.



REFERÊNCIAS

1. AFPA - AUSTRALIAN FOREST PRODUCTS ASSOCIATION. Pulp & Paper Sector Status as an Emissions Intensive and Trade Exposed Industry. Austrália: 2021. Disponível em: <https://ausfpa.com.au/wp-content/uploads/2022/04/20-21_16_PP-EITE-Status_FINAL_20211101_v1.pdf#page=18&zoom=100,92,97>. Acesso em: 21 jul. 2025.
2. AFRY. AFRY 1.5°C Roadmap. Estocolmo: AFRY, 2022. Disponível em: <<https://afry.com/sites/default/files/2024-01/AFRY-1.5C-Roadmap.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2025.
3. AFRY. AFRY Insights Bioindustry - Autumn 2021. Estocolmo: AFRY, 2021. Disponível em: <<https://afry.com/en/newsroom/news/afry-launches-autumn-2021-edition-afry-insights>>. Acesso em: 19 mar. 2025.
4. AFRY. AFRY Insights Bioindustry - Autumn 2023. Estocolmo: AFRY, 2023. Disponível em: <<https://afry.com/en/newsroom/news/introducing-autumn-2023-bioindustry-edition-afry-insights>>. Acesso em: 18 mar. 2025.
5. AFRY. Annual and Sustainability Report 2023. Estocolmo: AFRY, 2024. Disponível em: <<https://afry.com/en/newsroom/press-releases/afry-publishes-annual-and-sustainability-report-2023>>. Acesso em: 18 mar. 2025.
6. AFRY. Fossil Detox Report. Estocolmo: AFRY, 2024. Disponível em: <<https://afry.com/en/fossil-detox-report>>. Acesso em: 18 mar. 2025.
7. AFRY. Power-to-x. Estocolmo: AFRY, 2021. Disponível em: <<https://afry.com.br/servicos/energia/power-to-x>>. Acesso em: 24 mar. 2025.
8. Balbino, L.C; Barcellos, A. O.; Stone, L. F. Marco referencial: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. Brasília: Embrapa, 2011. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/923530/1/balbino01.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2025.
9. BANCO MUNDIAL. Perspectivas Econômicas Globais. Brasil: 2025. Disponível em: <<https://www.worldbank.org/pt/publication/global-economic-prospects>>. Acesso em: 11 set. 2025.
10. BAT - Best Available Techniques. Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). Sevilha: EC, 2015. Disponível em: <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/PP_revised_BREF_2015.pdf>. Acesso em: 07 abr. 2025.
11. BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Descarbonização da Indústria de Base. Brasília: BNDES, 2024.
12. BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Descarbonização da Indústria de Base. Brasília: BNDES, 2024.
13. BRASIL. Arcabouço Brasileiro para Títulos Soberanos Sustentáveis. Brasília: BRASIL, 2023b. Disponível em: <https://sisweb.tesouro.gov.br/apex/f?p=2501:9:::9:P9_ID_PUBLICACAO_ANEXO:21059>. Acesso em: 18 jun. 2025.
14. BRASIL. Cartilha do Novo Brasil Plano de Transformação Ecológica. Brasília: BRASIL, 2025a. Disponível em: <<https://www.gov.br/fazenda/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/transformacao-ecologica-novo-brasil/cartilha/cartilha-novo-brasil>>. Acesso em: 18 jun. 2025.
15. BRASIL. Eco Invest Brasil. Brasília: BRASIL, 2025c. Disponível em: <<https://www.gov.br/tesouronacional/pt-br/fomento-ao-investimento/eco-invest-brasil>>. Acesso em: 17 jun. 2025.
16. BRASIL. Plano Nacional de Economia Circular 2025-2034. Brasília: BRASIL, 2025b. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/enec/plano-nacional/plano-nacional-de-economia-circular-2025-2013-2034-versao_26-05-2025.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2025.
17. BRASIL. Taxonomia Sustentável Brasileira. Plano de ação para consulta pública. Brasília: 2023a. Disponível em: <<https://www.gov.br/fazenda/pt-br/orgaos/spe/taxonomia-sustentavel-brasileira/taxonomia-sustentavel-brasileira.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2025.
18. Cepi - CONFEDERATION OF EUROPEAN PAPER INDUSTRIES. KEY STATISTICS 2024 - European pulp & paper industry. Bélgica: 2024. Disponível em: <<https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2025/07/Cepi-2024-Key-Statistics.pdf>>. Acesso em: 21 jul. 2025.
19. CIF - Climate Investment Funds. CIF Funding. Washington: 2025. Disponível em: <<https://www.cif.org/cif-funding>>. Acesso em: 25 jun. 2025.
20. CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Descarbonização da indústria: análise de experiências internacionais e recomendações para o Brasil / Confederação Nacional da Indústria. - Brasília: CNI, 2024. 114 p.
21. CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Oportunidades e riscos da descarbonização da indústria brasileira: roteiro para uma estratégia nacional. Brasília: CNI, 2023. Disponível em: <<https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2023/12/oportunidades-e-riscos-da-descarbonizacao-da-industria-brasileira-roteiro-para-uma-estrategia-nacional/>>
22. EC - EUROPEAN COMMISSION. About F-gases. EC, 2025a. Disponível em: <https://climate.ec.europa.eu/eu-action/fluorinated-greenhouse-gases/about-f-gases_en#:~:text=Emissions%20can%20occur%20when%20F%2Dgases%20are%20produced%2C,F%2Dgases%20are%20emitted%20outright%20into%20the%20atmosphere>. Acesso em: 28 out. 2025.
23. EC - EUROPEAN COMMISSION. Overview of sustainable finance. Bruxelas: EC, 2025b. Disponível em: <https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/overview-sustainable-finance_en>. Acesso em: 28 mai. 2025.
24. EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Florestas energéticas. Brasília: Embrapa, 2021. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1131904/1/EmbrapaFlorestas-2021-LV-EucaliptoEmbrapa-cap26.pdf>>.
25. EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Mapa de rotas tecnológicas da conversão da lignina em intermediários químicos, combustíveis e materiais. Brasília: Embrapa, 2022. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1146185/1/Mapa-de-rotas-tecnicas.pdf>>.
26. EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Captura e Armazenamento de Carbono. Um Breve Guia sobre uma das Alternativas-Chave para a Transformação do Setor de Óleo e Gás no Brasil. Fact Sheet - F-EPE-DPG-SPG_01-2023. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em:

- em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-764/FS-EPE-DPG-SPG-01_2023-CCS_PT_BR_30ago23.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2025.
27. Forest Industries. Carbon Emissions (CO₂) 2001-2020 Per Tonnes Virgin Pulp and Paper. Suécia: 2020. Disponível em: <<https://www.forestindustries.se/siteassets/bilder-och-dokument/statistik-dokument/engelska/2021/forest-and-the-climate-2020.pdf>>. Acesso em: 21 jul. 2025.
28. Fundação Ellen MacArthur. Completando a figura: Como a economia circular ajuda a enfrentar as mudanças climáticas. 2019. Disponível em: <<https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/51d7f731e5e70179/original/Completando-a-figura-Como-a-economia-circular-ajuda-a-enfrentar-as-mudancas-climaticas.pdf>>.
29. GHGRP – GREENHOUSE GAS REPORTING PROGRAM 2024. Estados Unidos: EPA, 2025. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ghgreporting/ghgrp-pulp-and-paper#trends-subsector>>. Acesso em: 30 jul. 2025.
30. Global Footprint Network. Earth Overshoot Day 2024. Geneva: Global Footprint Network, 2024. Disponível em: <https://overshoot.footprintnetwork.org/?_ga=2.214631383.1963570334.1742298657-975967126.1742298656>. Acesso em: 18 mar. 2025.
31. Ibá – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁRVORES. Comunicação. São Paulo: Ibá, 2024. Disponível em: <<https://iba.org/comunicacao/sala-de-imprensa/iba-divulga-carteira-de-investimentos-do-setor-de-arvores-cultivadas-de-r-1054-bilhoes/>>. Acesso em: 10 nov. 2025.
32. Ibá – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁRVORES. Mosaico Ibá. São Paulo: Ibá, 2025b. Disponível em: <<https://iba.org/publicacoes/mosaico/>>. Acesso em: 04 nov. 2025.
33. Ibá – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório Anual 2025 (Ano-base 2024). São Paulo: Ibá, 2025a.
34. IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Síntese de Indicadores Sociais: uma análise das condições de vida da população brasileira: 2024. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9221-sintese-de-indicadores-sociais.html>>. Acesso em: 01 jul. 2025.
35. IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Tracking Pulp and Paper. 2025. Disponível em: <<https://www.iea.org/energy-system/industry/paper#tracking>>. Acesso em: 28 jul. 2025.
36. IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2022: Mitigation of climate change working group iii contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva: IPCC, 2022a. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>>. Acesso em: 15 jul. 2025.
37. IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Reino Unido e Nova Iorque: IPCC, 2022b. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Full_Report.pdf>.
38. IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Japão: IPCC, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>.
39. IPPTA – Indian Pulp and Paper Technical Association. Decarbonization in the Indian Pulp & Paper Industry. 2023. Saharanpur: Quarterly Journal of Indian Pulp and Paper Technical Association Vol. 35, E1, 2023, p. 62-65. Disponível em: <<https://ippta.co/wp-content/uploads/2023/03/62-65.pdf#:~:text=The%20CO2%20emission%20from%20the%20Indian%20Pulp,and%20Paper%20industry%20is%201.58%20MTCO2e/MT%20paper>>. Acesso em: 29 jul. 2025.
40. IUCN – INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE AND NATURAL RESOURCES. Nature-based Solutions for climate. Suíça: IUCN, 2025. Disponível em: <<https://iucn.org/our-work/topic/nature-based-solutions-climate>>. Acesso em: 27 mar. 2025.
41. JPA – JAPAN PAPER ASSOCIATION. Sustainability Report 2023. Japão: 2023. Disponível em: <https://www.jpa.gr.jp/sustainability/report/pdf/en_report2023_a4.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2025.
42. KEI – Kompetenzzentrum Klimaschutz in Energieintensiven Industrien. Pulp and paper industry. 2025. Disponível em: <<https://www.klimaschutz-industrie.de/en/topics/energy-intensive-industries/pulp-and-paper-industry/>>. Acesso em: 29 jul. 2025.
43. MCTI – MINISTÉRIO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. Relatório do Inventário Nacional das Emissões Antrópicas por Fontes e das Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa do Brasil. NIR 2024. Primeiro Relatório Bienal de Transparência (BTR1) à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Brasília, MCTI, 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-bienais-de-transparencia-btrs>>.
44. MDIC – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. Plano Setorial Indústria – Plano Clima Mitigação (em consulta pública).¹ Brasília, MDIC, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/smc/plano-clima/psm-industria-documento-na-integra.pdf/>. Acesso em: 21 set. 2025.
45. MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE 2025. Estratégia Nacional de Mitigação. Plano Clima 2024-2035. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/smc/plano-clima/enm_consolidada-vsubex-final-10-07-25-limpa-1-1.pdf/
46. MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE 2026. Sumário Executivo do Plano Nacional sobre Mudança do Clima (Plano Clima 2024-2035). Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/mudanca-do-clima/sumario-executivo-plano-clima.pdf>
47. MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Plano Decenal de Expansão de Energia 2031. Brasília: MME/EPE, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031_RevisaoPosCP_rvFinal_v2.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2025.
48. NRCAN – NATURAL RESOURCES CANADA. Canada's GHG Emissions by Sector, End Use and Subsector. Canadá: 2025. Disponível em: <<https://oee.nrcan.gc.ca/corporate/statistics/neud/dpa/showTable>>.
49. ONU – Organização das Nações Unidas. World Population Prospects 2024: Summary of Results. UN DESA/POP/2024/TR/NO. 9. New York: 2024, United Nations. Disponível em: <https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/files/documents/2024/Jul/wpp2024_summary_of_results_final_web.pdf>.
50. OURWORLDINDATA. Urbanization. UK. Our World Data, 2025. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/urbanization>>. Acesso em: 18 mar. 2025.
51. PBGHGP – Programa Brasileiro GHG Protocol. São Paulo: FVG EAESP, 2023. Nota técnica: uso do GHG Protocol Agricultural Guidance e contabilização de emissões resultantes das práticas agrícolas e de mudanças no uso do solo: versão 4.0". Disponível em: <<https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/8e6f34cd-acf4-4e01-8356-acc809df550a/content>>.
52. PUCRS, 2014. Ketzer, J. M. M.; Machado, C. X.; Rockett, G. C.; Iglesias, R. S. (orgs.). Atlas
- 1 Aguardando publicação final do governo.

Brasileiro de Captura e Armazenamento Geológico de CO₂. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2014. 66 p. ISBN 978-85-397-0577-1. Disponível em: <https://repositorio.pucrs.br/dspace/handle/10923/12801>.

53. Robinson, Mary. Justiça climática: esperança, resiliência e a luta por um futuro sustentável. Tradução de Leo Gonçalves e Clóvis Marques. 1. ed. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2023.

54. SBTi - SCIENCE BASED TARGETS INITIATIVE. Net-Zero Jargon Buster - a guide to common terms. 2024. Disponível em: <https://sciencebasedtargets.org/blog/net-zero-jargon-buster-a-guide-to-common-terms#3179645>. Acesso em: 23 jul. 2025.

55. TPI - Transition Pathway Initiative. TPI online tool - Paper Sector. Disponível em: <https://www.transitionpathwayinitiative.org/sectors/paper>. Acessado em: 25 set. 2025.

56. UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Montreal Protocol Progress - Kigali Amendment. Quênia. UNEP, 2020. Disponível em: <https://ozone.unep.org/news/kigali-story>. Acesso em: 03 abr. 2025.

57. UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Nature-Based Solutions For Climate Change Mitigation. Cambridge: UNEP, 2021. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/xmlui/bitstream/handle/20.500.11822/37318/NBSCCM.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2025.

58. UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTIONS ON CLIMATE CHANGE. Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement on its fifth session, held in the United Arab Emirates from 30 November to 13 December 2023. United Arab Emirates: UNFCCC, 2024. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2023_16a01E.pdf. Acesso em: 18 mar. 2025.

59. VISA. The Geography of the Global Middle

Class: Where They Live, How They Spend. 2025. Disponível em: <https://usa.visa.com/dam/VCOM/global/partner-with-us/documents/middle-class-spending-whitepaper.pdf>. Acesso em: 03 set. 2025.

60. WRI - WORLD RESOURCES INSTITUTE. GHG Protocol Agricultural Guidance. Interpreting the Corporate Accounting and Reporting Standard for the agricultural sector. Geneva: WRI, WBSCD, GHG Protocol, 2025. Disponível em: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/GHG%20Protocol%20Agricultural%20Guidance%20%28April%2026%29_0.pdf.

61. STUCKERT, Ricardo. Sobrevoos das áreas afetadas pelas chuvas na Região metropolitana de Porto Alegre. 2024. 1 fotografia. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:05.05.2024_-_Sobrevoos_das%C3%A1reas_afetadas_pelas_chuvas_na_Regi%C3%A3o_metropolitana_de_Porto_Alegre_%282%29.jpg. Acesso em: 14 abr. 2026.



ANEXO I - METODOLOGIA



Este Anexo descreve de forma detalhada a metodologia referente ao processo de elaboração da Estratégia de Descarbonização do Setor de Papel & Celulose consistiu em 3 etapas, mostradas no fluxograma abaixo e detalhadas a seguir.

1.1 Elaboração de um Panorama da Indústria de Papel & Celulose sobre Descarbonização

Projeção de Crescimento do Setor de Papel & Celulose: Análise do Panorama Global

A partir de informações da Iba sobre novos investimentos previstos no setor, e de projetos recentes realizados na AFRY, foi realizado uma análise do panorama global do setor, incluindo uma avaliação nas tendências demográficas, geopolíticas, econômicas, ambientais e tecnológicas e seu impacto nos mercados globais de celulose; análise dos dados históricos de produção de celulose e papel no Brasil (no período de 2005 a 2024), e prognóstico de tendência de crescimento de produção no setor, de acordo com os novos projetos previstos e plantas recém instaladas (projeções para cada 5 anos até 2050).

Processos Produtivos e Principais Fontes de Emissão do Setor de Papel & Celulose

A partir do banco de dados da AFRY e pesquisa em literatura, foi realizada uma descrição sucinta dos principais processos e as principais fontes de emissão de GEE em cada um deles, considerando os escopos 1, 2 & 3. Para tanto, a cadeia de valor foi dividida em 4 grupos: florestal, industrial, logística e produtos.

Diagnóstico sobre de Descarbonização no Setor

A coleta de informações para a realização do diagnóstico sobre de descarbonização se iniciou por uma extensiva coleta de informações públicas das empresas do setor de Papel & Celulose disponíveis em seus websites, relatórios integrados e de sustentabilidade.

Posteriormente, foi realizado um levantamento de percepção empresarial através de dois métodos de coleta de dados: *workshop* participativo setorial e aplicação de questionário estruturado e semiestruturado às empresas do setor atuantes no Brasil.

Para esta etapa foram selecionadas 28 empresas do setor de Papel & Celulose (figura abaixo), as quais foram convidadas a participar desta estratégia, sendo a seleção realizada em colaboração com a Iba, por meio da indicação de suas empresas associadas e respectivas pessoas chaves no assunto de descarbonização. A Iba também buscou indicações de outras empresas associadas à Associação Brasileira de Embalagens em Papel (EMPAPEL), de modo a se obter uma amostra mais representativa do setor.

No dia 22 de Maio de 2025 foi realizada a reunião inicial online para divulgação do projeto da estratégia de descarbonização do setor de Papel & Celulose, a qual contou com a participação de profissionais de 18 empresas, bem como representantes do BID, MDIC, Iba, ABTCP e representantes do corpo técnico da AFRY, somando a participação de 123 pessoas online.

O *workshop* participativo setorial promovido

pela AFRY ocorreu no dia 16 de Junho de 2025 nas instalações da própria AFRY em São Paulo, o qual teve a participação de 12 empresas, totalizando 61 pessoas participantes, bem como representantes do BID, MDIC, Iba, ABTCP e representantes do corpo técnico da AFRY.

A realização deste evento teve como foco principal ouvir das próprias empresas do setor como elas têm enfrentado as questões relacionadas aos temas dos 4 eixos estratégicos (alavancas prioritárias) previstos no mapeamento das ações potenciais de descarbonização.

O *workshop* foi dividido em 4 painéis, um para cada eixo estratégico: governança corporativa climática; soluções técnicas; instrumentos econômicos e políticas públicas; e engajamento da sociedade e da cadeia de valor.

Complementarmente ao *workshop*, foi enviado um questionário estruturado e semiestruturado às mesmas 28 empresas pré-selecionadas

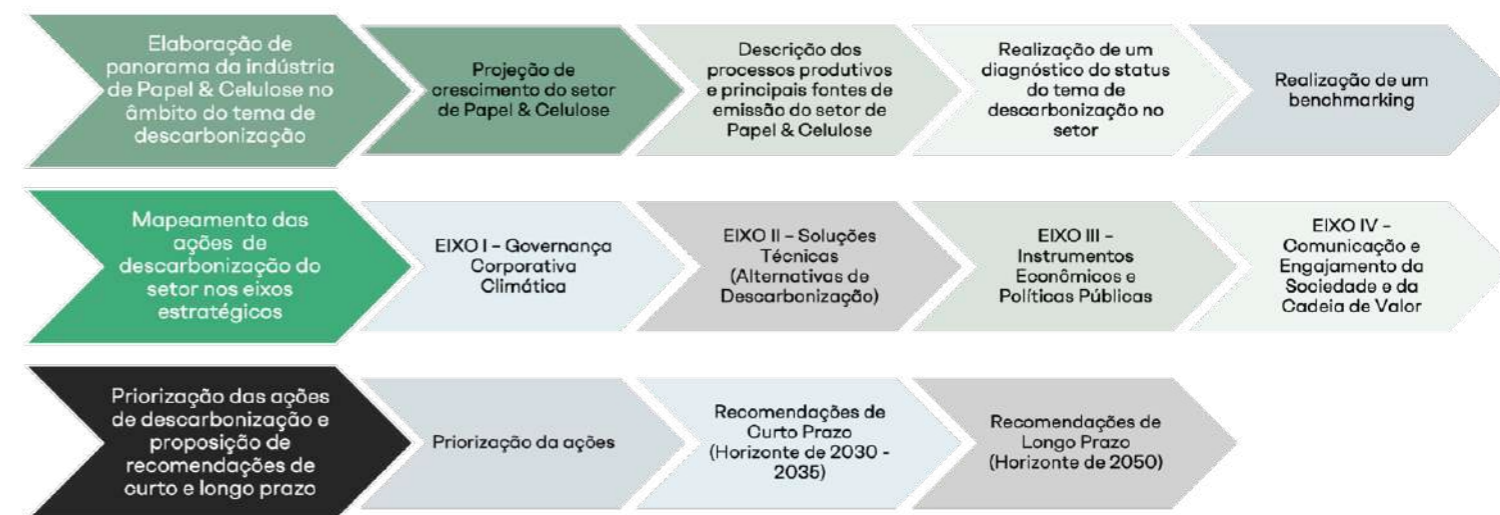


Figura 39 - Fluxograma do processo de elaboração da Estratégia de Descarbonização do Setor de Papel & Celulose.



No total os questionários foram preenchidos por 19 empresas, que representam os principais *players* do setor de Papel & Celulose, abrangendo 86% da produção de papel e celulose do Brasil.

Realização de um *Benchmarking*

A partir de informações disponibilizadas online em sites de associações setoriais, sites governamentais e em literatura, foi realizado um levantamento de dados do setor de Papel & Celulose referente a intensidade de emissões de GEE (tonelada de CO₂ equivalente por tonelada de produto) dos principais países produtores de papel e celulose, bem como sobre a existência de estratégias de descarbonização.

1.2 Mapeamento das Ações Potenciais de Descarbonização do Setor nos Eixos Estratégicos

Esta etapa compreendeu a elaboração de um mapeamento e descrição das ações potenciais de descarbonização aplicáveis ao setor, as quais foram segregadas em 4 eixos estratégicos, que são interconectados, e apresentam os principais temas que poderão ser desenvolvidos e implementados pelas empresas em sua jornada de descarbonização até 2050. Os 4 eixos estratégicos são:

- EIXO I – Governança Corporativa Climática: ações para criação/reforço dos arranjos institucionais de governança corporativa climática.
- EIXO II – Soluções Técnicas (Alternativas de Descarbonização): apresentação e descrição das ações de cunho técnico voltadas à descarbonização dos processos e operações do setor.
- EIXO III – Instrumentos Econômicos e Políticas Públicas: potenciais ações do poder público para criar as condições necessárias para que, juntamente com os compromissos e esforços do setor privado, seja criado um ambiente jurídico e regulatório adequado, assegurando equilíbrio fiscal, para viabilizar a execução e implementação das medidas de mitigação.
- EIXO IV – Comunicação e Engajamento

da Sociedade e da Cadeia de Valor: ações de descarbonização voltadas para o estabelecimento de parcerias entre as empresas do setor, os seus fornecedores, a academia, os movimentos sociais e a sociedade civil.

1.3 Priorização das Ações de Descarbonização e Proposição de Recomendações de Curto e Longo Prazo

A etapa final da estratégia de descarbonização refere-se à avaliação das ações potenciais de descarbonização, sua priorização e recomendações quanto a sua implantação, considerando curto prazo (no horizonte de 2030-2035) ou longo prazo (no horizonte de 2050).

Para isso, foi utilizada a metodologia de priorização das ações de acordo com o valor gerado por cada uma (potencial de mitigação e geração de cobenefícios ambientais, econômicos, sociais, operacionais e de governança), e o nível de esforço envolvido para a sua implementação (nível de maturidade tecnológica, custos envolvidos e barreiras existentes, demanda por ações estruturantes e aplicabilidade).

A metodologia baseia-se na avaliação multicritério por ponderação, com o objetivo de priorizar ações de forma estruturada e comparável. A partir da definição do conjunto de critérios de análise relevantes, atribuiu-se um peso, refletindo sua importância no contexto avaliado. As pontuações atribuídas são então multiplicadas e parametrizadas para uma escala de 0 a 1.

Por fim, os resultados são compilados em uma matriz de dois eixos — Valor Gerado (eixo vertical) versus Nível de Esforço (eixo horizontal). Essa representação gráfica permite visualizar e comparar as ações avaliadas, facilitando a identificação de prioridades, como ações de alto valor e baixo esforço (“quick wins”), bem como aquelas que demandam maior planejamento ou investimento estratégico. Por fim, a matriz resultante classifica as ações de descarbonização levantadas em:

- Ações de Curto Prazo: ações de baixo a médio esforço. Prazo recomendado para

implementação das ações: até 2030-2035.

- Ações de Longo Prazo: ações que geram alto valor, mas demanda alto esforço. Prazo recomendado para implementação das ações: até 2050.
- Ações Não Priorizadas: ações de baixo a médio valor gerado com alto esforço envolvido.

No total foram levantadas um total de 101 ações de mitigação possíveis para o setor de Papel & Celulose, sendo estas divididas em 40 estruturantes e 61 impactantes.



Figura 40 – Empresas e instituições convidadas a participar da Estratégia de Descarbonização do Setor de Papel & Celulose.

ESTRATÉGIA DE DESCARBONIZAÇÃO DA INDÚSTRIA DO SUBSETOR DE PAPEL E CELULOSE

EIXO I - Governança Corporativa Climática

Gabrielly Rauch Especialista Sustentabilidade BRACELL	Clóvis Zimmer Consultor Meio Ambiente e Novos Projetos CMPC	Karin Neves Diretora Sustentabilidade MELHORAMENTOS	Laura Castro Analista Sustentabilidade SYLVANO	Rafael Favery Gerente Sustentabilidade AFRY
--------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------

Moderador

AFRY



Eixo I - Governança Corporativa Climática

ESTRATÉGIA DE DESCARBONIZAÇÃO DA INDÚSTRIA DO SUBSETOR DE PAPEL E CELULOSE

EIXO II - Soluções de Descarbonização

Mauro Pereira Diretor Energia, Biomassa e Química AFRY	Fábio de Paula Gerente Sustentabilidade ELDORADO	Bianca Samensari Gerente Meio Ambiente SHURTT WESTROCK	Guilherme Coraiola Coordenador Mudanças Climáticas SUZANO	Karen Freitas Eng. Meio Ambiente e Sustentabilidade AFRY
---------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------

Moderadora

AFRY



Eixo II - Soluções Técnicas de Descarbonização

ESTRATÉGIA DE DESCARBONIZAÇÃO DA INDÚSTRIA DO SUBSETOR DE PAPEL E CELULOSE

EIXO III - Instrumentos Econômicos e Políticas Públicas

Kátia Fenyes Especialista Mudanças Climáticas e Sustentabilidade BID	Luiz Miranda Especialista Políticas Públicas MDC	Adriano Scarpa Gerente Mudanças Climáticas IBÁ	Betânia Vitas Boas Especialista Finanças Sustentáveis ARAÚCO	Rafael Favery Gerente Sustentabilidade AFRY
-----------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------

Moderador

AFRY



Eixo III - Instrumentos Econômicos e Políticas Públicas

ESTRATÉGIA DE DESCARBONIZAÇÃO DA INDÚSTRIA DO SUBSETOR DE PAPEL E CELULOSE

EIXO IV - Comunicação e Engajamento da Sociedade e da Cadeia de Valor

Marcia Silva de Jesus Especialista Sustentabilidade e Assuntos Florestais IBÁ	Umberto Cinque Head Técnico ABTCP	Kelen Moreira Coordenadora Gestão Ambiental CENBRA	Marília Dantas Supervisora Sistema de Gestão Integrado COBAP	Caroline Palacio Engenheira Ambiental e Sustentabilidade AFRY
--------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------

Moderadora

AFRY



Eixo IV - Comunicação e Engajamento da Sociedade

Figura 41 - Registros fotográficos de cada painel temático.



A close-up photograph of a tree trunk with rough, dark brown bark. The bark is covered with patches of green moss and light-colored lichen. The lighting is dramatic, highlighting the textures of the bark and the small plants. The background is dark and out of focus.

ANEXO II - MAPEAMENTO DAS AÇÕES POTENCIAIS DE DESCARBONIZAÇÃO

Este Anexo descreve de forma detalhada as ações potenciais de descarbonização aplicáveis ao setor de Papel & Celulose apresentadas no relatório principal.

Estas ações foram segregadas em 4 eixos estratégicos (alavancas prioritárias), que são interconectados, e apresentam os principais temas que poderão ser desenvolvidos e implementados pelas empresas em sua jornada de descarbonização até 2050.

A seguir, para cada eixo, são apresentadas as ações, soluções e iniciativas potenciais para se alcançar os objetivos de implementação da estratégia de descarbonização do setor de Papel & Celulose até 2050.

Estas recomendações foram agrupadas em:

- Ações Impactantes: apresentam impacto direto na redução de emissões ou remoção/captura de GEE; e
- Ações Estruturantes: estabelecem condições fundamentais para a execução e implementação das ações impactantes.



Figura 42 - Eixos da estrat\u00e9gia de descarboniza\u00e7\u00e3o do setor de Papel & Celulose.



1.1 Eixo I – Governança Corporativa Climática

A governança corporativa climática engloba não somente a gestão do carbono em termos de identificação das fontes, monitoramento, mitigação e compensação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), mas toda uma estrutura corporativa de gestão do tema de mudanças climáticas, que envolve ações para monitoramento, avaliação e valoração dos riscos climáticos, estabelecimento de uma política corporativa de mudanças do clima e de um comitê de mudanças climáticas, para um efetivo engajamento dos *stakeholders*, contemplando inclusive remuneração variável de executivos relacionada a essa temática, bem como o estabelecimento de compromissos, de metas e de indicadores, inclusão do carbono nas análises de viabilidade de novos projetos, relatos das emissões de GEE, etc.

O setor privado é uma peça fundamental na transição para uma sociedade mais sustentável. Assim, gerenciar a convergência da descarbonização com metas de ESG

(*Environmental, Social e Governance*) ou sustentabilidade mais amplas requer estruturas de governança robustas e mecanismos de relatórios transparentes nesse setor.

Para o alcance de resultados a governança das empresas deve incluir as questões climáticas em sua estratégia de negócio, de tal forma que haja envolvimento e comprometimento da alta direção, a qual deve estabelecer, implementar e manter uma política de sustentabilidade que inclua ações para combate às mudanças climáticas.

Toda a alta direção, assessorada por um comitê de sustentabilidade ou ESG ou climático, deve estar envolvida na supervisão e nas decisões relacionadas a essa temática. Além disso, a criação de uma área específica relacionada às mudanças climáticas e/ou carbono com um centro de custo dedicado para desenvolvimento de projetos nessa área é essencial para estabelecimento de uma

estrutura de governança climática forte e independente.

A participação em iniciativas e compromissos nacionais e internacionais relacionados às mudanças climáticas são essenciais e base para a governança climática, bem como para a comunicação e engajamento dos *stakeholders*.

Empresas que não possuem uma governança estruturada, ou que tenham falta de verba e pessoal especializado para criar e manter estruturas formais de governança (como comitês, auditorias, *compliance*, ou elaboração e revisão de políticas); ou que tenham uma cultura de gestão centralizada nos sócios, com pouca separação entre gestão e propriedade; ou que tenham foco apenas em prioridades de curto prazo devido a necessidade em manter o fluxo de caixa e as operações diárias, acabam por deixar a governança em segundo plano, incluindo a governança corporativa climática.

O estabelecimento de metas de mitigação de emissão de GEE e indicadores de desempenho é peça-chave para o desenvolvimento de uma estratégia climática bem-sucedida, bem como o relato das ações no combate às mudanças climáticas, que traz maior transparência sobre os resultados da estratégia climática.

Assim, este capítulo tem como objetivo apresentar as principais ações estruturantes relacionadas a governança corporativa climática, distribuídas nos seguintes tópicos:

- Estruturar a governança corporativa climática;
- Monitorar a governança corporativa climática;
- Estratégia climática corporativa.

1.1.1 Estruturar a Governança Corporativa Climática

1.1.1.1 Criar um Comitê de Mudanças Climáticas (GVN.1)

Descrição da Ação

- A criação de um comitê de mudanças climáticas, responsável por gerir a descarbonização da empresa, tem como objetivo formalizar essa responsabilidade ao definir papéis, metas, atribuições e forma de gestão dos projetos de descarbonização diretamente no nível do conselho de administração.
- É importante que o comitê responsável pelas mudanças climáticas esteja vinculado diretamente ao Conselho de Administração. Essa estrutura reforça o engajamento efetivo da liderança e assegura que o tema esteja integrado às decisões estratégicas da empresa. Também é importante a participação de pelo menos 1 pessoa do Conselho de Administração no referido comitê, para que as demandas sejam levadas e discutidas em nível estratégico.
- Pode-se incluir o tema de descarbonização sob a gestão de algum outro comitê executivo existente dentro da empresa, porém é imprescindível a participação de pessoas em cargos de decisão, com conhecimento técnico adequado sobre o tema de descarbonização / mudanças climáticas.

Forma de Mitigação

- Uma vez que o tema é discutido e gerido na alta liderança, está mais próximo do poder decisório e de sua consideração na estratégia da empresa; os líderes passam a entender a relevância dos impactos e riscos associados, inclusive financeiros, e percebem valor em ações de descarbonização, as quais além de reduzir riscos climáticos e secundários (como operacionais ou riscos legais), normalmente também reduzem custos no médio/longo prazo.

- Além disso, com a alta liderança envolvida e com um fórum dedicado ao tema, este acaba por ser cascadeado de forma mais eficaz para toda a empresa, o que provoca mais engajamento dos demais funcionários e os incentiva a buscar soluções para descarbonizar suas atividades rotineiras na empresa.

Importância (Cobenefícios)

- Operacional: Mais agilidade na tomada de decisões sobre descarbonização e maior probabilidade de as ações de descarbonização serem aprovadas e realmente implantadas.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço depende do porte da organização e do grau de maturidade em sustentabilidade. As principais barreiras que podem existir para que essa ação seja realizada são questões organizacionais e culturais, tais como: falta de engajamento da alta liderança, falta de clareza de responsabilidades, falta de percepção da importância do tema para a empresa, e recursos limitados.

Tipo de Ação

- Estruturante.



1.1.1.2 Estabelecer uma Política Corporativa de Mudanças Climáticas (GVN.2)

Descrição da Ação

- A ação de estabelecer uma política corporativa de mudanças climáticas visa colocar “no papel” a ambição e diretrizes climáticas da empresa, ou seja, ter um documento oficial e publicamente divulgado contendo: uma declaração de qual ambição da empresa em contribuir para a mitigação das mudanças climáticas e adaptação aos seus impactos; diretrizes de descarbonização que precisam ser consideradas nas tomadas de decisões (ex.: acréscimo/redução de emissões corporativas; acréscimo/redução de consumo de energia fóssil, acréscimo/redução do uso de renováveis); metas e objetivos mensuráveis de descarbonização (ex.: comoneutralidade de carbono até certo ano, percentual de redução de emissões até certo ano, ou adoção de padrões de reporte de emissões (GHG Protocol, SBTi, etc.); definição dos papéis da alta liderança, áreas técnicas e colaboradores na implementação e monitoramento de ações de descarbonização; definição do procedimento de monitoramento, reporte e divulgação de resultados de desempenho climático; e definição de formas de engajamento com demais partes interessadas.
- Observa-se que o tema de descarbonização e mudanças climáticas pode ser incluído em outras políticas corporativas correlatas, tais como Política de Meio Ambiente, Política de Fornecedores e Política de Risco.

Forma de Mitigação

- Uma política corporativa de mudanças climáticas é onde a organização estabelece os princípios, diretrizes e compromissos para lidar com os impactos das mudanças climáticas, tanto na mitigação (redução de emissões de gases de efeito estufa) quanto na adaptação (resiliência a eventos extremos), vinculados ou não na política de sustentabilidade ou meio ambiente, ou corporativa.

- Ao se incluir os temas de mudanças climáticas ou descarbonização em uma política corporativa, preferencialmente em uma política dedicada ao assunto, o posicionamento estratégico climático da empresa é fortalecido, há uma garantia de alinhamento interno e de clareza de responsabilidades quanto ao tema, assegurando que a pauta seja considerada de forma transversal e contínua.

Importância (Cobenefícios)

- Reputacionais e Econômico: Maior transparência da governança climática da empresa, menor risco de reputação da empresa e corroborar para uma maior facilidade de conseguir créditos e financiamentos.
- Social: garantia de alinhamento da ambição climática da empresa por todos os funcionários e maior probabilidade que o tema de descarbonização seja devidamente reconhecido como relevante e não seja negligenciado nas tomadas de ações.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- Estabelecer uma política corporativa de mudanças climáticas é um passo estratégico importante, mas exige engajamento da alta liderança, um comitê climático dedicado, definição de diretrizes e metas claras e estabelecimento de processos de monitoramento e reporte.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.1.2 Monitorar, Reportar e Verificar impactos climáticos gerados pelas operações da empresa

1.1.2.1 Contemplar o Risco Climático na Análise de Risco Integrado da Empresa (GVN.3)

Descrição da Ação

- O fato do setor de Papel & Celulose ser altamente dependente de recursos naturais (como florestas e água) e recursos humanos (trabalhadores próprios e terceiros; e comunidade local), o coloca em exposição cada vez mais a uma série de impactos das mudanças climáticas.
- A ação de incluir a avaliação de risco climático na análise de risco integrado da empresa visa permitir a avaliação do potencial impacto das mudanças climáticas nas suas operações existentes e futuras e na sua cadeia de valor, considerando tanto riscos físicos quanto riscos de transição.
- Na avaliação dos riscos físicos considera-se a probabilidade de ocorrência das ameaças climáticas e o nível de exposição e vulnerabilidade do projeto, operação existente ou cadeia de valor; além dos consequentes riscos operacionais e riscos financeiros. Na avaliação dos riscos de transição considera-se os riscos de regulação, tecnológicos, de mercado, legais e de reputação decorrentes das mudanças climáticas.
- Ressalta-se que os impactos potenciais das mudanças climáticas sobre as organizações já estão ocorrendo e vão além dos danos físicos, sendo o mapeamento dos riscos climáticos uma ferramenta de gestão necessária.

Forma de Mitigação

- Avaliar o risco climático na matriz de risco da empresa permite orientar investimentos e priorizar ações de descarbonização, de forma estratégica e preventiva.

Importância (Cobenefícios)

- Econômico: menor perda financeira na antecipação dos riscos físicos
- Operacional: reduz riscos de interrupções por eventos extremos
- Governança: maior transparência na gestão de riscos climáticos aumenta a confiança do mercado, valorizando a

marca e atração de investidores

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço para se realizar uma avaliação de riscos climáticos e incorporá-la à gestão de riscos é considerado alto, pois envolve etapas como coleta e análise de dados climáticos, mapeamento de ativos vulneráveis, modelagem de cenários e impactos, além da integração à matriz de riscos corporativa. Esse processo exige coordenação entre áreas técnicas, sustentabilidade, finanças e governança, além de ferramentas adequadas.
- As principais barreiras são a disponibilidade e qualidade dos dados, complexidade técnica para modelagem, integração com processos existentes e custos associados a modelagem climática.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.1.2.2 Elaborar anualmente relatório de sustentabilidade (GVN.5)

Descrição da Ação

- A ação consiste em “elaborar anualmente relatório de sustentabilidade”, incluindo estudo de dupla materialidade e priorização do tema de descarbonização/ mudanças climáticas entre os temas materiais das empresas do setor.
- O Relatório de Sustentabilidade deve conter informações claras, consistentes e alinhadas a padrões reconhecidos, garantindo transparência e credibilidade. Os elementos essenciais incluem: perfil organizacional, apresentando estrutura, operações e contexto; governança e estratégia, destacando políticas ESG e compromissos; materialidade, identificando temas relevantes para *stakeholders*; indicadores de desempenho, com métricas ambientais, sociais e econômicas (ex.: emissões, consumo de recursos, diversidade); gestão de riscos e oportunidades, incluindo riscos climáticos e de transição; e metas e progresso, mostrando evolução frente aos objetivos definidos. Além disso, é importante seguir *frameworks* como GRI, SASB ou ISSB, assegurar verificação externa e comunicar de forma acessível, reforçando o compromisso com a sustentabilidade e a criação de valor a longo prazo. O *Global Reporting Initiative (GRI)* é uma organização internacional independente que fornece os padrões mais usados do mundo para relatórios de sustentabilidade.
- Atualmente, além do GRI, existe uma série de iniciativas e compromissos corporativos para mitigação e adaptação às mudanças climáticas com diretrizes para divulgação, estabelecimento de metas e avaliação de riscos e oportunidades, que orientam as organizações nos seus esforços para serem mais responsáveis do ponto de vista ambiental e social, tais como *Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD)*, *Carbon Disclosure Project (CDP)*, *Science Based Targets initiative (SBTi)*, *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)*, *Principles for Responsible Investment (PRI)*, *International Financial Reporting*

Standards (IFRS), entre outros.

- A participação das organizações nestas iniciativas e compromissos relacionados às mudanças climáticas é fundamental para impulsionar a governança climática dentro das empresas, trazendo diretrizes e obrigações com foco na meta de limitar aquecimento global a 1,5 °C.

Forma de Estruturar

- O relatório de sustentabilidade é um instrumento que orienta as decisões, permite acompanhar os indicadores e avaliar o progresso de metas de descarbonização, facilitando a priorização das ações sobre emissões de GEE. Além disso, incentiva a definição de metas claras e o monitoramento contínuo, integrando riscos climáticos à estratégia corporativa.
- Ao atender exigências regulatórias e expectativas de investidores, o relatório fortalece o compromisso com a transição para uma economia de baixo carbono, engaja *stakeholders* e a cadeia de valor, e facilita o acesso a financiamentos sustentáveis.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: promove transparência sobre as emissões de gases de efeito estufa, permitindo identificar as principais fontes e estabelecer uma linha de base.
- Social: engajamento interno
- Governança: maior transparência aumenta a confiança do mercado, valorizando a marca

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- Realizar um Relatório de Sustentabilidade exige certo esforço, pois envolve definir padrões (como GRI, ISSB ou SASB), conduzir análise de materialidade, coletar e consolidar dados ambientais, sociais e de governança, além de estabelecer metas e indicadores. Também é necessário redigir uma narrativa clara, garantir transparência

e, idealmente, realizar assecuração externa para dar credibilidade ao documento. O nível de esforço é maior se a empresa não possui sistemas integrados ou processos de gestão ESG.

- As principais barreiras incluem a dificuldade de integrar dados entre áreas, falta de qualidade ou rastreabilidade das informações, necessidade de conhecimento técnico sobre normas globais, engajamento interno e custos com auditorias. Além disso, a regulação está em constante evolução, exigindo atualização contínua.

Tipo de Ação

- Estruturante.



1.1.2.3 Elaborar Anualmente Relatório de Inventário Corporativo Climático (GVN.5)

Descrição da Ação

- A ação consiste em “elaborar anualmente relatório de inventário GEE” através de metodologias consagradas.
- O *Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol)* é um padrão global para medir e gerenciar as emissões de GEE de operações dos setores público e privado, cadeias de valor e ações de mitigação. O GHG Protocol é o padrão para cálculo de emissões de GEE mais usado no mundo, que é usado por empresas, governos e outras organizações para desenvolver inventários abrangentes e confiáveis de suas emissões de GEE.
- A ISO 14064 é a norma internacional que estabelece princípios e requisitos para quantificação, monitoramento e verificação de emissões e remoções de GEE, muito usada para certificações e auditorias.
- O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) traz diretrizes a serem aplicadas principalmente em inventários nacionais e setoriais, além de fornecer base de cálculos de fatores de emissão.
- O Programa Brasileiro *GHG Protocol* é uma iniciativa nacional que adapta a metodologia internacional do *GHG Protocol (Greenhouse Gas Protocol)* para a realidade brasileira. Ele foi criado para apoiar empresas e organizações na quantificação, gestão e reporte das emissões de gases de efeito estufa (GEE) de forma padronizada e transparente. Ele é coordenado pelo FGVces (Centro de Estudos em Sustentabilidade da FGV) em parceria com o World Resources Institute (WRI).
- Conforme o *GHG Protocol*, os inventários de emissões devem incluir obrigatoriamente os Escopos 1 e 2. O Escopo 1 abrange as emissões diretas provenientes de fontes que pertencem ou são controladas pela empresa, como combustão em equipamentos e veículos próprios. O

Escopo 2 refere-se às emissões indiretas associadas à geração de energia adquirida e consumida pela organização. Já o Escopo 3, que inclui outras emissões indiretas ao longo da cadeia de valor (como transporte, fornecedores e uso de produtos), é opcional, mas altamente recomendado para uma avaliação completa de toda cadeia de valor.

Forma de Mitigação

- Realizar um inventário de GEE é fundamental para o setor pois fornece uma visão clara das principais fontes de emissão, tanto diretas quanto indiretas. Esse diagnóstico permite identificar pontos críticos e direcionar esforços para reduzir emissões de forma estratégica.
- Com base nos dados do inventário, as empresas podem definir metas de descarbonização alinhadas a padrões globais, como Science Based Targets, e implementar ações como substituição de combustíveis fósseis, aumento da eficiência energética, entre outros. Além disso, o inventário facilita o monitoramento contínuo, garantindo transparência para clientes, investidores e reguladores, e possibilitando participação em mercados de carbono e certificações ambientais.
- Por fim, incluir o Escopo 3 no inventário engaja toda a cadeia de valor, incentivando fornecedores e parceiros a reduzir suas emissões. Assim, o inventário não é apenas uma obrigação regulatória, mas uma ferramenta estratégica para aumentar competitividade, atender às exigências de mercado e contribuir para as metas globais de descarbonização.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: identificar as principais fontes de emissões permite reduzi-las
- Operacional: exige organização de dados e integração de áreas, aumentando o controle operacional
- Governança: demonstra responsabilidade socioambiental, fortalece a imagem da

empresa perante os *stakeholders*

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- Elaborar inventário de gases de efeito estufa requer levantar dados detalhados sobre consumo de combustíveis, energia elétrica, processos industriais e atividades da cadeia de valor. Esse processo envolve integração entre diversas áreas (operações, manutenção, compras, logística), definição de fronteiras organizacionais, o que demanda tempo, recursos e capacitação técnica.
- As principais barreiras incluem disponibilidade e qualidade dos dados, especialmente para o Escopo 3, que depende de informações de fornecedores e parceiros; complexidade técnica para aplicar metodologias; falta de engajamento interno, pois muitas áreas não têm processos estruturados para coleta de dados e custos relacionados a consultorias e verificação externa.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.1.2.4 Realizar Análise de Ciclo de Vida (GVN.6)

Descrição da Ação

- A ação consiste em “realizar Análise de Ciclo de Vida” (ACV), com foco na pegada de carbono. A ACV é uma metodologia que avalia os impactos ambientais associados a todas as etapas do ciclo de vida de um produto, processo ou serviço. Isso inclui desde a extração de matérias-primas, passando pela produção, transporte, uso, até a destinação final (reciclagem ou descarte).
- Ela segue normas internacionais, como a ISO 14040, e considera diferentes categorias de impacto, como emissões de gases de efeito estufa, consumo de energia, uso de água e geração de resíduos.
- Para se realizar uma Análise de Ciclo de Vida é necessário definir objetivo e unidade funcional, coletar dados sobre todas as entradas e saídas, realizar os cálculos com base em fatores reconhecidos, avaliar as categorias de impacto e interpretar os resultados.

Forma de Estruturar

- Realizar uma Análise de Ciclo de Vida com foco em pegada de carbono permite identificar as principais fontes de emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida de produtos ou processos, desde a extração de matérias-primas até o descarte. Essa abordagem fornece dados confiáveis para estabelecer metas de redução, evita a transferência de impactos para outras áreas ambientais e orienta decisões estratégicas sobre materiais, processos e logística, priorizando alternativas de menor pegada de carbono. Além disso, engaja a cadeia de valor, facilita a comunicação transparente e garante conformidade com normas internacionais, tornando a descarbonização mais estruturada e eficaz.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: identificar as principais fontes

de emissões permite reduzi-las

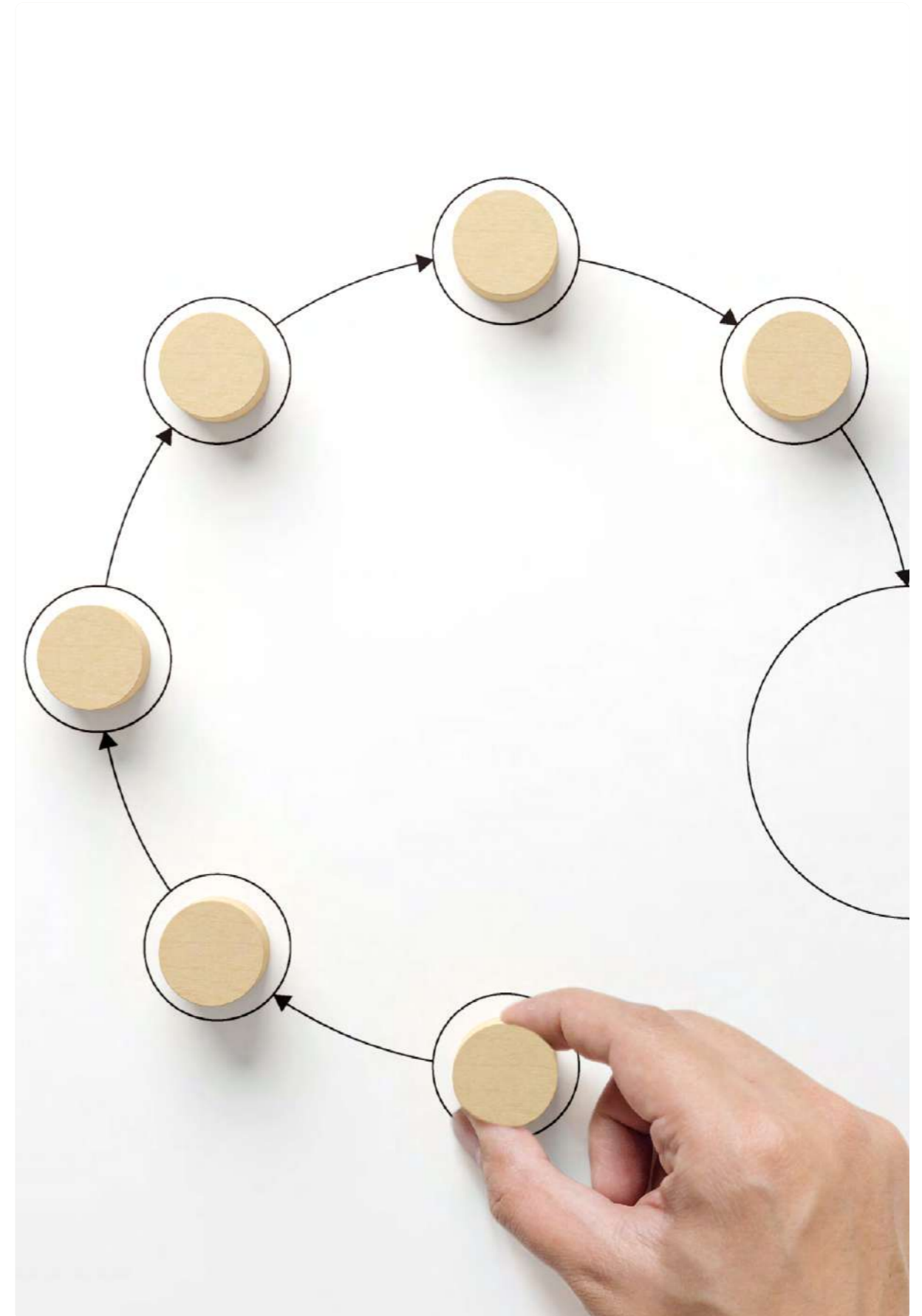
- Operacional: melhoria na gestão de processos uma vez que necessita de dados mais precisos, promovendo a integração e maior controle
- Social: promove engajamento interno

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço para realizar uma Análise de Ciclo de Vida com foco em mudanças climáticas é geralmente alto, pois envolve etapas complexas e integração de dados detalhados. É necessário definir objetivo e escopo, coletar informações sobre todas as fases do ciclo de vida (matérias-primas, produção, transporte, uso e descarte), aplicar metodologias conforme normas ISO 14040 e utilizar softwares especializados. Além disso, exige conhecimento técnico para interpretação dos resultados.
- As principais barreiras incluem dificuldade na coleta de dados confiáveis, especialmente em processos externos ou na cadeia de fornecedores; complexidade técnica; custos elevados com ferramentas, bases de dados e consultorias; tempo necessário para execução e validação; e a necessidade de engajamento interno e externo, já que muitas áreas não possuem processos estruturados para fornecer informações.

Tipo de Ação

- Estruturante.



1.1.2.5 Estabelecer metas de mitigação e de indicadores de desempenho e monitorar sua performance (GVN.7)

Descrição da Ação

- A ação consiste em “estabelecer metas de mitigação e de indicadores de desempenho e monitorar sua performance”.
- Para combater as mudanças climáticas, as empresas têm estabelecido metas e indicadores de desempenho com objetivo de monitorar sua performance climática. Os compromissos corporativos para atingir emissões líquidas zero cresceram rapidamente, mas a abordagem e a definição de emissões líquidas zero variam.
- A *Science Based Targets initiative (SBTi)* é uma das mais importantes iniciativas globais que auxilia as empresas a estabelecer metas de redução de GEE alinhadas a meta global do Acordo de Paris de limitar o aquecimento global a 1,5 °C. Essa iniciativa é fruto de uma parceria entre *Carbon Disclosure Project (CDP)*, o Pacto Global das Nações Unidas, o *World Resources Institute (WRI)* e o *World Wide Fund for Nature (WWF)*.
- A iniciativa SBTi desenvolveu, portanto, o Padrão Corporativo Net-Zero para fornecer um entendimento comum do que é net zero no contexto corporativo. O padrão inclui orientação para definir metas de curto e longo prazo, critérios de validação de metas e uma definição científica de zero líquido. As metas de curto prazo devem ser alcançadas em 5 a 10 anos e as metas de longo prazo até 2050, o mais tardar. O zero líquido deve ser alcançado por meio da redução das emissões de gases de efeito estufa a um nível zero ou a um nível residual. As emissões residuais no ano da meta líquida zero e quaisquer emissões de gases de efeito estufa liberadas na atmosfera a partir de então devem ser neutralizadas.
- Além de se estabelecer metas relacionadas às mudanças climáticas baseadas na ciência, é necessário validar as metas junto ao SBTi, selecionar indicadores padronizados de desempenho, capacitar

funcionários para atuarem na gestão das emissões de GEE e adotar procedimento interno para monitoramento dos indicadores e das metas relacionadas às mudanças climáticas.

Forma de Mitigação

- Estabelecer metas de mitigação de GEE e definir indicadores de desempenho e monitoramento transforma a descarbonização em um processo estruturado, mensurável e contínuo: metas alinhadas a SBTi orientam investimentos em eficiência energética, a substituição de combustíveis fósseis; indicadores como intensidade de carbono (tCO₂e/ton de celulose ou papel), intensidade energética, emissões por Escopos 1, 2 e 3 permitem acompanhar progresso e priorizar tecnologias de menor pegada de carbono.
- O monitoramento periódico e divulgação transparente é essencial para a implementação de uma estratégia climática, possibilitando um efetivo engajamento dos *stakeholders*.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: metas e monitoramento orientam ações para redução de emissões
- Operacional: melhoria no desempenho e estímulo por soluções mais sustentáveis
- Social: promove engajamento interno, metas bem definidas motivam equipes
- Econômico: indicadores mostram oportunidades de otimização e possibilitam a redução de custos

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- Estabelecer metas de mitigação de GEE, definir indicadores e implementar monitoramento de performance requer planejamento estratégico, integração de dados e engajamento organizacional. É desejável alinhar as metas a padrões reconhecidos (como SBTi), realizar inventários robustos de emissões e definir

indicadores claros (ex.: intensidade de carbono) e criar sistemas para coleta e análise contínua de dados. Esse processo exige recursos técnicos, financeiros e tempo para garantir consistência e credibilidade.

- As principais barreiras para implementação de metas climáticas incluem a falta de disponibilidade e qualidade dos dados, especialmente no Escopo 3; a complexidade técnica para definir metas e indicadores; custos com monitoramento e necessidade de engajamento.

Tipo de Ação

- Estruturante.



1.1.3 Estratégia Climática Corporativa

1.1.3.1 Adotar Precificação Interna do Carbono (GVN.8)

Descrição da Ação

- Criar “shadow price” (preço interno de carbono) utilizado na tomada de decisão visa medir e verificar o impacto dos novos projetos nas emissões de GEE até a criação e consolidação do mercado regulado brasileiro de carbono.
- A precificação de carbono está baseada no princípio do poluidor-pagador, que define a responsabilidade e estabelece um custo para as emissões de GEE, internalizando a externalidade negativa (CBEDS, 2016). Segundo Caring for Climate (2015), três abordagens distintas para a precificação interna de carbono podem ser identificadas: algumas empresas têm criado um “preço-sombra” para avaliar possíveis investimentos potenciais, outras têm criado incentivos e programas financeiros internos formais (imposto ou uma taxa interna), e algumas empresas não têm estabelecido um preço de carbono explícito, mas calculam o custo implícito por $MTCO_2e$ com base em quanto a empresa gasta para reduzir as emissões de GEE.
- Além da precificação do carbono, existe um outro instrumento que auxilia às empresas na tomada de decisão de novos investimentos em sua estratégia de descarbonização, que é a curva de custo marginal de abatimento (*Marginal Abatement Cost Curve - MACC*).
- A curva MACC é uma ferramenta comumente usada para avaliar tecnologias de redução de emissões e um instrumento de comunicação mais eficiente para discussões sobre as políticas de abatimento. Por meio dela é possível visualizar um cenário com um conjunto de tecnologias de descarbonização por um determinado período de tempo, resultando no potencial de redução de emissão pelo custo marginal por tonelada de carbono equivalente.

Forma de Mitigação

- A precificação interna de carbono é um instrumento que consiste na atribuição de um valor monetário interno das emissões de gases de efeito estufa, permitindo que o impacto financeiro das mudanças climáticas seja incorporado nas decisões de novos investimentos de uma empresa, o que possibilita uma análise financeira mais justa e um incentivo a mitigação da emissão dos gases de efeitos estufa.
- Esse instrumento é essencial para viabilizar a estratégia de descarbonização das empresas e fundamental para apoiar o alcance da meta global de limitar o aquecimento global a $1,5^{\circ}C$.
- A designação de um valor monetário a cada unidade de emissão de gases de efeito estufa (GEE) em tCO_2e (toneladas de dióxido de carbono equivalente) corresponde ao envio de um sinal de preços aos tomadores de decisão, desencorajando a adoção de tecnologias carbono-intensivas e incentivando o desenvolvimento de atividades que impliquem redução de emissões de GEE (CBEDS, 2016).

Importância (Cobenefícios)

- Ambientais e Econômico: viabiliza projetos de redução de GEE, e possibilita criar a curva MACC para apoiar as empresas na priorização de novos investimentos
- A adoção de um preço interno de carbono pode gerar benefícios estratégicos significativos para as organizações. Essa prática permite identificar oportunidades e riscos tanto nas operações quanto na cadeia de valor, além de direcionar investimentos para atividades menos intensivas em emissões de gases de efeito estufa. Também estimula aportes em pesquisa e desenvolvimento, promove maior conscientização interna sobre a relevância das mudanças climáticas e prepara a empresa para um futuro com mercados regulados de carbono. Adicionalmente, contribui para melhorar a pontuação em iniciativas climáticas, como o Carbon Disclosure Project (CDP), que

considera o preço interno do carbono como um indicador de desempenho.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- Qualquer que seja a abordagem adotada, um dos maiores desafios associados à precificação interna de carbono reside na escolha de um nível de preços adequado para as emissões de GEE. Entretanto, mais relevante do que escolher um nível de preços adequado (e como passo anterior) deve ser a definição clara dos objetivos pretendidos com a medida – o tipo de mudança comportamental que se busca incentivar e os projetos de redução de emissões que se pretende viabilizar (CBEDS, 2016).
- Estabelecer um preço interno de carbono exige um esforço moderado, pois envolve etapas como diagnóstico das emissões, definição da metodologia (preço sombra, implícito ou explícito), integração nos processos de decisão e investimentos, engajamento interno e monitoramento contínuo.
- As principais barreiras incluem a falta de dados confiáveis, especialmente para Escopo 3; complexidade técnica para definir e aplicar o valor; custos com consultorias, sistemas e capacitação e incertezas regulatórias sobre preços futuros.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.1.3.2 Compensar as Emissões (GVN.9)

Descrição da Ação

- A compensação de emissões de GEE é uma estratégia adotada por organizações para neutralizar as emissões residuais, ou seja, aquelas que não puderam ser eliminadas por meio de ações internas. Essa prática envolve o financiamento de iniciativas externas voltadas à redução ou remoção de emissões, por meio da aquisição de créditos de carbono certificados. Esses créditos representam reduções ou remoções reais, mensuráveis e verificadas de GEE, realizadas fora dos limites operacionais diretos da organização.
- A compensação de emissões de GEE pode ser regulada ou voluntária. A compensação regulada acontece dentro de mercados oficiais de carbono, nos quais empresas legalmente obrigadas a limitar suas emissões podem adquirir créditos de carbono provenientes de projetos certificados. Esses créditos são utilizados para cumprir parte de suas metas climáticas, conforme previsto pela legislação vigente. Por outro lado, a compensação voluntária é realizada por iniciativa própria das empresas, sem imposição legal. Nesse caso, elas optam por neutralizar suas emissões financiando projetos que reduzem ou removem GEE da atmosfera. Essa prática é motivada por fatores como responsabilidade socioambiental, compromissos com a sustentabilidade, estratégias de marketing verde ou exigências de investidores e consumidores conscientes.
- Por meio da Lei nº 15.042/2024, foi instituído o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), que é o marco regulatório do mercado regulado de carbono no Brasil, em fase de regulamentação.
- No mercado voluntário a emissão dos créditos de carbono deve atender a uma série de critérios, tais como adicionalidade, mensurabilidade, verificabilidade, permanência, rastreabilidade, evitar vazamento ("leakage"), conformidade com padrões reconhecidos (Verra e Gold

Standard, por exemplo) e desejável que proporcione cobenefícios socioambientais.

- Entretanto, destaca-se que o Padrão Net-Zero Corporativo da SBTi não permite o uso de compensações para atingir metas de redução de curto e longo prazo. As metas submetidas ao SBTi devem ser baseadas em reduções reais de emissões na cadeia de valor da empresa. De maneira complementar, a SBTi incentiva ações climáticas externas ou investimentos em projetos climáticos fora da cadeia de valor da empresa, como forma de contribuição voluntária, o que é denominado como *Beyond Value Chain Mitigation (BVCM)*.

Forma de Mitigação

- A compensação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) é uma estratégia complementar essencial para a descarbonização do setor de Papel & Celulose. Mesmo com avanços em eficiência energética e maior uso de biomassa, permanecem emissões residuais, como as provenientes do transporte e de processos químicos.
- A compensação, por meio de créditos de carbono ou projetos de sequestro, como reflorestamento e manejo sustentável, neutraliza essas emissões e aproxima as empresas da meta de carbono neutro. Além disso, valoriza a base florestal do setor, gera oportunidades de comercialização de créditos e contribui para o cumprimento de metas regulatórias e demandas de clientes e investidores.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: compensação reduz impacto climático, incentivam práticas de conservação e manejo sustentável e a restauração
- Econômico: ganhos financeiros adicionais com a venda de créditos de carbono
- Social: possibilita a geração de emprego em projetos de carbono

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- Realizar a compensação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) exige um nível de esforço moderado, começando pela elaboração de um inventário robusto e auditado. A empresa precisa selecionar projetos de redução de carbono, como reflorestamento, energia renovável ou captura de carbono, que gerem créditos certificados. Além disso, é necessário obter aprovação e garantir monitoramento e reporte conforme padrões reconhecidos.
- As principais barreiras incluem os custos financeiros associados à compra de créditos ou ao investimento em projetos próprios, bem como a necessidade de assegurar a qualidade e credibilidade.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.1.3.3 Pagamentos por Serviços Ambientais (GVN.10)

Descrição da Ação

- A ação de realizar “Pagamentos por Serviços Ambientais” tem como principais objetivos estimular a conservação de ecossistemas, recursos hídricos, solo e biodiversidade; valorizar economicamente e culturalmente os serviços ecossistêmicos; evitar degradação e fragmentação de habitats; contribuir para segurança hídrica e regulação do clima; incentivar projetos privados voluntários, pesquisa científica e criação de um mercado de serviços ambientais; além de assegurar transparência, gestão de dados e fomentar o desenvolvimento sustentável.
- A Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA), instituída pela Lei nº 14.119/2021, estabelece conceitos, objetivos, diretrizes e critérios para implantação do pagamento por serviços ambientais no Brasil. Ela cria o Cadastro Nacional e o Programa Federal de Pagamento por Serviços Ambientais, orientando a atuação do poder público, sociedade civil e setor privado para manter, recuperar e melhorar os serviços ecossistêmicos em todo o território nacional.
- As modalidades de pagamento por serviços ambientais incluem diferentes formas de incentivo, como pagamento direto (monetário ou não monetário), prestação de melhorias sociais para comunidades rurais e urbanas, compensações vinculadas a certificados de redução de emissões por desmatamento e degradação, emissão de títulos verdes (green bonds), contratos de comodato e utilização de Cotas de Reserva Ambiental (CRA).

Forma de Mitigação

- A PNSA desempenha um papel fundamental no combate às mudanças climáticas ao incentivar a preservação de ecossistemas que atuam na manutenção da estabilidade dos processos ecossistêmicos, tais como o sequestro de carbono, a

moderação de eventos climáticos extremos, a manutenção do equilíbrio do ciclo hidrológico, a minimização de enchentes e secas e o controle dos processos críticos de erosão e de deslizamento de encostas.

- Empresas que mantêm florestas nativas ou realizam reflorestamento podem receber compensações financeiras ou incentivos por conservar ecossistemas, proteger a biodiversidade e garantir serviços como regulação hídrica e captura de carbono.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: ajuda a conservação e recuperação florestal, protege a biodiversidade e qualidade de solo e águas
- Econômico: as empresas podem gerar créditos de carbono e monetizar os serviços ambientais
- Social: geração de renda para produtores rurais, agricultores e comunidade

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A implementação de pagamentos por serviços ambientais (PSA) no setor papel e celulose requer identificar áreas e práticas que gerem serviços ecossistêmicos, como por exemplo, a conservação de florestas nativas, realizar inventário e estudos para comprovar os benefícios ambientais, definir contratos e realizar a certificação.
- Entre as principais barreiras estão a complexidade regulatória, os custos para monitoramento, certificação e estruturação dos projetos, e a dificuldade de obter dados robustos para valoração dos serviços ecossistêmicos. Esses fatores exigem planejamento estratégico e governança sólida para que o PSA seja implementado de forma eficaz e gere benefícios ambientais, sociais e econômicos.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.1.3.4 Comprar Certificado de Origem Renovável (RECs) (GVN.11)

Descrição da Ação

- A aquisição de *International Renewable Energy Certificates (I-RECs)* é uma prática reconhecida globalmente para comprovar o consumo de energia elétrica proveniente de fontes renováveis. Essa metodologia está alinhada às diretrizes do GHG Protocol, que permite o uso de certificados de origem para contabilização das emissões de Escopo 2 pelo método market-based. Além disso, iniciativas como RE100 incentivam empresas a migrarem para 100% de energia renovável, utilizando mecanismos como I-RECs para atingir suas metas. A norma ISO 14064 também reforça a importância da rastreabilidade e verificação independente na contabilização das emissões, garantindo credibilidade e transparência.
- A quantidade de I-RECs adquirida pode ser ajustada conforme a necessidade da empresa, sem grandes investimentos iniciais ou mudanças operacionais, tornando-se uma solução acessível para organizações que buscam descarbonização rápida. No Brasil, a geração excedente de energia renovável já é uma realidade, especialmente em setores com forte integração de biomassa, solar e eólica. Essa energia pode ser certificada e registrada no sistema I-REC, permitindo que as empresas utilizem esses certificados para abatimento das emissões de Escopo 2, alinhando-se às melhores práticas internacionais e aos requisitos de relatórios corporativos.

Forma de Mitigação

- O setor de Papel & Celulose poderá adquirir energia certificada e registrada no sistema I-REC, permitindo que as empresas utilizem esses certificados para abatimento das emissões de Escopo 2. Essa prática incentiva investimentos em geração renovável, acelerando a descarbonização do setor elétrico.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: reduz as emissões fósseis de escopo 2, além de estimular a produção de energia renovável

- Operacional: solução prática que não requer mudanças estruturais

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A aquisição de energia certificada pelo sistema I-REC requer negociação com fornecedores de energia renovável e a compra dos certificados, além disso é necessário manter critérios de rastreabilidade e conformidade com padrões internacionais.
- As principais barreiras incluem a disponibilidade limitada de certificados em algumas regiões, o custo adicional em relação à energia convencional, e a necessidade de verificação e auditoria. Outro desafio é o engajamento interno, especialmente das áreas de compras e finanças, para justificar o investimento e alinhar a estratégia com metas de descarbonização. Por fim, a falta de conhecimento técnico sobre o sistema I-REC e suas regras pode dificultar a implementação inicial, exigindo capacitação ou apoio de consultorias especializadas.

Tipo de Ação

- Estruturante.



1.2 Eixo II – Soluções Técnicas (Alternativas de Descarbonização)

As emissões líquidas zero de CO₂ do setor industrial são possíveis, mas desafiadoras. A eficiência energética continuará a ser importante. A redução da demanda de materiais, a eficiência dos materiais e as soluções de economia circular podem reduzir a necessidade de produção primária. As opções de produção primária incluem a mudança para novos processos que usam energia e matérias-primas de baixa a zero emissão de GEE (por exemplo, eletricidade, hidrogênio, biocombustíveis e captura e utilização de carbono (CCU) para matéria-prima de carbono e captura e armazenamento de carbono (CCS) para o CO₂ restante). Essas opções exigem um aumento substancial da eletricidade, hidrogênio, reciclagem, CO₂ e outras infraestruturas, bem como a eliminação ou conversão das plantas industriais existentes (IPCC, 2022b).

Em suma, reduzir significativamente as emissões da indústria requer uma reorientação do foco histórico em melhorias importantes, mas incrementais (por exemplo, eficiência energética) para mudanças transformacionais no fornecimento de energia e

matéria-prima, eficiência de materiais e fluxos de materiais mais circulares (IPCC, 2022b).

Assim, este capítulo tem como objetivo apresentar as principais ações impactantes referentes às soluções técnicas relacionadas à descarbonização, distribuídas nos seguintes tópicos:

- Eficiência operacional;
- Transição energética;
- Adaptação climática em prol da mitigação climática;
- Circularidade e uso eficiente de recursos;
- Remoção de carbono;
- Bioprodutos;
- Gestão de emissões fugitivas.

1.2.1 Eficiência Operacional

A eficiência operacional que consiste basicamente na busca por otimizar processos, reduzindo perdas, melhorando o consumo de insumos e minimizando etapas desnecessárias, que por consequência, diminuem a quantidade de emissões de GEE associadas.

Os esforços atuais para combater as mudanças climáticas têm focado principalmente no papel essencial da energia renovável e das medidas de eficiência energética. No entanto, cumprir as metas climáticas também exigirá o enfrentamento de 45% de emissões restantes associadas à fabricação de produtos (Fundação Ellen MacArthur, 2019), ou seja, ao uso eficiente dos recursos naturais.

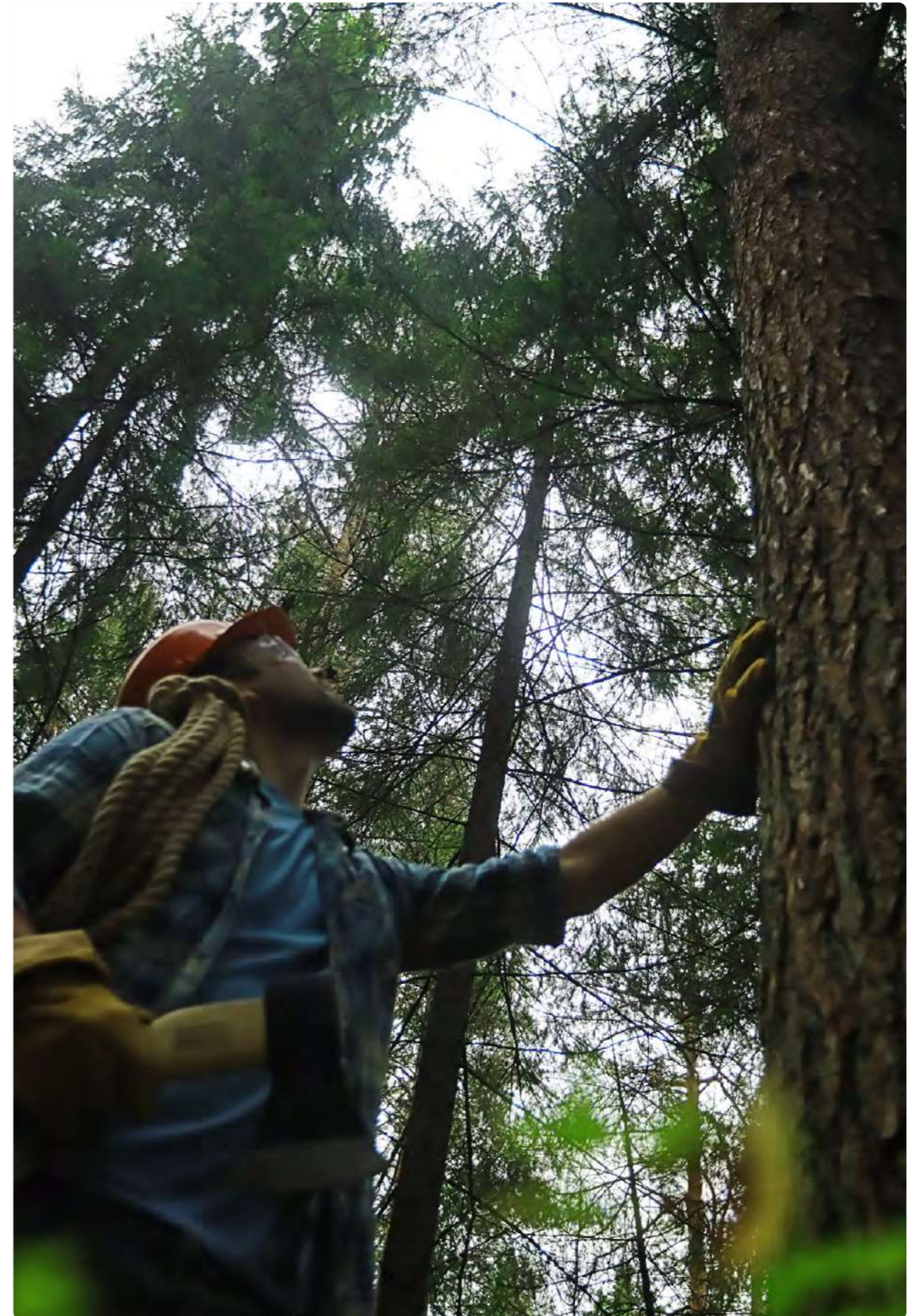
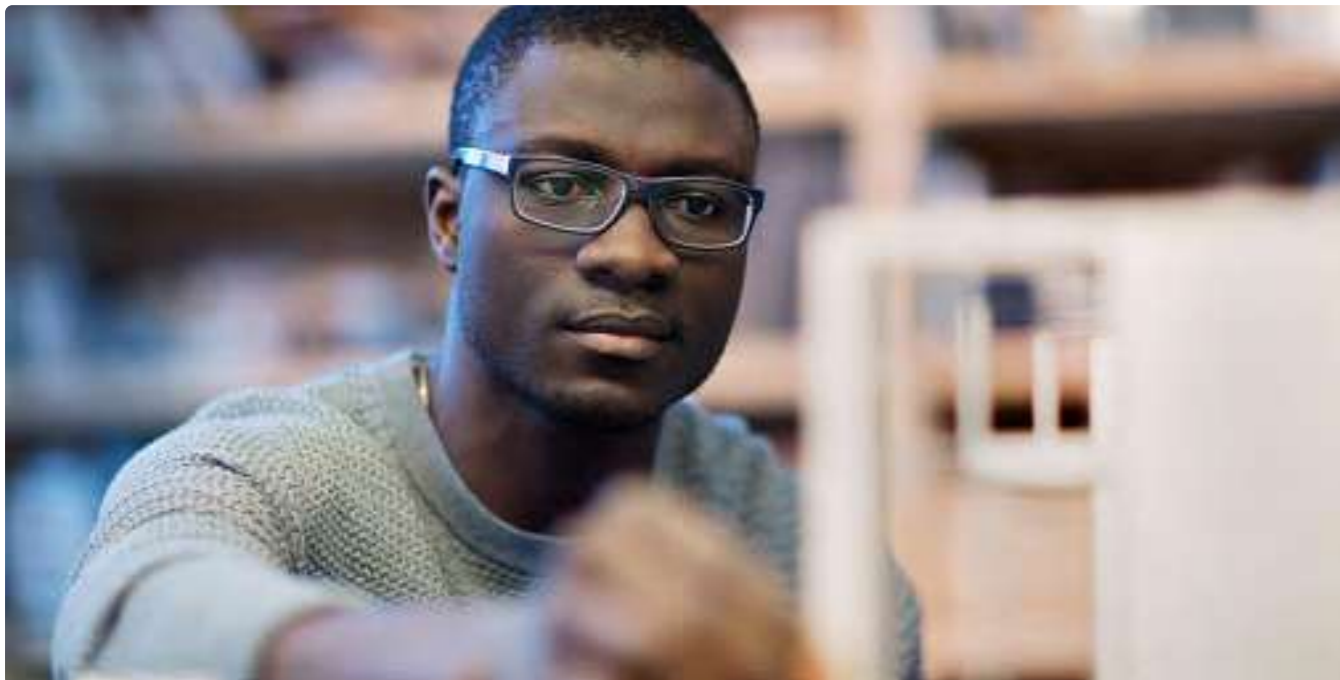
Neste sentido, a eficiência operacional tornou-se uma estratégia essencial para lidar com questões globais de energia e meio ambiente. Países ao redor do mundo estão intensificando os esforços por meio de políticas e regulamentos, reconhecendo a importância da eficiência na promoção da sustentabilidade, competitividade econômica e segurança energética.

1.2.1.1 Eficiência na Operação Florestal

A silvicultura destinada à produção de celulose é responsável por garantir matéria-prima de forma sustentável e competitiva. A otimização das práticas no campo não apenas contribui para a redução de custos e aumento da produtividade, mas também desempenha papel fundamental na descarbonização da cadeia produtiva.

Este capítulo aborda ações que visam aumentar a eficiência na operação florestal, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais. As práticas apresentadas refletem tendências globais e soluções já aplicadas ou em desenvolvimento no setor, com potencial para melhorar o desempenho das plantações, reduzir impactos ambientais e garantir maior resiliência frente às mudanças climáticas.

Essas ações representam um conjunto integrado de estratégias que, quando aplicadas de forma planejada, podem transformar a operação florestal em um processo mais eficiente, sustentável e alinhado às metas globais de descarbonização.





1.2.1.1.1 Manejo Florestal Sustentável (EOF.01)

Descrição da Ação

- O Manejo Florestal Sustentável (MFS) é um conjunto de práticas que conciliam produção florestal — madeira, celulose e biomassa — com conservação ambiental, assegurando a regeneração dos recursos e a manutenção dos serviços ecossistêmicos. Essa abordagem envolve planejamento de longo prazo, exploração seletiva, manutenção de resíduos florestais, controle biológico de pragas e monitoramento digital, garantindo conformidade com certificações como FSC e PEFC. Tais certificações estabelecem critérios socioambientais, legais e econômicos, além de rastreabilidade por meio da cadeia de custódia, evitando desmatamento ilegal e degradação ambiental.
- Entre as práticas complementares, destaca-se o preparo mínimo do solo, que reduz a mobilização e o consumo de combustível, diminuindo emissões diretas e aumentando o estoque de carbono orgânico no solo. O controle biológico de pragas, integrado ao Manejo Integrado de Pragas (MIP), substitui defensivos químicos por inimigos naturais, reduzindo impactos ambientais e emissões associadas. Tecnologias como polímeros superabsorventes (hidrogéis) também contribuem para a descarbonização ao melhorar a retenção hídrica, reduzir replantios e aumentar a fixação de carbono nas florestas plantadas. Essas práticas, aliadas à silvicultura de precisão, fortalecem a competitividade do setor de Papel & Celulose, alinhando-se às metas globais de sustentabilidade e desmatamento zero.

Forma de Mitigação

- O manejo sustentável de florestas é uma estratégia essencial para a mitigação climática, pois promove a remoção e o armazenamento de carbono. As plantações florestais apresentam elevada taxa de fixação de CO₂ via fotossíntese, acumulando grandes quantidades na biomassa e no solo ao longo do crescimento.

A manutenção do estoque médio de carbono na base florestal de uma empresa garante efeitos significativos de remoção de GEE, especialmente quando comparada ao uso anterior do solo, geralmente áreas degradadas de pastagens.

- Além disso, a conservação e regeneração de florestas nativas, associadas à criação de corredores ecológicos, reduzem a fragmentação dos biomas, aumentando a resiliência dos ecossistemas e diminuindo a necessidade de intervenções corretivas, como replantios ou controle químico, que demandariam energia e combustíveis fósseis. Essa conectividade favorece processos naturais como polinização, controle biológico e ciclagem de nutrientes, reduzindo a dependência de insumos químicos cuja produção é intensiva em carbono. Solos preservados também mantêm maior teor de carbono orgânico, evitando emissões por degradação.
- Por fim, essas ações englobam práticas que reduzem emissões diretas e indiretas, incluindo aquelas associadas ao uso de maquinário agrícola e ao transporte e produção de insumos, contribuindo para uma menor pegada de carbono em toda a cadeia florestal.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: Conservação da biodiversidade e serviços ecossistêmicos (inclui ações de inclusão de espécies nativas e a manutenção de corredores ecológicos, reduzindo fragmentação e favorecendo habitats para fauna e flora. Além disso, inclui ações de proteção a recursos hídricos e prevenção a erosão. Realizado em áreas degradadas, contribui para restaurar solos empobrecidos, aumentar fertilidade e reduzir processos de desertificação, fortalecendo a resiliência climática das paisagens.
- Operacional: Eficiência produtiva e redução de desperdícios.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A adoção do manejo florestal sustentável no

setor de silvicultura voltado à produção de celulose apresenta nível de esforço médio, principalmente devido à necessidade de planejamento integrado, capacitação técnica e adequação às normas de certificação. O CAPEX é classificado como médio, pois envolve investimentos em tecnologia (monitoramento digital, silvicultura de precisão), viveiros de mudas de alta qualidade e processos para obtenção de certificações (FSC e PEFC). Por outro lado, o OPEX tende a ser baixo, já que, após a implantação, os custos operacionais são reduzidos por ganhos de eficiência, menor uso de insumos químicos e otimização das operações.

- As principais barreiras incluem a necessidade de treinamento especializado, integração de sistemas digitais e adaptação cultural dentro das empresas. Apesar disso, os benefícios em termos de redução de emissões, aumento da produtividade e acesso a mercados premium tornam essa ação estratégica para atender às metas globais de descarbonização e competitividade do setor.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.11.2 Otimização do Ciclo de Rotação de Corte (EOF.02)

Descrição da Ação

- A otimização do ciclo de rotação de corte é uma prática de manejo florestal que consiste em definir a idade ideal para a colheita das árvores, considerando fatores como incremento médio anual (IMA), qualidade da madeira, custos operacionais e demanda industrial. Em florestas plantadas para papel e celulose, como as de *Eucalyptus spp.*, o ciclo tradicional varia entre 5 e 7 anos, mas pode ser ajustado conforme genética, solo, clima e estratégias de mercado. A idade ótima é determinada pelo ponto em que o IMA atinge seu máximo, garantindo maior volume de madeira por hectare e melhor aproveitamento econômico, sem comprometer a sustentabilidade do manejo.
- A definição do ciclo ideal é estratégica para reduzir custos e emissões, pois evita cortes prematuros (que diminuem o sequestro de carbono) e ciclos excessivamente longos (que aumentam riscos de pragas, incêndios e perdas econômicas). Inclusive, empresas líderes já utilizam modelos de simulação e ferramentas digitais para ajustar ciclos conforme cenários de mercado e clima.

Forma de Mitigação

- Além do ganho econômico, a otimização do ciclo de rotação de corte contribui para descarbonização ao maximizar o estoque de carbono na biomassa e no solo durante o crescimento, reduzir operações de preparo e transporte por hectare e melhorar a eficiência do uso de insumos.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: a prática resulta em menos operações de preparo e transporte, o que gera redução de combustão móvel em veículos e maquinários florestais, reduzindo emissões de outros poluentes atmosféricos, o que gera menor impacto na qualidade do ar.

- Econômico: ajuste do ciclo reduz custos com replantio e reaplicação de insumos, além de reduzir custos com a compra de combustíveis e com a operação/manutenção de maquinários e veículos florestais. Colheita mais eficiente também impacta rendimento industrial, já que madeira com densidade adequada melhora o rendimento no cozimento e na produção de celulose.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A otimização do ciclo de rotação de corte exige um nível de esforço moderado, pois envolve ajustes no planejamento florestal e integração de dados para definir o momento ideal de colheita, equilibrando produtividade, qualidade da madeira e captura de carbono. Em termos de custos, o CAPEX é considerado baixo, limitado à aquisição de sistemas e plataformas de gestão florestal. Já o OPEX varia de baixo a médio, devido a despesas adicionais com análises, inventários e consultoria técnica. Apesar dessas demandas, a ação apresenta alta viabilidade econômica e ambiental, pois contribui para reduzir emissões associadas ao ciclo florestal e otimizar a fixação de carbono.
- As principais barreiras estão relacionadas à necessidade de análises técnicas detalhadas, inventários florestais mais frequentes e capacitação das equipes para uso de ferramentas digitais. Embora não demande grandes investimentos em infraestrutura, é essencial implementar sistemas de monitoramento e softwares especializados para suportar decisões baseadas em dados.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.11.3 Uso de Drones para Monitorar o Desenvolvimento dos Plantios (EOF.03)

Descrição da Ação

- O uso de drones na silvicultura consiste em empregar veículos aéreos não tripulados equipados com câmeras de alta resolução e sensores para monitorar o crescimento das árvores, identificar falhas de plantio, pragas, doenças e estresse hídrico. Essa tecnologia permite coleta de dados em tempo real, mapeamento preciso e tomada de decisão baseada em informações georreferenciadas, reduzindo deslocamentos de equipes e aumentando a eficiência operacional.

Forma de Mitigação

- O uso de drones para monitorar o desenvolvimento dos plantios auxilia na descarbonização do setor principalmente por reduzir deslocamentos terrestres, diminuindo as emissões associadas ao uso de veículos para inspeções manuais em áreas extensas. Além disso, a tecnologia permite um controle mais preciso de insumos, como defensivos químicos e fertilizantes, evitando aplicações desnecessárias e, conseqüentemente, reduzindo emissões indiretas ligadas à produção e transporte desses produtos e emissões de N₂O diretas e indiretas na silvicultura.
- Por outro lado, há emissões associadas à fabricação dos drones, produção de baterias e consumo de eletricidade para recarga. No entanto, o resultado líquido tende a ser positivo, pois os ganhos em eficiência logística e redução de insumos superam essas emissões indiretas. Estudos indicam que drones também contribuem para projetos de carbono ao melhorar estimativas de biomassa e sequestro de CO₂, fortalecendo estratégias de manejo sustentável.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: menor uso de defensivos químicos por permitir aplicação localizada após identificação das regiões do plantio

com esta necessidade.

- Operacional: substitui inspeções manuais demoradas e caras.

- Econômico: detecta problemas precocemente, evitando perdas de produtividade.

- Ocupacional: reduz exposição de equipes a áreas remotas ou de difícil acesso.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A adoção de drones para monitoramento agrícola apresenta baixo a médio nível de esforço, pois envolve a aquisição de equipamentos, treinamento da equipe e integração com sistemas de análise de dados. Os custos são considerados baixos a médios, tornando-a acessível para diferentes escalas de operação. O CAPEX é baixo, pois envolve apenas a aquisição de drones, sensores e softwares necessários para o monitoramento. Já o OPEX varia de baixo a médio, incluindo despesas com treinamento da equipe, manutenção dos equipamentos e atualizações tecnológicas.
- As principais barreiras incluem a necessidade de capacitação técnica para operação e interpretação das informações, adequação às normas de voo e conectividade em áreas remotas. Apesar disso, a tecnologia é relativamente acessível e escalável, com benefícios para eficiência e redução de emissões.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.1.2 Eficiência na Operação Industrial

A eficiência na operação industrial é um dos fatores mais relevantes para a redução das emissões de GEE. À medida que processos industriais se tornam mais eficientes no uso de energia, água, matérias-primas e insumos, diminuem a necessidade de combustíveis fósseis, reduzem perdas e evitam emissões diretas e indiretas. Por isso, a eficiência operacional é considerada uma das estratégias mais custo-efetivas e de implementação mais rápida para mitigar as mudanças climáticas.

Este capítulo aborda ações que visam aumentar a eficiência na operação industrial, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais. As práticas apresentadas refletem tendências globais e soluções já aplicadas ou em desenvolvimento no setor, com potencial para melhorar o desempenho do processo produtivo, reduzir impactos ambientais e garantir maior resiliência frente às mudanças climáticas.

Essas ações representam um conjunto integrado de estratégias que, quando aplicadas de forma planejada, podem transformar a operação industrial em um processo mais eficiente, sustentável e alinhado às metas globais de descarbonização.

1.2.1.2.1 Modernizar Caldeiras e Fornos para Aumentar a Eficiência Térmica (EOI.01)

Descrição da Ação

- Processos mais eficientes utilizam menos energia, menos insumos e matérias-primas para produzir os mesmos resultados, e geram menos resíduos para serem tratados, o que impacta no consumo de recursos naturais, geração de emissões de GEE e custo das operações industriais.
- No setor de Papel & Celulose, o qual é baseado em matéria-prima de origem vegetal, a eficiência energética e operacional ganha ainda maior importância, sendo o pilar das medidas de mitigação de emissão de GEE.
- A modernização de caldeiras e fornos no setor de Papel & Celulose visa aumentar a eficiência térmica e reduzir emissões

por meio da adoção de tecnologias avançadas, como controle avançado de combustão, recuperação de calor, retorno de condensado e, quando necessário, substituição por caldeiras de alta eficiência. Essas melhorias contribuem para menor consumo de combustível, maior aproveitamento energético e redução da pegada de carbono do processo produtivo.

de equipamentos e instalação. O CAPEX é elevado devido à aquisição de caldeiras ou fornos mais eficientes e sistemas de controle avançado. O OPEX tende a ser moderado, relacionado à manutenção preventiva e atualização tecnológica, mas pode ser compensado por ganhos de eficiência energética e redução no consumo de combustíveis ao longo do tempo.

Forma de Mitigação

- Ao se modernizar caldeiras e fornos para aumentar a eficiência térmica, tem-se uma menor quantidade de paradas para manutenção, que causa menor consumo de combustíveis auxiliares (usualmente fósseis) e gera menores emissões de escopo 1 e 3 correlatas.

Tipo de Ação

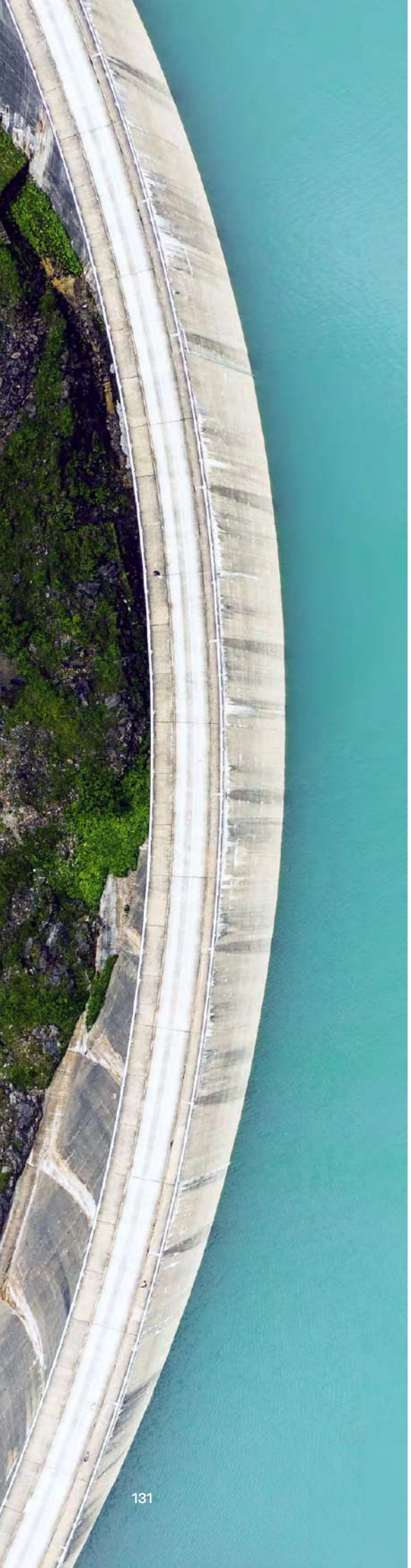
- Ação impactante.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: gera menores emissões atmosféricas de outros poluentes (ex. material particulado, óxidos de enxofre e de nitrogênio).
- Econômico: menor custo na compra de combustíveis auxiliares.
- Operacional: menor quantidade de paradas de equipamentos, o que gera menores custos e impactos ambientais correlatos à manutenção.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A implementação exige esforço médio a alto, pois envolve intervenções significativas em equipamentos críticos, planejamento detalhado e integração com sistemas existentes. As principais barreiras incluem alto investimento inicial, necessidade de paradas programadas para instalação, adequação às normas de segurança, limitação técnica das fábricas mais antigas e disponibilidade de fornecedores especializados. Além disso, a complexidade técnica pode demandar consultoria externa e treinamento avançado da equipe
- Os custos são classificados como médio-alto, considerando que a modernização abrange projeto de engenharia, compra



1.2.1.2.2 Reduzir Consumo de Água, Reaproveitar Água da Chuva, Reusar Efluente Tratado (EOI.02)

Descrição da Ação

- As fábricas de papel e celulose geralmente usam grandes quantidades de água. Por outro lado, na maioria das fábricas, uma grande quantidade de água é reutilizada e recirculada de volta aos processos e, assim, reduz o volume específico de água usado para a fabricação de papel e celulose.
- Em uma fábrica de celulose Kraft, isso pode ser alcançado, por exemplo, mudando o descascamento úmido para o descascamento a seco, mudando para equipamentos de lavagem mais eficientes, reciclando filtrado de alvejante alcalino ou filtrados do branqueamento com ozônio, usando os condensados da evaporação e fechando a sala de peneira em relação à água. No entanto, um alto grau de fechamento do sistema da fábrica de celulose pode ter efeitos negativos, pois leva a um acúmulo de substâncias dissolvidas e elementos não processuais (NPEs) nas etapas de branqueamento e ciclos químicos (licores de processo). As fábricas de celulose Kraft que operam de maneira contínua com um alto grau de fechamento do sistema precisam usar técnicas especiais para separação e purga das substâncias perturbadoras que não são do processo. Os principais efeitos negativos de uma concentração de NPEs são incrustação, entupimento, corrosão, aumento do lastro químico e decomposição de produtos químicos de branqueamento (BAT, 2015).
- No caso das fábricas de papel, os métodos de redução de água são uma questão complexa e dependem muito do grau desejado de fechamento dos circuitos de água, o qual dependerá do tipo de papel produzido, das matérias-primas utilizadas, do gerenciamento do circuito de água e celulose e das metas a serem alcançadas (BAT, 2015).
- A redução de consumo de água no setor está relacionada principalmente ao

aumento da circulação interna no próprio processo produtivo, porém outras medidas como reaproveitamento de água de chuva e reuso de efluente tratado também podem ser aplicáveis.

- Neste contexto, a redução do consumo de água na produção de papel e celulose é positiva tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, devido à redução do consumo de energia, bem como dos custos de tratamento de água e efluentes. No entanto, um alto grau de fechamento do circuito de água pode ter efeitos negativos.
- O uso eficiente dos recursos naturais está alinhado aos conceitos de economia circular e é fundamental no processo de combate às mudanças climáticas.

Forma de Mitigação

- A redução do consumo de água e o reaproveitamento de recursos hídricos diminuem a demanda pelo uso de recursos hídricos locais, seja para captação ou lançamento de efluentes tratados. Assim, como a redução do risco operacional em função da variação da disponibilidade hídrica.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: menor consumo de água diminui o potencial impacto do lançamento de efluente tratado nas águas superficiais, além de diminuir a pressão sobre recursos hídricos, contribuindo para uma operação mais sustentável.
- Operacional: menor consumo de água gera menor risco operacional resultante de uma variação da disponibilidade hídrica.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O esforço é médio, pois envolve custos classificados como baixo a médio, considerando que etapas iniciais, como mapeamento do consumo e balanço hídrico, demandam apenas horas-homens ou consultorias especializadas. A implantação de tecnologias para fechamento de circuito e sistemas de captação de água

da chuva também se enquadra em custos moderados. Contudo, o reuso do efluente tratado pode elevar significativamente o investimento, devido à necessidade de unidades de tratamento mais avançadas, incluindo processos físico-químicos e biológicos adicionais.

- As principais barreiras incluem complexidade técnica para integração dos sistemas, necessidade de investimentos em infraestrutura de tratamento avançado e garantia de qualidade da água para usos específicos.

Tipo de Ação

- Ação impactante.

1.2.1.2.3 Implantar Sistemas de Monitoramento e Gestão De Energia em Tempo Real (EOI.03)

Descrição da Ação

- A digitalização e a automação desempenham um papel estratégico no setor de Papel & Celulose ao permitir o monitoramento em tempo real de equipamentos e processos, criando uma base sólida para decisões rápidas e assertivas. Essa abordagem reduz desperdícios, aumenta o controle sobre o uso de recursos e identifica gargalos operacionais que, quando corrigidos, evitam emissões desnecessárias. A automação garante precisão e repetibilidade nas operações, minimizando falhas humanas e aumentando a produtividade. Processos automatizados consomem menos energia e operam de forma mais estável, contribuindo diretamente para a redução do consumo energético e, conseqüentemente, das emissões associadas.
- As principais tecnologias aplicadas incluem IoT (Internet das Coisas) para conectar sensores e dispositivos, SCADA para supervisão e controle remoto, IA (Inteligência Artificial) para análise preditiva e otimização de processos, e Big Data para processar grandes volumes de dados e gerar *insights* estratégicos. Além disso, essas soluções viabilizam práticas como manutenção preditiva, controle inteligente de climatização e iluminação, e operação de equipamentos apenas quando necessário, otimizando o uso de energia elétrica e combustíveis. A pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) também são fundamentais para aprimorar a eficiência operacional — em 2023, empresas do setor destinaram R\$122 milhões para PD&I, sendo 30% para otimização de processos e 20% para uso de tecnologias (Ibá, 2024).

Forma de Mitigação

- A gestão inteligente da energia reduz emissões em todos os escopos do GHG Protocol: no Escopo 1, a ação diminui consumo de combustíveis fósseis em

caldeiras e fornos, ao otimizar processos térmicos e reduzir perdas; já no Escopo 2, ela reduz emissões associadas à eletricidade adquirida, por meio da diminuição do consumo energético e maior eficiência nos sistemas; por fim, a ação tende a impactar a cadeia de suprimentos ao reduzir necessidade de manutenção corretiva, transporte de peças e insumos, além de diminuir emissões indiretas ligadas à produção e descarte de equipamentos por prolongar sua vida útil (escopo 3).

Importância (Cobenefícios)

- Operacional: aumento da agilidade na tomada de decisão, permitindo ajustes imediatos, identificação rápida ou preditiva de falhas e de desperdício, e otimização no consumo de energia e outras matérias primas.
- Ambiental: menor quantidade de paradas para manutenção, reduz consumo de combustíveis auxiliares (usualmente fósseis), o que além de diminuir emissões de GHG, resulta em menores emissões atmosféricas de outros poluentes (ex. material particulado, óxidos de enxofre e de nitrogênio).
- Econômico: menor custo na compra de combustíveis auxiliares, energia e matérias primas, e menor perda de produtividade por paradas para manutenção.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O esforço é médio a alto, devido à necessidade de infraestrutura tecnológica robusta, integração com sistemas legados e qualificação da equipe para operar e interpretar dados. Os custos são médio a alto, com CAPEX elevado para aquisição de sensores, redes, softwares e sistemas de análise, além de upgrades na infraestrutura de TI. O OPEX envolve manutenção, atualizações, treinamento contínuo e gestão de dados. As principais barreiras incluem alto investimento inicial, complexidade de integração, custos com segurança da informação e gestão do grande volume de dados gerados. Apesar do investimento inicial significativo, o

retorno tende a ser rápido, pois a redução de desperdícios energéticos gera economia operacional e contribui para metas de descarbonização.

Tipo de Ação

- Ação impactante.

1.2.1.3 Eficiência na Operação Logística

O setor de Papel & Celulose possui uma das cadeias logísticas mais extensas da indústria, envolvendo desde o transporte de madeira e biomassa até o escoamento da celulose e dos produtos finais aos mercados nacional e internacional.

A logística é um dos setores mais intensivos em energia e um dos maiores emissores de GEE, especialmente devido ao uso predominante de combustíveis fósseis no transporte rodoviário. Melhorar a eficiência da operação logística é, portanto, uma das formas mais rápidas, econômicas e eficazes de reduzir emissões, aumentar a competitividade e promover sustentabilidade na cadeia de suprimentos. Assim, a eficiência logística se torna um instrumento estratégico para reduzir emissões, otimizar custos e fortalecer a sustentabilidade setorial.

Este capítulo aborda ações que visam aumentar a eficiência na operação logística, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais. As práticas apresentadas refletem tendências globais e soluções já aplicadas ou em desenvolvimento no setor, com potencial para melhorar o desempenho logístico, reduzir impactos ambientais e garantir maior resiliência frente às mudanças climáticas.

Essas ações representam um conjunto integrado de estratégias que, quando aplicadas de forma planejada, podem transformar a cadeia logística em um processo mais eficiente, sustentável e alinhado às metas globais de descarbonização.

1.2.1.3.1 Otimizar Rotas Logísticas por Sistemas de Gestão de Transporte, IOT e Sensores Inteligentes na Frota (EOL.01)

Descrição da Ação

- Inteligência artificial e os sistemas de gestão de transporte, GPS e sensores também vêm sendo aplicados para melhorar a roteirização de frotas, prever demandas, monitorar o tráfego e evitar veículos subutilizados, fatores que elevam significativamente os custos e as emissões por tonelada transportada. O uso de inteligência artificial e as tecnologias digitais como sistemas de gerenciamento de transporte e algoritmos de roteirização inteligente têm se mostrado essenciais. Elas possibilitam a criação de rotas otimizadas, com menor distância e tempo de viagem, e permitem reações em tempo real a imprevistos. A inteligência artificial também é capaz de prever demandas, ajustar estoques e sugerir alocações logísticas mais eficientes, melhorando todo o fluxo da cadeia.

Forma de Mitigação

- A otimização logística reduz emissões diretas da frota própria, reduzindo consumo de combustíveis fósseis por meio de rotas mais curtas e consolidação de cargas; gera impacto indireto ao reduzir consumo de energia elétrica em operações logísticas (ex.: menor tempo de carga/descarga) e emissões de GEE correlatas; além de incluir ações que visam reduzir emissões da cadeia de suprimentos, como otimização de rotas de transporte terceirizado, movimentação conjunta de insumos e produtos, e menores emissões referentes a manutenção de veículos.

Importância (Cobenefícios)

- Operacional/Econômico: a otimização da logística a montante, envolvendo suprimento de matérias-primas e insumos, mitiga riscos operacionais e assegura maior estabilidade no fluxo produtivo. Paralelamente, a otimização da logística a jusante, voltada à distribuição de produtos acabados, promove maior

agilidade nas entregas, incrementando a confiabilidade do serviço e potencializando a rentabilidade.

- Ambiental: menor trânsito de caminhões, além de causar menor emissão de GEE, reduz outros poluentes atmosféricos, como fumaça preta e poeira (menor impacto climático e na qualidade do ar). Cita-se ainda um menor risco de atropelamento de fauna pela menor movimentação de veículos pesados nas estradas.
- Social: menor trânsito de caminhões gera menor impacto na infraestrutura rodoviária e menor incômodo à comunidade local pela menor geração de ruído e poluentes atmosféricos.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O esforço é médio, sendo os custos classificados como médio, considerando que o CAPEX envolve aquisição de softwares, sensores, dispositivos IoT e infraestrutura de conectividade. O OPEX inclui manutenção dos sistemas, atualizações, treinamento contínuo e gestão de dados. O valor total varia conforme a complexidade da operação logística, abrangência da frota e nível de automação desejado. Apesar do investimento, o retorno é rápido devido à redução de custos com combustível, manutenção e maior eficiência operacional.
- As principais barreiras incluem investimento inicial significativo, complexidade de integração com sistemas legados, necessidade de conectividade confiável e gestão da segurança da informação.

Tipo de Ação

- Ação impactante.

1.2.1.3.2 Considerar Intensidade de Carbono na Logística na Etapa de Planejamento Estratégico de Novas Unidades (EOL.02)

Descrição da Ação

- Essa ação consiste em incorporar a intensidade de emissões de GEE associadas à logística como critério no planejamento estratégico da localização de novas unidades industriais. A proximidade entre as fábricas e os polos de plantio é um fator determinante para reduzir distâncias percorridas, custos logísticos e emissões de transporte. Além disso, decisões sobre a localização de centros de distribuição e hubs logísticos regionais podem otimizar a cadeia de suprimentos, diminuir o tempo de entrega e reduzir significativamente as emissões de CO₂. Embora essa prática ainda seja incipiente no setor, ela representa um avanço estratégico para empresas que buscam integrar critérios ambientais às decisões de investimento, indo além da análise puramente econômica.

Forma de Mitigação

- Ao reduzir as distâncias entre polos de plantio, fábricas e centros de distribuição, essa ação diminui emissões diretas da frota própria, pois menos quilômetros percorridos significam menor consumo de combustíveis fósseis. Além disso, também tende a reduzir consumo energético em operações logísticas (ex.: menor tempo de carga/descarga e menor uso de climatização em armazéns).

Importância (Cobenefícios)

- Operacional/Econômico: a otimização da logística a montante, envolvendo suprimento de matérias-primas e insumos, mitiga riscos operacionais e assegura maior estabilidade no fluxo produtivo. Paralelamente, a otimização da logística a jusante, voltada à distribuição de produtos acabados, promove maior agilidade nas entregas, incrementando a confiabilidade do serviço e potencializando a rentabilidade.

- Ambiental: menor trânsito de caminhões causa menor emissão de GEE e outros poluentes atmosféricos, como fumaça preta e poeira (menor impacto climático e na qualidade do ar). Cita-se ainda um menor risco de atropelamento de fauna pela menor movimentação de veículos pesados nas estradas.

- Social: menor trânsito de caminhões gera menor impacto na infraestrutura rodoviária e menor incômodo à comunidade local pela menor geração de ruído e poluentes atmosféricos.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O esforço é baixo, pois a ação se concentra na inclusão de análises adicionais no processo de planejamento, sem necessidade de grandes investimentos em infraestrutura. Os custos são baixos, limitados a horas-homens internas ou contratação de consultorias para realizar estimativas de emissões de GEE na logística das alternativas locais. As principais barreiras são culturais e organizacionais, relacionadas à falta de padronização na integração das estimativas de emissões no processo decisório e à baixa maturidade do setor em considerar critérios climáticos como fator determinante na escolha da localização.

Tipo de Ação

- Ação impactante.

1.2.1.3.3 Alterar modal Rodoviário para Ferrovias, Hidrovias/Cabotagem (EOL.03)

Descrição da Ação

- A substituição do transporte rodoviário por modais mais eficientes, como ferrovias e hidrovias/cabotagem, é uma estratégia essencial para reduzir a pegada de carbono na logística do setor de Papel & Celulose. Esses modais apresentam menor emissão de CO₂ por tonelada-quilômetro e maior eficiência energética, especialmente para cargas de grande volume, como madeira, celulose e papel.
- No Brasil, o transporte ferroviário já é utilizado em estados como Bahia, Minas Gerais e Espírito Santo, enquanto a cabotagem por barcas é aplicada por grandes empresas para movimentar toras e celulose entre terminais florestais, fábricas e portos. A adoção de logística multimodal, combinando rodovias com ferrovias ou hidrovias, potencializa ganhos de eficiência e sustentabilidade.

Forma de Mitigação

- A alteração do modal reduz emissões de GEE da frota própria ou terceira, pois menos caminhões são utilizados para transporte de madeira e celulose (principalmente). Também tende a reduzir emissões indiretas correlatas, tais como aquelas oriundas das atividades de manutenção e troca de peças de caminhões e da produção e transporte de combustíveis fósseis.

Importância (Cobenefícios)

- Operacional/Econômico: maior capacidade de transporte por viagem, o que tende a reduzir custo por tonelada-quilômetro. Além disso, modais hidro e ferroviários normalmente se configuram por contratos de longo prazo com tarifas mais estáveis, o que reduz impacto devido a volatilidade do preço do diesel no modal rodoviário.
- Ambiental: menor trânsito de caminhões, além de causar menor emissão de GEE, também reduz emissões de outros

poluentes atmosféricos, como fumaça preta e poeira (menor impacto climático e na qualidade do ar). Cita-se ainda um menor risco de atropelamento de fauna pela menor movimentação de veículos pesados nas estradas.

- Social: menor trânsito de caminhões gera menor impacto na infraestrutura rodoviária e menor incômodo à comunidade local pela menor geração de ruído e poluentes atmosféricos.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O esforço é alto, pois depende de fatores externos como disponibilidade de infraestrutura ferroviária e hidroviária, integração multimodal e acordos regulatórios. Os custos são altos, considerando que a mudança de modal exige investimentos significativos em infraestrutura logística, terminais intermodais e adaptação da cadeia de suprimentos. Apesar do CAPEX elevado, os benefícios incluem redução de custos por tonelada transportada e menor emissão de carbono, especialmente em rotas de longa distância.
- As principais barreiras incluem limitações da infraestrutura no Brasil, concentração em regiões específicas, necessidade de planejamento estratégico e, muitas vezes, investimentos em terminais, conexões e equipamentos adequados para transbordo.

Tipo de Ação

- Ação impactante.

1.2.1.3.4 Aumentar a Capacidade de Caminhões Pesados (EOL.04)

Descrição da Ação

- A ação consiste em aumentar a capacidade dos caminhões pesados utilizados no transporte interno entre áreas de plantio e fábricas, substituindo veículos convencionais por opções de maior capacidade, como hexatrens (cavalomecânico com seis carretas, capacidade de até 200 toneladas por viagem) e tritrens (9 eixos) para rodovias. Também se destaca o uso de caminhões super bitrem dobráveis, com capacidade para 74 toneladas e possibilidade de operação noturna. Essa estratégia visa reduzir o número de viagens necessárias para transportar o mesmo volume de madeira, aumentando a eficiência logística.

Forma de Mitigação

- A adoção de caminhões de maior capacidade contribui para a redução das emissões de GEE provenientes da queima de diesel nos caminhões por tonelada transportada, pois diminui o número de viagens necessárias e, conseqüentemente, o consumo de combustível por unidade de carga. Cita-se ainda redução das emissões associadas à cadeia logística, incluindo menor desgaste de pneus e peças.

Importância (Cobenefícios)

- Operacional/Econômico: maior volume por viagem reduz número de viagens, o que reduz custo por tonelada-quilômetro.
- Ambiental: além da redução de viagens, caminhões de maior porte tendem a ser mais novos, com maior eficiência no consumo de combustível e conseqüente menores emissões de GEE e outros poluentes atmosféricos.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço é médio, pois envolve não apenas a aquisição de veículos, mas também adequações de infraestrutura (pátios, balanças, estradas internas) e

treinamento de motoristas para operação segura.

- As principais barreiras existentes são a necessidade de adequação de estradas internas, pátios e balanças para suportar veículos maiores, restrições legais para circulação de veículos de grande porte em determinadas rodovias, a necessidade de treinamento específico para motoristas e equipes de manutenção.

Tipo de Ação

- Ação impactante.

1.2.1.3.5 Renovar Frota e Manutenção Preventiva (EOL.05)

Descrição da Ação

- A renovação da frota no setor de Papel & Celulose consiste na substituição de veículos antigos por modelos mais modernos e eficientes, alinhados às normas mais recentes de controle de emissões, como as fases avançadas do Proconve P8 - oitava fase do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores, que estabelece limites mais rigorosos para emissões de poluentes por veículos pesados, como caminhões e ônibus, no Brasil. Em vigor desde 2022 para novos modelos, essa norma é equivalente à Euro VI e exige tecnologias avançadas, como sistemas de redução catalítica seletiva (SCR) com uso de ARLA 32, recirculação de gases (EGR) e monitoramento via diagnóstico de bordo (OBD).
- Complementarmente, a manutenção preventiva desempenha papel estratégico na preservação da eficiência dos veículos, evitando falhas mecânicas que aumentam o consumo de combustível e as emissões. Essa prática permite identificar e corrigir problemas antes que comprometam o desempenho, prolongando a vida útil dos equipamentos e garantindo maior confiabilidade operacional. Além disso, a manutenção preventiva reduz a necessidade de reparos emergenciais e contribui para a segurança das operações logísticas.

Forma de Mitigação

- A renovação da frota e a manutenção preventiva contribuem diretamente para a redução das emissões de GEE diretas provenientes da combustão de combustíveis fósseis nos veículos da frota própria. Além disso, também há redução nas emissões associadas à cadeia de valor, incluindo àquelas relativas a menor necessidade de peças e reparos corretivos.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: Redução significativa das

emissões de GEE e poluentes atmosféricos devido à maior eficiência energética e padrões de emissão mais restritivos (ex.: Proconve P8).

- Econômico: menor consumo de combustível por tonelada-quilômetro; redução de custos com manutenção corretiva e aumento da vida útil dos veículos.
- Operacional: redução de paradas não programadas, maior confiabilidade da frota e menor risco de falhas críticas.
- Social: menor risco de acidentes por falhas mecânicas, melhoria das condições de trabalho dos motoristas.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço é considerado médio, pois envolve planejamento logístico, aquisição de novos veículos e implementação de sistemas de monitoramento. O custo inicial é significativo, principalmente pela compra da frota renovada e pela necessidade de destinação adequada dos veículos obsoletos, preferencialmente por meio de reciclagem ou logística reversa. A simples revenda pode transferir as emissões para outro operador, sem benefício ambiental. Idealmente, a substituição deve ocorrer para empresas cuja frota seja ainda mais antiga, garantindo redução líquida das emissões. Apesar do investimento inicial elevado, os custos operacionais tendem a diminuir ao longo do tempo devido à maior eficiência energética e menor necessidade de reparos corretivos.

Tipo de Ação

- Ação impactante.

1.2.1.3.6 Aumentar a Eficiência Energética nas Operações Associadas a Logística (EOL.06)

Descrição da Ação

- A ação consiste em implementar medidas para reduzir o consumo de energia em centros de distribuição, terminais logísticos e portuários, por meio da adoção de tecnologias e práticas mais eficientes. Entre as principais iniciativas estão: instalação de painéis solares e sistemas fotovoltaicos para geração própria de energia, substituição de iluminação convencional por LED, uso de sistemas inteligentes de climatização com sensores e automação, eletrificação de guindastes e equipamentos de movimentação, e fornecimento de energia elétrica aos navios atracados (sistema *Onshore Power Supply*) para desligamento de seus geradores a diesel. Essas medidas aumentam a eficiência operacional e reduzem significativamente as emissões associadas às operações logísticas.

Forma de Mitigação

- Essa ação contribui para reduzir emissões de GEE devido ao consumo de combustíveis em equipamentos móveis, e aquelas oriundas do uso de geradores a diesel nos portos. Se atrelada a instalação de autogeração de energia renovável (ex. placas fotovoltaicas), há redução das emissões indiretas pelo menor consumo de energia elétrica da rede. Cita-se ainda redução das emissões associadas à cadeia logística, como a menor necessidade de manutenção corretiva e, como consequência, menor emissões correlatas e aquelas para produção e transporte de insumos e peças.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: redução significativa de outros poluentes atmosféricos com a redução da combustão em equipamentos móveis ou pelo menor uso de geradores a diesel nos navios.
- Econômico: maior eficiência energética

ou autoprodução de energia elétrica gera menor custo na sua compra.

- Operacional: eletrificação de guindastes e equipamentos portuários diminui a necessidade de manutenção, aumenta a confiabilidade e reduz paradas não programadas, visto que a ação facilita a associação a sistemas de monitoramento online e de previsão de falhas, melhorando a produtividade das operações.
- Social: maior conforto acústico dos trabalhadores, visto que equipamentos elétricos são mais silenciosos. Além disso, climatização eficiente e iluminação adequada contribuem para ambientes mais seguros e confortáveis, promovendo bem-estar e saúde ocupacional.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço é baixo a médio, mas requer investimento inicial em sistemas de monitoramento, softwares de roteirização, instalação de painéis solares e treinamento da equipe. Outras barreiras são a necessidade de coordenação com parceiros privados e públicos, especialmente quando a logística é terceirizada, a possível demanda por adaptação de equipamentos existentes e integração de novas tecnologias.

Tipo de Ação

- Ação impactante.

1.2.1.3.7 Otimizar Coleta de Aparas com Roteirização de Rotas e Fortalecimento de Parcerias (EOL.07)

Descrição da Ação

- As aparas de papel são resíduos gerados durante processos de fabricação, corte, impressão ou uso de papel e papelão, e seu reaproveitamento é fundamental para o setor de Papel & Celulose. O uso de aparas traz benefícios econômicos, ambientais e sociais, como redução de custos, mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), inclusão social e promoção da economia circular. Esse insumo é estratégico para a competitividade da indústria, que já utiliza fibras recicladas em cerca de 67% da produção nacional.
- O Brasil é um dos líderes mundiais em reciclagem de papel, com um sistema de logística reversa consolidado. Em 2023, foram coletadas 4,3 milhões de toneladas de aparas, alcançando um índice de reciclagem de 58,1%, que chega a 64% quando considerados papéis para embalagens e papel cartão. Essa ampla cadeia de fornecedores reforça a importância de otimizar a coleta para garantir regularidade e volume, essenciais para atender à demanda das indústrias.
- A otimização da coleta pode ser feita por meio de roteirização inteligente, utilizando softwares que reduzem quilômetros percorridos, consumo de combustível e emissões, além de aumentar a previsibilidade operacional. Outra estratégia é estabelecer parcerias com cooperativas, associações de catadores e grandes geradores, como supermercados e gráficas, garantindo maior eficiência e integração na cadeia de suprimentos, garantindo maior eficiência e integração na cadeia de suprimentos. Por fim, a consolidação de cargas em pontos estratégicos permite que caminhões saiam com carga completa, reduzindo viagens com baixa ocupação e tornando a logística mais eficiente e econômica. Essa prática diminui custos e emissões, evitando deslocamentos desnecessários e fortalecendo a sustentabilidade do setor, alinhando-se às metas de descarbonização

e à promoção da economia circular.

Forma de Mitigação

- Essa ação contribui para reduzir emissões de GEE pela produção e transporte de celulose virgem, além de reduzir emissões de combustão móvel por quilometragem percorrida, visto que a ação tende a reduzir viagens com baixa ocupação de aparas nos caminhões. Outro impacto evitado é a disposição desse material em aterros ou até mesmo em lixões, que contribuiriam com emissões de GEE devido à sua degradação

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço é baixo, com necessidade de investimento inicial em softwares de roteirização, sistemas de monitoramento, instalação de pontos de consolidação e treinamento da equipe. As principais barreiras incluem a coordenação com múltiplos parceiros quando a logística é terceirizada, além de desafios culturais e operacionais para integração de novas ferramentas digitais e processos.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: a ação fomenta a economia circular e reduz emissões de outros poluentes atmosféricos (ex. fumaça preta e poeira), o que gera menor impacto na qualidade do ar.
- Econômico: menor deslocamento de caminhões de coleta e maior aproveitamento das rotas, em termos de quantidade de aparas coletadas por viagem, diminuem gastos com combustível e manutenção.
- Operacional: coleta mais eficiente garante fluxo contínuo de aparas e aumenta a previsibilidade do material, reduzindo riscos de falta de insumo.

Tipo de Ação

- Ação impactante.

1.2.1.3.8 Realizar Monitoramento Remoto de Máquinas e Veículos para Otimizar Consumo de Combustível e Reduzir Emissões (EOL.08)

Descrição da Ação

- O monitoramento remoto de máquinas e veículos utiliza tecnologias como IoT, telemetria, sensores e plataformas em nuvem para coletar dados em tempo real sobre consumo de combustível, desempenho e emissões. Esses dados permitem otimizar rotas, corrigir comportamentos de condução, realizar manutenção preditiva e reduzir tempos de inatividade. No setor de Papel & Celulose, aplica-se tanto à logística florestal (transporte de madeira) quanto à operação interna de máquinas pesadas e empilhadeiras

Forma de Mitigação

- Essa ação contribui para descarbonização do setor pois atua diretamente na redução de emissões de combustão móvel a base fóssil.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço é médio, pois envolve integração tecnológica e adaptação de processos. O custo geral também é médio, com CAPEX associado à aquisição de sensores IoT, dispositivos telemáticos e infraestrutura de conectividade, enquanto o OPEX é baixo a médio, relacionado à manutenção dos sistemas, conectividade e análise de dados. As principais barreiras incluem a necessidade de conectividade em áreas remotas, integração com sistemas existentes, treinamento da equipe e resistência cultural à adoção de novas tecnologias.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: reduz emissões do consumo de combustíveis para movimentação de veículos e maquinários, além de emissões diretas e indiretas de atividades de manutenção.
- Econômico: menor custo com compra de

combustível e atividades de manutenção.

- Operacional: telemetria permite otimização de rotas, correção de comportamentos de condução, realização de manutenção preditiva e redução de tempos de inatividade.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.2 Transição Energética

As emissões de GEE associadas à energia correspondem a 55% das emissões totais (Fundação Ellen MacArthur, 2019). Neste sentido, a mudança de combustíveis fósseis e materiais de base fóssil para alternativas renováveis e de baixo carbono representa um dos desafios mais significativos dos tempos atuais. Por esse motivo, o relatório final da COP 28 - Artigo 28 (UNFCCC, 2024) conclamou as Partes a contribuir para os seguintes esforços globais, de maneira nacionalmente determinada, levando em consideração o Acordo de Paris e suas diferentes circunstâncias, caminhos e abordagens nacionais:

- Triplicar a capacidade de energia renovável globalmente e dobrar a taxa média anual global de melhorias na eficiência energética até 2030;
- Acelerar os esforços para a redução gradual da energia a carvão sem redução;
- Acelerar os esforços globais em direção a sistemas de energia com emissão líquida zero, utilizando combustíveis com emissão

zero e baixa de carbono, bem antes ou por volta de meados do século;

- Transição dos combustíveis fósseis nos sistemas de energia, de forma justa, ordenada e equitativa, acelerando a ação nesta década crítica, de modo a atingir o zero líquido até 2050, de acordo com a ciência;
- Acelerar as tecnologias com emissões nulas ou baixas, incluindo, entre outras, as energias renováveis, nucleares, tecnologias de redução e remoção, como a captura, utilização e armazenamento de carbono, em especial em setores difíceis de reduzir, e a produção de hidrogênio hipocarbônico;
- Acelerar a redução das emissões do transporte rodoviário numa série de vias, nomeadamente através do desenvolvimento de infraestruturas e da rápida implantação de veículos com nível nulo ou baixo de emissões.

Assim, neste capítulo são apresentadas soluções técnicas relacionadas à transição energética.

1.2.2.1 Consumo de Energia Renovável

A energia renovável desempenha um papel central na transição energética e na mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), sendo uma das estratégias mais eficazes para enfrentar as mudanças climáticas globais.

As emissões de GEE associadas à energia correspondem a 55% das emissões totais (Fundação Ellen MacArthur, 2019). Neste sentido, a mudança de combustíveis fósseis e materiais de base fóssil para alternativas renováveis e de baixo carbono representa um dos desafios mais significativos dos tempos atuais.

A energia renovável refere-se a energia obtida de fontes naturais que se regeneram constantemente, como a solar, a eólica, a hídrica, a biomassa e a geotérmica. Diferentemente dos combustíveis fósseis, como petróleo, carvão e gás natural, essas fontes emitem pouco ou nenhum GEE durante a geração de energia, o que as torna ambientalmente mais sustentáveis.

No contexto da transição energética a energia renovável é essencial, pois reduz a dependência de recursos não renováveis, diversifica a matriz energética, tornando-a mais segura e resiliente, e impulsiona novas oportunidades econômicas por meio da geração de empregos verdes e da inovação tecnológica. Além disso, contribui para a descentralização da produção de energia, permitindo que sistemas como os painéis solares sejam instalados diretamente em residências, promovendo maior autonomia energética e democratização do acesso.



1.2.2.1.1 Aumentar Autogeração de Energia Solar e Eólica (TER.01)

Descrição da Ação

- O setor de Papel & Celulose tem grande potencial para ampliar a autogeração de energia solar e eólica, aproveitando áreas ociosas nos terrenos fabris e até mesmo áreas de silvicultura, sem comprometer a produção florestal. As aplicações incluem geração elétrica por painéis fotovoltaicos, aquecimento solar térmico para processos industriais, pequenas turbinas eólicas para complementar consumo e parques eólicos próximos às unidades fabris. Essa integração permite uso múltiplo do solo, reduz a dependência da rede elétrica e fortalece a imagem sustentável das empresas, alinhando-se às metas globais de descarbonização.
- Como alternativa ou complemento, empresas podem adquirir certificados internacionais de energia renovável (I-RECs), reconhecidos pelo *GHG Protocol* para contabilização das emissões de Escopo 2 pelo método *market-based*. Essa solução é acessível, não exige grandes investimentos iniciais e garante rastreabilidade e credibilidade na redução das emissões. Ao ampliar a geração própria ou comprovar o consumo de energia limpa via I-RECs, o setor contribui para a transição energética, reduzindo emissões e fortalecendo sua posição como referência em sustentabilidade.

Forma de Mitigação

- A ação implica em redução das emissões de GEE de escopo 2, além de reduzir emissões diretas (escopo 1) em situações de transitoriedade (falta de energia do SIN) com o uso de geradores a diesel em operações internas.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: menores emissões de outros poluentes atmosféricos, visto que a geração solar e eólica tende a ter emissão de outros poluentes atmosféricos nula.

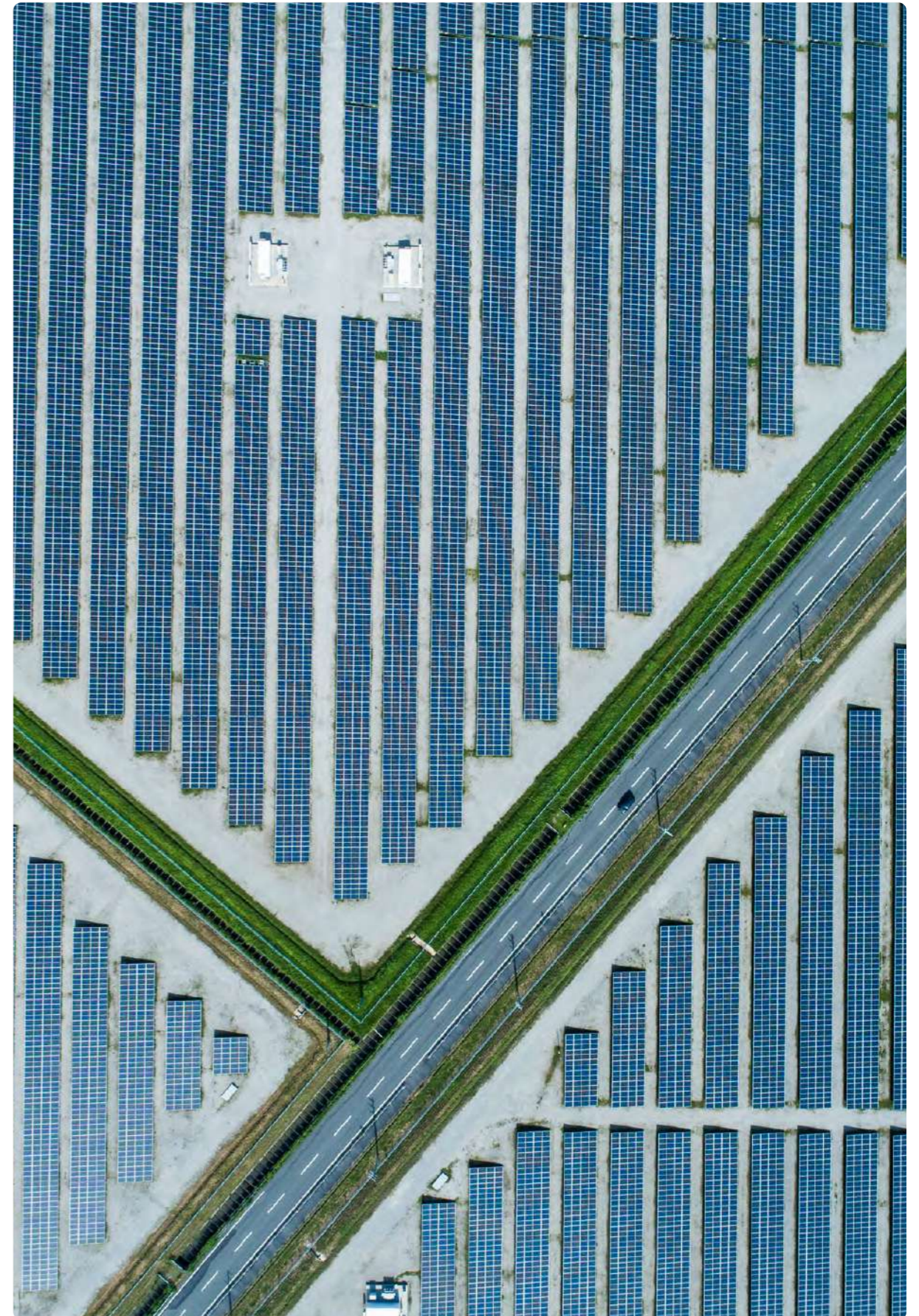
- Econômico: menor gasto na compra de energia elétrica e menor dependência da energia da rede elétrica do SIN, protegendo contra oscilações tarifárias e interrupções no fornecimento. Além disso, há potencial de venda de excedente renovável e geração de receita adicional.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço é alto, pois envolve planejamento, licenciamento ambiental e integração com a infraestrutura elétrica existente. O custo geral é médio a alto, com CAPEX elevado para instalação e OPEX relativamente baixo para manutenção. As principais barreiras incluem processos regulatórios complexos, necessidade de atualização da rede elétrica, acesso limitado a capital para investimentos e falta de incentivos fiscais robustos. Além disso, há desafios técnicos para coexistência com manejo florestal, a demanda por infraestrutura em áreas remotas, a dependência de condições climáticas e inclusão de sistemas de armazenamento (baterias), sendo que o último implica em CAPEX adicional e cuja circularidade ainda é um desafio.

Tipo de Ação

- Impactante.



1.2.2.1.2 Recuperar Energia Hidráulica do Efluente Tratado (TER.02)

Descrição da Ação

- As tecnologias convencionais de geração de energia elétrica fundamentam-se, em sua maioria, na combustão de combustíveis fósseis, a partir carvão mineral, petróleo e gás natural, que representam uma das principais fontes antropogênicas de emissões de GEE, contribuindo significativamente para o aquecimento global e as mudanças climáticas. Por outro lado, as tecnologias de conversão baseadas em fontes renováveis de energia, como solar, eólica, hidrelétrica, geotérmica e biomassa, apresentam baixas ou nulas emissões de GEE durante sua operação. Por essa razão, são amplamente reconhecidas como alternativas sustentáveis e tecnologias de baixo carbono ou neutras em carbono, alinhadas às metas globais de descarbonização do setor energético.
- As fábricas de papel e celulose geralmente têm apenas um ponto de lançamento de efluente tratado no corpo receptor, e no caso principalmente das fábricas de celulose, apresentam elevadas vazões de efluente tratado, na ordem de 25 - 50 m³/ADt (BAT, 2015).
- Neste contexto, a utilização da tecnologia de microgeração hidrelétrica, que refere-se à produção de energia elétrica a partir da força da água em pequena escala, pode ser mais uma alternativa de geração de energia limpa e sustentável.
- Esse sistema de microgeração hidrelétrica pode ser instalado no emissário de efluente tratado, porém é necessária uma avaliação do potencial hídrico, principalmente com relação à altura de queda, ou seja, a diferença de conta entre o ponto de saída da ETE e a turbina de geração.

Forma de Mitigação

- A recuperação de energia hidráulica do efluente tratado contribui para a descarbonização ao recuperar a energia hidráulica e convertê-la em energia elétrica

renovável. Essa ação reduz emissões diretas associadas à geração de energia elétrica, caso parte da energia seja suprida por combustíveis fósseis.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: redução do consumo de energia da rede elétrica, aproveitando um recurso já disponível no processo industrial.
- Econômicos: potencial para redução de custos energéticos a médio prazo, especialmente em plantas com alto volume de efluentes.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço é médio, pois a tecnologia é consolidada, mas exige estudos de viabilidade técnica e econômica. Os principais custos envolvem CAPEX significativo para aquisição e instalação de turbogeradores, sistemas de controle e integração com a rede elétrica; projetos de engenharia para adequação hidráulica e elétrica; além de manutenção preventiva para garantir eficiência e segurança. A viabilidade depende diretamente da vazão e do desnível disponível no efluente tratado. Em plantas com baixa vazão ou pouca diferença de altura, o retorno financeiro pode ser limitado, tornando o investimento menos atrativo.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.2.1.3 Implantar Sistemas de Cogeração para Produção de Energia a partir de Biomassa (TER.03)

Descrição da Ação

- A cogeração para produção de energia é amplamente utilizada pelo setor de Papel & Celulose, principalmente porque esse setor dispõe de grande quantidade de biomassa. Ela permite produzir simultaneamente vapor de processo e energia elétrica, aumentando a eficiência global do sistema da fábrica.
- O sistema de cogeração utilizando biomassa como fonte de combustível é uma alternativa essencial no processo de descarbonização industrial, pois possibilita a geração de vapor e energia renovável.
- Esse tipo de sistema permite que muitas fábricas de celulose sejam autossuficientes em energia elétrica, podendo gerar excedente de energia para comercialização.

Forma de Mitigação

- A cogeração para produção de energia contribui para a descarbonização ao gerar vapor e energia renovável. Essa ação reduz emissões diretas associadas à geração de energia elétrica, caso parte da energia seja suprida por combustíveis fósseis.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: reaproveitamento energético de resíduos de processo (cascas e cavacos fora do padrão para produção de celulose) reduz compra de energia externa, além de menor necessidade de outros tipos de tratamento e destinação final desses resíduos, o que implica menores impactos ambientais correlatos em comparação com aqueles resultantes do seu aproveitamento energético.
- Econômico/operacional: maior eficiência energética pela cogeração simultânea de energia térmica e elétrica gera menor custo na compra de energia elétrica e menor dependência da estabilidade do fornecimento da energia elétrica externa

do SIN, que por sua vez gera menor quantidade de paradas por falta de energia. Além disso, cita-se potencial exportação de excedente renovável e potencial emissão de certificados de geração de energia renovável (IRECs).

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço é alto, pois envolve projetos complexos de engenharia, integração com sistemas existentes e adequação da infraestrutura elétrica. Os custos são elevados devido a CAPEX significativo para aquisição de caldeiras de alta pressão, turbogeradores, sistemas de controle e infraestrutura elétrica; adequação da estrutura elétrica local (subestações, linhas de transmissão) para suportar o volume de energia excedente; custos logísticos e operacionais para coleta, transporte e armazenamento da biomassa; além de despesas para treinamento de pessoal para operação e manutenção dos sistemas. Apesar do investimento inicial elevado, a cogeração pode gerar economia no longo prazo, reduzindo gastos com energia elétrica e combustíveis fósseis, além de possibilitar venda de excedentes para a rede.
- Além disso, há exigências regulatórias para conexão à rede e comercialização de excedentes, bem como riscos relacionados à variação na disponibilidade de resíduos.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.2.2 Eletrificação

A eletrificação está emergindo como uma opção chave de mitigação para a indústria. A eletricidade é um vetor de energia versátil, potencialmente produzido a partir de fontes de energia renováveis abundantes ou outras opções de baixo carbono. O uso direto ou indireto de eletricidade por meio de hidrogênio da eletrólise para demandas de alta temperatura e matéria-prima química oferece muitas opções para reduzir as emissões (IPCC, 2022b).

O uso da eletrificação é uma estratégia altamente discutida para a descarbonização industrial. O efeito líquido de GEE da eletrificação depende de como a eletricidade é produzida, o mix de fontes de geração de energia elétrica e os impactos que podem ocasionar na oferta e demanda do sistema elétrico nacional. Além disso, pode haver variação no fator médio anual de emissão de GEE em função dos diferentes tipos de fontes de geração da energia elétrica conectados ao sistema elétrico nacional.

No Brasil, a matriz elétrica é composta essencialmente por fontes renováveis (acima de 85%), principalmente a partir da geração hidráulica (55,3%). Outras fontes renováveis, como eólica (14,1%) e solar (9,3%), tem aumentado sua participação substancialmente na matriz elétrica brasileira nos últimos anos.

No entanto, esse crescimento enfrenta desafios relacionados à infraestrutura da rede elétrica nacional. Apesar da abundância de energia renovável, o Brasil ainda depende de usinas termelétricas para atender à demanda em horários de pico, devido à intermitência das fontes solar e eólica. Outro fator importante, é que a geração dependente do clima não é controlável e, portanto, não segue os padrões de demanda. Há momentos em que há excesso de oferta e momentos em que a geração renovável não é suficiente para cobrir a demanda. A modernização da infraestrutura elétrica é essencial para aproveitar plenamente o potencial das fontes renováveis e garantir um sistema mais eficiente e sustentável.

Em termos das emissões de GEE, a variação do mix de fontes de geração da energia elétrica impacta o fator de emissão anual médio da rede elétrica nacional, o que acaba impactando nas emissões dos empreendimentos que consomem energia proveniente da rede elétrica nacional.

1.2.2.2.1 Trocar Caldeiras a Combustíveis Fósseis por Caldeiras Elétricas (TEL01)

Descrição da Ação

- O setor de Papel & Celulose é altamente intensivo em energia térmica, tradicionalmente suprida por caldeiras de força que podem operar com diversos tipos de combustíveis, dependendo do projeto, da disponibilidade local e dos objetivos ambientais e econômicos da indústria. Esses combustíveis podem ser sólidos (biomassa, carvão, serragem, cavacos), líquidos (óleo combustível, diesel, óleos residuais), gasosos (gás natural, GLP, biogás) ou mistos.
- A eletrificação via caldeiras elétricas surge como uma estratégia crescente de descarbonização, especialmente em regiões com matriz elétrica limpa. No entanto, esta tecnologia traz alguns desafios como alto custo da eletricidade em alguns países, investimentos iniciais em infraestrutura e capacidade elétrica e limitações da rede (demanda e potência).
- Muito embora o setor de Papel & Celulose utilize predominantemente caldeiras de biomassa e recuperação para produção de vapor e energia elétrica, algumas fábricas utilizam caldeiras a combustíveis fósseis para complementar a produção de vapor. Nestes casos, a caldeira elétrica poderia ser utilizada em substituição às caldeiras a combustíveis fósseis.
- A eletrificação de caldeiras ainda está sendo testados equipamentos com foco em escalas menores ou aplicações específicas (como aquecimento de água para processos auxiliares). A alta demanda térmica do processo de secagem e a necessidade de temperaturas elevadas e estáveis tornam a substituição de caldeiras a biomassa ou recuperação por elétricas ainda economicamente inviável em larga escala.
- Contudo, o uso de caldeiras elétricas no setor de Papel & Celulose não é comum, em virtude desse setor já ser baseado em

matéria-prima de origem vegetal, portanto as emissões de gases de efeito estufa (GEE) são predominantemente de origem não fóssil.

Forma de Mitigação

- A troca de caldeiras à combustíveis fósseis por caldeiras elétricas é uma das estratégias mais eficazes para mitigar emissões de GEE, quando se tem disponibilidade de energia renovável. Essa ação reduz emissões diretas na geração de vapor, além de reduzir emissões pelo efeito de substituição associadas à extração, transporte e refino de combustíveis fósseis. No entanto, destaca-se que no setor essa tecnologia não é comum, em virtude do uso da biomassa.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: caldeiras elétricas eliminam a queima de combustíveis fósseis, reduzindo emissões de poluentes atmosféricos, o que gera menor impacto na qualidade do ar.
- Operacional: caldeiras elétricas podem atingir alta eficiência com praticamente toda a energia elétrica convertida em calor e são mais facilmente integradas a sistemas de controle e monitoramento (Indústria 4.0), o que implica em menor quantidade de paradas para manutenção. Além disso, ressalta-se uma menor complexidade de operação e manutenção, sem necessidade de manuseio de biomassa, cinzas ou sistemas de alimentação de combustível sólido e de combustíveis auxiliares.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A substituição de caldeiras movidas a combustíveis fósseis por caldeiras elétricas apresenta um nível de esforço alto, principalmente devido ao CAPEX relevante para aquisição da caldeira elétrica e infraestrutura elétrica necessária. Também há maior custo operacional (OPEX) visto que o custo da eletricidade é, em geral, mais alto que o da biomassa. Além disso, leva a maior dependência de energia elétrica, caso esta não seja autogerada mas comprada da rede, gera dependência

da estabilidade do fornecimento da energia elétrica externa e maior risco de paradas por falta de energia. Por fim, não promove economia circular pelo reaproveitamento de resíduos.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.2.2 Substituir Equipamentos/ Maquinários Móveis da Operação Industrial Movidos a Combustíveis Fósseis por Elétricos (TEL.02)

Descrição da Ação

- Esta ação visa substituir os equipamentos e máquinas móveis utilizadas na operação industrial movidos a combustíveis fósseis por elétricos. Os principais equipamentos e máquinas consiste em empilhadeiras, carregadeiras e veículos de apoio, geralmente movidos a diesel ou GLP. Com a substituição pelo elétrico promove redução das emissões diretas da combustão móvel.
- A infraestrutura de carregamento precisa ser dimensionada conforme a frota e o perfil de uso, evitando gargalos e garantindo disponibilidade.

Forma de Mitigação

- Essa ação contribui para descarbonização do setor pois atua diretamente na redução de emissões de combustão móvel industrial a base fóssil.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: menor emissão de poluentes atmosféricos, o que gera menor impacto e na qualidade do ar. Cita-se ainda menor uso de insumos oleosos na manutenção e menores impactos ambientais correlatos.
- Econômico: equipamentos elétricos têm menor OPEX (ex. menor custo com manutenção; custo por kWh da eletricidade é inferior ao custo por litro do diesel ou gás natural, especialmente quando a energia é gerada internamente).
- Social: menor ruído e vibração, importante para segurança e saúde ocupacional.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço é considerado de médio a alto, com CAPEX relevante, incluindo além da aquisição de veículos e equipamentos elétricos, a aquisição e instalação de

infraestrutura de carregamento e potencial demanda por reforço na rede elétrica interna. Por outro lado, o OPEX é menor, dado ao menor custo com manutenção e menor custo por kWh da eletricidade que é inferior ao custo por litro do diesel ou gás natural, especialmente quando a energia é gerada internamente.

- Caso a energia não seja autogerada, há maior dependência da energia elétrica externa e maior exposição a sua instabilidade do fornecimento de energia, o que tende a causar maior número de paradas.
- Além disso, o tempo necessário para recarregar baterias pode impactar a produtividade, exigindo planejamento logístico mais complexo. Porém, equipamentos elétricos são mais facilmente integrados a sistemas de controle e monitoramento (Indústria 4.0), permitindo gestão otimizada e preditiva.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.2.3 Substituir Equipamentos/ Maquinários e Veículos da Operação Florestal Movidos a Combustíveis Fósseis por Elétricos (TEL.03)

Descrição da Ação

- Diferentemente do ambiente industrial, o contexto florestal apresenta significativa emissão de GEE. Nas atividades de colheita, máquinas como *harvesters*, *forwarders*, tratores, carregadeiras e veículos são tradicionalmente movidos a diesel, contribuindo de forma expressiva para as emissões totais de gases de efeito estufa do setor.
- A substituição de equipamentos, maquinários e veículos movidos a combustíveis fósseis por alternativas elétricas na operação florestal do setor de celulose representa uma transformação significativa rumo a descarbonização da cadeia.
- Apesar dos benefícios, o processo exige planejamento robusto. É necessário avaliar rotas, distâncias e disponibilidade energética antes de definir a frota; dimensionar estações de carregamento, especialmente em áreas onde a autonomia pode ser um fator crítico.

Forma de Mitigação

- Essa ação contribui para descarbonização do setor pois atua diretamente na redução de emissões de combustão móvel da operação florestal a base fóssil

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: menor emissão de poluentes atmosféricos, o que gera menor impacto e na qualidade do ar. Cita-se ainda menor uso de insumos oleosos na manutenção e menores impactos ambientais correlatos.
- Econômico: equipamentos elétricos têm menor OPEX (ex. menor custo com manutenção; custo por kWh da eletricidade é inferior ao custo por litro do diesel ou gás natural, especialmente quando a energia é gerada internamente).

- Social: menor ruído e vibração, importante para segurança e saúde ocupacional.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço é considerado alto, requer grande investimento (CAPEX) considerando que a que a operação florestal demanda grande quantidade de equipamentos móveis e estruturas de carregamento. Adicionalmente, equipamentos elétricos ou híbridos, especialmente os de grande porte (tratores, colheitadeiras, caminhões florestais), ainda têm custo elevado e disponibilidade restrita no mercado brasileiro, o que dificulta a adoção em larga escala.
- Exige infraestrutura robusta e descentralizada para carregamento (ex.: em áreas florestais ou nas proximidades), o que demanda investimento inicial significativo e limita a viabilidade operacional em longas distâncias.
- Caso a energia não seja autogerada, há maior dependência da energia elétrica externa, e maior exposição a sua instabilidade do fornecimento de energia, o que tende a causar maior número de paradas.
- O tempo necessário para recarregar baterias pode impactar a produtividade, exigindo planejamento logístico mais complexo. Porém, equipamentos elétricos são mais facilmente integrados a sistemas de controle e monitoramento (Indústria 4.0), permitindo gestão otimizada e preditiva.
- Já existem iniciativas em estágios piloto ou em pequena escala para eletrificação de alguns processos, como trituradores estacionários elétricos utilizados próximos a fábricas de celulose (onde há fornecimento de energia estável). Também há pesquisas sobre o uso de máquinas híbridas e alternativas movidas a biocombustíveis (HVO, biodiesel), que podem reduzir a intensidade de emissões sem demandar mudanças radicais de infraestrutura.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.2.2.4 Substituir Equipamentos/ Maquinários e Veículos da Operação Logística Movidos a Combustíveis Fósseis por Elétricos (TEL.04)

Descrição da Ação

- A cadeia de suprimentos da indústria de Papel & Celulose é uma das mais complexas e integradas do setor industrial, envolvendo diversas etapas que vão desde a produção da matéria-prima até a entrega do produto final ao consumidor. Desta forma, a substituição de equipamentos, maquinários e veículos movidos a combustíveis fósseis por versões elétricas na operação logística do setor de papel e celulose constitui uma ação muito importante na estratégia de descarbonização.
- A cadeia de logística *inbound* na indústria de Papel & Celulose envolve todos os fluxos de matéria-prima (madeira, celulose e aparas de papel), produtos químicos, equipamentos e peças industriais, combustíveis (como biomassa, óleo combustível) e embalagens e materiais auxiliares, geralmente realizado por modal rodoviário (diversos tipos de caminhão).
- A cadeia de logística *outbound* (*downstream* ou logística de saída) na indústria de Papel & Celulose envolve todos os fluxos de entrega de produtos finais, desde as fábricas até os clientes finais, que podem ser indústrias, distribuidores ou portos para exportação. Para transporte dos produtos finais no mercado interno o modal mais utilizado é o rodoviário, enquanto para transporte em longas distâncias o modal mais utilizado é o ferroviário.

Forma de Mitigação

- Essa ação contribui para descarbonização do setor pois atua diretamente na redução de emissões de GEE de combustão móvel da operação logística a base fóssil.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: menor emissão de poluentes atmosféricos, o que gera menor impacto e na qualidade do ar. Cita-se ainda menor

uso de insumos oleosos na manutenção e menores impactos ambientais correlatos.

- Econômico: equipamentos elétricos têm menor OPEX (ex. menor custo com manutenção; custo por kWh da eletricidade é inferior ao custo por litro do diesel ou gás natural, especialmente quando a energia é gerada internamente).
- Social: menor ruído e vibração, importante para saúde ocupacional.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço é médio, com CAPEX relevante, uma vez que inclui além da aquisição de veículos e equipamentos elétricos, a aquisição e instalação de infraestrutura de carregamento e potencial demanda por reforço na rede elétrica interna. Por outro lado, o OPEX é menor, dado ao menor custo com manutenção e menor custo por kWh da eletricidade que é inferior ao custo por litro do diesel ou gás natural.
- Há maior dependência da energia elétrica externa, e maior exposição a sua instabilidade do fornecimento de energia, o que tende a causar maior número de paradas.
- O tempo necessário para recarregar baterias pode impactar a produtividade, exigindo planejamento logístico mais complexo. Porém, equipamentos elétricos são mais facilmente integrados a sistemas de controle e monitoramento (Indústria 4.0), permitindo gestão otimizada e preditiva.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.2.3 Combustíveis com Baixa Emissão de Carbono Fóssil

Os combustíveis com baixa emissão de carbono são fontes de energia que emitem significativamente menos dióxido de carbono (CO₂) e outros gases de efeito estufa em comparação com os combustíveis fósseis tradicionais, como carvão mineral, gasolina e diesel.

A adoção de combustíveis de baixo carbono é essencial para enfrentar as mudanças climáticas e promover a transição energética para uma matriz mais limpa e sustentável, em linha com o Acordo de Paris e metas globais de neutralidade de carbono.

Esse tipo de combustível é fundamental para a descarbonização de setores considerados "hard-to-abate", ou seja, setores que enfrentam grandes desafios na redução de suas emissões de gases de efeito estufa, tais como aviação, transporte marítimo, siderurgia e indústria química, onde a eletrificação direta é limitada.

Dentre os combustíveis considerados com baixa emissão de carbono estão os biocombustíveis (derivados de matéria orgânica de origem biológica), os combustíveis sintéticos (produzidos a partir de hidrogênio verde e gás carbônico capturado ou de processo industrial), alguns tipos de hidrogênio e o gás natural.

Embora o gás natural não seja uma solução definitiva, ele representa um passo importante rumo à descarbonização da economia. Por ser abundante e já contar com uma rede de distribuição consolidada em muitos países, pode acelerar esse processo ao oferecer uma alternativa menos poluente enquanto as energias renováveis ganham escala e competitividade.

Apesar dos benefícios ambientais e estratégicos, a transição para combustíveis de baixo carbono pode enfrentar alguns obstáculos significativos, tais como: barreiras tecnológicas, custo e competitividade, disponibilidade de matéria-prima, regulação e políticas públicas, infraestrutura e logística, escalabilidade e tempo.

Neste contexto, os combustíveis com baixa emissão de carbono são essenciais e complementares às demais ações de combate ao aquecimento global, sendo detalhados nos capítulos seguintes.



1.2.2.3.1 Trocar Caldeiras à Combustíveis Fósseis por Caldeiras à Biomassa (TBC.01)

Descrição da Ação

- No processo produtivo de celulose e papel, as caldeiras exercem um papel absolutamente central, tanto no ponto de vista energético quanto ambiental. Elas garantem o fornecimento de vapor, energia térmica, energia elétrica e participam da recuperação química, que é essencial para a viabilidade econômica e sustentável do processo.
- As caldeiras de força podem operar com diversos tipos de combustíveis, dependendo do projeto, da disponibilidade local e dos objetivos ambientais e econômicos da indústria. Esses combustíveis podem ser sólidos (biomassa, carvão, serragem, cavacos), líquidos (óleo combustível, diesel, óleos residuais), gasosos (gás natural, GLP, biogás) ou mistos.
- As caldeiras de recuperação operam com o licor negro gerado no cozimento da madeira, com a finalidade de recuperar os produtos químicos usados no cozimento, e consequentemente, produzir vapor.
- O uso de combustíveis renováveis nas caldeiras tem se tornado cada vez mais importante devido aos seus benefícios ambientais, econômicos e de sustentabilidade. Para indústrias como de papel e celulose, que dependem fortemente de caldeiras para a geração de vapor e energia, a substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis é uma estratégia essencial para mitigar as emissões de GEE.
- Neste sentido, o uso de biomassa é estratégico ao setor para que as empresas atinjam suas metas climáticas.

Forma de Mitigação

- A troca de caldeiras à combustíveis fósseis por caldeiras à biomassa, além de fortalecer cadeias locais de biomassa, promovendo economia circular, é essencial

para contribuir para a descarbonização do processo produtivo da celulose e do papel. Essa ação reduz emissões diretas na geração de vapor e energia elétrica das fábricas do setor, além de reduzir emissões pelo efeito de substituição associadas à extração, transporte e refino de combustíveis fósseis.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: reaproveitamento de resíduos de processo (palitos, nós, lodo da ETE) reduz necessidade de outros tipos de tratamento e destinação final desses resíduos, o que implica menores impactos ambientais correlatos.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A substituição de caldeiras movidas a combustíveis fósseis por modelos a biomassa é uma ação estratégica para descarbonização, mas apresenta alto nível de esforço devido à complexidade técnica e operacional. O CAPEX é elevado, pois envolve aquisição da caldeira de biomassa, sistemas de alimentação de combustíveis sólidos, combustível auxiliar e remoção de cinzas, além de adaptações estruturais. A queima de biomassa exige sistemas de controle ambiental para mitigar emissões de NOx, material particulado e compostos orgânicos voláteis. Em contrapartida, o OPEX tende a ser menor, já que o custo da biomassa é geralmente inferior ao de combustíveis fósseis ou eletricidade. Modelos inovadores como "Capex as a Service", já aplicados no Brasil, reduzem a necessidade de investimento direto, permitindo que o cliente pague apenas pela "conta de vapor", transferindo a responsabilidade operacional para o fornecedor.
- As principais barreiras incluem o alto investimento inicial, a necessidade de logística e armazenamento de biomassa, que aumenta a complexidade de gestão, e os desafios regulatórios relacionados ao controle de emissões atmosféricas. Além disso, a disponibilidade regional de biomassa e a garantia de fornecimento contínuo são fatores críticos para

viabilidade. A implementação também requer treinamento operacional e integração com sistemas existentes, além de adequação às normas ambientais para tratamento de gases.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.2.3.2 Utilizar Caminhões de Pequeno e Médio Portes Movidos a Gás Natural Veicular (TBC.02)

Descrição da Ação

- O gás natural tem ganhado destaque como um combustível de transição, capaz de reduzir significativamente as emissões de carbono em comparação com fontes fósseis mais poluentes, como o carvão e o óleo combustível. O gás natural emite cerca de 50% menos CO₂ que o carvão e 30% menos que o petróleo na geração de eletricidade, e representa 6,3% da matriz energética brasileira.
- O gás natural veicular (GNV) é o gás natural comprimido a altas pressões para uso em motores de combustão interna adaptados. Ele é reconhecido por seu potencial de reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE) e melhorar a qualidade do ar urbano quando comparado aos combustíveis líquidos derivados do petróleo (gasolina e diesel).
- Embora o gás natural não seja uma solução definitiva, ele representa um passo importante rumo à descarbonização da economia, principalmente no uso em caminhões de pequeno e médio portes.

Forma de Mitigação

- O uso de caminhões de pequeno e médio portes movidos a gás natural veicular no setor contribui para a descarbonização, apesar do gás natural ser fóssil, em virtude da sua menor intensidade de carbono em relação a outros combustíveis fósseis. Essa ação reduz emissões diretas ao utilizar gás natural como combustível nas cadeias logísticas de transporte de insumos e de produtos acabados, bem como para a transporte interno (por exemplo, empilhadeiras).

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: menor emissão de outros poluentes atmosféricos (principalmente NOx e material particulado), o que gera menor impacto na qualidade do ar.

- Econômicos: redução significativa de custo por km rodado em comparação ao diesel, especialmente em regiões com boa infraestrutura de abastecimento. Além disso o GNV causa menor desgaste de peças, aumentando a durabilidade dos motores e reduzindo custos de manutenção.

- Social: motores a gás são mais silenciosos, importante para saúde ocupacional e gerando menor incômodo na comunidade local.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A adoção de caminhões a GNV para transporte no setor de Papel & Celulose apresenta custo geral médio, mas requer planejamento e investimentos iniciais. O CAPEX é relevante, pois a conversão ou aquisição de veículos a gás é mais cara que modelos a diesel, embora esse custo seja compensado pelo menor custo operacional ao longo do tempo, devido ao preço mais competitivo do GNV. O OPEX tende a ser reduzido, mas depende da disponibilidade de infraestrutura de abastecimento, que ainda é limitada em regiões remotas, como áreas florestais. Além disso, caminhões a GNV possuem menor autonomia, exigindo mais paradas para abastecimento, e os cilindros ocupam espaço e aumentam o peso do veículo, reduzindo a capacidade útil de carga.

Tipo de Ação

- Impactante.



1.2.2.3.3 Substituir Combustíveis Fósseis Mais Intensivos em Carbono por Gás Natural (TBC.03)

Descrição da Ação

- Diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas, a busca por fontes de energia mais limpas e sustentáveis tornou-se prioridade global. A transição energética envolve a substituição gradual de combustíveis fósseis por fontes renováveis como solar, eólica e biomassa. No entanto, essa mudança exige tempo, investimentos em infraestrutura e avanços tecnológicos.
- Nesse contexto, o gás natural tem ganhado destaque como um combustível de transição, capaz de reduzir significativamente as emissões de carbono em comparação com fontes fósseis mais poluentes, como o carvão e o óleo combustível. O gás natural emite cerca de 50% menos CO₂ que o carvão e 30% menos que o petróleo na geração de eletricidade, e representa 6,3% da matriz energética brasileira.
- Embora o gás natural não seja uma solução definitiva, ele representa um passo importante rumo à descarbonização da economia. Por ser abundante e já contar com uma rede de distribuição consolidada em muitos países, pode acelerar esse processo ao oferecer uma alternativa menos poluente enquanto as energias renováveis ganham escala e competitividade.
- Por essas razões, muitos países têm adotado o gás natural como uma ponte entre o modelo energético atual e um futuro baseado em fontes renováveis.
- No entanto, o gás natural pode representar uma solução e uma obstrução à transição energética e no combate às mudanças climáticas, visto que ainda é um combustível fóssil e composto majoritariamente por metano, ou seja, vazamentos durante extração, transporte e distribuição, bem como, queima ineficiente (incompleta) podem ocasionar a liberação

de um gás com elevado potencial de aquecimento global. Ainda, investimentos em infraestrutura de gás natural podem prolongar a dependência de combustíveis fósseis, impactando na transição para as fontes de energia renováveis.

- Desta forma, gás natural como um combustível de transição precisa ter seu uso limitado no tempo, com metas de descarbonização claras, acompanhado de controle rigoroso de emissões de metano e inserido num plano de substituição gradual por energias de baixo carbono ou zero carbono.
- No setor de Papel & Celulose o gás natural é utilizado em caldeiras para gerar vapor necessário para o processo de produção de celulose e em sistemas de cogeração para produzir simultaneamente eletricidade e calor.

Forma de Mitigação

- A substituição de combustíveis fósseis mais intensivos em carbono por gás natural no setor contribui para a descarbonização, apesar do gás natural ser fóssil, em virtude da sua menor intensidade de carbono em relação a outros combustíveis fósseis. Essa ação reduz emissões diretas ao utilizar gás natural como combustível renovável em caldeiras e fornos de cal, reduzindo o consumo de óleo combustível. No entanto, destaca-se que este é um combustível de transição.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: menor emissão de poluentes atmosféricos (principalmente óxidos de enxofre e material particulado), o que gera menor impacto na qualidade do ar. Cita-se ainda menor uso de insumos oleosos na manutenção e menores impactos ambientais correlatos.
- Operacional: a queima do gás natural é mais completa e controlável, o que melhora a eficiência térmica dos equipamentos e reduz a formação de resíduos e incrustações nas caldeiras e fornos.

— Econômico: a ausência de resíduos sólidos e a queima limpa reduzem o desgaste dos equipamentos e a necessidade de limpezas frequentes, diminuindo os custos operacionais e o tempo de parada para manutenção.

— Social/Ocupacional: por ser mais leve que o ar, o gás natural se dissipa rapidamente em caso de vazamento, reduzindo o risco de explosões em comparação com combustíveis líquidos armazenados no local.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

— A substituição de óleo combustível por gás natural em caldeiras e fornos é uma ação relevante para reduzir emissões, mas apresenta nível de esforço médio a alto devido às adaptações necessárias. O CAPEX é significativo, pois a conversão exige modificações estruturais, ajustes nos queimadores, sistemas de controle e implantação de infraestrutura interna, como rede de gás, válvulas e dispositivos de segurança. O OPEX é variável, já que o gás natural pode ser mais barato que o óleo combustível em algumas regiões, mas seu preço está sujeito à volatilidade do mercado e à disponibilidade de infraestrutura de distribuição. A viabilidade depende da proximidade com gasodutos ou acesso a GNL (gás natural liquefeito), o que pode limitar a adoção em áreas remotas.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.2.3.4 Produzir Etanol Celulósico (TBC.04)

Descrição da Ação

- O etanol pode ser produzido a partir de diversas matérias-primas ricas em açúcares, amido ou celulose, tais como cana-de-açúcar, beterraba, milho, arroz, etc.
- A produção de etanol celulósico a partir da hemicelulose de eucalipto ou pinus é uma rota promissora dentro do aproveitamento de biomassa florestal. Diferentemente do bagaço da cana ou da palha de milho, a madeira de eucalipto e pinus possui uma estrutura lignocelulósica mais densa, com alta presença de lignina, o que torna o processo mais desafiador, mas totalmente viável com tecnologias modernas.
- No passado, a maioria das fábricas de celulose que utilizavam o processo sulfito também operava unidades de produção de etanol. Uma parte da hemicelulose gerada a partir de pinus, por exemplo, pode ser fermentada e destilada em etanol. Entretanto, com a introdução de sistemas de recuperação química e energética, a maioria das usinas abandonou a produção de etanol. As políticas climáticas e as recentes regulamentações sobre combustíveis renováveis tornaram a produção de etanol mais atraente novamente (BAT, 2015).
- O maior desafio da produção deste tipo de etanol é que leveduras tradicionais (como *Saccharomyces cerevisiae*) não fermentam xilose. Por isso, há necessidade do uso de micro-organismos capazes de fermentar açúcares C5 (típicos da hemicelulose de biomassa como eucalipto, pinus, palha de milho e outras fontes lignocelulósicas). Outros fatores, consistem na presença de muitos inibidores no hidrolisado hemicelulósico e custos elevados de pré-tratamento e detoxificação.
- Apesar, disso no setor de Papel & Celulose tem se estudado a produção de etanol celulósico para produção de combustível sustentável de aviação.

Forma de Mitigação

- A produção de etanol celulósico no setor contribui para a descarbonização ao aproveitar subprodutos do processo para gerar biocombustíveis, substituindo combustíveis fósseis. Essa ação reduz emissões diretas ao utilizar etanol celulósico para produção de combustível sustentável de aviação, reduzindo o consumo de querosene de aviação.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: reaproveitamento de resíduos de processo (cascas e cavacos fora do padrão para produção de celulose), reduzindo necessidade de outros tipos de tratamento e destinação final desses resíduos.
- Econômico: novo produto promovendo diversificação de negócio para empresas do setor. Pode gerar receita adicional com a venda de CBIO no mercado regulado de créditos de descarbonização.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A produção de etanol celulósico é uma das rotas mais avançadas para agregar valor à biomassa residual do setor de Papel & Celulose, mas apresenta custo geral alto e elevado grau de complexidade. O CAPEX é muito alto, pois exige plantas dedicadas com tecnologias para pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação, além de sistemas de recuperação e purificação. O OPEX também é elevado, devido ao consumo energético, uso de enzimas especializadas e mão de obra qualificada. A eficiência do processo ainda é limitada pela dificuldade na quebra da lignina e na conversão de pentoses, o que impacta a produtividade e o retorno financeiro. Em comparação, alternativas como cogeração de energia a partir da biomassa apresentam menor risco e retorno mais rápido, tornando o etanol celulósico uma solução de longo prazo.

Tipo de Ação

- Impactante.



1.2.2.3.5 Aumentar Consumo de Etanol em Veículos Leves e Semileves (TBC.05)

Descrição da Ação

- O etanol (ou álcool etílico) é um biocombustível produzido principalmente por meio da fermentação de açúcares presentes em materiais orgânicos. Ele pode ser produzido a partir de diferentes fontes, divididas em três categorias principais: matérias-primas de primeira, segunda ou terceira geração.
- A produção de biocombustíveis de primeira geração é a mais amplamente difundida e utilizada no mundo. Ela ocorre por meio da fermentação de matérias-primas ricas em açúcares e amidos, como a cana-de-açúcar (principal fonte no Brasil), o milho (predominante nos Estados Unidos) e a beterraba (com grande uso na Europa).
- Já os biocombustíveis de segunda geração são obtidos a partir da fermentação de materiais lignocelulósicos, ou seja, ricos em celulose e hemicelulose, provenientes de resíduos agrícolas e florestais. Exemplos incluem palha e bagaço da cana-de-açúcar, resíduos de milho (como sabugo e palha), além de madeira e serragem.
- Em estágio ainda experimental, a terceira geração de biocombustíveis utiliza fontes não convencionais, como algas e micro-organismos geneticamente modificados. As algas, por exemplo, apresentam rápido crescimento e capacidade de produzir açúcares ou óleos que podem ser convertidos em etanol, oferecendo potencial para uma produção mais sustentável e eficiente.
- O Brasil é um dos maiores produtores de etanol do mundo. Em 2024, a produção de etanol atingiu 36,952 bilhões de litros, um crescimento de 4,22% em relação ao ano anterior (ANP, 2025).
- O etanol é uma alternativa consolidada para a transição rumo a uma matriz energética mais sustentável, especialmente no segmento de veículos leves. Amplamente utilizado no Brasil e em diversos países, esse

biocombustível se destaca não apenas por seu potencial de redução de emissões, mas também por seu impacto socioeconômico. A produção de etanol impulsiona o desenvolvimento regional, promovendo a geração de empregos e renda, sobretudo em áreas rurais, onde se concentram as atividades agrícolas e industriais relacionadas à sua cadeia produtiva.

- No setor de Papel & Celulose, o etanol tem importância na mitigação das emissões fósseis no uso de veículos leves para deslocamento de pessoal na própria operação para acesso interno, comercial, viagens e deslocamento casa-trabalho.

Forma de Mitigação

- O aumento do consumo de etanol em veículos leves e semileves no setor contribui para a descarbonização ao utilizar um combustível renovável, substituindo combustíveis fósseis. Essa ação reduz emissões diretas e indiretas ao utilizar etanol como combustível renovável em veículos leves para deslocamento de pessoal na própria operação para acesso interno, comercial, viagens e deslocamento casa-trabalho.

Importância (Cobenefícios)

- Econômico: preço do etanol é inferior ao da gasolina em muitas regiões. Volatilidade no preço dependente da safra da cana-de-açúcar e políticas fiscais.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A ampliação do uso de etanol em veículos leves e semileves no setor de Papel & Celulose apresenta custo geral baixo, pois a frota brasileira já é majoritariamente flex e a rede de abastecimento é ampla e consolidada. Isso significa que não há necessidade de investimentos significativos em infraestrutura ou adaptação tecnológica. O esforço concentra-se em gestão e políticas internas, como incentivo ao abastecimento com etanol e monitoramento do consumo, tornando essa ação altamente viável e de rápida implementação.

- As barreiras são mínimas, mas incluem variação de preço do etanol em relação à gasolina, que pode afetar a adesão, e a necessidade de engajamento dos motoristas e gestores de frota para garantir a priorização do combustível renovável. Além disso, é importante considerar a disponibilidade regional do etanol hidratado, embora essa limitação seja pouco relevante no Brasil devido à capilaridade da rede de distribuição.

Tipo de Ação

- Impactante.



1.2.2.3.6 Aumentar o Consumo de Biodiesel na Logística (TBC.06)

Descrição da Ação

- O biodiesel é produzido a partir de matéria orgânica de origem vegetal ou animal, como diferentes tipos de oleaginosas (soja, mamona, girassol, algodão, amendoim e dendê), gordura animal e óleos residuais, por meio de um processo químico denominado transesterificação, gerando o combustível e a glicerina.
- Em 2003, tiveram início os primeiros estudos concretos para a criação de uma política do biodiesel no Brasil com o lançamento do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) em 2024. O objetivo inicial do PNPB foi introduzir o biodiesel na matriz energética brasileira, com enfoque na inclusão social e no desenvolvimento regional. A partir 2005, por meio da Lei nº 11.097/2005, teve início a mistura do biodiesel ao diesel convencional (fóssil) numa proporção de 5%. Entretanto, o marco regulatório para o Combustível do Futuro, promulgado em 2024, permite a ampliação da mistura de biodiesel no diesel para até 25%.
- A barreira regulatória para aumentar voluntariamente a mistura de biodiesel acima do percentual obrigatório está fundamentada em normas brasileiras que controlam a proporção permitida e os procedimentos para uso adicional.
- O Brasil é um dos maiores produtores de biodiesel do mundo. Em 2024, a produção de biodiesel atingiu 9,067 bilhões de litros, um crescimento de 20,45% em relação ao ano anterior (ANP, 2025).
- O biodiesel é uma importante alternativa para tornar a matriz energética mais renovável, embora o não seja uma solução definitiva é uma peça essencial na transição energética, especialmente no setor de transportes pesados. O uso de biodiesel contribui para a redução imediata das emissões de poluentes, impulsiona o desenvolvimento das cadeias produtivas locais e atua como uma solução de

transição inteligente, enquanto tecnologias como os veículos elétricos e o hidrogênio verde continuam em evolução.

Forma de Mitigação

- O aumento no consumo de biodiesel contribui para a descarbonização pois utiliza matéria orgânica de origem vegetal ou animal para gerar esse biocombustível, que posteriormente será misturado ao diesel convencional de origem fóssil. Essa ação reduz emissões diretas ao utilizar diesel contendo uma proporção de biodiesel; e contribui para a mitigação das emissões da cadeia de logística, diminuindo a pegada de carbono dos produtos finais.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: menor emissão de outros poluentes atmosféricos (principalmente óxidos de enxofre e material particulado), o que gera menor impacto na qualidade do ar.
- Operacional: Facilidade de implantação alta devido a ampla rede de distribuição. Pode ser usado em motores convencionais sem grandes adaptações.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A ampliação do uso de biodiesel na frota logística do setor de Papel & Celulose apresenta nível de esforço baixo a médio, pois depende principalmente da gestão de abastecimento e negociação com fornecedores. O OPEX tende a ser maior, já que o consumo específico é superior ao do diesel, mas o preço do biodiesel está competitivo na maioria das regiões do Brasil. Esse aumento de custo por quilômetro rodado pode ser compensado pela obrigação de compensação de emissões prevista na Lei nº 15.042/2024, tornando a adoção economicamente mais atrativa. Não há necessidade de grandes investimentos em infraestrutura, porém misturas acima de B20 podem exigir ajustes nos motores e aumentar custos de manutenção.
- As principais barreiras incluem limites

legais para mistura obrigatória (atualmente B12), sendo que o uso acima disso depende de contratos específicos com fornecedores. Há também desafios relacionados à garantia de fornecimento de misturas superiores (B20, B30) em regiões remotas, além da necessidade de assegurar qualidade para evitar problemas mecânicos. Grandes empresas podem negociar fornecimento dedicado, enquanto pequenas dependem da oferta local e preço competitivo.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.2.3.7 Produzir e/ou Consumir Biometano no Setor (TBC.07)

Descrição da Ação

- O biometano é um biocombustível gasoso constituído essencialmente de metano, derivado da purificação do biogás (ANP, 2025).
- O biogás é obtido através do processo de digestão anaeróbia, definida como a conversão de material orgânico, através de bactérias, em metano, dióxido de carbono, alguns gases inertes e compostos sulfurosos, em um ambiente com ausência de oxigênio. Diferentes substratos podem ser utilizados para sua produção e a quantidade de biogás obtida depende principalmente da tecnologia empregada na digestão e do substrato (MME, 2025). Alguns exemplos de matérias-primas são: resíduos agropecuários (esterco de bovinos, suínos, aves), resíduos agrícolas (palha, restos de culturas), resíduos orgânicos urbanos (lixo orgânico doméstico, restos de comida), lodo de esgoto (de estações de tratamento) e resíduos industriais (alimentos, bebidas, papel, abatedouros).
- A purificação do biogás resulta no biometano com elevado teor de metano em sua composição, reunindo características que o torna intercambiável com o gás natural em todas as suas aplicações. Ou então passível de ser transportado na forma de gás comprimido por meio de caminhão-feixe (gasoduto virtual) ou na forma de gás liquefeito, denominado biometano liquefeito - Bio-GNL (ANP, 2025).
- O Brasil é um dos maiores produtores de biometano do mundo. Em 2024, a produção de biometano atingiu 81,525 milhões de m³, um crescimento de 8,87% em relação ao ano anterior (ANP, 2025).
- No Brasil, o maior potencial de biogás encontra-se no setor agropecuário (resíduos agrícolas e pecuária confinada), o que inclui tanto as palhas e pontas, quanto a vinhaça e a torta de filtro do setor sucroenergético. Adiciona-se, ainda, um montante considerável que pode ser obtido

através dos resíduos sólidos urbanos e esgoto (MME, 2025).

- A produção e uso do biogás pode servir para aumentar a oferta de gás natural, bem como para diminuir sua pegada de carbono, evidenciando uma sinergia positiva entre o combustível fóssil e o renovável, no processo de transição energética (MME, 2025).
- Essa fonte renovável pode ter várias aplicações, como geração elétrica, uso veicular e injeção nas malhas de gás natural (MME, 2025).
- Recentemente, foi aprovado o marco regulatório para o Combustível do Futuro, que tem como objetivo incentivar a pesquisa, a produção, a comercialização e o uso do biometano e do biogás na matriz energética brasileira com vistas à descarbonização do setor de gás natural.
- Além disso, já existe o RenovaBio, política nacional de biocombustíveis instituída pela Lei nº 13.576/2017, reconhece o biometano como um biocombustível elegível para emissão de CBIO, que equivale a 1 tonelada de CO₂ evitada e é emitido por produtores de biocombustíveis certificados pela ANP, podendo ser comercializados.
- No setor de Papel & Celulose, pode ser produzido por meio da captura do biogás, diretamente no tratamento de efluentes industriais, ou gerado na compostagem de lodos industriais, ou ainda, em aterros orgânicos do setor.

Forma de Mitigação

- A produção e consumo de biometano no setor contribui para a descarbonização ao aproveitar subprodutos do tratamento de efluentes e resíduos sólidos para gerar biocombustível, substituindo combustíveis fósseis. Essa ação reduz emissões diretas ao utilizar biometano como combustível renovável em caldeiras, reduzindo o consumo de óleo combustível ou gás natural; emissões indiretas associadas à geração de vapor e energia elétrica, caso parte da energia seja suprida por

combustíveis renováveis; e contribui para a mitigação das emissões da cadeia de valor, ao oferecer alternativas de baixo carbono para indústrias químicas e de transporte, diminuindo a pegada de carbono dos produtos finais.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: reaproveitamento de resíduos de processo (palitos, nós, lodo da ETE) reduz necessidade de outros tipos de tratamento e destinação final desses resíduos, o que implica menores impactos ambientais correlatos em comparação com aqueles resultantes da produção e uso do biometano.
- Operacional/Econômica: pode suprir parte da demanda térmica e veicular, diminuindo dependência externa. Reduz custos de tratamento e destinação de resíduos. Pode ser aplicável a geração de créditos de descarbonização (CBIO).

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A produção de biometano no setor de Papel & Celulose é uma ação estratégica para descarbonização, mas apresenta custo geral alto e elevada complexidade operacional. O CAPEX é significativo, pois envolve a instalação de biodigestores, sistemas de purificação para remoção de CO₂, H₂S e umidade, além de unidades de compressão para viabilizar o uso do biometano como combustível. O processo exige controle rigoroso da digestão anaeróbia e monitoramento da qualidade do gás para atender padrões técnicos e regulatórios. Embora o biometano seja uma alternativa renovável, sua viabilidade depende de escala produtiva e integração com processos industriais existentes.
- Outras barreiras são as exigências regulatórias, visto que normas da ANP impõem critérios diferentes para produção destinada ao consumo interno (dentro da planta) e para comercialização ou abastecimento externo, aumentando a burocracia. Além disso, há desafios relacionados à garantia de fornecimento contínuo de biomassa

para biodigestão, à gestão de efluentes e à falta de infraestrutura consolidada para distribuição do biometano. A ausência de incentivos regulatórios claros e a competição com outras rotas bioenergéticas mais consolidadas, como etanol e biodiesel, também limitam a expansão dessa solução.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.2.3.8 Produzir e Consumir Bio-Óleo e Biochar no Setor (TBC.08)

Descrição da Ação

- O bio-óleo é um combustível líquido obtido a partir da biomassa, como resíduos vegetais, restos agrícolas, madeira, casca de arroz e bagaço de cana. Sua produção ocorre principalmente por meio da pirólise, um processo termoquímico que transforma matéria orgânica em bio-óleo, carvão vegetal (biochar) e gases combustíveis. Esse processo acontece na ausência de oxigênio, em temperaturas entre 350°C e 600°C, e representa uma alternativa renovável aos combustíveis fósseis, como o petróleo.
- O bio-óleo possui uma composição complexa, formada por ácidos, álcoois, cetonas, fenóis e água. Apresenta-se como um líquido escuro e viscoso, semelhante ao petróleo bruto, com poder calorífico entre 16 e 20 MJ/kg. Embora esse valor seja inferior ao dos combustíveis fósseis, ainda é suficiente para aplicações na geração de energia térmica e elétrica. Sua alta densidade energética volumétrica o torna mais eficiente que a biomassa bruta, podendo ser utilizado diretamente em caldeiras e turbinas modificadas ou ainda processado para obtenção de biocombustíveis avançados.
- Entre as principais vantagens do bio-óleo produzido por pirólise está a possibilidade de utilizar resíduos agrícolas, florestais e urbanos como matéria-prima, o que contribui para a redução do impacto ambiental e o reaproveitamento de materiais descartados. Por ser uma fonte renovável de energia, o bio-óleo ajuda a diminuir a dependência de combustíveis fósseis e facilita o armazenamento e transporte em comparação com a biomassa sólida ou o gás.
- Outro ponto positivo é o potencial de refino do bio-óleo, que pode ser transformado em produtos químicos de alto valor agregado ou em combustíveis líquidos. A pirólise também gera subprodutos úteis, como o biochar, que melhora a qualidade do solo

e contribui para o sequestro de carbono, e os gases combustíveis, que podem ser reaproveitados no próprio processo, promovendo autossuficiência energética. Dessa forma, o bio-óleo se destaca como uma solução promissora para a transição energética sustentável.

- O setor de Papel & Celulose apresenta um cenário altamente promissor para a produção de bio-óleo, especialmente pela abundância de resíduos gerados em seu processo industrial. Cascas, galhos, serragem e lodo de recuperação, tradicionalmente tratados como subprodutos de baixo valor, podem ser convertidos em bio-óleo por meio de tecnologias como a pirólise, agregando valor à cadeia produtiva e contribuindo para a transição energética. A integração da produção de bio-óleo ao processo industrial fortalece os princípios da economia circular, ao transformar resíduos em fontes renováveis de energia. Ao explorar novos mercados, como o de combustíveis renováveis e produtos químicos verdes, o setor pode ampliar sua atuação, agregar valor à biomassa florestal e posicionar-se como protagonistas na bioeconomia. Essa evolução reforça o papel do setor como agente de inovação e sustentabilidade no cenário industrial brasileiro.

Forma de Mitigação

- A produção de bio-óleo e biochar no setor contribui para a descarbonização ao aproveitar subprodutos do processo para gerar biocombustíveis e biomateriais, substituindo combustíveis e insumos fósseis. Essa ação reduz emissões diretas ao utilizar bio-óleo como combustível renovável em caldeiras, reduzindo o consumo de óleo combustível ou gás natural; e emissões indiretas associadas à geração de vapor e energia elétrica, caso parte da energia seja suprida por combustíveis renováveis. Nota-se que o biochar, quando aplicado ao solo, atua como sumidouro de carbono, promovendo sequestro de carbono e melhoria da qualidade do solo das florestas/plantações agrícolas.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: reaproveitamento energético de resíduos de processo (cascas e cavacos fora do padrão para produção de celulose) reduz compra de energia externa, além de menor necessidade de outros tipos de tratamento e destinação final desses resíduos, o que implica menores impactos ambientais correlatos em comparação com aqueles resultantes do seu aproveitamento energético.
- Econômico: quando há resíduos internos abundantes, custo operacional é baixo. Oportunidade de produção de e-combustível pelo refino do bio-óleo. Potencial de geração de crédito de carbono pela produção e aplicação de biochar na silvicultura.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A produção e utilização de bio-óleo e biochar por meio da pirólise da biomassa é uma alternativa promissora para descarbonização no setor de Papel & Celulose, mas apresenta custo médio-alto e desafios tecnológicos. O CAPEX é relevante, pois requer instalações de pirólise, sistemas para *upgrading* do bio-óleo e tratamento de subprodutos como gases e alcatrões. Apesar disso, o investimento é menor que o de tecnologias como gaseificação, já que a pirólise opera a temperaturas mais baixas e não exige oxigênio controlado nem sistemas complexos de limpeza para gás. Projetos podem ser flexíveis, permitindo aplicação em plantas pequenas e médias. O OPEX inclui custos com energia térmica, manutenção e processos adicionais para estabilização química do bio-óleo, que apresenta alta acidez e baixa compatibilidade com equipamentos convencionais.
- Entre as principais barreiras estão a instabilidade química do bio-óleo, que exige *upgrading* para uso energético ou químico, e a falta de cadeia logística estruturada. Além disso, os custos de produção são elevados frente aos combustíveis fósseis, e há ausência de incentivos regulatórios claros, o que limita competitividade. A concorrência com rotas bioenergéticas consolidadas, como etanol, biodiesel e biogás, também é um entrave para adoção

em larga escala.
Tipo de Ação
— Impactante.

1.2.2.3.9 Produzir e Consumir Gás de Síntese (Syngas) (TBC.09)

Descrição da Ação

- O principal consumidor de combustíveis fósseis em uma fábrica de celulose Kraft é o forno de cal. Quase todos os fornos de cal usam óleo combustível ou gás natural. Combustíveis alternativos mais típicos que são usados apenas como parte do combustível principal são gases não condensáveis (GNC), metanol e terebentina. No entanto, já existem alternativas para substituir o consumo de combustíveis fósseis por biocombustíveis, tais como: pó de biomassa seco e pulverizado, gaseificação de biomassa e uso do gás gerado, tall-oil e substituir o óleo combustível por lignina (BAT, 2015).
- A gaseificação de biomassa em fábricas de celulose é um processo de conversão termoquímica da biomassa e uma tecnologia inovadora que transforma biomassa em biogás, substituindo combustíveis fósseis e promovendo maior sustentabilidade.
- A tecnologia de gaseificador para fornos de cal existe desde a década de 1980. No entanto, por razões econômicas, não foi usado em maior escala. A substituição de combustíveis fósseis no forno de cal é a tecnologia disponível hoje (BAT, 2015).
- O sistema de gaseificação consiste em um silo de biomassa, uma seção de triagem e picagem da biomassa, um secador de biomassa, uma seção de pré-aquecimento do ar, um queimador de partida e o próprio gaseificador. Uma linha de gás conduz os gases de pirólise da biomassa gaseificada diretamente para o forno de cal. A biomassa que entra no gaseificador deve ter um teor de umidade inferior a 15%, assim é necessária sua secagem por meio de ar pré-aquecido por vapor da fábrica. O gaseificador opera em uma faixa de temperatura de 600 a 700 °C. As cinzas são removidas do fundo do reator (BAT, 2015).

Forma de Mitigação

- A produção de gás de síntese no setor de celulose contribui para a descarbonização ao aproveitar subprodutos do processo para gerar biocombustíveis, substituindo insumos fósseis. Essa ação reduz emissões diretas ao utilizar gás de síntese como combustível renovável nos fornos de cal, reduzindo o consumo de óleo combustível ou gás natural.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: valoriza subprodutos do processo, reduzindo custos com destinação.
- Econômico: quando há disponibilidade de resíduos internos, o custo operacional é menor que combustíveis fósseis.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A produção e utilização de gás de síntese (syngas) por meio da gaseificação da biomassa é uma alternativa avançada para descarbonização no setor de Papel & Celulose, mas apresenta custo geral alto e elevada complexidade tecnológica. O CAPEX é elevado, pois requer sistemas de gaseificação, unidades de purificação para remoção de particulados, alcatrões e contaminantes, além de infraestrutura para compressão e integração com processos térmicos ou químicos. Embora o syngas seja versátil, podendo ser usado para geração de energia, vapor ou como insumo químico, sua viabilidade depende de escala industrial e controle rigoroso das condições de operação (temperatura, pressão e composição do gás). A ausência de incentivos regulatórios claros e a competição com rotas bioenergéticas consolidadas (como etanol, biodiesel e biogás) também limitam sua adoção. Outro ponto crítico é a logística da biomassa, que deve ser contínua e economicamente viável para garantir operação estável.

- Tipo de Ação

Impactante.

1.2.2.3.10 Aumentar o Consumo de Diesel Verde - HVO (TBC.10)

Descrição da Ação

- O diesel verde, também conhecido como HVO (*hydrotreated vegetable oil*), é um biocombustível avançado produzido a partir de matérias-primas orgânicas (óleos, gorduras, etc.), que se destaca como uma alternativa renovável e de alta qualidade ao diesel fóssil.
- Ele é quimicamente muito semelhante ao diesel comum, mas produzido a partir de óleos vegetais ou gorduras animais por meio de um processo industrial de hidrogenação.
- O diesel verde é semelhante ao biodiesel, porém é um produto mais estável, não possui glicerinas e outros contaminantes, o que garante uma queima mais completa e mais limpa. Além disso, é considerado um combustível "drop-in", ou seja, pode ser usado em motores e infraestruturas existentes sem a necessidade de modificações significativas.
- Assim como o biometano, o diesel verde tem papel estratégico na descarbonização dos setores de transporte e indústria, pois substitui diretamente combustíveis fósseis como o diesel, a gasolina e o gás natural, mas com emissões muito menores — ou até negativas, dependendo da origem do resíduo usado.
- Em 2024, foi aprovado o marco regulatório para o Combustível do Futuro, que tem como objetivo incentivar a pesquisa, a produção, a comercialização e o uso energético do diesel verde na matriz energética brasileira.

Forma de Mitigação

- O aumento do consumo de diesel verde no setor contribui para a descarbonização ao utilizar um combustível renovável, substituindo combustíveis fósseis. Essa ação reduz emissões diretas ao utilizar diesel verde na cadeia logística própria; e contribui para a mitigação das emissões da cadeia de valor, diminuindo a pegada de carbono dos produtos finais.

Importância (Cobenefícios)

- Operacional: O HVO pode ser usado puro ou misturado ao diesel convencional em qualquer proporção, sem necessidade de modificações nos motores ou nos sistemas de combustão industrial.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A adoção do diesel verde (*HVO - Hydrotreated Vegetable Oil*) na frota logística do setor de Papel & Celulose apresenta nível de esforço baixo a médio, pois não exige adaptações significativas nos motores, sendo compatível com veículos a diesel convencionais. No entanto, o OPEX tende a ser maior, já que o HVO ainda é mais caro que o diesel fóssil, devido ao processo de produção mais complexo e à necessidade de hidrogênio para hidrotreatamento. Em mercados internacionais, o HVO custa aproximadamente três vezes o preço do diesel convencional e cerca de 65% acima do biodiesel puro, além de apresentar consumo volumétrico ligeiramente maior (0,8% a 3,5%). Apesar disso, o aumento do custo por quilômetro rodado pode ser compensado pela obrigação de compensação de emissões em processo de regulamentação na Lei nº 15.042/2024, tornando a adoção mais atrativa em cenários regulados.
- As principais barreiras incluem a baixa escala de produção no Brasil, a existência de poucos pontos de abastecimento e a necessidade de contratos específicos para garantir disponibilidade. Outro desafio é a origem do hidrogênio usado no processo, que atualmente é majoritariamente derivado de fontes fósseis, reduzindo o benefício ambiental líquido se não houver fontes renováveis. Além disso, óleos residuais e gorduras, principais matérias-primas para HVO, são limitados e disputados por outros setores, como biodiesel e indústria química, o que pode pressionar custos e disponibilidade.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.2.3.11 Produzir e/ou Consumir Metanol Verde (TBC:11)

Descrição da Ação

- O metanol verde é uma forma sustentável e renovável de metanol, produzido a partir de fontes não fósseis, CO₂ biogênico capturado e hidrogênio verde, em vez de gás natural ou carvão, como na produção convencional. É um composto químico extremamente versátil, com diversas aplicações além do uso como combustível.
- Na indústria química, o metanol é um insumo essencial na produção de plásticos, borrachas e fertilizantes. A substituição do metanol convencional pela versão verde permite que esses produtos sejam fabricados com menor impacto ambiental, contribuindo para cadeias produtivas carbono neutras. Essa transição representa um avanço significativo na descarbonização da indústria pesada, tradicionalmente associada a altos níveis de poluição.
- Além disso, o metanol verde também desempenha um papel relevante no armazenamento de energia. Ele pode ser utilizado como portador de hidrogênio, facilitando o transporte e a estocagem desse elemento, ou diretamente em células a combustível, oferecendo uma alternativa eficiente e limpa para geração de eletricidade. Essa versatilidade posiciona o metanol como um componente-chave na transição energética, conectando setores distintos em torno de uma mesma solução sustentável.
- No setor de Papel & Celulose, as fábricas de celulose principalmente, têm elevado potencial para a produção de hidrogênio verde e metanol verde, em virtude da geração excedente de energia elétrica renovável e das emissões de CO₂ predominantemente de origem não fóssil que saem das chaminés das caldeiras de biomassa e de recuperação.
- Esse carbono biogênico pode ser capturado via tecnologia BECCS ("Bioenergy with carbon capture and storage") para

posterior produção de combustíveis sintéticos, o que pode ser uma nova oportunidade estratégica de diversificação dos negócios para o setor, tanto para uso interno nas próprias fábricas ou uso na sua própria cadeia logística, bem como comercialização externa. O uso de metanol verde no transporte marítimo, principalmente para exportação de celulose, é uma alternativa que tem sido estudada pelas operadoras dessas atividades.

Forma de Mitigação

- A produção de metanol verde no setor contribui para a descarbonização ao aproveitar o excedente de energia renovável e emissões de CO₂ predominantemente de origem não fóssil para gerar biocombustíveis, substituindo insumos fósseis. Essa ação reduz emissões diretas ao utilizar metanol verde como combustível renovável em caldeiras e fornos de cal, reduzindo o consumo de óleo combustível ou gás natural; emissões indiretas associadas à geração de vapor e energia elétrica, caso parte da energia seja suprida por combustíveis renováveis; e contribui para a mitigação das emissões da cadeia de valor, ao oferecer alternativas de baixo carbono para indústrias químicas e de transporte, diminuindo a pegada de carbono dos produtos finais.

Importância (Cobenefícios)

- Econômico: produto com alto valor agregado, aceito por setores regulados (ex.: navegação).

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A produção e utilização de metanol verde no setor de Papel & Celulose é uma solução inovadora para descarbonização, mas apresenta custo geral alto e elevada complexidade tecnológica. O CAPEX é significativo, pois envolve a instalação de eletrolisadores para geração de hidrogênio verde, sistemas de captura, separação e purificação do CO₂ biogênico, além de unidades de síntese com reatores catalíticos, compressores e trocadores de

calor. O OPEX também é elevado, devido ao consumo energético renovável em larga escala para garantir benefícios climáticos. Indústrias do setor com excedente de energia elétrica gerada podem se beneficiar nesse sentido. Cita-se ainda custos operacionais para manutenção de sistemas de alta pressão e controle rigoroso da qualidade do metanol.

- Além disso, há desafios regulatórios relacionados à certificação do produto como "verde" e à falta de incentivos claros para combustíveis sintéticos. A competitividade frente a combustíveis fósseis e outras rotas bioenergéticas consolidadas (como etanol e biodiesel) também é um entrave.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.2.3.12 Produzir e/ou Consumir Amônia Verde (TBC.12)

Descrição da Ação

- A amônia verde desponta como uma inovação estratégica na busca por soluções sustentáveis para os desafios climáticos. Produzida a partir de hidrogênio verde, obtida pela eletrólise da água com o uso de fontes renováveis como solar, eólica e hídrica, ela substitui o hidrogênio fóssil derivado do gás natural ou carvão, eliminando as emissões de carbono associadas à produção convencional de amônia.
- A amônia é amplamente utilizada na produção de fertilizantes nitrogenados, na indústria química (plásticos, explosivos, têxteis), como vetor de transporte de hidrogênio e como combustível alternativo para o setor marítimo.
- Por ser mais fácil de armazenar e transportar do que o hidrogênio puro, a amônia verde pode ser reconvertida em hidrogênio ou utilizada diretamente como combustível, consolidando-se como um elo crucial na logística energética global. No transporte marítimo, por exemplo, ela surge como uma alternativa promissora ao bunker fóssil, com emissões nulas de CO₂ na queima e aproveitamento de infraestrutura já existente. Além disso, como transportadora de hidrogênio, a amônia verde viabiliza o comércio internacional de energia limpa, permitindo que países com abundância de fontes renováveis exportem hidrogênio de forma eficiente e segura.
- Na agricultura, permite a produção de fertilizantes com emissões quase zero, reduzindo a pegada de carbono sem comprometer a produtividade, um fator essencial diante da crescente demanda por alimentos sustentáveis. Já na indústria química e energética, a amônia verde pode substituir o gás natural como insumo ou combustível em diversos processos, contribuindo para a descarbonização de setores de difícil eletrificação.
- Apesar do enorme potencial, a amônia

verde ainda enfrenta desafios importantes: o alto custo da eletrólise, a necessidade de ampliar a escala industrial, o controle das emissões de NOx durante a queima e a urgência de regulamentações e certificações que assegurem sua origem renovável. No entanto, sua capacidade de atuar em múltiplos setores críticos, seu elevado potencial de abatimento de carbono e a viabilidade tecnológica já demonstrada em projetos piloto tornam a amônia verde uma ferramenta indispensável na transição energética global.

- No setor de Papel & Celulose, as fábricas de celulose principalmente, têm elevado potencial para a produção de hidrogênio verde, e consequentemente, são potenciais produtoras de amônia verde. A produção de combustíveis sintéticos pode ser uma nova oportunidade estratégica de diversificação dos negócios para o setor, tanto para uso interno nas próprias fábricas ou uso na sua própria cadeia logística, bem como comercialização externa. O uso de amônia no transporte marítimo, principalmente para exportação de celulose, é uma alternativa que tem sido estudada pelas operadoras dessas atividades.

Forma de Mitigação

- A produção de amônia verde no setor contribui para a descarbonização ao aproveitar o excedente de energia renovável para gerar biocombustíveis, substituindo insumos fósseis. Essa ação reduz emissões indiretas ao disponibilizar amônia verde como combustível renovável para indústrias químicas e de transporte; e contribui para a mitigação das emissões da cadeia de valor, ao oferecer alternativas de baixo carbono, diminuindo a pegada de carbono dos produtos finais.

Importância (Cobenefícios)

- Econômico: pode ser usada como combustível para navios, insumo químico e fertilizante, além de reduzir dependência de gás natural importado.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A produção de amônia verde é considerada uma das rotas mais promissoras para descarbonização industrial, mas apresenta custo geral alto e elevada complexidade tecnológica. O CAPEX é significativo, pois envolve eletrolisadores para geração de hidrogênio verde, sistemas de separação de nitrogênio do ar (via processos criogênicos ou PSA) e unidades de síntese adaptadas ao processo Haber-Bosch, além de infraestrutura robusta para transporte e armazenamento seguro devido ao risco tóxico da amônia. O OPEX também é elevado, principalmente pelo consumo energético e manutenção de sistemas de alta pressão e temperatura, embora melhorias na eficiência dos eletrolisadores e redução no custo da energia renovável possam tornar a produção mais competitiva nos próximos anos.
- As principais barreiras incluem alto investimento inicial, complexidade operacional e dependência de energia renovável para garantir que o hidrogênio seja verde. A produção requer fontes estáveis de CO₂ biogênico e hidrogênio verde, cuja disponibilidade ainda é limitada no Brasil. Além disso, há desafios regulatórios relacionados à certificação do produto como "verde" e à segurança no transporte e armazenamento, que demanda tanques criogênicos e sistemas de contenção rigorosos. Outro entrave é a competição com rotas bioenergéticas mais maduras, como etanol e biodiesel, e a necessidade de contratos de longo prazo para viabilizar economicamente a produção. A ausência de incentivos regulatórios claros e a limitação de infraestrutura logística também dificultam a expansão dessa solução.

Tipo de Ação

- Impactante.



1.2.2.3.13 Incentivar o Uso de Caminhões com Motor Bicombustível Diesel-Etanol (TRA.01)

Descrição da Ação

- Esta ação de mitigação visa reduzir as emissões de gases de efeito estufa associadas ao transporte rodoviário de insumos, madeira, produtos intermediários e produtos finais no setor de papel e celulose.
- Considerando que a logística representa uma parcela significativa das emissões do Escopo 1 e, em muitos casos, do Escopo 3 das empresas do setor, a adoção de tecnologias veiculares mais limpas constitui uma estratégia relevante para a descarbonização da cadeia de valor.
- Os caminhões com tecnologia bicombustível diesel-etanol permitem a substituição parcial do óleo diesel por etanol combustível, reduzindo o consumo de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, as emissões de CO₂ de origem fóssil. No contexto brasileiro, essa alternativa apresenta elevado potencial de mitigação, uma vez que o etanol é um biocombustível amplamente disponível, de fonte renovável e com menor intensidade de carbono ao longo de seu ciclo de vida, especialmente quando produzido a partir da cana-de-açúcar.

Forma de Mitigação

- O uso de caminhões com motor bicombustível diesel-etanol impulsiona a descarbonização no setor de celulose e papel porque reduz significativamente as emissões associadas ao transporte, que é uma parcela relevante do Escopo 1 e 3 das empresas do setor. O etanol, por ser um biocombustível renovável com menor intensidade de carbono que o diesel, permite substituir parte do combustível fóssil por uma alternativa de menor impacto climático, diminuindo a pegada de carbono por quilômetro rodado, especialmente no contexto brasileiro, onde há ampla disponibilidade desse biocombustível.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: menor emissão de outros poluentes atmosféricos (principalmente NO₂ e material particulado), melhorando a qualidade do ar.
- Econômico: caminhões bicombustíveis podem operar com diesel ou etanol, garantindo maior segurança contra variações de preço ou disponibilidade.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O incentivo ao uso de caminhões com motor bicombustível diesel-etanol apresenta um nível de esforço alto, pois envolve inovação tecnológica, adaptação da cadeia logística e articulação com fornecedores e fabricantes.
- A maior disponibilização de caminhões com motor bicombustível diesel etanol enfrenta ainda barreiras tecnológicas e econômicas, como a baixa escala de produção, a maturidade ainda limitada da tecnologia e o custo inicial mais elevado em comparação aos veículos convencionais. Cabe às empresas do setor a decisão em apoiar as empresas fabricantes desses veículos, por exemplo, via testes de desempenho e segurança, renovação gradual da frota própria, estabelecimento de critérios ambientais para transportadoras contratadas e do desenvolvimento de projetos-piloto em rotas estratégicas.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.2.2.3.14 Produzir e/ou Consumir Hidrogênio de Baixo Carbono (TRA.02)

Descrição da Ação

- O hidrogênio ganhou maior relevância na estratégia de energia e de clima de diversos países, inclusive do Brasil, principalmente, por oferecer uma alternativa para setores de difícil abatimento de emissões de carbono e por se constituir também em um vetor de energia, possibilitando o seu armazenamento e favorecendo o acoplamento do setor de energia aos setores de indústria e transporte. Nos transportes leves, o hidrogênio pode ter papel importante, trazendo mais uma possibilidade tecnológica para a descarbonização de emissões de GEE devido ao consumo de energia em veículos, seja diretamente por meio de células a combustível ou, indiretamente, por meio de combustíveis sintéticos (MME, 2022).
- A aceleração do desenvolvimento do mercado de hidrogênio de baixo carbono trará uma série de oportunidades de negócios (para petróleo e gás, renováveis, biocombustíveis, nuclear e outras indústrias), já que existem diferentes rotas tecnológicas e insumos para a sua produção (MME, 2022).

Forma de Estruturar

- No setor de Papel & Celulose, as fábricas de celulose, principalmente, têm elevado potencial para a produção de hidrogênio verde, em função da geração excedente de energia elétrica renovável.
- O hidrogênio produzido nesse setor pode ser utilizado internamente (por exemplo, nos fornos de cal) ou comercializado. A produção de combustíveis sintéticos a partir de gás carbônico biogênico, abundante nas fábricas de celulose, também é uma alternativa.
- Ainda, o oxigênio gerado na produção de hidrogênio verde pode ser utilizado no processo produtivo da celulose, mais especificamente, deslignificação, branqueamento, oxidação do licor branco e planta de peróxido de hidrogênio.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: Redução significativa de outros poluentes atmosféricos, visto que emissões de NO_x, SO_x e material particulado são quase nulas, melhorando a qualidade do ar nas áreas industriais.
- Econômico: Competitividade futura, visto que projeções indicam queda com escala e incentivos, tornando o hidrogênio competitivo frente a combustíveis fósseis. Potencial de renda adicional com a obtenção de créditos de carbono em mercados regulados e voluntários.
- Operacional: Permite armazenar energia renovável em forma química, garantindo segurança energética e flexibilidade operacional em períodos de alta demanda. Além disso, hidrogênio pode ser usado para gerar calor de alta temperatura, essencial em processos de secagem e cozimento da celulose, onde eletrificação é difícil.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- Apesar de seu imenso potencial, a transição para uma economia de hidrogênio enfrenta desafios significativos, particularmente em termos de custo, tornando necessárias ações estratégicas e cooperação internacional para superar esses obstáculos e realizar todo o potencial do hidrogênio. Atualmente, o hidrogênio é produzido principalmente a partir de gás (denominado hidrogênio cinza) e carvão (denominado hidrogênio preto). Embora os custos atuais de produção permaneçam altos, prevê-se uma redução de custos até 2030 para o hidrogênio verde. Para avaliar a competitividade deste mercado, é crucial considerar os custos do carbono por meio dos diferentes mecanismos de mercado de carbono.
- Nos setores em que há pouca ou nenhuma alternativa ao uso de hidrogênio, os investimentos relevantes serão mandatórios nesse tipo de combustível.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.2.3 Adaptação Climática em prol da Mitigação Climática

De acordo com o IPCC, a adaptação à mudança do clima é o processo de ajuste de sistemas naturais e humanos ao comportamento do clima no presente e no futuro e seus efeitos, buscando reduzir e evitar potenciais danos e explorar oportunidades apresentadas pela mudança do clima.

Contudo, essas ações de preparo dos ecossistemas e comunidade para os efeitos das mudanças climáticas também ajudam a reduzir as emissões de gases de efeito estufa (mitigação).

No setor de Papel & Celulose, altamente dependente de ativos florestais e recursos hídricos, a adaptação climática surge como um pilar estratégico para garantir resiliência, continuidade operacional e competitividade

em um cenário de incertezas.

Este capítulo aborda um conjunto de ações estruturantes voltadas à redução da vulnerabilidade e ao fortalecimento da capacidade adaptativa das empresas frente aos impactos climáticos. Entre as medidas destacam-se a diversificação genética florestal para aumentar a resistência a climas extremos e pragas, a priorização de áreas com menor risco climático para expansão da base florestal, o monitoramento de bacias hidrográficas para assegurar disponibilidade hídrica, e a adequação de sistemas de drenagem para enfrentar enchentes. Também são exploradas estratégias complementares, como planos de contingência e contratação de seguros climáticos.



Figura 43: Sobrevo das áreas afetadas pelas chuvas na Região Metropolitana de Porto Alegre. Fonte: Stuckert (2024).

1.2.3.1 Diversificar Genética Florestal para Aumentar a Resiliência a Climatas Extremos e Pragas (ADP.01)

Descrição da Ação Forma de Estruturar

- A ação consiste em “realizar diversificação genética florestal para aumentar a resiliência a climas extremos e pragas”, ou seja, ampliar a variabilidade genética utilizada no plantio, combinando com diferentes tolerâncias a estresses hídricos/ térmicos e resistência a pragas e doenças.
- Na prática, isso envolve um portfólio de genótipos adaptados a microclimas e sítios distintos, uso de híbridos interespecíficos, rotação e mosaico, enriquecimento com novas fontes genéticas e programas de melhoramento contínuo. O resultado esperado é maior resiliência operacional, redução de perdas em eventos extremos e menor pressão seletiva que favorece surtos de pragas.

Forma de Adaptação

- Esta ação reduz perdas florestais causadas por eventos climáticos ou biológicos (pragas), mantendo o sequestro de carbono das florestas e garantindo a estabilidade do sequestro de CO₂.

Importância (Cobenefícios)

- Econômico: maior probabilidade de conter indivíduos resistentes a pragas e patógenos, reduzindo o risco de perdas em larga escala
- Operacional: estabilidade da produtividade, maior estabilidade da produção de madeira e biomassa ao longo do tempo, mesmo sob condições ambientais adversas.
- Ambiental: aumenta a saúde das árvores, evitando o acúmulo de genes deletérios que podem surgir em populações geneticamente homogêneas.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- Requer maior complexidade operacional, a

gestão de florestas geneticamente diversas exige monitoramento mais detalhado, especialmente em relação ao desempenho de diferentes genótipos em distintos ambientes. Além disso, a diversidade pode resultar em variações no crescimento, forma e qualidade da madeira, o que pode dificultar o planejamento industrial e a colheita mecanizada.

- Entre as barreiras, pode-se destacar o custo e tempo de desenvolvimento, programas de diversificação genética e melhoramento florestal exigem investimentos de longo prazo, infraestrutura de pesquisa e testes de campo em múltiplas regiões.
- A indústria de papel e celulose tradicionalmente valoriza uniformidade e previsibilidade, o que pode entrar em conflito com a variabilidade genética em campo.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.2.3.2 Priorizar Áreas com Menores Riscos Climáticos para Ampliação da Base Florestal (ADP.02)

Descrição da Ação

- Priorizar áreas de menor risco climático para ampliar a base florestal é uma estratégia de redução de volatilidade produtiva, proteção de ativos e descarbonização operacional. Em termos práticos, significa direcionar novos plantios (e expansões) para sítios com maior resiliência edafoclimática— melhor balanço hídrico, menor frequência de extremos (secas prolongadas, geadas, ondas de calor), menor suscetibilidade a incêndios e pragas— combinando zonas agroclimáticas e avaliação de risco multivariável.
- Uma consequente ação do mapeamento de riscos climáticos nas unidades produtivas é a possibilidade de escolher os locais para expansão ou até remanejamento da base florestal para áreas com menor possibilidade de impactos climáticos.

Forma de Adaptação

- Priorizar áreas com menor risco climático para expansão florestal contribui para a descarbonização de forma direta e indireta: reduz as emissões por perdas, garante maior fixação do carbono, menor consumo de fertilizantes e previne incêndios florestais.

Importância (Cobenefícios)

- Econômico: Minimiza os impactos de eventos extremos (secas prolongadas, geadas, vendavais), que podem comprometer a produtividade florestal e causar prejuízos significativos.
- Operacional: garante maior segurança no fornecimento de matéria-prima e áreas com menor risco climático tendem a ter maior disponibilidade hídrica e menor estresse térmico, o que melhora a eficiência do uso da água e dos insumos.
- Ambiental: florestas mais resilientes mantêm sua capacidade de sequestro de

carbono ao longo do tempo, contribuindo para os compromissos climáticos do setor.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- Áreas com menor risco climático geralmente coincidem com zonas agrícolas de alta produtividade, o que pode gerar conflitos de uso do solo e elevar os custos de aquisição. A disponibilidade de áreas com baixo risco climático pode ser restrita, especialmente em regiões já ocupadas por outras atividades econômicas.
- Além disso, exige investimentos em geotecnologias, modelagem climática e análise de risco, além de monitoramento contínuo para atualização dos dados.
- A priorização de áreas com menor risco pode levar à concentração das plantações em determinadas regiões, aumentando a vulnerabilidade a pragas e doenças específicas.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.2.3.3 Monitorar Bacias Hidrográficas para Garantir Disponibilidade Hídrica Futura (ADP.03)

Descrição da Ação

- A ação consiste em “monitorar bacias hidrográficas para garantir disponibilidade hídrica futura”, é uma ação estratégica para garantir a disponibilidade hídrica futura, especialmente em setores intensivos em água como celulose e papel.

Forma de Adaptação

- As mudanças climáticas tendem a modificar os padrões de precipitação por todo o globo terrestre, inclusive o Brasil. Regiões mais secas e outras mais úmidas, enquanto eventos climáticos críticos, tendem a ter sua frequência aumentada. Dados que as empresas do setor de Papel & Celulose dependem do recurso água, elas necessitam monitorar as localidades das suas operações.

Importância (Cobenefícios)

- Operacional: assegura o abastecimento de água para processos industriais e florestais, que são altamente dependentes desse recurso, apoia decisões estratégicas de expansão e permite a adaptação das operações industriais e florestais
- Ambiental: possibilita o uso racional da água, evitando conflitos com outros usuários e promovendo a sustentabilidade da bacia e permite identificar alterações na qualidade e quantidade da água, acarretando ações corretivas

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- Esta ação requer alto custo de implementação e manutenção, exige investimentos em estações de monitoramento, sensores, análises laboratoriais, sistemas de dados e equipes técnicas especializadas.
- A interpretação dos dados requer conhecimento técnico em hidrologia,

geoprocessamento e modelagem ambiental, o que pode demandar parcerias com instituições de pesquisa.

- Monitorar toda a bacia com precisão pode ser difícil, especialmente em áreas extensas ou de difícil acesso. A escolha inadequada de pontos de amostragem pode comprometer a qualidade dos dados.
- A eficácia do monitoramento depende da articulação com órgãos públicos e comitês de bacia, o que pode ser desafiador em regiões com baixa governança hídrica.
- Os benefícios do monitoramento são de longo prazo e podem não ser imediatamente percebidos, o que dificulta sua priorização em contextos de restrição orçamentária.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.2.3.4 Adequar Sistemas de Drenagem para Eventos Climáticos Extremos (enchentes) (ADP.04)

Descrição da Ação

- A ação consiste em “adequar sistemas de drenagem para eventos climáticos extremos”, ou seja, significa adaptar a infraestrutura de manejo de águas pluviais para suportar volumes muito acima da média, decorrentes de chuvas intensas e enchentes cada vez mais frequentes devido às mudanças climáticas. Essa adesão envolve ampliar a capacidade de canais, galerias e reservatórios, e adotar tecnologias de monitoramento e alerta para prevenir alagamentos.
- O objetivo é reduzir riscos de danos às operações, proteger ativos e comunidades, e garantir a continuidade produtiva, evitando impactos econômicos e ambientais. Além disso, essa ação contribui para a resiliência climática da empresa, alinhando-se às metas de adaptação e mitigação previstas em políticas ESG e planos de descarbonização.

Forma de Adaptação

- Esse tipo de ação evita danos físicos às infraestruturas industriais e ativos florestais, prevenindo interrupções das operações, reconstruções de infraestruturas ou replantios e consequentes emissões de GEE associadas.

Importância (Cobenefícios)

- Operacional: evita paradas operacionais e perdas produtivas uma vez que sistemas de drenagem eficientes reduzem o risco de alagamentos e inundações
- Econômico: Minimiza danos a equipamentos, estruturas e estoques, e paradas operacionais geram perdas econômicas.
- Ambiental: contribui para a mitigação de GEE ao evitar paradas e reinícios de equipamentos.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A modernização dos sistemas de drenagem pode exigir obras civis significativas, como instalação de canais, bacias de contenção, drenos subterrâneos e sistemas de bombeamento, acarretando alto custo de implementação. Sistemas de drenagem exigem monitoramento e limpeza periódica para manter sua eficiência, o que implica custos operacionais adicionais.
- A adequação deve considerar topografia, tipo de solo, regime de chuvas, impermeabilização do solo e ocupação do entorno, exigindo estudos técnicos detalhados.
- Os benefícios econômicos e ambientais podem levar anos para se materializar, o que pode dificultar a priorização em contextos de restrição orçamentária.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.2.3.5 Fortalecer Estruturas Contraventos Fortes e Temperaturas Elevadas (ADP.05)

Descrição da Ação

- As mudanças climáticas têm intensificado eventos extremos, como tempestades com ventos mais fortes e ondas de calor prolongadas. Esses fenômenos representam riscos significativos para edificações, infraestruturas e sistemas produtivos, podendo causar danos materiais, interrupções de operação e ameaças à segurança das pessoas. Nesse contexto, o fortalecimento estrutural contraventos fortes e temperaturas elevadas surge como uma medida essencial de adaptação climática, garantindo maior resistência e durabilidade frente às novas condições ambientais. Essa ação envolve desde a escolha de materiais mais robustos e resistentes ao calor até o aprimoramento de técnicas construtivas que minimizem vulnerabilidades, contribuindo para a redução de impactos e para a resiliência das comunidades.

Forma de Adaptação

- Esse tipo de ação evita danos físicos às infraestruturas industriais e ativos florestais, prevenindo interrupções das operações, reconstruções de infraestruturas e consequentes emissões de GEE associadas.

Importância (Cobenefícios)

- Operacional: evita paradas operacionais por danos em estruturas e equipamentos
- Econômico: minimiza custos de reparos de estruturas e equipamentos, além de paradas operacionais que geram perdas econômicas.
- Ambiental: contribui para a mitigação de GEE ao evitar paradas e reinícios de equipamentos.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- Essa ação envolve instalações complexas,

grandes áreas e equipamentos críticos, exigindo engenharia especializada e possíveis paradas programadas. As principais barreiras incluem custos elevados, complexidade operacional e integração com sistemas existentes.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.2.3.6 Preparar Planos de Contingência para Interrupções Causadas por Eventos Climáticos (ADP.06)

Descrição da Ação

- Com a intensificação das mudanças climáticas, eventos extremos como tempestades, enchentes, ondas de calor e secas prolongadas têm se tornado mais frequentes, impactando diretamente operações industriais e cadeias de suprimento. A elaboração de planos de contingência é uma medida estratégica para garantir a continuidade operacional e reduzir riscos financeiros, ambientais e sociais. Esses planos devem contemplar a identificação de vulnerabilidades, definição de protocolos de resposta rápida, comunicação eficiente, alternativas logísticas e estratégias para proteção de ativos críticos.
- Além disso, é essencial integrar esses planos aos sistemas de gestão de riscos e treinar equipes para atuação em cenários emergenciais, assegurando maior resiliência e capacidade de adaptação frente às incertezas climáticas.

Forma de Adaptação

- Estabelecer previamente procedimentos de emergências em situações de eventos climáticos, permite que as empresas possam prevenir ou diminuir os impactos negativos sofridos em tais situações, prevendo as melhores saídas para que tais eventos afetem o menos possível suas operações e seu capital (estruturas, pessoas).

Importância (Cobenefícios)

- Operacional: garante a continuidade da produção com menor vulnerabilidade
- Econômico: minimiza prejuízos e custos de danos por eventos extremos
- Ambiental: evita paradas prolongadas que poderiam levar ao uso de soluções emergenciais mais emissoras

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A elaboração de planos de contingência para eventos climáticos apresenta um nível de esforço alto, pois requer análise detalhada de riscos, identificação de vulnerabilidades e integração com processos já existentes. Esse trabalho envolve múltiplas áreas da empresa, como produção, logística, segurança e meio ambiente, além de demandar tempo para desenvolvimento, testes e treinamentos.
- Entre as principais barreiras estão a falta de dados climáticos confiáveis, a dificuldade de integração com sistemas de gestão atuais, os custos relacionados a tecnologia e capacitação, e a necessidade de engajamento interno.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.2.3.7 Contratar Seguro Climático (ADP.07)

Descrição da Ação

- A ação consiste em “contratar seguro climático”, é um instrumento financeiro que protege empresas, produtores ou comunidades contra perdas econômicas causadas por eventos extremos relacionados às mudanças climáticas, como secas prolongadas, enchentes, geadas, tempestades ou incêndios florestais. Ele funciona como um mecanismo de gestão de risco, garantindo indenização quando condições climáticas previamente definidas são atingidas, reduzindo impactos financeiros e operacionais.
- Esse tipo de seguro é cada vez mais usado em setores como silvicultura, agricultura e energia, pois ajuda a manter a continuidade das operações, reduzir riscos financeiros e apoiar estratégias de resiliência climática.

Forma de Adaptação

- Embora não reduza emissões diretamente, incentiva a gestão ativa de riscos climáticos e pode viabilizar recursos financeiros necessários em momentos de emergências climáticas para minimizar os impactos decorrentes (por exemplo, em incêndios florestais oriundos de estiagens prolongadas e altas temperaturas, necessitando de recursos para combate ao fogo), o que pode sim evitar emissões de GEE desnecessárias.

Importância (Cobenefícios)

- Econômico: proteção financeira contra perdas catastróficas, garante indenização por danos causados por eventos climáticos extremos, além do maior acesso a financiamentos
- Operacional: permite a continuidade das operações industriais e do fornecimento de matéria-prima

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A contratação de um seguro climático requer uma análise de riscos, definição de parâmetros e negociação com seguradoras. A empresa precisa mapear vulnerabilidades climáticas (secas, enchentes, incêndios), integrar dados históricos e projeções, e escolher entre modelos tradicionais ou paramétricos. Também é necessário alinhar a cobertura com a estratégia de gestão de riscos e ESG, além de garantir governança interna para monitoramento e acionamento do seguro.
- O custo dos prêmios pode ser elevado, especialmente em regiões com alta frequência de eventos extremos, tornando a adesão menos atrativa para algumas empresas.
- Além disso, a definição de índices climáticos confiáveis para seguros paramétricos exige dados robustos e modelagem avançada, o que aumenta a complexidade técnica e demanda investimentos em sistemas de monitoramento.
- Outro desafio é a percepção equivocada de que se trata apenas de um custo adicional, e não de uma ferramenta estratégica para mitigação de riscos e fortalecimento da resiliência climática.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.2.4 Circularidade e Uso Racional dos Recursos Naturais

Espera-se que a população mundial continue crescendo nos próximos 50 ou 60 anos, atingindo um pico de cerca de 10,3 bilhões de pessoas em meados da década de 2080, acima dos 8,2 bilhões em 2024. Após o pico, a população global deve começar a diminuir gradualmente, retornando a 10,2 bilhões de pessoas até o final do século (ONU, 2024).

Atualmente, mais de 4 bilhões de pessoas – mais da metade da população mundial vive em áreas urbanas – cada vez mais em cidades altamente densas. Nas perspectivas de urbanização mundial da ONU estima-se que as parcelas urbanas aumentem nas próximas décadas. Até 2050, projeta-se que 1 em cada 7 pessoas em todo o mundo viverá em áreas urbanas (*Our World in Data*, 2024).

Em termos de PIB, que retrata o crescimento da economia, diretamente ligada ao consumo, nota-se que o PIB global teve um crescimento superior a 9 vezes entre 1960 e 2023 (apenas 63 anos), passando de 11,07 trilhões (1960) para 93,35 trilhões (2023) (Banco Mundial, 2025).

Além disso, o processo produtivo atual é baseado no modelo de economia linear, baseado na extração, produção, consumo e descarte. Assim, em um sistema linear, o crescimento econômico depende do consumo de recursos finitos. Em 2023, o relatório *Circle Economy's Circularity Gap Report* revelou que nosso mundo é apenas 7,2% circular, deixando uma enorme Lacuna de Circularidade. Isso significa que mais de 90% dos materiais são desperdiçados, perdidos ou permanecem indisponíveis para reutilização por anos, e que o mundo depende quase exclusivamente de materiais virgens (CGR, 2023).

O cenário atual com aumento da população, crescimento da urbanização, aumento do consumo e baseado no processo produtivo linear está gerando um excesso na demanda por recursos naturais. Desde 1970, a humanidade tem estado em excesso ecológico (*ecological overshoot*), o que isso significa uma demanda de recursos que excede a biocapacidade da Terra em fornecer estes recursos. Atualmente, a humanidade demanda o equivalente a 1,75

planeta terra para fornecer os recursos que utilizamos e absorver os nossos resíduos (*Global Footprint Network*, 2025).

Os esforços atuais para combater as mudanças climáticas têm focado principalmente no papel essencial da energia renovável e das medidas de eficiência energética. No entanto, cumprir as metas climáticas também exigirá o enfrentamento de 45% de emissões restantes associadas à fabricação de produtos (Fundação Ellen MacArthur, 2019), ou seja, ao uso eficiente dos recursos naturais.

Em suma, nossa economia linear atual está nos conduzindo para um aumento de 3 a 6 °C até 2044. Se os países do Acordo de Paris cumprirem seus compromissos de redução de emissões, teremos aumento de 2 a 3 °C. Se o índice de circularidade global for dobrado (17%), manteremos a temperatura global inferior a 2°C (CGR, 2021). Desta forma, o uso eficiente dos recursos naturais é fundamental no processo de combate às mudanças climáticas.

Assim, neste capítulo são apresentadas soluções técnicas relacionadas a circularidade e ao uso eficiente dos recursos. Na figura abaixo, alimentos, aço, cimento, plástico e alumínio são exemplos de produtos abortados no artigo.

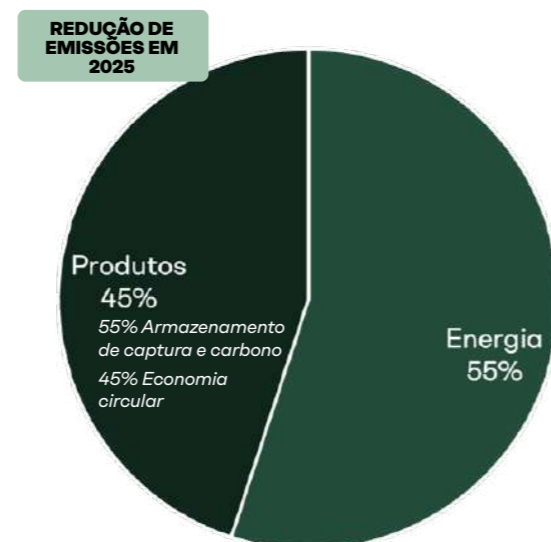


Figura 44 - Modo de enfrentamento das emissões negligenciadas. Fonte: Adaptado de Fundação Ellen MacArthur (2019).





1.2.4.1 Aumentar o Uso de Aparas de Papel (CTE.01)

Descrição da Ação

- As aparas de papel são sobras ou resíduos gerados durante a fabricação, corte, impressão ou uso de papel e papelão. Podem ser divididas em três categorias, pré-consumo (ou aparas industriais), geradas durante o processo de fabricação ou corte de papel em gráficas e indústrias; pós-consumo, originadas após o uso pelo consumidor final (jornais, caixas de papelão, cadernos, etc.) ou misturadas ou mistas: mistura de diferentes tipos de aparas ou papéis, com diferentes níveis de pureza.
- A produção de papel reciclado a partir de aparas tem menor custo do que a produção a partir da celulose virgem e mais acessível, especialmente em localidades com ampla coleta seletiva. O consumo de água, energia elétrica e produtos químicos é significativamente menor. Cabe destacar que há limites técnicos para a porcentagem de aparas que pode compor determinados tipos de papel, especialmente aqueles que exigem maior resistência, alvura ou requisitos sanitários específicos. Além disso, é também importante reforçar que a reciclabilidade da fibra é limitada: após sucessivos ciclos, as fibras se tornam mais curtas e perdem propriedades físicas, tornando o material inviável para novas reciclagens.
- Em tempos de mudanças climáticas, o uso de aparas de papel diversifica as fontes de matéria-prima, tornando a cadeia mais resiliente a crises climáticas, que podem impactar a produtividade das florestas plantadas.
- Como mencionado, os esforços atuais para combater as mudanças climáticas têm focado principalmente na transição energética, porém cumprir as metas climáticas também exigirá o enfrentamento de 45% de emissões restantes associadas à fabricação de produtos (Fundação Ellen MacArthur, 2019), ou seja, ao uso eficiente dos recursos naturais.
- Neste contexto, o uso de aparas é uma

excelente alternativa de matéria-prima para as fábricas de papel, da mesma forma que é fundamental no processo de combate às mudanças climáticas no setor de Papel & Celulose.

- Além disso, o mercado de aparas potencializa a geração de empregos, inclusão de catadores, fortalecimento e formalização de cooperativas, impulsionamento de toda a cadeia de coleta e triagem de materiais recicláveis. Normalmente envolve ações de educação ambiental nas comunidades, escolas e empresas parceiras.

Forma de Mitigação

- O aumento do uso de aparas contribui para a redução das emissões diretas e indiretas ao diminuir a necessidade de processos intensivos em energia para produção de celulose virgem, incluindo as emissões associadas à cadeia de suprimentos, como menor extração de madeira e transporte de matéria-prima para produção da celulose virgem. Esta prática está alinhada aos conceitos de economia circular e otimização o uso de recursos naturais, o que está diretamente ligado a mitigação das emissões de GEE.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: Promove a circularidade, aproveitando resíduos pós-consumo e pré-consumo, reduzindo a necessidade de celulose virgem e os impactos e emissões atreladas a sua produção e transporte.
- Econômico: Redução de custos com insumos, visto que aparas são, em muitos casos, mais baratas do que a produção de celulose virgem, especialmente em contextos de alta no preço da madeira. Aumenta a taxa de reaproveitamento de resíduos pós-consumo, reduzindo o volume destinado a aterros sanitários (em grande parte municipais), o que reduz custos públicos no gerenciamento de resíduos sólidos. Fortalece o mercado de recicláveis e cria novas oportunidades de negócios e inovação em logística reversa e rastreabilidade.

- Social: A cadeia de aparas envolve milhares de catadores, cooperativas e pequenos fornecedores, promovendo geração de emprego e renda. A valorização das cooperativas de catadores contribui para a redução da informalidade e o fortalecimento de redes locais de economia circular.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- Aumentar o uso de aparas de papel no setor de Papel & Celulose é uma ação de baixo a médio esforço, sendo o custo considerado baixo no CAPEX, dado que não há necessidade de grandes investimentos em equipamentos, e médio no OPEX, devido aos gastos com coleta, triagem e remoção de contaminantes.
- As principais barreiras incluem a complexidade logística para coleta em áreas urbanas dispersas, especialmente com o crescimento do e-commerce, além da necessidade de lidar com aparas contaminadas ou úmidas, que exigem processos adicionais de limpeza. Outro desafio é a concorrência com aparas importadas, que pode desestimular o mercado interno e afetar catadores e aparistas locais, muitos dos quais atuam em condições informais e vulneráveis.
- Além das questões técnicas, existem barreiras sociais relevantes. A cadeia de coleta é fortemente dependente de catadores e cooperativas, que muitas vezes operam sem equipamentos adequados, direitos trabalhistas ou remuneração justa. A formalização e capacitação desses agentes são fundamentais para garantir um fornecimento estável e sustentável de aparas, além de promover inclusão social e melhoria das condições de trabalho. A integração com plataformas digitais e parcerias estratégicas pode ajudar a superar parte dessas barreiras, aumentando a eficiência e a previsibilidade da coleta.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.4.2 Recuperar Aparas de Plástico Misto (CTE.02)

Descrição da Ação

- A pasta de celulose para fabricação de papel pode ser produzida a partir de fibra virgem por meios químicos ou mecânicos ou pode ser produzida a partir de fibras recuperadas de aparas de papel (BAT, 2015).
- As fibras recuperadas tornaram-se uma matéria-prima indispensável para a indústria transformadora de papel, devido ao preço favorável das fibras recuperadas em comparação com fibras de mercado e devido à promoção da reciclagem de resíduos de papel (BAT, 2015).
- O processamento de papel para reciclagem visa, em primeiro lugar, a remoção de componentes não fibrosos (por exemplo, plásticos, metal, madeira, areia) e a eliminação de substâncias prejudiciais, como adesivos, cera ou pequenos pedaços de papel não desintegrado (flocos) ou papel resistente a úmido. Esses rejeitos são removidos da maior forma possível e no estágio mais precoce possível na preparação da polpa. A maioria das impurezas do papel processado para reciclagem acaba como resíduo (BAT, 2015).
- A porcentagem de impurezas no papel para reciclagem aumentou na última década devido ao aumento contínuo da taxa de reciclagem, à tendência para mais embalagens multicomponentes, publicidade de embalagens plásticas fáceis de manusear em revistas e uma coleta combinada de papel para reciclagem junto com outras frações de resíduos (BAT, 2015).
- Entretanto, recentemente foi desenvolvida tecnologia para separar, picar, lavar, secar e prensar o resíduo plástico oriundo das aparas de papel, que foi denominado como aparas de plástico misto.
- Essas aparas de plástico são comercializadas e utilizadas como matéria-prima para a fabricação de diversos tipos

de produtos, tais como solas de sapato, mourões de cerca, telhas ecológicas, decks, paletes, madeira plástica e móveis.

- Essa recuperação dos plásticos evita o envio destes materiais para aterro sanitário, bem como minimiza o consumo recursos naturais de fonte fóssil.

Forma de Mitigação

- A recuperação de aparas de plástico misto contribui para reduzir emissões diretas ao utilizar plásticos como fonte energética em caldeiras, substituindo combustíveis fósseis, além de mitigar emissões associadas à cadeia de suprimentos, evitando a produção de plásticos virgens e reduzindo o volume destinado a aterros. Essa ação fortalece a economia circular e diminui a dependência de combustíveis fósseis.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: promove a circularidade, aproveitando resíduos pós-consumo, reduzindo emissões de GEE por efeito de substituição e impactos correlatos quando plástico recuperado de aparas é usado para substituir plástico de origem fóssil em outros produtos ou como combustível fóssil se utilizado para recuperação energética. Além disso, reduz passivos ambientais.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

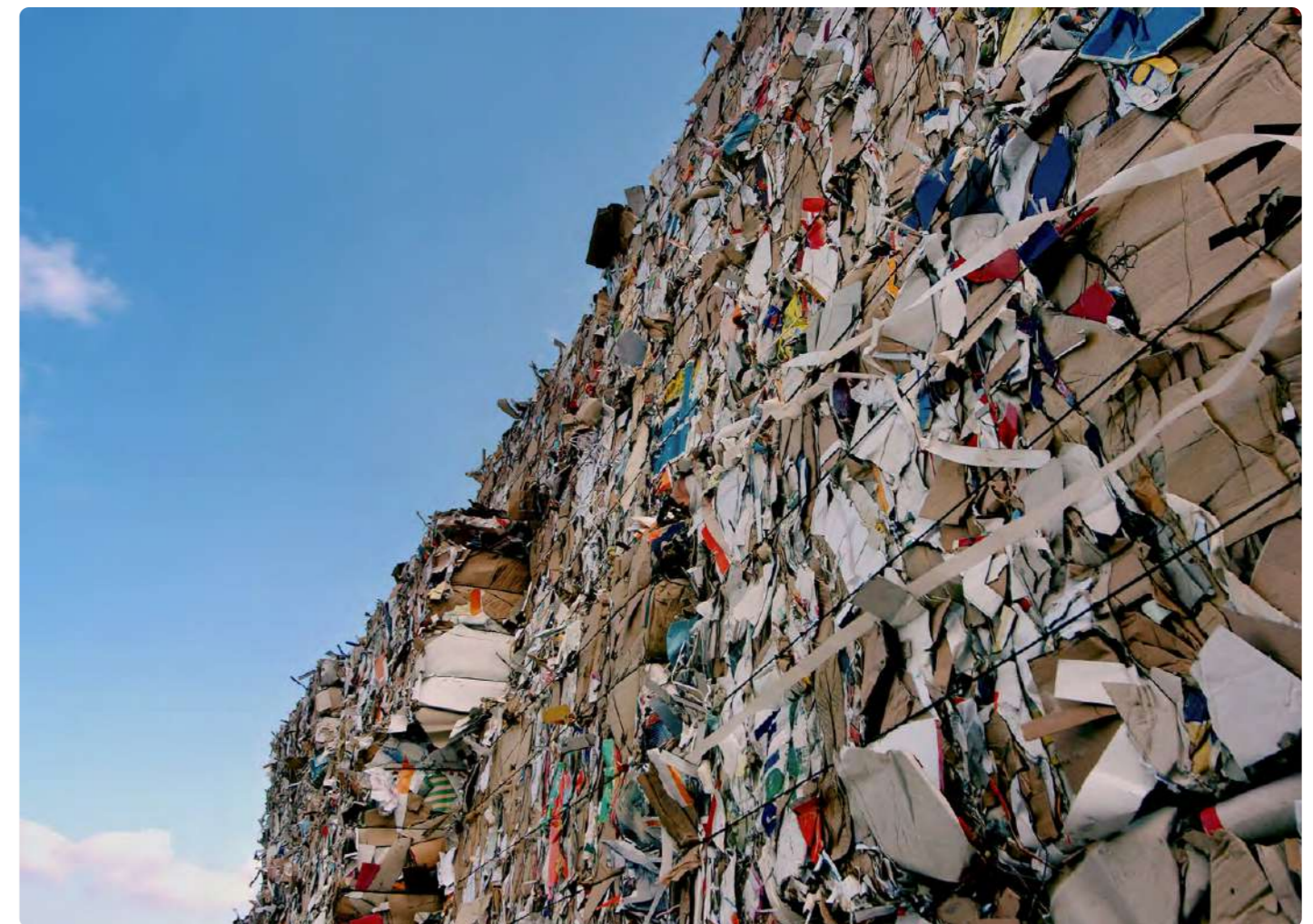
- A recuperação de aparas de plástico misto no setor de Papel & Celulose é uma ação de baixo a médio esforço, pois exige adaptações tecnológicas e processos adicionais para triagem e reaproveitamento. O CAPEX é médio, relacionado à instalação de linhas de extrusão, enquanto o OPEX também é médio, devido aos custos com triagem, limpeza e consumo de energia para extrusão.
- As principais barreiras incluem a heterogeneidade dos resíduos plásticos, que dificulta a padronização do processo, a necessidade de garantir qualidade para aplicações industriais e a logística complexa para coleta e transporte. Além disso, há desafios regulatórios e de mercado, como a falta de incentivos para reciclagem de

plásticos mistos e a concorrência com soluções de descarte mais simples.

- Outro ponto crítico é a gestão adequada dos contaminantes presentes nos resíduos, que pode elevar custos e demandar processos adicionais. A formalização da cadeia de coleta e a capacitação dos agentes envolvidos também são essenciais para garantir eficiência e sustentabilidade, evitando impactos sociais negativos.

Tipo de Ação

- Impactante.



1.2.4.3 Recuperar Potássio das Cinzas da Caldeira de Recuperação para Produção de Sulfato de Potássio (CIN.01)

Descrição da Ação

- No sistema de recuperação de químicos do processo produtivo da celulose Kraft, o licor negro gerado no cozimento da madeira é encaminhado para evaporação e posteriormente para queima na caldeira de recuperação, com a finalidade de recuperar os produtos químicos usados no cozimento.
- Na queima do licor negro na caldeira de recuperação são geradas cinzas contendo diversos componentes, tais como cloreto e potássio (indesejáveis ao processo), sódio e enxofre (desejáveis ao processo), que são arrastados pelos gases de exaustão e coletadas nos precipitadores eletrostáticos, principalmente.
- É prática comum simplesmente purgar parte das cinzas totais coletadas no precipitador eletrostático, mas isso causa uma perda significativa de sulfato de sódio e carbonato de sódio. No entanto, o sódio e o enxofre purgado precisam ser substituídos, portanto, há um custo adicional para produtos químicos de make-up, bem como demanda por novos recursos naturais.
- Desta forma, para recuperar o sódio e o enxofre das cinzas e minimizar os impactos dos elementos não processados tem-se tecnologia de tratamento de cinzas, que remove o cloreto e o potássio das cinzas e recupera o sódio para o processo.
- O cloreto e o potássio removido das cinzas podem ser utilizados para outros usos. O sulfato de potássio pode ser usado como condicionador de solo.

Forma de Mitigação

- Essa ação contribui para reduzir emissões de GEE principalmente pelo efeito de substituição, ao recuperar sódio e o enxofre das cinzas e os enviar de volta ao processo, o que fortalece a economia circular e reduz as emissões para produção e transporte desses produtos químicos como make-up. Além disso, ao se utilizar o sulfato de potássio

como condicionador de solo, há reduções de emissões de GEE associadas à produção convencional (por efeito de substituição).

Importância (Cobenefícios)

- Ambientais: redução do descarte de efluentes salinos, o que evita contaminação das águas superficiais. Promove circularidade ao transformar resíduo em insumo útil.
- Econômicos: redução da dependência de potássio importado (Brasil importa >95%). Receita adicional com venda de fertilizante, visto que a demanda no agronegócio (e na própria silvicultura) é alta.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A recuperação de potássio das cinzas da caldeira de recuperação para produção de sulfato de potássio é uma ação de alto esforço, pois envolve tecnologias complexas e integração com processos já existentes. O custo geral é alto, com CAPEX elevado para instalação de sistemas de evaporação, cristalização e adaptação da caldeira, enquanto o OPEX é médio, devido ao consumo energético para evaporação e manutenção do sistema. As principais barreiras incluem a necessidade de investimentos significativos, disponibilidade de tecnologia especializada, complexidade regulatória para comercialização do sulfato de potássio e gestão de resíduos gerados no processo. Além disso, há desafios técnicos para garantir a pureza do produto e a viabilidade econômica frente ao mercado de fertilizantes.
- A implementação exige integração com a operação da caldeira de recuperação, ajustes no fluxo de cinzas e sistemas de controle para garantir eficiência e segurança. Também é necessário planejamento para armazenagem e transporte do sulfato de potássio, além de parcerias com empresas do setor agrícola para comercialização. A falta de incentivos fiscais e linhas de financiamento específicas pode dificultar a adoção, especialmente em fábricas de menor porte.

Tipo de Ação

- Impactante.



1.2.4.4 Recuperar Enxofre para Produção de Ácido Sulfúrico (CIN.02)

Descrição da Ação

- No processo produtivo da celulose, especialmente no processo Kraft, são gerados gases não condensáveis (GNC), em diversas etapas do processo, que podem ser classificados em dois tipos principais os GNCC (Gases Não Condensáveis Concentrados) que possuem alta concentração e baixo volume, e os GNCD (Gases Não Condensáveis Diluídos) que apresentam baixa concentração e alto volume.
- Os GNCC são gerados principalmente nos estágios de cozimento e evaporação, enquanto os GNCD são gerados principalmente nos estágios de cozimento, evaporação e caustificação (BAT, 2015).
- Esses gases são compostos odorosos, tóxicos e até explosivos, exigindo sistemas de coleta, tratamento e condicionamento para minimizar impactos ambientais e sociais (BAT, 2015).
- Tradicionalmente, para o tratamento dos gases não condensáveis, existem diferentes opções técnicas disponíveis: principalmente incineração na caldeira de recuperação e biomassa, no forno de cal ou um queimador de GNC dedicado equipado com purificador de SO_2 , o que aumenta os níveis de emissão atmosférica.
- Além disso, como opção de back-up aos sistemas de tratamento tradicionais ou para ocasiões transitórias de operação (paradas ou partidas de unidades, quedas de energia, testes, etc.), também são utilizados sistemas de flare ou de incineração.
- Recentemente, foi desenvolvida uma nova tecnologia de conversão desses gases não condensáveis em produtos de maior valor agregado, como ácido sulfúrico (H_2SO_4). Neste caso, o enxofre é recuperado e não há aumento dos níveis de emissão atmosférica da fábrica.

- Nessa nova tecnologia, os GNCC são incinerados, oxidando os compostos totais de enxofre reduzido em SO_2 . Posteriormente, o SO_2 é oxidado em SO_3 , a partir do excesso de oxigênio fornecido pelo ar de combustão da caldeira. Na sequência, o ar de combustão com SO_3 é submetido a uma torre de condensação, na qual o SO_3 reage com H_2O , formando o ácido sulfúrico (H_2SO_4).
- O ácido sulfúrico produzido poderá substituir o ácido comprado em vários estágios do processo, tais como no gerador de dióxido de cloro, na acidificação da polpa no branqueamento, no tratamento de águas de caldeira e no tratamento de efluentes.
- Também existe a possibilidade de produção de bissulfito de sódio.

Forma de Mitigação

- A recuperação de enxofre contribui para a descarbonização do setor de Papel & Celulose ao reduzir emissões diretas e indiretas ao reduzir consumo energético associado ao tratamento de efluentes e purgas químicas, e emissões da cadeia de suprimentos, ao reduzir a necessidade de transporte e compra externa de ácido sulfúrico. Embora a principal redução seja de poluentes atmosféricos (SO_2 e H_2S), a ação também contribui indiretamente para redução de CO_2 equivalente, pois evita processos adicionais de neutralização e transporte externo, alinhando-se a mitigação climática.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: fomento da circularidade, pelo aproveitamento de enxofre, evitando seu descarte. Redução significativa de emissões de TRS e SO_2 .
- Econômico: produção de ácido sulfúrico para uso interno ou venda. Redução de compra de insumos químicos.
- Social: menor impacto odorífero (TRS), melhorando relação com comunidade local.

- Operacional: melhora no controle ambiental e conformidade regulatória.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço é alto, pois envolve a instalação de unidades complexas para oxidação, conversão catalítica e sistemas de controle de emissões. O CAPEX é elevado, devido à necessidade de equipamentos especializados, infraestrutura adicional e integração com processos existentes. Porém há potencial de economia anual significativa pela redução na compra de químicos e menor descarte de resíduos. O OPEX é médio, incluindo custos com manutenção, catalisadores e energia térmica para operação. Apesar do investimento inicial robusto, o retorno financeiro é viabilizado pelo aproveitamento do ácido sulfúrico produzido internamente e pela redução de custos com purgas químicas e tratamento de efluentes.

- Outras barreiras são a complexidade na integração da unidade de recuperação com processos Kraft existentes; a demanda de mão de obra qualificada para operação e manutenção dos sistemas e a necessidade de atendimento às normas ambientais e de segurança para manuseio de compostos sulfurosos e ácido sulfúrico.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.4.5 Recuperar Hidrogênio a partir da Produção de Clorato de Sódio (CIN.03)

Descrição da Ação

- Nas fábricas de celulose, o dióxido de cloro usado no processo de branqueamento é gerado a partir de clorato de sódio comprado ou produzido numa planta específica, dentro da própria fábrica.
- O clorato de sódio é produzido em células eletroquímicas a partir do cloreto de sódio com geração de gás hidrogênio. O clorato é formado através da eletrólise da salmoura.
- Como a energia elétrica utilizada no processo de eletrólise é renovável pode ser utilizado como combustível alternativo no forno de cal ou caldeira em substituição ao combustível fóssil.
- Tradicionalmente, esse hidrogênio era ventilado ou queimado sem aproveitamento energético.
- O processo inovador consiste em capturar, purificar e utilizar esse hidrogênio:
 - Queima em caldeiras para geração de vapor (substituindo gás natural).
 - Uso como combustível limpo em processos internos ou para venda.
 - Em projetos avançados, pode ser integrado à produção de hidrogênio verde para mobilidade ou geração elétrica.

Na eletrólise para produção de clorato de sódio, o hidrogênio gerado é muito puro (quase livre de contaminantes), o que facilita sua utilização em processos químicos avançados.

Esse hidrogênio pode ser usado como matéria-prima para e-metanol (CH₃OH) e e-amônia (NH₃), ambos combustíveis e insumos industriais de baixo carbono, quando combinados com CO₂ capturado (para metanol) ou nitrogênio do ar (para amônia).

Forma de Mitigação

- Essa ação contribui para reduzir emissões diretas ao substituir combustíveis fósseis por hidrogênio recuperado em caldeiras ou processos internos. Caso o hidrogênio seja usado para geração própria de energia, também há reduções de emissões de escopo 2. Cita-se ainda a mitigação das emissões associadas à cadeia de suprimentos, ao reduzir a necessidade de produção e transporte de combustíveis fósseis convencionais.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: aproveitamento de subproduto antes desperdiçado.
- Econômico: menor custo na compra de combustíveis fósseis. Potencial venda de hidrogênio para mobilidade ou indústria química. Potencial integração com projetos de produção de e-metanol e e-amônia.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A recuperação de hidrogênio a partir da produção de clorato de sódio é uma ação de alto esforço, pois envolve tecnologias avançadas para captura, purificação e armazenamento do hidrogênio gerado como subproduto do processo eletrolítico. O custo geral é alto, com CAPEX elevado para instalação de sistemas de separação, compressão e integração com a planta, além de infraestrutura para uso ou comercialização do hidrogênio. O OPEX é médio, relacionado ao consumo energético para purificação e manutenção dos equipamentos. As principais barreiras incluem a necessidade de investimentos significativos, disponibilidade de tecnologia especializada, adequação às normas de segurança para manuseio de hidrogênio, e desafios logísticos para transporte ou utilização interna. Além disso, há questões regulatórias e falta de incentivos fiscais específicos para projetos de hidrogênio verde no Brasil.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.4.6 Recuperar Alumínio e Fósforo do Tratamento de Efluentes Líquidos e de Alumínio do Tratamento de Água (CIN.04)

Descrição da Ação

- O tratamento terciário é normalmente aplicado para remover contaminantes que as etapas anteriores do tratamento (por exemplo, tratamento biológico) não puderam remover totalmente ou parcialmente, como sólidos suspensos totais, DQO, nitrogênio ou fósforo. O tratamento avançado pode incluir técnicas como floculação/precipitação, biofiltração, membranas para filtração avançada, ozonização (BAT, 2015). O tratamento terciário com coagulação química utilizando sais de alumínio ou férricos tem uma grande desvantagem no fato de que o lodo do tratamento químico é difícil de desidratar e descartar.
- Nas fábricas de papel e celulose, o tratamento da água geralmente é realizado para remover sólidos, corantes e substâncias orgânicas, ferro e manganês. Para tratamento químico, a água recebe a adição de produtos químicos apropriados para coagulação e floculação. Em seguida, ocorre a floculação (com adição de outros agentes coagulantes, se necessário) e os flocos formados são separados da fase líquida por clarificação e filtração em areia. Para a floculação, são adicionados coagulantes como o sulfato de alumínio. Outro coagulante comumente usado é o aluminato de sódio (BAT, 2015). Como resultado do processo de tratamento tem-se o lodo, composto basicamente por areias, argila, siltes, por frações de matéria orgânica e por compostos de alumínio proveniente do coagulante utilizado.
- A recuperação de alumínio e fósforo no tratamento de efluentes líquidos e de alumínio no tratamento de água consiste em reaproveitar elementos presentes nos lodos gerados nesses processos, transformando-os em insumos para uso interno ou comercialização. Essa prática utiliza tecnologias de precipitação, solubilização e secagem para separar os componentes, permitindo que o alumínio seja reutilizado em processos industriais e que o fósforo seja destinado à produção de fertilizantes, fortalecendo a economia circular e reduzindo

impactos ambientais.

Forma de Mitigação

- Atualmente, os processos convencionais descartam lodos ricos em alumínio e fósforo, gerando custos para tratamento e disposição. A recuperação desses elementos permite reaproveitamento como insumos para a indústria química ou agrícola, reduzindo a demanda por matérias-primas virgens e fortalecendo a economia circular. Essa ação contribui para reduzir emissões de GEE, ao otimizar processos internos e diminuir perdas químicas, além de emissões da cadeia de suprimentos, ao substituir produtos químicos convencionais (com alta pegada de carbono) por materiais recuperados.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: redução do descarte de metais e nutrientes em corpos d'água.
- Econômico: menor custo com coagulantes e fertilizantes.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A recuperação de alumínio e fósforo no tratamento de efluentes líquidos e de alumínio no tratamento de água é uma ação de baixo a médio esforço, pois utiliza tecnologias conhecidas, mas requer integração com sistemas existentes e ajustes operacionais. O custo geral é baixo a médio, com CAPEX baixo para recuperação no tratamento de água (tanques, reatores, bombas, sistemas de secagem e instrumentação) e CAPEX médio para recuperação no tratamento de efluentes (tanques e sistemas de precipitação e secagem). O OPEX é baixo a médio, envolvendo consumo de produtos químicos, energia elétrica e mão de obra para operação e manutenção. As principais barreiras incluem a necessidade de garantir pureza dos materiais recuperados, gestão de resíduos secundários, adequação às normas ambientais e viabilidade econômica para comercialização dos subprodutos.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.4.7 Reduzir o Uso de Aterro através do Aproveitamento Energético de Lodo do Tratamento de Efluentes Líquidos (CIN.05)

Descrição da Ação

- O lodo gerado no tratamento dos efluentes líquidos do processo de produção de papel e celulose é um dos principais grupos de resíduos. Uma grande quantidade de lodo é gerada no tratamento primário e no tratamento biológico com o método de lodo ativado. As lagoas aeradas geram apenas pequenas quantidades de excesso de lodo. A floculação química produz uma quantidade considerável de lodo (BAT, 2015).
- Basicamente, o tratamento pode gerar até três tipos de lodo: lodo primário, lodo secundário e lodo terciário. Os lodos primário e secundário são gerados no tratamento primário e secundário da ETE e apresentam características orgânicas. O lodo terciário é gerado no tratamento terciário da ETE e apresenta características inorgânicas, geralmente DQO, fósforo e/ou nitrogênio.
- O lodo geralmente é espessado antes de ser desaguado em um filtro prensa, prensa de rosca ou em um filtro a vácuo. Muitas vezes, o excesso de lodo do tratamento biológico é misturado com lodo primário antes da desidratação. Produtos químicos são usados para melhorar o desaguamento do lodo, formando flocos maiores (BAT, 2015).
- Num passado recente, esses lodos eram destinados para aterros industriais localizados nas próprias indústrias. No entanto, conforme previsto na Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), a disposição em aterro só deve ocorrer para aqueles resíduos sólidos enquadrados como rejeitos, para os quais não existem alternativas tecnológicas disponíveis e economicamente viáveis para seu tratamento.
- A partir deste cenário, diversas alternativas têm sido utilizadas pelas fábricas para tratamento deste tipo de resíduo, como por exemplo, produção de condicionadores

de solo (descrito no capítulo anterior), aproveitamento energético pela queima direta do lodo ou pela queima do biogás produzido na biodigestão do lodo.

- No caso da queima direta em caldeira ou equipamento dedicado, a produção de energia é aproximadamente zero ou negativa, se o teor de sólidos secos no lodo for inferior a 40 % e se houver uma quantidade elevada de matéria inorgânica. O uso de combustível auxiliar é necessário para manter boas condições de queima, a menos que o lodo seja misturado com casca e outros resíduos de madeira. Uma alternativa utilizada em fábricas do Brasil é a pré-secagem do lodo antes de sua queima.
- Outra alternativa, é a mistura do lodo do tratamento biológico com o licor negro para queima na caldeira de recuperação.
- A biodigestão do lodo consiste no seu tratamento anaeróbio com geração de biogás (biocombustível), que pode ser utilizado para geração de energia elétrica ou para queima em caldeira ou forno de cal em substituição ao combustível fóssil. Neste caso é necessária a complementação com outra tecnologia para destinação do digestato, queima em caldeira ou compostagem.

Forma de Mitigação

- Ao realizar seu aproveitamento energético do lodo gerado no tratamento de efluentes, é possível reduzir a dependência de combustíveis fósseis, gerar energia térmica ou elétrica e diminuir o volume de resíduos enviados para disposição final. Portanto, essa ação fortalece a economia circular e contribui para reduzir emissões diretas ao substituir combustíveis fósseis por energia gerada a partir do lodo; potencialmente reduz emissões devido a compra de energia elétrica do SIN (escopo 2), e mitiga emissões associadas à cadeia de suprimentos, evitando transporte e disposição do lodo em aterros, que gerariam metano, que apresenta elevado PAG.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: reduz demanda por manejo do lodo e tratamento e destinação final desses resíduos, o que implica menores impactos ambientais correlatos em comparação com aqueles resultantes do seu aproveitamento energético.
- Econômico: menor OPEX para tratamento de lodo de ETE.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O aproveitamento energético do lodo proveniente do tratamento de efluentes líquidos é uma ação de esforço médio, pois requer tecnologias específicas para secagem, desaguamento e conversão energética, além de integração com sistemas existentes. O custo geral é médio, com CAPEX médio para instalação de digestores anaeróbios, sistemas de secagem ou adaptação de caldeiras e tratamento de gases. Se a planta já possui caldeiras a biomassa, as adaptações são moderadas, sendo o principal investimento a secagem do lodo. O OPEX é baixo, pois a operação pode ser integrada ao processo atual. As barreiras incluem a alta umidade do lodo, que reduz seu poder calorífico, necessidade de controle de emissões atmosféricas, licenciamento ambiental e viabilidade econômica frente a alternativas convencionais de disposição.

Tipo de Ação

Impactante.

1.2.4.8 Reduzir o Uso de Aterro através da Compostagem e Produção de Condicionadores de Solo (CIN.06)

Descrição da Ação

- A fabricação de papel e celulose dá origem a diferentes tipos de resíduos tais como: resíduo inorgânico (*dregs, grits* e lama de cal) da recuperação química; cascas e resíduos de madeira do manuseio de madeira; lodo do tratamento de efluentes (material inorgânico, fibras e lodo biológico); lodo do tratamento de água; material particulado de caldeiras e fornos; rejeitos (principalmente areia) do manuseio de madeira; cinzas de caldeira e gaseificador; rejeitos não fibrosos na reciclagem de papel; rejeitos e fibras, lamas fibrosas, pigmentos de revestimento da produção de papel (BAT, 2015).
- Valores típicos de geração de resíduos sólidos em fábricas de celulose Kraft não integradas variam de 0 a 50 kg de resíduos por tonelada de celulose produzida. Para fábricas de celulose Kraft e papel integradas os valores típicos variam de 0 a 20 kg de resíduos por tonelada de papel produzido (BAT, 2015).
- No entanto, a maioria dos resíduos sólidos resultantes do processo de produtivo podem não ser considerados resíduos, mas sim subprodutos, podendo ser amplamente reutilizados, reciclados e/ou recuperados.
- Nesse contexto, as fábricas de celulose têm produzido condicionadores de solo, a partir de resíduos industriais, que tem a função a melhorar as propriedades físicas, físico-químicas ou da atividade biológica do solo.
- Resíduos de madeira e casca do pátio de toras, cinzas da caldeira de biomassa, lodos da ETE são enviados para compostagem para produção de fertilizante orgânico composto. *Dregs, grits*, lama de cal e cinzas da caldeira de biomassa são utilizados na produção de corretivo de acidez de solo. Cinzas da caldeira de biomassa são utilizados na produção de fertilizante mineral.
- Os condicionares de solo produzidos podem ser destinados à plantios próprios, de terceiros ou mesmo para comercialização.

Forma de Mitigação

- A produção de condicionadores de solo contribui para reduzir emissões diretas de metano e CO₂ provenientes da decomposição de resíduos em aterros, e mitiga emissões da cadeia de suprimentos ao substituir fertilizantes sintéticos (com alta pegada de carbono).

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: a aplicação desses condicionadores no solo tende a melhorar a sua estrutura física do solo, podem atuar na correção de sua acidez (pH) e aumentam a sua capacidade de troca catiônica, melhorando a fertilidade potencial do solo.
- Econômico: diminui custos com aterros industriais e passivos ambientais. Gera produto comercializável, agregando valor à cadeia.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- Processar subprodutos do setor de Papel & Celulose para produzir condicionadores de solo, como corretivos de acidez e fertilizantes orgânicos, é uma ação de esforço médio, pois exige infraestrutura para compostagem, mistura e secagem, além de integração com processos existentes.
- O custo geral é médio, com CAPEX médio para implantação de áreas de compostagem e equipamentos, enquanto o OPEX é baixo, devido à simplicidade operacional e possibilidade de aproveitamento de mão de obra interna.
- As principais barreiras incluem garantir qualidade e estabilidade dos produtos, atender às normas ambientais e sanitárias, e desenvolver logística eficiente para distribuição. Vale destacar que os benefícios ambientais podem ser reduzidos caso os condicionadores precisem ser transportados para regiões distantes, aumentando emissões no transporte.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.4.9 Produzir Briquetes a partir de Cinzas de Caldeira (CIN.07)

Descrição da Ação

- Nas fábricas integradas de celulose e papel, o excesso de calor produzido pela fábrica geralmente não é suficiente para cobrir toda a demanda de energia do processo de produção de celulose e papel. Assim, o calor adicional necessário é produzido em caldeiras de força. Em muitas dessas caldeiras, é usada uma mistura de combustíveis (combustão combinada de lodo, casca, resíduos de madeira e combustíveis fósseis). Tradicionalmente, a biomassa na forma de casca, resíduos de madeira e cavaco tem sido utilizada no setor de Papel & Celulose (BAT, 2015).
- As emissões de poeira desse tipo de caldeira dependem principalmente do teor de cinzas do combustível. As técnicas normalmente utilizadas para controlar as emissões de partículas (poeiras) são os filtros de tecido e os precipitadores eletrostáticos (ESP). Uma outra técnica disponível consiste na lavagem de gases para retenção úmida das partículas.
- A técnica de lavagem dos gases gera um efluente contendo material particulado que é filtrado gerando dois resíduos (cinza fina e cinza grossa). Os resíduos de cinza fina podem ser utilizados como condicionador de solo e a cinza grossa pode ser utilizada para ser utilizado na produção de briquete de carvão vegetal e comercializado.
- A proposta consiste em utilizar cinzas de caldeiras (geradas na queima de biomassa) como insumo para produção de briquetes, geralmente misturadas com resíduos lignocelulósicos ou finos de carvão vegetal. O processo envolve mistura, aglutinação (com amido ou cal), prensagem e secagem, resultando em um combustível sólido com maior densidade energética e melhor manuseio. Essa prática reduz a disposição de cinzas em aterros, valoriza resíduos e contribui para a economia circular.

Forma de Mitigação

- A produção de briquetes reduz emissões de GEE pelo efeito de substituição, visto

que substitui parcialmente combustíveis fósseis. Além disso, há redução das emissões indiretas associadas à destinação de resíduos para aterros e à produção e transporte de combustíveis fósseis.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: Promove a circularidade, com a valorização energética de resíduos industriais, sendo os briquetes resultantes com poder calorífico superior comparável com o carvão vegetal convencional.
- Operacional: Podem vir a substituir parte da demanda energética em caldeiras e fornos, já que são fáceis de armazenar e transportar.
- Econômico: pode reduzir custos com compra de combustíveis fósseis para caldeiras. Gera produto comercializável, agregando valor à cadeia.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço é médio, pois envolve implantação de equipamentos e ajustes no processo produtivo. Os custos de CAPEX incluem aquisição de briquetadeiras, misturadores e área de secagem; já o OPEX envolve custos com aglutinantes (como amido ou cal), energia para secagem e controle de qualidade. Cita-se ainda a necessidade de mistura das cinzas com biomassa ou finos de carvão, devido ao baixo poder calorífico das cinzas; além da demanda pela inclusão de sistema de controle de contaminantes para garantir segurança, já que cinzas podem conter metais ou sais solúveis. Apesar do custo moderado, essa solução pode gerar economia ao reduzir gastos com destinação de resíduos e combustíveis fósseis, e complementar a matriz energética da planta.
- Além disso, há desafios logísticos para coleta, secagem e armazenamento dos briquetes, bem como adequação às normas ambientais e de segurança.

Tipo de Ação

Impactante.

1.2.4.10 Realizar Recuperação Energética de Metanol Residual nas Caldeiras e Forno de Cal (CIN.08)

Descrição da Ação

Durante o processo Kraft, especialmente no cozimento alcalino da madeira (pinus), ocorre a formação de metanol e compostos voláteis (TRS - *Total Reduced Sulphur*). Esse metanol é arrastado nos condensados contaminados e pode ser recuperado por colunas de *stripping* e retificação, purificado e utilizado como combustível líquido ou gasoso em caldeiras de biomassa e fornos de cal. Essa prática reduz a necessidade de combustíveis fósseis (óleo, gás natural) e evita emissões associadas à degradação do metanol no efluente, contribuindo para a descarbonização.

Forma de Mitigação

- Essa ação é impactante porque reduz emissões de GEE pelo efeito de substituição, principalmente na categoria de Combustão Estacionária, ao substituir parcialmente a demanda local energética por combustível fóssil em caldeiras e fornos, ou, se vendido como insumo químico, ao substituir o metanol convencional de origem fóssil.

Importância (Cobenefícios)

- Operacional: combustível renovável produzido tem alta densidade energética, superior ao licor negro e comparável a combustíveis líquidos.
- Econômico: pode reduzir significativamente custos com compra de combustíveis fósseis para caldeiras ou fornos.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

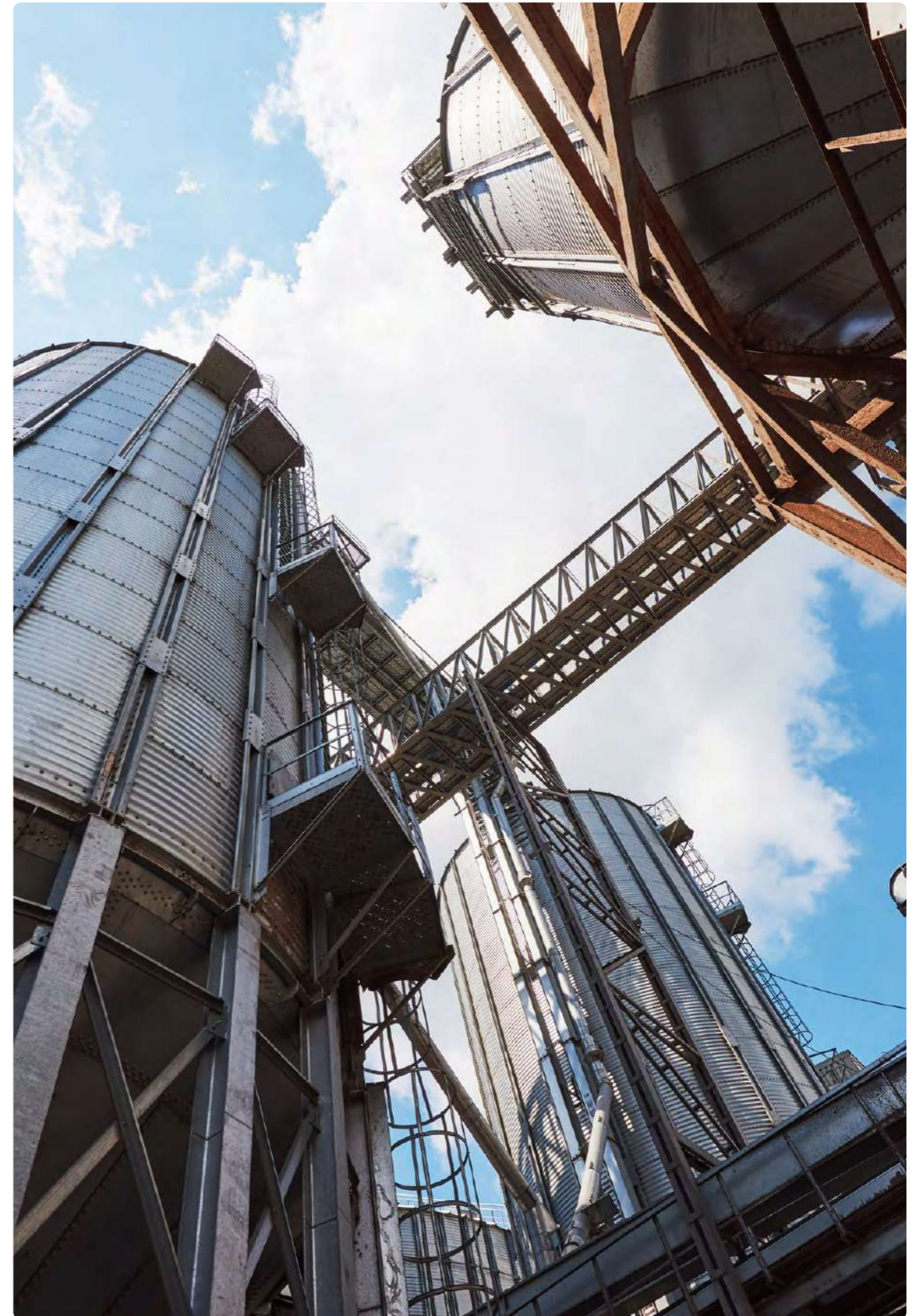
- A recuperação energética do metanol residual nas caldeiras e no forno de cal é uma ação de alto esforço, pois exige tecnologias avançadas para separação, purificação e integração segura ao processo térmico. O custo geral é alto, com CAPEX elevado para instalação de colunas de *stripping*, sistemas de retificação e dispositivos de segurança, enquanto o OPEX é baixo, já que a operação pode ser

integrada ao processo existente.

- As principais barreiras incluem protocolos rigorosos de segurança devido à inflamabilidade do metanol, necessidade de adequação às normas ambientais, e viabilidade econômica frente ao custo de implantação. Além disso, é necessário garantir estabilidade operacional e evitar impactos na qualidade do processo de recuperação química.

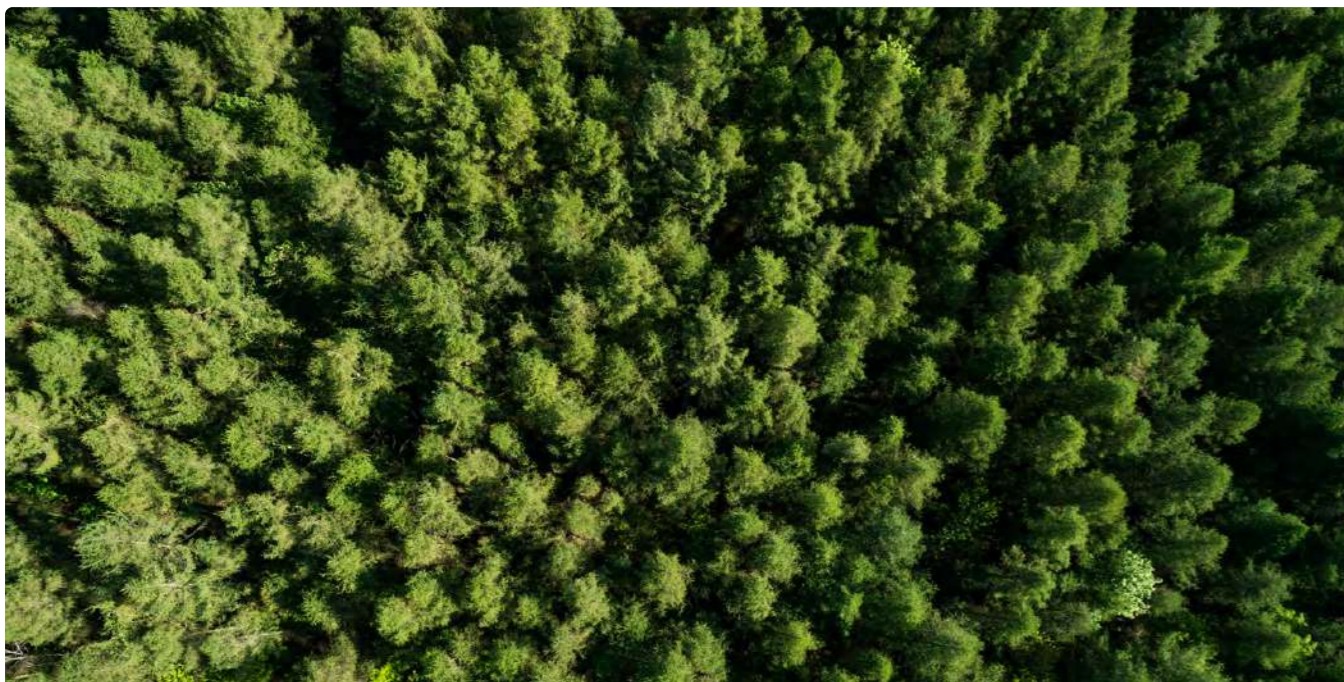
Tipo de Ação

- Impactante.



1.2.5 Remoção de Carbono

Para atingir as metas líquidas zero em toda a economia, a remoção de carbono baseada na natureza e na tecnologia é essencial. Embora as reduções significativas das emissões de carbono continuem sendo a principal estratégia, a remoção de dióxido de carbono oferece um complemento fundamental, especialmente para indústrias difíceis de reduzir. Ao capturar e armazenar CO₂ por meio de diversos métodos, desde o florestamento até a captura direta do ar, atende à necessidade urgente de armazenamento de carbono à longo prazo. No entanto, cada abordagem tem seus pontos fortes e fracos, exigindo um mercado equilibrado e bem regulamentado para maximizar seu potencial e garantir uma transição sustentável para emissão líquida zero.



1.2.5.1 Remoção de Carbono por Solução Natural (Soluções Baseadas na Natureza)

As soluções baseadas na natureza (Nbs, em inglês) são abordagens que utilizam processos e elementos naturais para enfrentar desafios ambientais, sociais e econômicos de forma sustentável. Elas promovem a conservação, restauração, reflorestamento e gestão de ecossistemas, permitindo que a própria natureza atue como solução para problemas como mudanças climáticas, poluição e perda de biodiversidade.

Estas soluções desempenham um papel crucial na descarbonização, utilizando processos naturais para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e capturar carbono da atmosfera. Essas soluções incluem práticas como restauração florestal, conservação de ecossistemas e agricultura regenerativa, que ajudam a mitigar os impactos das mudanças climáticas.

Os cenários do IPCC para reduções de emissões são claros. Para manter o aumento da temperatura próximo à meta do Acordo de Paris de 1,5°C, devemos atingir emissões líquidas zero de CO₂ até 2050. Os cenários mostram que isso exigirá, além de uma descarbonização massiva e rápida, uma contribuição significativa das opções terrestres. As soluções baseadas na natureza fornecem a melhor maneira de fornecer essas opções baseadas no solo, por meio da proteção, restauração e gestão sustentável de sumidouros e reservatórios naturais de carbono. Além disso, existe um potencial adicional de atenuação das soluções baseadas na natureza nos ecossistemas costeiros e marinhos (UNEP, 2021).

O último relatório do IPCC demonstrou que as soluções baseadas na natureza tais como reduzir a destruição de florestas e outros ecossistemas, restaurá-los e melhorar a gestão do solo estão entre as cinco estratégias mais eficazes para mitigar as emissões de carbono até 2030 (IUCN, 2025).

As soluções baseadas na natureza – baseadas na proteção, restauração e gestão sustentável dos ecossistemas mundiais – têm o potencial de fornecer até 30% da mitigação climática necessária para cumprir a meta de 1,5°C no

Acordo de Paris (IUCN, 2025).

As soluções baseadas na natureza para mitigação e adaptação servem como parte integrante da resposta global necessária para a ação climática. As soluções baseadas na natureza podem lidar com as mudanças climáticas de três maneiras (IUCN, 2025):

- Diminuir as emissões de gases de efeito estufa relacionadas ao desmatamento e uso da terra
- Capturar e armazenar dióxido de carbono da atmosfera
- Aumentar a resiliência dos ecossistemas e, como tal, apoiar as sociedades a se adaptarem aos riscos climáticos, como inundações, aumento do nível do mar e secas, inundações, ondas de calor e incêndios florestais mais frequentes e intensos.

Desta forma, as soluções baseadas na natureza são essenciais e complementares às demais ações de combate ao aquecimento global.

Assim, a seguir são apresentadas algumas soluções baseadas na natureza já disponíveis.





1.2.5.11 Ampliar Área de Restauração Florestal e Criação de Corredores Ecológicos (SBN.01)

Descrição da Ação

- À medida que avançamos rumo às metas de emissões líquidas zero, as florestas têm papel fundamental. Seja na redução do desmatamento de florestas nativas, na ampliação das áreas florestais por meio de projetos de reflorestamento e revegetação, ou na substituição de materiais com alta pegada de carbono por produtos à base de madeira, as florestas estão no centro do debate climático.
- Por esse motivo, o relatório final da COP 28 - Artigo 3 (UNFCCC, 2024) enfatiza ainda mais a importância de conservar, proteger e restaurar a natureza e os ecossistemas para alcançar a meta de temperatura do Acordo de Paris, incluindo por meio de esforços redobrados para deter e reverter o desmatamento e a degradação florestal até 2030, e outros ecossistemas terrestres e marinhos que atuam como sumidouros e reservatórios de gases de efeito estufa, e conservando a biodiversidade, ao mesmo tempo em que se garantem salvaguardas sociais e ambientais.
- Destaca-se que os projetos florestais têm um impacto significativo na mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente no médio e longo prazo. No entanto, o grau e o timing desse impacto dependem de uma série de fatores, incluindo a integridade do projeto, sua escala, governança e monitoramento contínuo.
- A restauração de florestas nativas e a criação de corredores ecológicos são estratégias fundamentais para aumentar a conectividade entre fragmentos florestais, reduzir a fragmentação da paisagem e promover a conservação da biodiversidade. Essas ações contribuem para o sequestro de carbono, mitigação das mudanças climáticas e melhoria dos serviços ecossistêmicos, como regulação hídrica e proteção do solo. No setor de Papel & Celulose, empresas

já implementam programas robustos de restauração, integrando áreas de preservação permanente, reservas legais e áreas adicionais de proteção, com ganhos ambientais e reputacionais significativos.

Forma de Mitigação

- As florestas são essenciais na mitigação das emissões de GEE, em função de sua capacidade de sequestrar e armazenar carbono, bem como o elevado potencial de substituição de matérias de origem fóssil por produtos renováveis a base de madeira. Além de sua importância climática, as florestas prestam diversos serviços ecossistêmicos essenciais, como a conservação da biodiversidade, a proteção do solo e a regulação dos recursos hídricos.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: proteção da biodiversidade (pelo aumento da conectividade) e dos serviços ecossistêmicos ofertados pela floresta (habitat para biodiversidade, regulação do ciclo hidrológico e do microclima, controle da erosão, beleza cênica, valor educacional, etc.).
- Econômico: potencial geração de créditos de carbono, a restauração pode ser registrada em programas de REDD+ ou mercados voluntários, gerando receitas adicionais por meio da venda de créditos de carbono. Ressalta-se que está em regulação a Lei 15.042/2024, que reconhece "projetos privados de créditos de carbono" de redução ou remoção de GEE, ou seja, após a regulamentação da referida lei, existe a tendência de consideração desta geração de créditos de carbono no mercado regulado brasileiro. Embora o retorno financeiro de curto prazo seja limitado, há oportunidades de valorização da marca, além de benefícios indiretos como redução de riscos regulatórios e acesso a mercados sustentáveis.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço é médio, pois envolve planejamento, produção de mudas em viveiros, plantio, cercamento, controle

de espécies invasoras e monitoramento contínuo. O CAPEX é médio, incluindo investimentos em viveiros, infraestrutura para plantio e sistemas de monitoramento. O OPEX é baixo, com custos anuais reduzidos após a implantação, mas requer manutenção e monitoramento para garantir a permanência do carbono e atender às exigências de certificadoras.

- Outras barreiras são a baixa fertilidade do solo, risco de incêndios, seca e pressão antrópica, que podem comprometer o sucesso da restauração. Há ainda incerteza sobre retorno econômico no curto prazo e demanda por mão de obra qualificada, logística para plantio e monitoramento robusto (MRV - Monitoramento, Relato e Verificação).

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.5.1.2 Sistemas Agroflorestais e Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (SBN.02)

Descrição da Ação

- Os Sistemas Agroflorestais (SAFs) e a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) são estratégias que combinam diferentes atividades produtivas (cultivos agrícolas, pecuária e florestas) em uma mesma área, de forma consorciada, rotativa ou sucessiva. O objetivo é otimizar o uso da terra, aumentar a produtividade, recuperar áreas degradadas e reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE). No contexto do setor de Papel & Celulose, essas práticas podem ser aplicadas em áreas de fomento florestal ou propriedades parceiras, promovendo sequestro de carbono no solo e na biomassa, diversificação econômica e maior resiliência climática.
- Segundo Ibá (2025), o setor de árvores cultivadas, o qual está situado o setor de C&P, planta, colhe e replanta árvores para fins industriais em 10,52 de hectares, sendo 1,8 milhão de árvores plantadas por dia. Além disso, o setor de árvores cultivadas conserva 7,01 milhões de hectares de área conservada, uma extensão maior que o estado do Rio de Janeiro. Desse total, 4,99 milhões de hectares são áreas de Reserva Legal, 1,98 milhão de hectares são Áreas de Preservação Permanente e 0,04 milhão de hectares são Reservas Particulares do Patrimônio Natural (Ibá, 2025a).

Forma de Mitigação

- Esses sistemas florestais têm potencial de otimizar o uso da terra, aumentar a produtividade, recuperar áreas degradadas e mitigam as mudanças climáticas pelo aumento do estoque de carbono (no solo e na biomassa) por unidade de área. Essas práticas tendem também a reduzir emissões da cadeia de suprimentos, ao otimizar o uso de insumos agrícolas por unidade de área e, portanto, reduzir o total de consumo destes produtos químicos em comparação se as atividades fossem realizadas em áreas separadas.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: os sistemas agroflorestais e ILPF promovem uso múltiplo do solo, combinando produção florestal, agrícola e pecuária de forma sustentável. Essa integração melhora a fertilidade do solo, reduz erosão, aumenta a biodiversidade e tendem a valorizar serviços ambientais oferecidos pelos agroecossistemas, tais como: (i) conservação dos recursos hídricos e edáficos; (ii) abrigo para os agentes polinizadores e de controle natural de insetos-praga e doenças; (iii) fixação de carbono; (iv) redução da emissão de gases de efeito estufa; (v) reciclagem de nutrientes; e (vi) biorremediação do solo (Balbino et al., 2011).
- Econômico: potencial geração de créditos de carbono, visto que esses sistemas florestais podem ser registrados em programas de mercados voluntários, gerando receitas adicionais por meio da venda de créditos de carbono.
- Social: quando essa ação é realizada em áreas onde ocorre parceria florestal com produtores locais, contribui-se para a promoção e geração de emprego e renda, adoção de boas práticas agropecuárias, melhoria das condições sociais locais e redução no êxodo rural, beneficiando a indústria com uma cadeia de suprimentos e comunidade local mais resiliente.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A implementação de sistemas agroflorestais e da integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) no setor de Papel & Celulose é uma ação de esforço médio a alto, pois exige planejamento integrado, adaptação de áreas, capacitação técnica, demandando muitas vezes engajamento com a comunidade local. O custo geral é médio, com CAPEX associado à preparação do solo, aquisição de mudas, cercas e infraestrutura para manejo, enquanto o OPEX é relativamente baixo, relacionado à manutenção e monitoramento das áreas. As principais barreiras incluem complexidade operacional, necessidade de conhecimento técnico especializado, tempo para retorno

econômico, e desafios regulatórios para certificação e comercialização de produtos oriundos desses sistemas. Além disso, a falta de incentivos fiscais e linhas de financiamento específicas pode limitar a adoção em larga escala.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.5.1.3 Adoção de Práticas de Manejo na Silvicultura que aumentem o Estoque de Carbono Médio no Solo e na Biomassa (SBN.03)

Descrição da Ação

— As empresas que possuem ativos florestais poder adotar práticas de manejo na silvicultura que aumentem o estoque de carbono médio no solo e na biomassa, tal como detalhado a seguir.

→ Quanto ao aumento do estoque de carbono médio na biomassa:

» Durante a atividade de planejamento florestal e gestão ambiental da operação florestal deve-se priorizar áreas degradadas e improdutivas, visando promover a sua valorização ambiental e aumentar o estoque de carbono médio pela implantação da silvicultura.

» Além disso, na escolha de áreas para novas estruturas (como novas fábricas) deve-se priorizar áreas que não demandem desmatamento direto ou indireto de vegetação nativa, evitando-se assim emissões de GEE de mudança de uso do solo pela supressão de vegetação de floresta nativa para implantação de silvicultura, ou deslocamento de desmatamento para outras áreas por outras atividades (pecuária e agricultura) devido a disputa de terrenos entre com a silvicultura.

→ Quanto ao incremento do reservatório de carbono no solo:

» É um processo de acúmulo gradual de matéria orgânica no solo, proveniente da biodegradação da vegetação florestal, especialmente das raízes, serapilheira (folhas, galhos caídos) e exsudatos radiculares.

» As raízes finas das árvores vivem pouco tempo e são constantemente renovadas. Quando morrem, se

decompõem e transferem carbono para o solo, principalmente nas camadas mais profundas. Já as raízes vivas, liberam compostos orgânicos solúveis (exsudatos) no solo, que alimentam micro-organismos que, ao morrerem e se decompor, formam matéria orgânica estável (humificação). Uma parte desta matéria orgânica se estabiliza em partículas do solo, permanecendo por muito tempo.

» O acúmulo de carbono é maior após os primeiros anos de crescimento, e se estabiliza com o tempo. Solos degradados (ex-pastagens, lavouras) geralmente apresentam maior potencial de ganho de carbono com o reflorestamento. Práticas como menor revolvimento do solo, manutenção da serapilheira, uso de resíduos florestais, uso de espécies com maior aporte radicular, adubação orgânica e rotação de culturas, favorecem o sequestro de carbono.

» O carbono no solo é mais estável do que o carbono na biomassa aérea, sendo que uma parte pode permanecer no solo por centenas de anos, especialmente nas frações mais recalcitrantes da matéria orgânica.

Forma de Mitigação

— As ações visam aumentar o estoque de carbono médio no solo e na biomassa, através de:

→ Priorização de áreas degradadas e improdutivas para expansão da base florestal, visando aumentar o estoque de carbono médio.

→ Na escolha de áreas para novas estruturas (como novas fábricas), priorização de áreas que não demandem desmatamento direto ou indireto de vegetação nativa nem áreas produtivas, evitando-se assim emissões de GEE de mudança de uso do solo pela supressão de vegetação para implantação de silvicultura, ou deslocamento de desmatamento para

outras áreas por outras atividades (pecuária e agricultura) devido a disputa de terrenos entre com a silvicultura.

→ Realização de Inventário Florestal anual para o monitoramento da variação da quantidade de estoque de carbono presente na silvicultura em comparação tanto com o estoque de carbono prévio (área degradada/ antropizada/pastagens/lavouras) quanto com o estoque de carbono "perdido" na colheita, garantindo que a "promessa" do setor se cumpra, ou seja, a ocorrência de remoções de GEE maiores que emissões de GEE.

→ Práticas como menor revolvimento do solo, manutenção da serapilheira, uso de resíduos florestais, uso de espécies com maior aporte radicular, adubação orgânica e rotação de culturas favorecem o sequestro de carbono no solo. O incremento do reservatório de carbono no solo em florestas plantadas é fundamental para a mitigação das mudanças climáticas, pois o carbono armazenado no solo funciona como um sumidouro de carbono estável. Além disso, essa ação tende a reduzir emissões de GEE devido ao consumo energético na aplicação, na produção e transporte de insumos agrícolas, já que solos mais saudáveis demandam menos insumos externos; assim como gera redução pelo efeito de substituição, ao reduzir emissões da cadeia de suprimentos, pelo menor consumo de fertilizantes sintéticos convencionais com alta pegada de carbono.

Importância (Cobenefícios)

— Ambiental: aumenta o estoque de carbono no solo por unidade de área. A ação também melhora qualidade e fertilidade do solo, aumentando sua retenção de água e resiliência, além de reduzir emissões de GEE por efeito de substituição, visto que prioriza o uso de fertilizantes orgânicos no lugar de fertilizantes sintéticos a base fóssil.

— Econômico: potencial geração de créditos

de carbono, visto que ações que aumentem o sequestro de carbono no solo podem ser registradas em programas de mercados voluntários, gerando receitas adicionais por meio da venda de créditos de carbono.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

— A adoção de práticas de manejo na silvicultura que aumentem o sequestro de carbono no solo e biomassa é uma ação de esforço médio, pois envolve ajustes no processo decisório na escolha de áreas para expansão da base florestal, nos métodos de preparo do solo, rotação de culturas, manutenção de resíduos florestais e uso de bioinsumos.

— O custo geral é médio, com CAPEX baixo a médio para aquisição de ferramentas de monitoramento e bioinsumos, enquanto o OPEX é baixo, já que os custos tendem a reduzir após a implantação, com ganhos indiretos via aumento da produtividade.

— As principais barreiras incluem resistência à inclusão de critério ambiental na escolha de áreas para expansão da base florestal, necessidade de capacitação técnica, monitoramento contínuo para garantir eficácia, e tempo para retorno dos benefícios, além da falta de incentivos financeiros e políticas públicas que estimulem práticas regenerativas.

Tipo de Ação

— Impactante.

1.2.5.1.4 Adotar Medidas de Prevenção a Incêndios Florestais (SBN.04)

Descrição da Ação

- A prevenção a incêndios florestais é um tema crítico e estratégico para o setor de Papel & Celulose, especialmente diante do agravamento das mudanças climáticas. Incêndios representam uma das maiores ameaças aos ativos florestais, afetando diretamente a produtividade, os custos operacionais, a segurança das comunidades e a reputação das empresas do setor.
- A ação de prevenção a incêndios florestais no setor envolve um conjunto de medidas integradas para reduzir riscos e impactos. Entre elas estão o monitoramento contínuo, inclusive com uso de inteligência artificial, sensores e imagens em tempo real; a formação de brigadas treinadas e equipadas; a implementação de aceiros e manejo da vegetação combustível; o mapeamento de pontos de captação de água; campanhas de conscientização com comunidades vizinhas; e o planejamento florestal preventivo, considerando espécies e arranjos mais resistentes ao fogo.
- A prevenção a incêndios florestais é de responsabilidade comum ao poder público, setor privado e sociedade, conforme a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo.

Forma de Mitigação

- Para o setor de Papel & Celulose, a prevenção a incêndios florestais é essencial não apenas do ponto de vista econômico, mas também climático e ambiental. Em um cenário de mudanças climáticas aceleradas, a resiliência florestal passa a ser um ativo estratégico — tanto para assegurar a continuidade operacional, quanto para garantir a efetividade das ações de mitigação de carbono associadas às florestas plantadas.
- As empresas desse setor operam com florestas plantadas em larga escala, que são o insumo básico para sua produção. Um único incêndio pode destruir milhares de hectares, comprometendo o abastecimento de matéria-prima por vários anos. Além de

gerar custos com o combate do incêndio, replantio da floresta e perda da matéria-prima.

- Os incêndios podem gerar impactos ambientais e sociais, pois o fogo pode ultrapassar os limites das propriedades e atingir áreas de vegetação nativa, reservas legais, fauna silvestre e comunidades vizinhas.
- As florestas plantadas funcionam como reservatórios temporários de carbono. Quando queimadas, todo o carbono acumulado na biomassa é liberado rapidamente como CO₂, contribuindo para o efeito estufa e anulando anos de sequestro.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: Conservação de carbono e biodiversidade, incêndios florestais liberam esse carbono para a atmosfera, além de prejudicarem as propriedades químicas e físicas do solo
- Social: maior segurança e proteção das comunidades do entorno
- Econômico: Redução de perdas florestais
- Operacional: Continuidade da operação florestal e industrial

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- Adotar medidas de prevenção a incêndios florestais exige a implantação de sistemas de monitoramento robustos, formação e manutenção de brigadas treinadas, implementação de estrutura preventiva e campanhas de engajamento com comunidades.
- As principais barreiras incluem custos (tecnologia, equipes, equipamentos), complexidade técnica para integrar dados em tempo real e tomar decisões rápidas, variabilidade climática que eleva o risco (secas, ondas de calor), logística em áreas remotas e coordenação multissetorial.

Tipo de ação

- Estruturante.

1.2.5.2 Remoção de Carbono por Solução Técnica de Captura, Utilização e/ou Armazenamento de Carbono

À medida que ações cada vez mais urgentes para o enfrentamento das mudanças climáticas são exigidas pelas partes interessadas e pelas novas legislações, empresas de todos os setores devem avançar para reduzir suas emissões, o que já traz diversos custos e riscos para seus negócios.

Uma maneira de perseguir esses objetivos e reduzir os custos e riscos que podem surgir das mudanças climáticas recai sobre as tecnologias CCUS, que podem ajudá-los a adaptar as plantas industriais e de energia existentes, permitindo que continuem suas operações capturando as emissões de CO₂ "difíceis de reduzir".

Em termos de mitigação de carbono, a captura de carbono e seu uso ou armazenamento é amplamente considerada como uma solução crucial para reduzir as emissões de GEE globalmente, reconhecida no relatório final da COP 28 – Artigo 28 (UNFCCC, 2024), principalmente para setores de difícil mitigação das emissões de GEE.

A cadeia de um processo CCUS, exemplificada pela figura abaixo, começa com uma tecnologia de captura de CO₂, a partir do ponto de emissão de CO₂ concentrado fóssil ou biomassa, ou captura de CO₂ diretamente do ar. Em seguida, o CO₂ capturado pode ser usado diretamente ou passar por algum condicionamento prévio (por exemplo, compressão) para facilitar a próxima etapa do transporte até o destino final, que pode ser algum tipo de utilização de CO₂ e/ou armazenamento permanente.

Espera-se principalmente que essas tecnologias sejam capazes de ajudar a mitigar setores com emissões que não podem ser evitadas, chamadas de "emissões não reduzidas" ou "emissões difíceis de reduzir", mas também apoiar processos para alcançar emissões negativas e, assim, fomentar o mercado de créditos de carbono (EPE, 2023).

Nos conceitos de CCUS, o efeito sobre as mudanças climáticas depende da origem do CO₂, da origem da energia utilizada tanto do

combustível (CO₂ fóssil), quanto da matéria-prima de madeira da fábrica de celulose (CO₂ biogênico) (IEA, 2024).

De modo geral, o CCUS contribui para a transição energética, favorecendo processos que culminam em emissões negativas, e ajudando a mitigar aquelas que envolvem emissões que não podem ser evitadas, as tecnologias de CCS são aplicadas a diversos setores da indústria, como alternativa no cumprimento das metas e metas climáticas. Eles também representam uma opção tática para explorar um negócio internacional em rápido crescimento: o mercado de créditos de carbono (EPE, 2023).

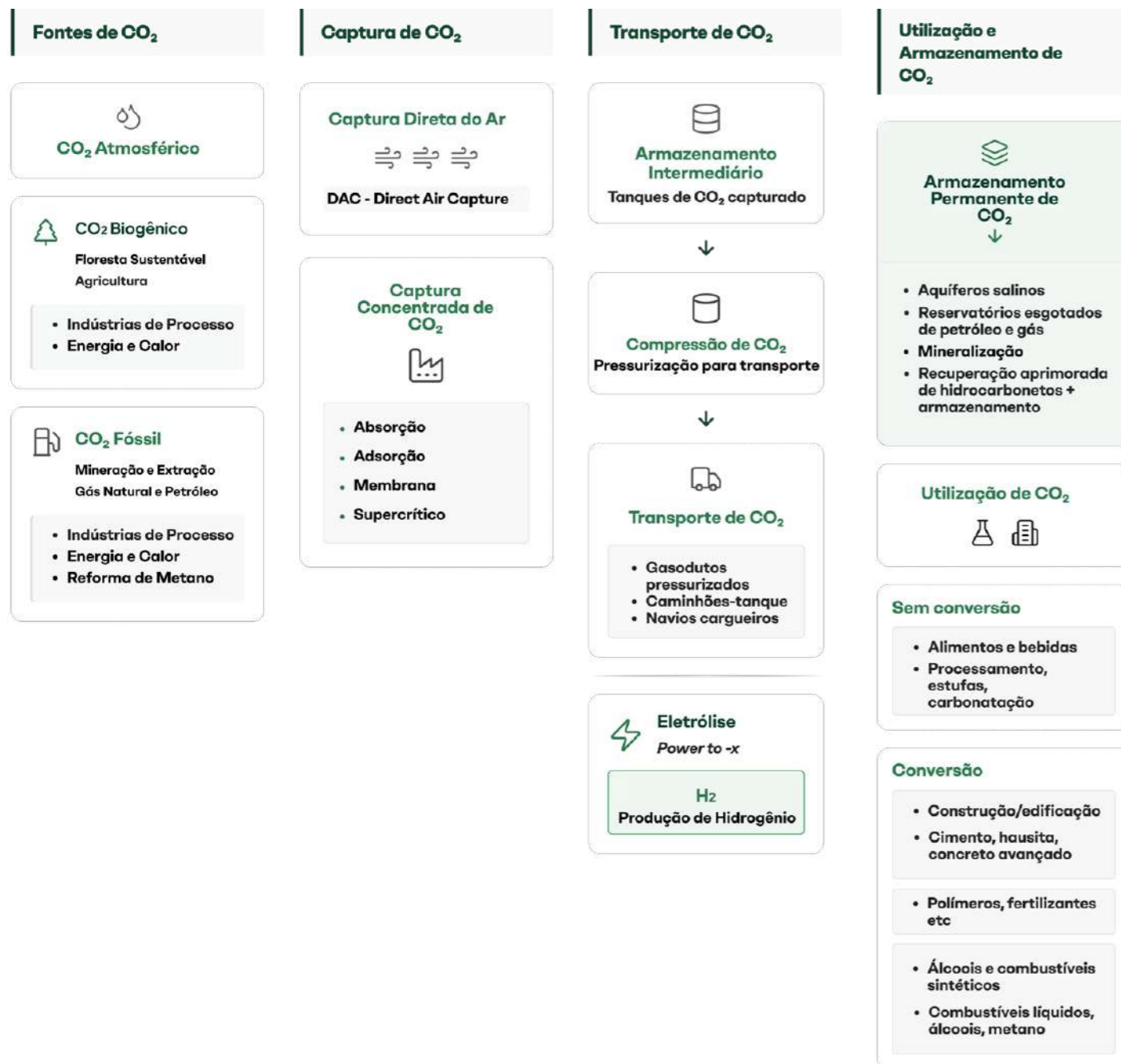


Figura 45 - A cadeia do CCUS. Fonte: AFRY (2024).

1.2.5.2.1 Produzir Carbonato de Cálcio Precipitado (RST.01)

Descrição da Ação

- O dióxido de carbono (CO₂) pode ser utilizado na fábrica de papel na produção de carbonato de cálcio precipitado, que é utilizado como preenchimento na produção de papel para aumentar sua opacidade. O Carbonato de Cálcio Precipitado (PCC) é um aditivo mineral produzido por reação química controlada entre leite de cal (Ca(OH)₂) e CO₂, formando partículas de alta pureza e brancura. É amplamente utilizado como carga e pigmento na fabricação de papel para melhorar opacidade, brilho e suavidade, além de reduzir o consumo de fibras. A produção de PCC pode ser integrada ao processo Kraft, aproveitando CO₂ proveniente da calcinação da cal, cuja concentração e pureza do CO₂ obtido da calcinação são mais adequadas para a produção de PCC, tornando essa fonte preferida em detrimento da alternativa de captura CO₂ biogênico das chaminés das indústrias de celulose, uma vez que este está diluído nos gases de combustão, exigindo tecnologias adicionais de captura e purificação, o que aumenta custos.

Forma de Mitigação

- A produção de PCC remove CO₂ direto das emissões do forno de cal, capturando-o para uso na carbonatação, evitando sua emissão para a atmosfera. Há ainda redução de emissões de GEE do transporte e emissões associadas à produção de PCC por terceiros. Além disso, cita-se ainda uma redução de emissões de GEE pelo menor consumo de fibras virgens no papel, reduzindo impactos a montante (silvicultura, transporte).

Importância (Cobenefícios)

- Operacional:** quando produzido internamente, permite maior controle sobre a qualidade e a granulometria do PCC, ajustando-o às necessidades específicas da linha de produção. Além disso, reduz riscos de desabastecimento e dependência de fornecedores externos.

- Econômico:** Redução de custos logísticos. Em plantas integradas, isso pode representar economia relevante, pois PCC é volumoso e sensível à umidade. Além disso, o uso de PCC pode substituir parcialmente fibras virgens, reduzindo custos com celulose. Há ainda a possibilidade de comercializar o excedente de PCC para outras indústrias (plásticos, tintas, farmacêutica).

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O custo geral da produção interna de PCC é considerado alto, principalmente devido ao investimento inicial (CAPEX) necessário para instalação de reatores, sistemas de secagem, controle de qualidade, infraestrutura de segurança e automação. Já os custos operacionais (OPEX) são classificados como médios, envolvendo insumos como cal hidratada e custos com a captura e transferência de CO₂, além de energia térmica e elétrica, manutenção e mão de obra qualificada para garantir o controle rigoroso dos parâmetros físico-químicos (pH, temperatura e concentração).
- Em algumas regiões, a compra de PCC pode ser mais econômica do que a produção interna, especialmente quando há fácil acesso a fornecedores. A regulamentação da taxa de carbono prevista na Lei nº 15.042/2024 pode atuar como um catalisador, tornando a produção interna mais competitiva e incentivando a captura e utilização de CO₂ industrial.
- Ressalta-se ainda a necessidade de controle preciso das condições de processo para assegurar qualidade e de gestão adequada dos resíduos sólidos e líquidos gerados, que exigem tratamento especializado.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.5.2.2 Utilizar CO₂ Capturado na Separação da Lignina (RST.02)

Descrição da Ação

- No processo Kraft, a separação da lignina do licor negro ocorre por acidificação, sendo uma das técnicas mais eficientes a redução gradual do pH por meio do borbulhamento com CO₂. Essa etapa promove a precipitação da lignina, que é posteriormente filtrada e purificada para aplicações industriais de maior valor agregado.
- A inovação está em utilizar CO₂ capturado das chaminés das fábricas de celulose — predominantemente biogênico, proveniente da biomassa — como reagente no processo, substituindo ácidos minerais convencionais. Essa prática reduz impactos ambientais, diminui custos operacionais e fortalece a integração com princípios de economia circular e descarbonização industrial.
- Além de atuar na acidificação, o CO₂ capturado pode ser direcionado para reuso em processos químicos ou para armazenamento permanente em reservatórios geológicos, como aquíferos salinos ou formações rochosas profundas, por meio de tecnologias de CCUS (Captura, Uso e Armazenamento de Carbono). Essa abordagem cria um ciclo fechado entre captura, utilização e sequestro, contribuindo para emissões líquidas negativas e alinhando o setor de Papel & Celulose às metas globais de neutralidade de carbono.

Forma de Mitigação

- Remove momentaneamente carbono direto da atmosfera e o utiliza para precipitação da lignina do licor preto. Além disso, a ação reduz emissões de GEE por efeito de substituição, visto que substitui ácidos minerais convencionais (como H₂SO₄) pelo CO₂, reduzindo inclusive outros impactos ambientais referentes à fabricação, manuseio e descarte destes. Após essa utilização, CO₂ pode ser recapturado e reutilizado, o que implicaria em maior

benefício climático.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: redução de outros impactos ambientais referentes à fabricação, manuseio e descarte destes.
- Econômico: transforma resíduos (CO₂ e lignina) em insumos para produtos de maior valor agregado (bioplásticos, nanofibras, grafeno). Redução de custos com ácidos minerais convencionais e possibilidade de monetização via créditos de carbono.
- Social: CO₂ é menos agressivo que ácidos fortes (ex. ácido sulfúrico), reduzindo riscos para operadores e equipamentos.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A utilização do CO₂ capturado na separação da lignina no processo Kraft é uma tecnologia já demonstrada em escala piloto e semi-industrial, porém sua integração com sistemas de captura, utilização de carbono (CCU) e o aproveitamento da lignina para produtos avançados ainda está em fase pré-comercial. O nível de esforço é alto, com CAPEX moderado a elevado devido à necessidade de sistemas eficientes de captura, compressão e controle do CO₂, enquanto o OPEX tende a ser competitivo frente ao uso de ácidos minerais, já que o CO₂ pode ser subproduto interno.
- As principais barreiras incluem mercado limitado para lignina — atualmente, a maior parte é queimada para geração de energia — e a necessidade de pesquisa para ampliar aplicações avançadas, como grafeno e polímeros.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.5.2.3 Utilizar CO₂ Capturado para Lavagem de Massa Marrom (RST.03)

Descrição da Ação

- A lavagem da massa marrom é uma etapa crítica no processo Kraft, responsável por remover o licor negro da polpa após a digestão. A aplicação nesta etapa de CO₂ capturado tem como objetivo ajustar o pH e melhorar a eficiência da lavagem, reduzindo perdas de soda e consumo de água. O CO₂ substitui ácidos fortes tradicionalmente usados para controle de pH, oferecendo uma alternativa mais segura e sustentável. Já existem empresas no Brasil que já ofertam essa tecnologia comercialmente em fábricas de celulose e papel.

Forma de Mitigação

- A lavagem com CO₂ capturado, além de reduzir momentaneamente carbono pela sua captura direto da atmosfera (chaminé da fábrica), utilizando-o para lavagem da polpa marrom, essa ação causa redução de emissões de GEE por efeito de substituição, visto que substitui ácidos minerais convencionais (como H₂SO₄) pelo CO₂.
- Uma outra alternativa seria a utilização de CO₂ ionizado (em estudo).

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: A lavagem com CO₂ permite reduzir a quantidade de água utilizada. Além disso, como substitui ácidos minerais convencionais (como H₂SO₄) pelo CO₂, reduz outros impactos ambientais referentes à fabricação, manuseio e descarte destes.
- Operacional: Menor perda de soda cáustica no licor negro, aumentando a eficiência do ciclo de recuperação.
- Social: CO₂ é menos agressivo que ácidos fortes (ex. ácido sulfúrico), reduzindo riscos para operadores e equipamentos.
- Econômico: potencial para obtenção de crédito de carbono com a ação de CCU.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço para implantação dessa ação é considerado alto, sendo que o CAPEX inclui a instalação de sistemas de dosagem e armazenamento de CO₂; e o OPEX engloba custo do CO₂ capturado (compressão, transporte). As principais barreiras são a logística de fornecimento de CO₂ capturado, a necessidade de integração com sistemas de recuperação química e a falta de incentivos regulatórios específicos para uso de CO₂ em processos industriais no Brasil.
- Nota-se que, para a existência de benefícios econômicos, a ação demanda a obtenção de créditos de carbono, visto que o custo da captura e utilização do CO₂ praticamente anula a economia com ácidos fortes. Assim, vislumbra-se oportunidade para o setor, dado que se utilizado o CO₂ capturado, que é majoritariamente biogênico, tem-se um benefício climático passível de pleito de crédito de carbono.

Tipo de Ação

- Impactante.



1.2.5.2.4 Utilizar CO₂ Capturado no Tratamento de Efluentes (RST.04)

Descrição da Ação

- A utilização no tratamento de efluentes do CO₂ capturado é uma estratégia para reduzir emissões e substituir ácidos fortes, como o ácido sulfúrico, na neutralização de efluentes alcalinos das estações de tratamento. O CO₂, proveniente de processos industriais ou sistemas de captura (CCUS/BECCS), é injetado no efluente, formando ácido carbônico que reage com íons OH⁻, ajustando o pH e gerando bicarbonatos e carbonatos estáveis. Essa abordagem é especialmente aplicada antes do tratamento biológico, garantindo condições adequadas para os micro-organismos e prevenindo incrustações. Uma outra alternativa seria a utilização de CO₂ ionizado que também contribuirá na remoção de matéria orgânica e principalmente na redução de cor (em estudo).
- Além de melhorar a segurança operacional e reduzir riscos associados ao manuseio de ácidos minerais, essa prática contribui para a descarbonização do setor ao dar um destino útil ao CO₂ capturado. Os compostos formados permanecem no efluente tratado e não representam risco ambiental significativo, tornando a solução eficiente e sustentável para indústrias de celulose com efluentes de alta alcalinidade.

Forma de Mitigação

- A ação, além de reduzir momentaneamente carbono pela sua captura direto da atmosfera (chaminé da fábrica), utilizando-o para neutralização de efluentes alcalinos e controle de incrustações, causa redução de emissões de GEE por efeito de substituição, visto que substitui ácidos minerais convencionais (como H₂SO₄) pelo CO₂.
- Nota-se que, quando o CO₂ é injetado no efluente alcalino, cerca de 90 a 95% do gás reage formando bicarbonatos e carbonatos, enquanto apenas uma pequena fração permanece dissolvida

como CO₂ livre. Esses compostos são estáveis e ajudam a tamponar o pH, garantindo condições adequadas para o tratamento biológico.

- Após a neutralização, os bicarbonatos e carbonatos não são removidos do efluente, pois não representam risco ambiental significativo. Assim, eles seguem para o corpo receptor junto com o efluente tratado, mantendo sua forma química.
- No ambiente natural, esses sais permanecem estáveis em pH neutro, e apenas em situações extremas, como acidificação intensa ou aeração forçada, pode ocorrer liberação parcial de CO₂. Mesmo nesses casos, as estimativas indicam que menos de 5% do CO₂ retorna à atmosfera, tornando essa tecnologia uma solução eficaz para imobilização do carbono.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: A lavagem com CO₂ permite reduzir a quantidade de água utilizada. Além disso, há também a redução de outros impactos ambientais referentes à fabricação, manuseio e descarte dos ácidos substituídos pelo CO₂.
- Operacional: Menor perda de soda cáustica no licor negro, aumentando a eficiência do ciclo de recuperação.
- Social: CO₂ é menos agressivo que ácidos fortes (ex. ácido sulfúrico), reduzindo riscos para operadores e equipamentos.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço é alto, sendo que o CAPEX corresponde ao investimento inicial em infraestrutura, incluindo sistemas de dosagem e injeção de CO₂, tanques de armazenamento, instrumentação para controle de pH, automação, adequações na ETE, dispositivos de segurança, além de projeto, engenharia e treinamento da equipe. Esse custo tende a ser elevado quando a planta precisa instalar toda a estrutura do zero, podendo ser classificado como médio ou alto.

- Já o OPEX refere-se aos gastos recorrentes para manter a operação, como consumo de CO₂ (compra ou transferência interna), energia elétrica para bombas e compressores, manutenção preventiva e corretiva, calibração de instrumentos, mão de obra, inspeções de segurança e custos regulatórios. Em geral, o OPEX é baixo a médio, pois o consumo de CO₂ é relativamente pequeno. Além disso, a substituição do ácido sulfúrico por CO₂ pode gerar uma economia significativa, reduzindo entre 30% e 50% os gastos com produtos químicos, o que torna a solução atrativa para grandes plantas com integração de captura. CAPEX: Alto.
- Apesar das vantagens, existem desafios para adoção dessa tecnologia. Do ponto de vista técnico, é necessário integrar sistemas de captura e garantir controle preciso do pH no processo. No âmbito regulatório, o Brasil ainda está em fase de definição de normas para CCUS, com consultas públicas em andamento. Economicamente, o maior obstáculo é o investimento inicial para captura e compressão do CO₂, o que pode exigir recursos externos ou incentivos para viabilização em empresas de médio porte.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.5.2.5 Captura e Armazenamento Geológico do Carbono (RST.05)

Descrição da Ação

- O Brasil possui um marco regulatório específico para Captura e Armazenamento de Carbono (CCS), estabelecido pela Lei nº 14.993/2024, que define regras para captura, transporte e armazenamento geológico de CO₂. A autorização para operação é concedida pela ANP, com prazo de 30 anos prorrogável, e inclui exigências como monitoramento contínuo, inventário das quantidades armazenadas e gestão de riscos. A legislação reconhece CCS como atividade de interesse público para cumprimento das metas climáticas nacionais e prevê responsabilidade pós-fechamento por pelo menos 20 anos após a injeção.
- Já foram realizados estudos relevantes quanto ao mapeamento de áreas viáveis para armazenamento geológico de carbono no Brasil, como o Atlas Brasileiro de Captura e Armazenamento Geológico de CO₂ (PUCRS, 2014), que identifica bacias sedimentares com alto potencial, incluindo Paraná, Santos, Campos e Amazonas. Pesquisas da Empresa de Pesquisa Energética e projetos acadêmicos, como o do Centro de Pesquisa para Inovação em Gases de Efeito Estufa (RCGI) da USP, apontam regiões estratégicas no Sudeste e Nordeste para armazenamento *offshore*, além de áreas no Sul e Centro-Oeste para integração com bioenergia (BECCS - Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono). Estimativas indicam capacidade teórica superior a 1.000 GtCO₂, concentrada principalmente em aquíferos salinos.
- Apesar do potencial, existem desafios significativos. A distribuição desigual das áreas de armazenamento em relação às fontes emissoras aumenta custos de transporte e infraestrutura. Além disso, há barreiras tecnológicas, regulatórias e financeiras, exigindo desenvolvimento de modelos de negócio sustentáveis e políticas públicas para viabilização. A implantação também depende de procedimentos rigorosos de medição, monitoramento e

verificação (MMV) para garantir segurança e evitar riscos ambientais.

Forma de Mitigação

- Remove “permanentemente” carbono da atmosfera, com potencial de remoções líquidas via tecnologia BECCS. CCS é uma solução estratégica para descarbonização do setor, especialmente em fábricas de celulose de grande porte. Porém, exige políticas públicas, incentivos financeiros e desenvolvimento de infraestrutura para viabilização.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: remove “permanentemente” carbono da atmosfera, com potencial de remoções líquidas via tecnologia BECCS (Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono).
- Econômico: potencial para geração de crédito de carbono.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A implementação da Captura e Armazenamento Geológico de Carbono no setor de Papel & Celulose apresenta custos elevados. O CAPEX é considerado alto, pois envolve construção de sistemas de captura, compressão, transporte e armazenamento geológico, exigindo investimentos significativamente altos. Esse nível de investimento torna inviável a execução com recursos próprios, sendo necessária a obtenção de financiamento externo ou apoio por meio de políticas públicas. O OPEX também é alto, devido à demanda contínua por energia para compressão, manutenção da infraestrutura e monitoramento permanente dos locais de armazenamento.
- A adoção da CCS enfrenta barreiras significativas. Entre as tecnológicas, destaca-se a necessidade de adaptar os sistemas de captura aos processos específicos de papel e celulose e integrar a tecnologia às caldeiras de biomassa. No aspecto de infraestrutura, há carência de redes de transporte e definição de áreas

adequadas para armazenamento geológico no Brasil. As barreiras regulatórias incluem a ausência de um marco legal consolidado e normas técnicas detalhadas para CCS. Por fim, existem barreiras sociais e ambientais, relacionadas à percepção pública sobre a segurança do armazenamento geológico e à necessidade de monitoramento rigoroso para evitar riscos.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.6 Bioprodutos

A madeira, esse recurso versátil, surge como um substituto promissor para uma variedade de materiais de origem fóssil usados em produtos do dia a dia, desde a construção até a embalagem. Essa mudança não apenas oferece um caminho para reduzir as emissões de carbono, mas também apoia as metas climáticas de longo prazo, aproveitando a capacidade natural da madeira de sequestrar carbono. Com os avanços na tecnologia e políticas de apoio, as soluções à base de madeira estão prontas para desempenhar um papel fundamental em nossa transição para um futuro mais sustentável.

O petróleo é usado de várias maneiras, não apenas em veículos e na geração de eletricidade, mas também para criação de uma variedade de produtos, muitos deles usados no dia a dia, incluindo roupas, móveis, eletrônicos e até produtos farmacêuticos. Nossa dependência do petróleo, no entanto, teve um efeito prejudicial no planeta. Portanto, novas maneiras de produzir de forma sustentável são urgentemente necessárias.

Embora muitas alternativas estejam sendo investigadas, a substituição de produtos de origem fóssil por alternativas à base de madeira, sem comprometer a qualidade ou as características do produto, já é uma realidade em muitos setores.

Materiais à base de madeira também estão sendo usados para substituir embalagens plásticas para frutas e vegetais, produtos de confeitaria, etc.

Em comparação com as embalagens plásticas, as emissões geradas durante o ciclo de vida das alternativas de embalagens à base de madeira são consideravelmente menores e a sua reciclagem oferece possibilidades adicionais de redução de emissões.

Tipos especiais de celulose também já estão sendo usados para produzir fibras têxteis à base de madeira, como o liocel, que têm o potencial de substituir fibras têxteis de origem fóssil, como o poliéster. Além disso, a indústria florestal e seus resíduos poderiam ser utilizados para produzir biocombustíveis

líquidos e uma variedade de produtos químicos de base biológica, substituindo as versões de base fóssil.

Atualmente as fábricas de celulose tem como principal produto a celulose, porém em virtude de uma série de outros bioprodutos que são gerados em seu processo produtivo a partir da madeira, essa indústria também pode ser entendida como uma bioindústria ou uma fábrica de bioprodutos, estando totalmente alinhada aos preceitos de economia circular e combate às mudanças climáticas.

A partir da biomassa essas fábricas produzem energia sustentável, terebintina, *tall oil*, gás de produto usado no forno de cal como biocombustível, ácido sulfúrico a partir gases odoríferos, fertilizante e corretivo de acidez de solo a partir de resíduos gerados no processo produtivo, e-metanol a partir de carbono biogênico das chaminés das caldeiras, produtos de lignina, bioprodutos a partir do licor verde, bio-óleo, entre outros.

Desta forma, o setor florestal desempenha um papel essencial na transição climática, proporcionando o sequestro de carbono e uma importante alternativa para substituição de materiais de origem fóssil.

Assim, neste capítulo são apresentadas algumas soluções à base de madeira (bioprodutos) já disponíveis.



1.2.6.1 Produzir Lignina (RES.01)

Descrição da Ação

- A lignina de biomassa é um biopolímero encontrado na biomassa vegetal, especialmente em árvores e plantas lignocelulósicas. Ela desempenha um papel essencial na estrutura e resistência das plantas, permitindo que cresçam e se mantenham firmes. A composição precisa da madeira varia de acordo com o tipo e a espécie, mas os constituintes mais importantes são a celulose, a hemicelulose e a lignina. A madeira contém naturalmente cerca de 50% de água e a fração sólida é tipicamente de cerca de 45% de celulose, 25% de hemicelulose e 25% de lignina e 5% de outras matérias orgânicas e inorgânicas (BAT, 2015).
- Na indústria de celulose, no processo Kraft, as fibras são libertadas na unidade de cozimento (digestor) dissolvendo a lignina e parte da hemicelulose na solução química de cozimento (licor branco), que contém hidróxido de sódio e sulfureto de sódio como produtos químicos ativos. A polpa proveniente do digestor contém fibras e licor de cozimento usado (licor preto). Cerca de metade da madeira é dissolvida no cozimento. Consequentemente, o licor negro contém produtos químicos inorgânicos e uma grande quantidade de substâncias orgânicas. O licor negro é removido da polpa na etapa de lavagem subsequente e é conduzido ao sistema de recuperação química, onde os produtos químicos de cozimento e a energia são recuperados (BAT, 2015).
- Basicamente, o processo de extração da lignina consiste em duas etapas: precipitação e purificação. A lignina pode ser precipitada, a partir do licor negro do processo Kraft, por meio dióxido de carbono e ácido sulfúrico, e posteriormente purificada, através de processos de filtração e lavagem.
- As principais características da lignina são estabilidade química e térmica, capacidade antioxidante e proteção UV, biodegradabilidade e propriedades

antifúngicas e antibacterianas.

- A lignina é utilizada para diversas aplicações, como bioenergia, biocombustíveis, aditivos industriais, dispersantes agrícolas, nutrição animal, cosméticos, resinas e termoplásticos, borrachas, poliuretanos, materiais de carbono, produção de antioxidantes e outros.

Forma de Mitigação

- A lignina é uma alternativa renovável para a substituição de materiais de origem fóssil, em virtude de apresentar algumas características semelhantes ao petróleo, especialmente no que diz respeito à sua estrutura química e potencial de uso industrial. Assim como o petróleo, a lignina é rica em compostos aromáticos, o que a torna uma matéria-prima promissora para substituir derivados fósseis em diversas aplicações como biocombustíveis, biomateriais e bioquímicos. Assim, sua principal forma de mitigação das mudanças climáticas é pelo efeito de substituição de insumos petroquímicos por produtos à base de lignina (resinas, polímeros, adesivos), reduzindo emissões associadas à extração e transporte de petróleo e derivados. Além disso, a produção de SAF pode contribuir para decarbonizar o setor de transporte aéreo, impactando emissões à jusante da cadeia de valor.
- Nota-se que, com a precipitação da lignina, há uma redução da carga energética na caldeira, o que causa uma menor geração de vapor interno, podendo aumentar consumo externo de energia elétrica se não houver compensação de perda de vapor com biomassa ou eficiência térmica. Ainda, se atrelada a captura do CO₂ majoritariamente biogênico das chaminés das indústrias de celulose para uso na precipitação da lignina do licor preto, essa ação geraria um maior benefício climático, dada a substituição de ácidos minerais convencionais (como H₂SO₄) pelo CO₂.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: se atrelado a captura do

CO₂ para uso na precipitação da lignina do licor preto, há redução de outros impactos ambientais referentes à fabricação, manuseio e descarte dos ácidos minerais convencionais (como H₂SO₄).

- Econômico: transforma resíduos (CO₂ e lignina) em insumos para produtos de maior valor agregado.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A valorização da lignina como matéria-prima para biocombustíveis avançados (como SAF e bio-óleo), produtos químicos (resinas, dispersantes, adesivos) e materiais de alta tecnologia (nanofibras, fibras de carbono) exige investimentos significativos, pois envolve tecnologias emergentes, integração de cadeias produtivas e adaptação das plantas industriais para operar como biorrefinarias multifuncionais.
- Cita-se outras barreiras existentes, tais como a complexidade química da lignina, cuja estrutura heterogênea dificulta padronização e conversão seletiva, exigindo rotas avançadas (pirólise, gaseificação, biocatalítica) ainda em consolidação para escala industrial; o mercado limitado para lignina ainda é limitado - apenas cerca de 2% da lignina gerada globalmente é usada em produtos de alto valor; o restante é queimado para geração de energia, prática que reduz o incentivo econômico para inovação; questões de escalabilidade e necessidade de conectar produtores de celulose, biorrefinarias e fornecedores de tecnologia, com processos digitalizados e rastreáveis.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.6.2 Produzir Embalagem a partir de Lignina (RES.02)

Descrição da Ação

- A lignina é um polímero natural abundante, presente na parede celular das plantas e gerado como subproduto no processo Kraft da indústria de celulose. Atualmente, grande parte da lignina é queimada para geração de energia, mas novas tecnologias permitem sua conversão em biomateriais para embalagens, substituindo plásticos derivados de petróleo. Essa ação consiste em extrair, purificar e modificar a lignina para produzir filmes, revestimentos ou compósitos biodegradáveis aplicáveis em embalagens.
- Basicamente, o processo de produção das embalagens consiste na extração da lignina, obtida como subproduto da indústria de celulose e biocombustíveis; modificação química, na qual a lignina pode ser tratada para melhorar suas propriedades mecânicas e de barreira; e formação de biocompósitos, que é a mistura com outros polímeros naturais para criar embalagens flexíveis ou rígidas.
- As principais vantagens das embalagens à base de lignina são redução do uso de plásticos fósseis, menor pegada de carbono na produção, biodegradabilidade e alta resistência mecânica, podendo ser usada em embalagens de alimentos e produtos industriais.
- Pesquisas indicam que a lignina pode ser utilizada na fabricação de fibras de carbono, polímeros e nanopartículas, ampliando suas aplicações na indústria de embalagens. Empresas e instituições como a Embrapa estão explorando novas tecnologias para viabilizar essa produção

Forma de Mitigação

- A produção de embalagens a partir de lignina reduz emissões de GEE pelo efeito de substituição de plásticos derivados de petróleo por materiais renováveis, reduzindo emissões a montante (extração e transporte de petróleo) e a jusante (decomposição de plásticos).

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: embalagens biodegradáveis à base de lignina contribuem para economia circular, valorizando resíduos e mitigando impactos ambientais do descarte de plásticos.
- Econômico: além de transformar um resíduo em produto de maior valor agregado, diversificando portfólio, a embalagem feita a partir de lignina tende a ter propriedades favoráveis, tais como criação de barreira UV, potencial antimicrobiano e resistência mecânica quando modificada.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A utilização da lignina - subproduto abundante da indústria de papel e celulose - para fabricar embalagens biodegradáveis exige alto nível de esforço devido à complexidade tecnológica e à necessidade de adaptação das plantas industriais.
- O custo é alto, pois requer processos seletivos para fracionamento e modificação química da lignina, com CAPEX elevado para unidades específicas e integração com linhas de biopolímeros, e OPEX médio devido à manutenção, insumos químicos e controle de qualidade.
- Cita-se outras barreiras existentes, tais como a complexidade química da lignina, cuja estrutura heterogênea dificulta padronização e conversão seletiva, exigindo rotas avançadas (pirólise, gaseificação, biocatalítica) ainda em consolidação para escala industrial; mercado limitado, pois apesar do potencial, embalagens à base de lignina ainda competem com bioplásticos consolidados (PLA, PHA), exigindo diferenciação e redução de custos; necessidade de maior pesquisa para melhorias nas propriedades físico-mecânicas (resistência à umidade, barreira a gases), além da necessidade de garantir conformidade com normas de segurança alimentar e compostabilidade.

Tipo de Ação

- Impactante.





1.2.6.3 Produzir Celulose Microfibrilada (RES.03)

Descrição da Ação

- A celulose microfibrilada (MFC), é uma matéria-prima 100% renovável, de origem vegetal, composta por microfibrilas extremamente finas de celulose, formando uma pasta fibrosa denominada polpa celulósica.
- A MFC é obtida por um processo de fibrilação mecânica da celulose. Esse processo envolve a aplicação de alta tensão de cisalhamento para romper as ligações de hidrogênio, provocando a desintegração das fibras de celulose em fragmentos microscópicos. Existem várias técnicas para produzir MFC, incluindo homogeneização, microfluidização, refino, moagem, extrusão e ultrassom. O processo de fabricação é uma outra vantagem, pois não há necessidade de processos químicos, o que minimiza possíveis impactos ambientais.
- Essas microfibrilas possuem alta área superficial e propriedades únicas, tornando a MFC um material versátil para diversas aplicações industriais. As principais características deste material são alta resistência mecânica, capacidade de retenção de água, Biodegradável e renovável e Melhoria na barreira de oxigênio
- As aplicações da celulose microfibrilada são diversas:
 - Indústria de papel e embalagens: aumenta a resistência e reduz o uso de fibras convencionais.
 - Cosméticos e produtos farmacêuticos: utilizada como espessante natural.
 - Materiais compósitos: pode ser incorporada em plásticos biodegradáveis.
 - Têxteis e adesivos: melhora propriedades mecânicas e estruturais.

- Produção de papéis: proporciona maior resistência

Forma de Mitigação

- Esse material assume um papel importante para inovar em vários segmentos, possibilitando, em muitos casos, substituir compostos de origem fóssil, impactando diretamente na redução de emissões de GEE por efeito de substituição, podendo viabilizar embalagens 100% celulósicas, eliminando camadas plásticas. Assim, reduz emissões a montante (extração de petróleo) e a jusante (decomposição de plásticos).
- Ainda, para plantas com excedente de energia, apesar da alta demanda elétrica para essa ação, o uso de energia renovável para desfibrilação pode neutralizar emissões, tornando o processo mais sustentável. Nota-se ainda que a utilização de MFC tende a aumentar a resistência e reduzir o peso de embalagens, diminuindo emissões no transporte de produtos acabados.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: a ação confere biodegradabilidade aos produtos, mitigando impactos ambientais do descarte de produtos acabados.
- Econômico: além de diversificar o portfólio, as embalagens produzidas com MFC possuem maior resistência à tração, barreira contra oxigênio e gordura, e superfície mais lisa, o que confere maior valor agregado ao produto. Há ainda redução de custos com redução de gramatura do papel e menor uso de fibras.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A produção de celulose microfibrilada (MFC) demanda alto nível de esforço devido à complexidade tecnológica e ao consumo energético elevado. O custo geral é considerado alto, com CAPEX significativo para aquisição de equipamentos especializados, como refinadores e homogeneizadores, além da

adaptação das plantas industriais. O OPEX é médio, principalmente pela alta demanda de energia elétrica para desfibrilação mecânica, sendo recomendável o uso de fontes renováveis para garantir benefícios climáticos. Esses fatores tornam a viabilidade econômica dependente de escala produtiva e otimização dos processos.

- As principais barreiras incluem o alto consumo energético, que impacta custos e emissões, e a necessidade de investimentos robustos para instalação e integração de tecnologias. Além disso, há desafios de escalonamento industrial, pois os processos ainda carecem de padronização e controle de qualidade para aplicações avançadas. O mercado é emergente e competitivo, exigindo redução de custos e aumento de escala, enquanto a complexidade técnica demanda pesquisas contínuas para garantir propriedades adequadas em embalagens, filmes barreira e reforço de papéis.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.6.4 Produzir Fibra Têxtil a Base de Celulose Solúvel (RES.04)

Descrição da Ação

- A produção de fibras têxteis regeneradas (viscose, modal e liocel) utiliza celulose dissolvida proveniente de polpa de madeira (eucalipto, pinus) para fabricar fios destinados à indústria têxtil.
- Viscose, modal e liocel são três tipos de fibras têxteis derivadas da celulose solúvel, cada uma com características e processos de produção distintos.
- Viscose: Uma das fibras artificiais mais populares, é produzida a partir da celulose extraída de árvores como eucalipto e bambu. Seu toque macio e caimento suave a tornam ideal para roupas confortáveis, mas sua resistência à umidade é relativamente baixa.
- Modal: Uma evolução da viscose, o modal passa por um tratamento especial que melhora sua resistência e durabilidade, especialmente quando úmido. Ele é mais macio, brilhante e resistente ao encolhimento, sendo amplamente usado em roupas íntimas, pijamas e roupas esportivas.
- Liocel: Considerado a versão mais sustentável entre as três, o liocel é produzido por um processo de circuito fechado que utiliza solventes orgânicos, que posteriormente são reutilizados. É uma fibra resistente, biodegradável e com excelente capacidade de absorção de umidade, sendo frequentemente encontrada em roupas de alta qualidade e tecidos mistos.
- A composição precisa da madeira varia de acordo com o tipo e a espécie, mas os constituintes mais importantes são a celulose, a hemicelulose e a lignina. A madeira contém naturalmente cerca de 50% de água e a fração sólida é tipicamente de cerca de 45% de celulose, 25% de hemicelulose e 25% de lignina e 5% de outras matérias orgânicas e inorgânicas (BAT, 2015).

- A celulose solúvel utilizada para produção das fibras têxteis requer maior pureza, para tanto, para sua produção é necessária a remoção de hemicelulose da polpa.
- O processo de produção da celulose solúvel é praticamente o mesmo da produção de celulose Kraft, porém existe uma etapa de pré-hidrólise dos cavacos com vapor na etapa de cozimento (digestor), que permitirá a remoção da hemicelulose. Em função da remoção da hemicelulose da polpa, é necessário um aumento de aproximadamente 60% da capacidade do circuito de recuperação química da fábrica, em comparação a capacidade de uma fábrica de produção de celulose Kraft.

Forma de Mitigação

- Essas fibras são biodegradáveis, provenientes de fontes renováveis, e uma alternativa para a substituição de fibras sintéticas derivadas de origem fóssil, como o poliéster, evitando emissões associadas à produção interna de polímeros fósseis. Além disso, reduz emissões a montante ligadas à extração e transporte de petróleo e a jusante relacionadas à decomposição de fibras sintéticas, que liberam microplásticos e têm alta pegada de carbono.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: são fibras biodegradáveis, provenientes de fontes renováveis, de decomposição rápida em condições adequadas. Especificamente para o Liocel, usa-se solvente reciclável (99% de recuperação), o que reduz consumos químicos e gera efluentes não tratados menos contaminados.
- Econômico: diversifica o portfólio para um novo mercado, o da moda sustentável.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A produção de fibra têxtil à base de celulose solúvel exige um alto nível de esforço devido à complexidade dos processos químicos e à necessidade de plantas industriais dedicadas. O custo geral é alto, com

CAPEX elevado, já que a construção dessas plantas requer investimentos elevados e sistemas avançados para purificação da celulose. O OPEX é médio-alto, principalmente pelo consumo de energia, uso de reagentes químicos e tratamento rigoroso de efluentes, fatores que tornam a viabilidade econômica dependente de escala produtiva e tecnologias mais limpas.

- Entre as principais barreiras estão o alto investimento inicial, que limita a entrada de pequenos *players*, e a complexidade dos processos químicos, que demandam controle rigoroso para garantir qualidade e segurança ambiental. Além disso, há desafios relacionados ao tratamento de efluentes tóxicos, à necessidade de energia renovável para reduzir impactos climáticos e à competitividade do mercado têxtil, que pressiona por custos baixos e certificações sustentáveis. Esses fatores exigem inovação contínua e integração eficiente para tornar essa solução escalável e economicamente viável.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.6.5 Produzir Breu (RES.05)

Descrição da Ação

- O breu é obtido a partir da colofônia, que por sua vez é extraída da resina de pinus ou como subproduto do processo Kraft (licor negro).
- Esse material contém ácidos resinosos que podem ser extraídos e tem diversas aplicações industriais, incluindo a indústria de celulose. As suas propriedades estão relacionadas à alta estabilidade térmica, hidrofobicidade e resistência mecânica.
- O breu é um produto versátil com aplicações em diversos setores. Ele pode ser usado na fabricação de adesivos industriais, resinas para tintas e vernizes, colagem interna de papel, revestimentos, aditivos para borracha e plásticos, além de aplicações em cosméticos, ceras depilatórias, goma de mascar e até agroquímicos. Em biorrefinarias, o breu também serve como base para novos materiais e biopolímeros, alinhando-se à economia circular e à química verde.
- Essas aplicações agregam valor aos subprodutos da celulose, substituem insumos fósseis e reduzem a pegada de carbono, tornando o breu um componente estratégico para empresas que buscam diversificação e sustentabilidade.

Forma de Mitigação

- O breu é uma alternativa renovável para a substituição de materiais de origem fóssil, além de valorizar subprodutos do processo, reduzindo principalmente emissões de GEE por efeito de substituição, visto que, ao substituir/reduzir o uso de insumos fósseis (tais como aqueles usados na fabricação de adesivos industriais, resinas para tintas e vernizes, revestimentos, aditivos para borracha e plásticos, aplicações em cosméticos e agroquímicos), reduz-se emissões associadas à extração e transporte de petróleo e à produção de químicos fósseis.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: essa ação promove economia circular, valorizando resíduos e fortalecendo a bioeconomia no setor.
- Econômico: diversifica o portfólio com bioprodutos de maior valor agregado.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A produção de breu apresenta nível de esforço médio a alto, pois exige processos de destilação e purificação para garantir qualidade comercial. O custo geral é considerado de médio a alto, devido à necessidade de infraestrutura específica, sendo o CAPEX voltado a investimentos em colunas de destilação, tanques e sistemas de recuperação química e o OPEX relacionado ao consumo de energia térmica e manutenção dos equipamentos. Embora menos onerosa que outras rotas de biorrefinaria, a viabilidade depende de escala produtiva e integração com processos existentes.
- Entre as principais barreiras estão a necessidade de investimentos em equipamentos especializados, a complexidade do controle de qualidade para atender padrões industriais e a dependência de energia térmica, que pode comprometer benefícios climáticos se não houver uso de fontes renováveis. Além disso, o mercado para breu é relativamente consolidado, mas sujeito à volatilidade de preços e à concorrência com derivados fósseis, exigindo estratégias para garantir competitividade e certificações sustentáveis.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.6.6 Produzir Terebentina (RES.06)

Descrição da Ação

- A terebentina, também conhecida como turpetina, é um subproduto do processo Kraft de produção de celulose a partir de madeira de coníferas, especialmente pinus. Principalmente durante o estágio de cozimento dos cavacos de madeira, ocorre a liberação de compostos orgânicos voláteis ricos em terpenos, que são coletados e condensados. A obtenção também pode ser realizada diretamente da madeira fresca do pinus (BAT, 2015).
- A terebentina é um líquido inflamável e volátil, rico em terpenos, como α -pineno e β -pineno que são usados em diversas aplicações industriais, como na fabricação de solvente para tintas e vernizes, matéria-prima na fabricação de fragrâncias e cosméticos, uso medicinal em pomadas e sprays para aliviar dores musculares e reumáticas. Além disso, algumas fábricas utilizam a terebentina como combustível alternativo no forno de cal, em função de sua renovável.

Forma de Mitigação

- A recuperação e purificação da terebentina evita emissões de compostos orgânicos voláteis e agrega valor à cadeia, alinhando-se à lógica de biorrefinaria e economia circular. Além disso, é uma alternativa renovável para uso na fabricação de diversos produtos, o que causa redução de emissões de GEE por efeito de substituição, visto que pode substituir/reduzir o uso de insumos fósseis utilizados na fabricação de fragrâncias, solventes, produtos químicos e biocombustíveis.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: Redução de emissões de GEE por efeito de substituição, visto que pode substituir/reduzir o uso de insumos fósseis utilizados na fabricação de fragrâncias, solventes, produtos químicos e biocombustíveis. A recuperação e purificação da terebentina evita emissões de compostos orgânicos voláteis (COVs)

e agrega valor à cadeia, alinhando-se à lógica de biorrefinaria e economia circular. Além disso, por demandar a captura de COVs que, se liberados, contribuem para poluição atmosférica e formação de ozônio troposférico, contribuem para a melhoria da qualidade do ar.

- Econômico: diversifica o portfólio com bioprodutos de maior valor agregado, aproveitando o crescimento do mercado para derivados de terebentina, como fragrâncias, solventes e terpeneol.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A terebentina, subproduto da indústria de papel e celulose obtido pela destilação da resina de pinus, é utilizada em solventes, fragrâncias e produtos químicos, e sua produção exige nível de esforço médio a alto devido à necessidade de processos controlados para garantir qualidade e segurança. O custo geral é considerado médio a alto, com CAPEX significativo para sistemas de recuperação, separadores, tanques e dispositivos de segurança contra explosão, enquanto o OPEX varia de baixo a médio, envolvendo manutenção e consumo de energia para destilação e purificação. Além disso, a operação requer armazenamento seguro e transporte especializado, aumentando a complexidade logística e operacional.
- As principais barreiras incluem a necessidade de sistemas robustos de segurança, devido à inflamabilidade da terebentina, e a complexidade logística, que exige transporte especializado e conformidade com normas regulatórias. Outro desafio é a dependência de energia térmica, que pode comprometer benefícios climáticos se não houver uso de fontes renováveis. Por fim, o mercado é competitivo e sujeito à volatilidade de preços, exigindo estratégias para garantir rentabilidade e certificações sustentáveis.

Tipo de Ação

- Impactante.



1.2.6.7 Produzir Tall Oil (RES.07)

Descrição da Ação

- O *tall oil* é um subproduto do processo Kraft de produção de celulose, composto principalmente por ácidos graxos e resínicos e pode ser refinado em frações como TOFA (*tall oil fatty acid*) e TOR (*tall oil rosin*).
- O sabão de *tall oil* é originário de extrativos presentes na madeira utilizadas para produção de celulose, principalmente resina e ácidos graxos. No processo Kraft, os ácidos graxos são saponificados devido às condições alcalinas do digestor e formam sabões de sódio (sabão bruto de *tall oil*) que se dissolvem no licor negro. No processo de recuperação química, o sabão se separa da fase aquosa e forma uma camada de sabão na superfície do licor à medida que o licor negro é sucessivamente concentrado e a solubilidade do sabão é diminuída. Por razões de processo, a maior parte do sabão deve ser removida do licor negro para evitar a formação de espuma nos evaporadores e manter a combustão estável na caldeira de recuperação (BAT, 2015).
- O *tall oil* bruto (CTO - *crude tall oil*) é produzido pela acidulação do sabão de *tall oil* em um processo contínuo ou em lote. É um líquido marrom escuro semelhante ao alcatrão com alta viscosidade e um odor desagradável de compostos de enxofre do processo de polpação (BAT, 2015).
- O *tall oil* bruto é utilizado para diversas aplicações industriais, como na produção de resinas, lubrificantes e aditivos químicos, HVO (diesel verde), plastificantes, estabilizantes de PVC e insumos para mineração, etc. Além disso, algumas fábricas utilizam o *tall oil* como combustível alternativo no forno de cal, em função de sua renovável.

Forma de Mitigação

- A produção de *tall oil* no setor de celulose contribui para a descarbonização ao aproveitar subprodutos do processo de cozimento da madeira para gerar

bioquímicos e biocombustíveis, substituindo versões fósseis. Assim, essa ação reduz emissões diretas por efeito de substituição, ao utilizar *tall oil* como combustível renovável em caldeiras, reduzindo o consumo de óleo combustível ou gás natural. Além disso, há também redução nas emissões indiretas associadas à geração de vapor e energia elétrica, caso parte da energia seja suprida por combustíveis renováveis; e contribuição para a mitigação das emissões da cadeia de valor, ao oferecer alternativas de baixo carbono para indústrias químicas e de transporte.

- Por fim, quando *tall oil* substitui óleos vegetais, há redução de emissões associadas ao ciclo de vida desses produtos, incluindo emissões ligadas ao preparo do solo, fertilizantes, transporte e mudanças no uso da terra. Essa vantagem é reforçada pelo fato de *tall oil* ser não alimentar, evitando competição com a cadeia de alimentos.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: a ação contribui para economia circular e lógica de biorrefinaria, maximizando o uso da biomassa e reduzindo resíduos industriais.
- Econômico: diversifica o portfólio com bioprodutos que são insumos para química verde, biolubrificantes e aditivos para biodiesel.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O *tall oil* é um subproduto da indústria de papel e celulose e uma alternativa renovável aos derivados fósseis. Sua produção exige nível de esforço médio a alto, pois envolve processos de acidificação, separação e, em alguns casos, destilação para purificação. O custo geral é médio a alto, com CAPEX significativo para sistemas de acidificação, separadores, tanques e colunas de destilação, enquanto o OPEX é médio, devido ao uso de reagentes como ácido sulfúrico, energia para aquecimento e manutenção dos equipamentos.

- Apesar de menos onerosa que outras rotas avançadas de biorrefinaria, a viabilidade econômica depende da integração com processos existentes e da competitividade frente a óleos vegetais e petroquímicos. A regulamentação da taxa de carbono prevista na Lei nº 15.042/2024, que institui o mercado regulado de carbono no Brasil, pode atuar como um importante catalisador, tornando produtos renováveis mais atrativos e fortalecendo a lógica de biorrefinaria e economia circular no setor.
- As principais barreiras incluem a competição com óleos vegetais e derivados fósseis, que possuem cadeias consolidadas e preços mais baixos, além da necessidade de investimentos em equipamentos especializados e sistemas de segurança para lidar com reagentes corrosivos. Outro desafio é a gestão de efluentes ácidos gerados no processo, exigindo tratamento adequado para atender normas ambientais. A volatilidade do mercado químico e a dependência de escala produtiva também impactam a viabilidade, tornando essencial a busca por nichos de maior valor agregado, como biocombustíveis avançados e químicos verdes.

Tipo de Ação

- Impactante.

1.2.7 Gestão de Emissões Fugitivas

De maneira geral, as discussões sobre o aquecimento global estão focadas nas emissões de CO₂, em decorrência do maior volume representado por este gás. No entanto, o aquecimento global não depende apenas das emissões de CO₂, mas também na contribuição de outros gases com potencial de aquecimento global, incluindo os aerossóis e outros GEE, como por exemplo, N₂O, CH₄ e os gases fluorados (gases-F) (IPCC, 2022b).

Uma categoria importante de emissão direta de gases de efeito estufa (GEE) são as emissões fugitivas, que resultam da liberação direta para a atmosfera de compostos de GEE de vários tipos de equipamentos e processos (EPA, 2023).

Os gases fluorados (gases-F), são gases sintéticos de efeito estufa usados em várias aplicações industriais e comerciais. Eles incluem hidrofluorcarbonetos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hexafluoreto de enxofre (SF₆) e trifluoreto de nitrogênio (NF₃) e outros compostos fluorados. Os hidrofluorcarbonetos (HFC) representam cerca de 90% de todos os gases fluorados. Esses gases não são inflamáveis e quimicamente estáveis, tornando-os altamente valiosos em refrigeração, ar-condicionado, fabricação de semicondutores e sistemas elétricos.

Os gases fluorados geralmente têm altos potenciais de aquecimento global, milhares ou até dezenas de milhares de vezes maiores que o dióxido de carbono (CO₂), embora sejam emitidos em quantidades menores. O Potencial de Aquecimento Global (GWP) é uma medida usada para comparar o impacto de diferentes gases de efeito estufa no aquecimento global em um horizonte de tempo específico, normalmente 100 anos. O Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) fornece valores Potencial de Aquecimento Global (PAG) atualizados para vários gases. Por exemplo:

- HFC-23 → PAG = 14.600
- HFC-125 → PAG = 3.740
- PFC-128 → PAG = 9.290

- Hexafluoreto de enxofre (SF₆) → PAG = 24.300

As emissões podem ocorrer quando os gases fluorados são produzidos, transportados, armazenados ou enchidos em produtos e equipamentos, ou se vazam durante sua vida útil ou descarte. Quando contidos em produtos como aerossóis e solventes, por exemplo, os gases fluorados são emitidos diretamente para a atmosfera. Um princípio fundamental no novo regulamento relativo aos gases fluorados é que todos devem evitar estas emissões, se possível (EC, 2025a).

Esforços estão sendo feitos globalmente para eliminar ou reduzir o uso de gases fluorados. Por exemplo, a Emenda de Kigali ao Protocolo de Montreal visa reduzir significativamente a produção e o consumo de HFCs, o que pode ajudar a limitar o aumento da temperatura global.

A Emenda de Kigali entrou em vigor em 2019, após ser aprovada na 28ª Reunião das Partes do Protocolo de Montreal em 2016 em Kigali, Ruanda. De acordo com a Emenda, todos os países reduzirão gradualmente os HFCs em mais de 80% nos próximos 30 anos e os substituirão por alternativas mais amigáveis ao planeta (UNEP, 2020).

1.2.7.1 Reduzir ou Eliminar Emissões Fugitivas em Equipamentos de Refrigeração e Climatização (REF.01)

Descrição da Ação

- A ação consiste em reduzir ou eliminar emissões fugitivas de gases refrigerantes (HFCs, HCFCs) em sistemas de refrigeração e climatização, substituindo fluidos de alto PAG por alternativas:
 - Troca completa por refrigerantes naturais (CO₂, NH₃, hidrocarbonetos), exigindo muitas vezes substituição do equipamento para compatibilidade.
 - Retrofit/conversão para HFOs ou misturas (baixo PAG, mas não nulo), mantendo parte da infraestrutura existente.

Forma de Mitigação

- A redução e eliminação dessas emissões fugitivas de gases fluorados é muito importante para a mitigação das emissões diretas de GEE (Escopo 1), visto que esses tipos de gases apresentam elevado PAG, centenas a milhares de vezes maior que o CO₂.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: redução de emissões de GEE. Atende ao Protocolo de Montreal e Emenda de Kigali, que impõem redução de HFCs até 2040.
- Econômico: sistemas com CO₂ e NH₃ podem reduzir consumo energético em até 20% em aplicações industriais.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A redução ou eliminar emissões fugitivas em sistemas de climatização e refrigeração apresenta um nível de esforço classificado entre médio e alto, principalmente devido às exigências técnicas, financeiras e operacionais envolvidas.
- A troca completa para refrigerantes

naturais, envolve mudança estrutural de todo sistema, traduzindo em CAPEX elevado para aquisição de novos equipamentos, reforço de componentes e adequação das instalações.

- O retrofit para HFOs, por outro lado, possui menor complexidade pela substituição do fluido demanda ajustes em compressores e outros componentes, o que eleva o investimento inicial. Embora o CAPEX também seja considerado alto, essa opção normalmente evita a troca completa do equipamento, reduzindo o impacto estrutural da intervenção. Em contrapartida, o OPEX tende a ser menor após a conversão, principalmente pela maior eficiência energética e, no caso dos naturais, pelo menor custo dos fluidos ao longo do ciclo de vida. Outra barreira é resistência à mudança e falta de mão de obra qualificada no Brasil para tecnologias de alta pressão e fluidos naturais.

- Além disso, esses fluidos exigem equipamentos projetados para suas propriedades particulares: o CO₂ opera em pressões elevadas, alcançando até 130 bar; a amônia é tóxica e requer sistemas altamente seguros e ventilados; e os hidrocarbonetos são inflamáveis, o que demanda rigor nas normas de segurança.

Tipo de Ação

- Impactante

1.2.7.2 Eliminação Gradual de SF₆ em Equipamentos Elétricos (REF.02)

Descrição da Ação

- O SF₆ (hexafluoreto de enxofre) é um gás isolante usado em equipamentos elétricos de média e alta tensão (disjuntores, seccionadores, GIS). Ele possui excelente capacidade dielétrica e extinção de arco, mas apresenta elevado PAG, 24.300 vezes maior que CO₂ e vida útil atmosférica de até 3.200 anos.
- A eliminação gradual do SF₆ é uma exigência regulatória em diversos países e uma tendência global para reduzir emissões industriais.
- No setor de Papel & Celulose, o SF₆ é utilizado principalmente em equipamentos elétricos de alta e média tensão que fazem parte da infraestrutura das plantas industriais. Esses equipamentos estão ligados ao sistema de distribuição elétrica interno, que alimenta motores, bombas, refinadores e outros equipamentos críticos.
- Alternativamente, tecnologias de disjuntores a vácuo já estão consolidadas para média tensão, o isolamento com ar limpo aplicado em GIS ecológicos, mistura de gases sintéticos está em processo de desenvolvimento para alta tensão e isolamento sólido vem sendo usado em religadores modernos.

Forma de Mitigação

- A eliminação do uso de SF₆ em

equipamentos elétricos tem grande impacto na mitigação das emissões de GEE, visto que apresenta elevado PAG (24.300 vezes maior que CO₂) e vida útil atmosférica de até 3.200 anos.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: redução de emissões de GEE de alto PAG.
- Operacional: equipamentos sem SF₆ permitem maior digitalização e monitoramento inteligente.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço é considerado médio, envolve investimento na substituição completa de celas GIS ou disjuntores requer investimentos significativos com equipamentos e obras civis, já o OPEX é menor uma vez que a manutenção tende a ser mais simples.
- Muito embora já existam tecnologias para substituir o SF₆, muitas ainda estão em fase de amadurecimento, principalmente para tensões elevadas, onde há desafios em relação ao seu desempenho e tamanho de equipamentos.
- Novos gases e equipamentos livres de SF₆ ainda têm custos iniciais mais altos devido à escala de produção limitada.

Tipo de Ação

- Impactante

1.2.7.3 Instalar Sensores IoT e Sistemas Automáticos para Detectar Vazamentos de Gases Fluorados (REF.03)

Descrição da Ação

- Os gases fluorados (F-gases) incluem HFCs, PFCs, SF₆ e HFOs, são usados em sistemas de refrigeração e climatização (câmaras frias, HVAC, controle térmico de processos) e equipamentos elétricos (SF₆ em disjuntores e GIS).
- Esses gases têm alto Potencial de Aquecimento Global (PAG), variando de centenas a dezenas de milhares de vezes o CO₂, e longa permanência na atmosfera. Vazamentos, mesmo pequenos, representam grande impacto climático e custos operacionais.
- A solução consiste em sensores IoT conectados a sistemas automáticos, que monitoram concentrações de gases em tempo real, enviam alertas e podem acionar respostas automáticas (ex.: corte de válvulas, ventilação, desligamento de equipamentos).

Forma de Mitigação

- O controle de vazamento de gases fluorados é muito importante para a mitigação das emissões de GEE, visto que esses tipos de gases apresentam elevado PAG.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: redução de emissões de GEE de alto PAG.

- Operacional: aumenta a confiabilidade operacional e reduz tempo de acionamento de protocolo de manutenção quando um vazamento ocorre.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço é médio, com CAPEX médio também, que envolve a instalação física de sensores em pontos estratégicos, integração com sistemas de automação e/ou plataformas IoT, análise de dados em tempo real com possibilidade de ajustes operacionais e adaptação dos sistemas de refrigeração. Enquanto o OPEX é baixo a médio, os custos de operação envolvem calibração periódica e manutenção dos sistemas e redes.
- Sistemas de refrigeração mais complexos e instalações mais antigas podem ser barreiras para implementação desta ação.

Tipo de Ação

- Impactante.





1.3 Eixo III – Instrumentos Econômicos e Políticas Públicas

A redução dos gases de efeito estufa e das mudanças climáticas requer transformações econômicas, sociais e estruturais. Para isso, os instrumentos econômicos e as políticas públicas são essenciais, pois orientam essas mudanças de forma justa, eficiente e sustentável.

Neste contexto os instrumentos econômicos são utilizados para internalizar custos ambientais, incentivar a inovação para uma economia verde, estimular investimentos e gerar recursos para financiar políticas de mitigação e adaptação climática.

As políticas públicas por sua vez visam estabelecer metas e diretrizes a uma economia de baixo carbono, estabelecer leis, planos e regulamentações que orientam o governo, empresas e sociedade para o desenvolvimento sustentável, além de criar condições para o uso de instrumentos econômicos.

As finanças sustentáveis referem-se ao processo considerar aspectos ambientais, sociais e de governança (ESG) ao tomar decisões de investimento no setor financeiro, levando a mais investimentos de longo prazo em atividades e projetos sustentáveis. Os aspectos ambientais podem incluir a atenuação das mudanças climáticas e medidas de adaptação climática, bem como, a preservação da biodiversidade, a prevenção da poluição e a economia circular. Os aspectos sociais podem referir-se a questões de desigualdade, inclusão, relações laborais, investimento nas pessoas e nas suas competências e comunidades, bem como questões de direitos humanos. A governança de instituições públicas e privadas – incluindo estruturas de gestão, relações com funcionários e remuneração de executivos – desempenha um papel fundamental para garantir a inclusão de considerações sociais e ambientais no processo de tomada de decisão (EC, 2025b).

O principal objetivo das finanças sustentáveis é a alocação de recursos públicos e privados em atividades sustentáveis, inovadoras e inclusivas, reduzindo os riscos ambientais e climáticos, de tal forma a aumentar os investimentos em atividades econômicas e soluções tecnológicas voltadas para a redução do impacto ambiental, abrindo caminho para o desenvolvimento sustentável.

As finanças sustentáveis desempenham um papel crucial na construção de um futuro mais sustentável, principalmente no combate às mudanças climáticas e alcance das metas de redução de emissão de gases de efeito estufa. São essenciais para empresas que desejam se tornar sustentáveis, mas precisam fazê-lo em etapas ao longo do tempo - em outras palavras, empresas com diferentes pontos de partida que desejam financiar sua jornada em direção a um futuro sustentável.

Assim, este capítulo tem como objetivo apresentar as ações estruturantes referente aos principais instrumentos econômicos e políticas públicas relacionados à descarbonização, distribuídas nos seguintes tópicos:

- Estratégias e políticas nacionais;
- Planos, programas e iniciativas;
- Marcos regulatórios e instrumentos normativos;
- Finanças, fundos e mecanismos de investimento.

1.3.1 Estratégias e Políticas Nacionais

Política Nacional de Mudança do Clima (PNMC): instituída pela Lei nº 12.187/2009, é o principal marco legal brasileiro voltado ao enfrentamento das causas e efeitos das mudanças climáticas. Seu objetivo é promover o desenvolvimento sustentável por meio da redução das emissões de gases de efeito estufa, do estímulo à adaptação aos impactos climáticos e da transição para uma economia de baixo carbono. A PNMC estabelece diretrizes, metas e instrumentos de implementação — como planos setoriais, mecanismos de mercado e fundos de financiamento climático — que orientam ações nos setores de energia, indústria, transporte, agricultura e florestas, em articulação com políticas públicas nacionais e compromissos internacionais do Brasil.

Plano Clima: é o principal instrumento da Política Nacional sobre Mudança do Clima, com o objetivo de identificar as alternativas mais custo-efetivas para a redução das emissões de GEE no Brasil. Em elaboração desde setembro de 2023, ele servirá como referência para as ações de enfrentamento à mudança do clima no país até 2035. A estrutura do Plano Clima é composta por dois pilares centrais. O primeiro é voltado à mitigação, com diretrizes para impulsionar a transição para uma economia de baixo carbono. O segundo foca na adaptação, visando aumentar a resiliência dos sistemas naturais e humanos frente aos impactos climáticos. Além das Estratégias Nacionais de Mitigação e Adaptação, o plano inclui documentos específicos com ações, metas, estimativas de custo, fontes de financiamento e mecanismos de monitoramento e avaliação, abrangendo os diversos setores da economia.

Nova Indústria Brasil (NIB): é a política industrial lançada pelo governo federal em 2024, coordenada pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC), com o objetivo de promover a reindustrialização sustentável e inovadora do país. Estruturado em seis missões temáticas, entre elas a descarbonização, a transformação digital e o fortalecimento das cadeias produtivas, o NIB busca aumentar a competitividade da indústria nacional, estimular a produção com menor intensidade de carbono, ampliar investimentos em pesquisa e desenvolvimento e incentivar o uso

de tecnologias limpas.

Estratégia Nacional de Descarbonização da Indústria (ENDI): complementa os esforços da Nova Indústria Brasil (NIB), atuando como um instrumento operacional para a transformação sustentável do setor industrial. Além disso, a ENDI está integrada ao Plano Nacional sobre Mudança do Clima (Plano Clima), reforçando a convergência entre as políticas industriais e climáticas do país. Para desenvolver a ENDI, o MDIC iniciou oficinas com representantes do setor industrial, especialistas e demais partes interessadas, com o objetivo de identificar desafios e oportunidades para a descarbonização industrial (CNI, 2023).

Estratégia Nacional de Mitigação (ENM): é uma iniciativa do governo brasileiro que faz parte do Plano Clima, tem como objetivo orientar as ações de mitigação para alcançar de forma conjunta a ambição de mitigação nacional, identificando as melhores alternativas em termos de custo-efetividade para subsidiar o cumprimento da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) brasileira. É composta por 7 planos setoriais, incluindo o Plano Setorial da Indústria, que é composto por planos de vários subsetores, dentre os quais o de Papel e Celulose.

Plano de Transformação Ecológica: o Novo Brasil é o Plano de Transformação Ecológica com políticas públicas e ações estratégicas distribuídas em seis eixos temáticos. Esse plano constrói ferramentas para que indústria, agricultura, energia, finanças e sociedade como um todo sejam impulsionadas a um novo patamar de desenvolvimento sustentável e tecnológico, gerando prosperidade, com melhores empregos e distribuição de renda mais justa para a população (BRASIL, 2025a). Os eixos são: finanças sustentáveis, adensamento tecnológico, bioeconomia e sistemas agroalimentares, transição energética, economia circular e nova infraestrutura verde e adaptação.

Política Nacional de Transição Energética (PNTE): foi instituída pelo Conselho Nacional De Política Energética, por meio da Resolução CNPE nº 05/2024, com o objetivo de orientar os esforços nacionais no sentido da transformação da matriz energética nacional para uma estrutura de baixa emissão de

carbono, contribuindo para o alcance da neutralidade das emissões líquidas de gases de efeito estufa do País. Os instrumentos desta política são o Plano Nacional de Transição Energética e o Fórum Nacional de Transição Energética.

Política Nacional de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono: foi instituída pela Lei nº 14.948/2024, que estabelece o marco legal para o desenvolvimento do hidrogênio como vetor energético sustentável no Brasil. Tem como objetivo promover a produção e uso do hidrogênio com baixa emissão de carbono, incentivar rotas tecnológicas de produção, estimular a pesquisa e inovação e integrar o hidrogênio à matriz energética do Brasil.

Estratégia Nacional de Economia Circular (ENEC): é uma política pública instituída pelo Decreto nº 12.082/2024 com a finalidade de promover a transição do modelo de produção linear para uma economia circular, de modo a incentivar o uso eficiente dos recursos naturais e das práticas sustentáveis ao longo das cadeias produtivas. A ENEC será implementada por meio do Plano Nacional de Economia Circular.

Plano Nacional de Economia Circular (PLANEC): é um instrumento do governo federal que acompanha a tendência global de repensar o crescimento econômico com foco na sustentabilidade. O documento apresenta 18 macro-objetivos e 71 ações para implementar a circularidade na economia brasileira nos próximos 10 anos (2025-2034). O planejamento decenal detalha os cinco eixos da ENEC e norteia os trabalhos a serem desenvolvidos em diferentes setores da sociedade e da indústria, além das três esferas governamentais (Brasil, 2025b).

Estratégia Nacional de Bioeconomia: foi instituída pelo Decreto nº 12.044/2024 com a finalidade de coordenar e implementar as políticas públicas destinadas ao desenvolvimento da bioeconomia, em articulação com a sociedade civil e o setor privado. Será implementada por meio do Plano Nacional de Desenvolvimento da Bioeconomia, a ser desenvolvido pela Comissão Nacional de Bioeconomia, que será instituída por ato conjunto do Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, do Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e

Serviços e do Ministério da Fazenda.

Plano Nacional de Desenvolvimento de Florestas Plantadas (PNDF): é uma iniciativa do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), que foi atualizado em 2024, com objetivo de aumentar a área produtiva de árvores cultivadas para fins comerciais, consequentemente a área conservada sob responsabilidade deste setor, estimular o setor por meio da Política Agrícola de Florestas Plantadas (Decreto Nº 8.375/2014) e as cadeias produtivas florestais, proporcionando reflexos positivos nos aspectos social, econômico e ambiental.

Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA): foi instituída pela Lei nº 14.119 em 13 de Janeiro de 2021 e define conceitos, objetivos, diretrizes, ações e critérios de implantação da PNPSA, institui o Cadastro Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais e o Programa Federal de Pagamento por Serviços Ambientais.

1.3.2 Planos, Programas e Iniciativas

Plano de Retomada da Indústria: é uma nova estratégia, focada em inovação, descarbonização, inclusão social e crescimento sustentável. Lançado em 2023 pela CNI, apresenta propostas concretas para a reindustrialização do país, em bases modernas e alinhadas com as atuais demandas por sustentabilidade. O Plano apresenta medidas de alcance horizontal que, ao melhorar o ambiente de negócios, contribuem para a modernização dos processos produtivos, a redução dos custos de produção e a inserção das empresas brasileiras no mercado global.

Plano Nacional de Energia (PNE): tem como objetivo o planejamento de longo prazo do setor energético do país, orientando tendências e balizando as alternativas de expansão desse segmento nas próximas décadas, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) sob diretrizes do Ministério de Minas e Energia (MME).

Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL): é um programa instituído pela Portaria Interministerial nº 1.877/1985, para promover o uso eficiente da energia elétrica e combater o seu desperdício, e

coordenado pelo Ministério de Minas e Energia.

Programa de Aceleração da Transição Energética (PATEN): é uma iniciativa do governo brasileiro, instituída pela Lei nº 15.103/2025, com o objetivo de impulsionar projetos sustentáveis e acelerar a substituição de fontes poluentes por energias limpas e renováveis. O programa oferece crédito e facilidades de pagamento, e será supervisionado pelo BNDES através de um fundo

Programa Nacional de Biometano: regulamentado pela Lei do Combustível do Futuro (Lei nº 14.993/2024) e pelo Decreto nº 12.614/2025, visa promover a redução das emissões de GEE no setor de gás natural, incentivando a produção, comercialização e uso do biometano como alternativa renovável, alinhado à transição energética e à economia circular.

Programa Brasileiro de Redução do Consumo de HFCs: o programa está alinhado à Emenda de Kigali ao Protocolo de Montreal, que inclui metas para reduzir gradualmente o consumo de hidrofluorcarbonos (HFCs) — gases com alto potencial de aquecimento global, usados principalmente em refrigeração, ar-condicionado e aerossóis. Tem como objetivo reduzir o consumo de HFCs no Brasil até 2045.

Plano Floresta+ Sustentável (F+S): é um Plano de Ação para Recuperação e Manejo de Florestas. Elaborado pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) com o objetivo de impulsionar o desenvolvimento do setor de florestas plantadas no Brasil, estimulando a produção sustentável, a recuperação de áreas degradadas e o fortalecimento de cadeias produtivas. É desenvolvido a partir de três eixos: Florestas Plantadas, Economia Florestal e Rede Floresta + Iniciativa Conexão Florestal.

1.3.3 Marcos Regulatórios e Instrumentos Normativos

Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE): que estabelece o marco regulatório do mercado de carbono no Brasil, foi instituído pela Lei nº 15.042/2024, que define limites máximos de emissão de gases de efeito estufa para setores específicos da economia. Ele funciona pelo modelo "cap and trade", onde empresas

com emissões abaixo do teto podem vender permissões (Cotas Brasileiras de Emissão - CBEs) e créditos de carbono (Certificados de Redução ou Remoção Verificada de Emissões - CRVE). O objetivo é incentivar a redução de emissões de forma gradual e eficiente para que o Brasil cumpra seus compromissos climáticos internacionais, como os do Acordo de Paris.

Taxonomia Sustentável Brasileira: é um sistema que classifica quais atividades econômicas são sustentáveis. É um catálogo que identifica e define, com base científica e de forma objetiva, atividades econômicas, ativos e projetos que contribuem para objetivos ambientais, econômicos e sociais estabelecidos pela sociedade brasileira. Uma taxonomia funciona como um instrumento estratégico para mobilizar e redirecionar fluxos de capital para investimentos essenciais no combate à crise climática (Brasil, 2023a).

Combustível do Futuro: instituído pela Lei nº 14.993/2024 e dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono. Esse marco regulatório instituiu três programas nacionais voltados para combustíveis sustentáveis: Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação, Programa Nacional de Diesel Verde e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano.

Nova Lei do Gás: instituído pela Lei nº 14.134/2021 e estabelece um novo marco regulatório para o setor de gás natural no Brasil, visando criar um mercado mais aberto, competitivo e dinâmico, com maior atração de investimentos e expansão da infraestrutura.

Marco Legal do Hidrogênio: instituído pela Lei nº 14.948/2024, é um conjunto de regras que estabelece as bases para a produção, transporte, armazenamento e comercialização do hidrogênio de baixa emissão de carbono no Brasil. A lei visa atrair investimentos, criar um ambiente regulatório estável e posicionar o país como um player global na economia do hidrogênio verde, principalmente através de incentivos fiscais, fomento à pesquisa e desenvolvimento, e certificação da produção.

1.3.4 Finanças, Fundos e Mecanismos de Investimento

Fundo Nacional sobre Mudança do Clima: é um instrumento da Política Nacional sobre Mudança do Clima e tem sua regulamentação definida pelo Decreto nº 9.578/2018. Possui a finalidade de assegurar recursos para apoio a projetos ou estudos e financiamento de empreendimentos que visem à mitigação da mudança do clima e à adaptação à mudança do clima e aos seus efeitos. O Fundo Clima disponibiliza recursos em duas modalidades, reembolsável e não-reembolsável. Os recursos reembolsáveis, que são financiamentos, são administrados pelo BNDES. Já os recursos não-reembolsáveis são operados pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA).

Fundo Verde para o Clima (GCF - *Green Climate Fund*): é um fundo climático global estabelecido na Convenção-Quadro das Nações Unidas para Mudanças Climáticas (UNFCCC) para apoiar os países em desenvolvimento a responder aos múltiplos desafios das mudanças climáticas.

Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF - *Global Environment Facility*): é uma instituição internacional, criada em 1991, que apoia projetos ambientais globais, oferecendo financiamento e assistência técnica em áreas como biodiversidade, mudança climática e gestão de produtos químicos.

Fundos de Investimento Climático (CIF - *Climate Investment Funds*): são uma parceria multilateral em financiamento climático que canaliza financiamento por meio de seis bancos multilaterais de desenvolvimento para apoiar a ação climática (CIF, 2025). O Grupo Banco Mundial, o Banco Africano de Desenvolvimento, o Banco Asiático de Desenvolvimento, o Banco Europeu de Desenvolvimento e o Banco Interamericano de Desenvolvimento são os parceiros de implementação dos investimentos do CIF (CIF, 2025). O CIF compreende dois fundos: o Fundo de Tecnologia Limpa e o Fundo Estratégico para o Clima.

Programa Eco Invest Brasil - Mobilização de Capital Privado Externo e Proteção Cambial: é uma iniciativa do Governo Brasileiro para

facilitar a atração de investimentos privados estrangeiros essenciais para a transformação ecológica do país. O programa é parte do Plano de Transformação Ecológica do Brasil, adota conceitos inovadores e boas práticas financeiras, incorporando critérios climáticos, ambientais, sociais e de governança (BRASIL, 2025c).

Títulos Soberanos Sustentáveis: são instrumentos de dívida pública lastreados em programações orçamentárias do Orçamento Geral da União destinadas ao desenvolvimento sustentável e definidas como elegíveis, à luz do Arcabouço Brasileiro para Títulos Soberanos Sustentáveis, incluindo ações e projetos associados com a temática ambiental ou à social (BRASIL, 2023b). O pilar fundamental dos Títulos Sustentáveis é o compromisso com a alocação de recursos para projetos ambientais e/ou sociais elegíveis (BRASIL, 2023b).

Instrumentos de Financiamento Sustentável: são mecanismos financeiros criados para impulsionar projetos que promovem a sustentabilidade ambiental e social. Esses instrumentos ajudam empresas e governos a acessar capital com benefícios financeiros, como por exemplo taxas de juros reduzidas, caso as metas sejam atingidas, enquanto impulsionam a transição para uma economia mais verde. Alguns desses instrumentos são: *Sustainability-Linked Bonds (SLBs)*, *Sustainability-Linked Loans (SLLs)* e *Títulos Verdes (green bonds)*.

Letras de Crédito do Desenvolvimento (LCDs) e Debêntures: o Plano de Transformação Ecológica tem inovado na captação de recursos para financiar projetos sustentáveis. Três importantes instrumentos financeiros vêm ganhando destaque: as Letras de Crédito do Desenvolvimento (LCDs), as Debêntures Incentivadas e as Debêntures de Infraestrutura. Estes novos instrumentos possibilitam que investidores financiem diretamente projetos voltados para a transformação ecológica e o desenvolvimento econômico sustentável do país.

Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT): é um fundo de natureza financeira, criado em 1969, cujo objetivo é o de financiar a inovação e o desenvolvimento científico e tecnológico nacional. Atualmente,

existem 15 Fundos em operação, sendo 13 relativos a setores específicos e dois transversais (CT-FVA e CT-Infra), cada um com fontes próprias de recursos.

Plataforma Brasil de Investimentos Climáticos e para Transformação Ecológica (BIP): é uma iniciativa do Governo Brasileiro criada com a ambição de ampliar os investimentos na transformação ecológica rumo à descarbonização da economia, o uso sustentável dos recursos e a melhora da qualidade de vida da população. Liderada pelo Ministério da Fazenda, em conjunto com outros ministérios, tem o BNDES como o Secretariado da Plataforma, gerindo o dia a dia das operações.





1.4 Eixo IV – Comunicação e Engajamento da Sociedade e da Cadeia de Valor

No âmbito da estratégia de descarbonização da indústria de Papel & Celulose, o principal objetivo é identificar as possibilidades de mitigação de emissões de GEE. Adicionalmente, serão avaliadas barreiras, cobenefícios e potenciais efeitos adversos à adoção de tais medidas de mitigação.

Nesse contexto, a comunicação transparente e o engajamento efetivo com a sociedade e com os diversos elos da cadeia de valor tornam-se pilares fundamentais para a construção de uma operação sustentável e socialmente responsável.

Engajamento na cadeia de valor se desdobra em conexões que geram impacto. Engajar *stakeholders*, como clientes, fornecedores, investidores e colaboradores fortalece a reputação e a sustentabilidade do negócio. O engajamento dos clientes, por exemplo, amplia o impacto positivo das ações ESG e reforça a fidelidade à marca. Investidores valorizam

empresas transparentes e comprometidas com causas sociais e ambientais, o que acaba influenciando diretamente decisões de investimento.

A indústria de Papel & Celulose tem adotado estratégias robustas para engajar sua cadeia de valor nas ações contra as mudanças climáticas. E neste eixo estão descritos os principais pilares dessa abordagem.

Estratégias de engajamento climático na cadeia de valor e na sociedade se traduzem em ações concretas que contribuem para o amadurecimento do setor. As empresas têm desenvolvido seus planos de descarbonização, investido em desenvolvimento de produtos de baixo carbono e comunicado o que vem sendo desenvolvido às partes interessadas.

As organizações não se limitam à aplicação formal da matriz de materialidade, mas se dedicam intensamente a compreender quais

temas são críticos para sua operação e reputação. Esse esforço envolve analisar como cada questão afeta seus públicos internos e externos, identificar os riscos e oportunidades associados, e alinhar esses temas com seus compromissos de descarbonização e sustentabilidade.

A pergunta que se impõe é: como migrar para sistemas de baixo ou zero carbono, promovendo simultaneamente melhorias nos indicadores sociais? A resposta passa, necessariamente, pela comunicação estratégica e pelo engajamento ativo da sociedade e da cadeia de valor.

A transição para uma economia de baixo carbono precisa ser sinérgica com medidas de justiça social. Isso significa que os esforços de descarbonização devem contribuir para a redução das desigualdades socioeconômicas; geração de empregos verdes e decentes; fortalecimento da participação social nos processos decisórios e proteção dos direitos humanos e dos territórios tradicionais.

A comunicação no contexto da transição justa não se limita à divulgação de metas e resultados. Ela deve ser dialógica, acessível e inclusiva, permitindo que diferentes públicos compreendam os impactos, benefícios e riscos das mudanças propostas. No setor de Papel & Celulose, isso significa envolver comunidades locais, trabalhadores, consumidores e parceiros comerciais em conversas sobre todo o processo de descarbonização e os efeitos socioambientais das novas tecnologias utilizadas para tal.

A transparência na comunicação fortalece a confiança e legitima as ações empresariais, especialmente quando se trata de decisões que afetam diretamente territórios e modos de vida. Comunicar com responsabilidade é, portanto, um ato de respeito e um passo essencial para garantir que ninguém seja deixado para trás na transição.

A descarbonização com justiça social é um desafio complexo, mas absolutamente necessário. Para que ela se concretize, é essencial que as empresas do setor de Papel & Celulose adotem uma postura proativa de comunicação transparente e engajamento

profundo com a sociedade e a cadeia de valor.

Assim, este capítulo tem como objetivo apresentar as principais ações estruturantes relacionadas a comunicação e engajamento da sociedade e da cadeia de valor, distribuídas nos seguintes tópicos:

- G. Fornecedores;
- H. Clientes;
- I. Público interno (funcionários);
- J. Sociedade;
- K. Comunidade local;
- L. Organizações e associações setoriais.

1.4.1 Fornecedores

O controle das emissões de GEE, associadas à logística de insumos e produtos finais classificadas como escopo 3 (emissões indiretas), representa um dos maiores desafios na gestão de gases de efeito estufa no setor de Papel & Celulose, devido à amplitude da cadeia de fornecedores e à complexidade operacional. Apesar disso, as empresas exercem influência significativa para promover o engajamento de seus fornecedores na mitigação dessas emissões.

Apesar das dificuldades em influenciar ações fora do controle direto da empresa, é fundamental adotar práticas que possibilitem a atuação sobre toda a cadeia de valor. Essa abordagem fortalece o alinhamento com as melhores práticas de enfrentamento às mudanças climáticas e contribui para a redução da exposição a riscos diversos. Nesse cenário, o engajamento dos fornecedores torna-se um passo estratégico essencial para desenvolver iniciativas voltadas à diminuição das emissões indiretas de GEE. A indústria de Papel & Celulose tem demonstrado forte interesse em desenvolver estratégias específicas para engajar seus fornecedores na agenda climática, reconhecendo que a descarbonização só se torna viável com uma

cadeia de valor alinhada e colaborativa.

Nesse contexto, é de extrema importância desenvolver estratégias que fortaleçam o relacionamento com a cadeia de suprimentos, permitindo avanços tanto na mensuração das emissões quanto na implementação de iniciativas voltadas à descarbonização. Para isso, planos de engajamento devem ser estruturados considerando as particularidades de cada empresa, suas operações e o perfil dos fornecedores envolvidos, garantindo maior efetividade nas ações e alinhamento com os objetivos climáticos.

As organizações possuem critérios socioambientais na avaliação de fornecedores, algumas delas estabelecem indicadores ambientais obrigatórios para seus fornecedores, promovendo alinhamento com metas climáticas, tornando a exigência de transparência e reporte parte dos contratos e processos de homologação.

Com essas práticas as organizações fomentam à inovação e sustentabilidade no Setor de Papel & Celulose incentivando à adoção de tecnologias limpas, como por exemplo a substituição de combustíveis fósseis por renováveis.

1.4.1.1 Critérios Socioambientais na Avaliação de Fornecedores (FOR.01)

Em um cenário empresarial cada vez mais orientado por valores de sustentabilidade, ética e governança, a avaliação de fornecedores com base em critérios socioambientais tornou-se uma prática essencial para organizações comprometidas com a responsabilidade corporativa. Mais do que garantir conformidade legal, essa abordagem busca promover uma cadeia de valor alinhada aos princípios da sustentabilidade, fortalecendo a reputação da empresa e contribuindo para impactos positivos na sociedade e no meio ambiente.

A adoção de critérios socioambientais na seleção e monitoramento de fornecedores permite identificar riscos, prevenir violações de direitos humanos e ambientais, e fomentar relações comerciais mais justas e

transparentes.

Descrição da Ação

- A inclusão de critérios socioambientais na avaliação de fornecedores consiste em incorporar aspectos relacionados à sustentabilidade, ética e responsabilidade social na seleção, contratação e monitoramento de parceiros comerciais. Essa prática visa garantir que os fornecedores estejam alinhados com os valores da empresa, respeitem os direitos humanos, cumpram normas ambientais e contribuam para uma cadeia de suprimentos mais justa e transparente.

Forma de Mitigação

- Ao priorizar fornecedores que adotam práticas sustentáveis como uso eficiente de recursos naturais, redução de emissões de gases de efeito estufa, gestão adequada de resíduos e energia limpa a empresa contribui diretamente para a descarbonização da cadeia produtiva. Essa ação incentiva a adoção de tecnologias limpas e processos menos poluentes, promovendo uma cultura de baixo carbono entre os parceiros comerciais e reduzindo a pegada ambiental do setor como um todo.
- A ação cria uma base sistêmica e permanente para decisões futuras, incorporando critérios socioambientais nos processos de compras e gestão da cadeia de suprimentos.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: conscientização ambiental
- Social: conscientização social
- Governança: Em aceitar apenas fornecedores que estão em concordância com práticas sustentáveis.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- Embora seja possível iniciar com ações simples, como cláusulas contratuais, a evolução para um modelo robusto exige

tempo, recursos e alinhamento cultural, tornando o processo gradual e estratégico e com nível de esforço alto.	insumos, controle biológico de pragas e rotação de culturas florestais;	as empresas incentivam seus fornecedores a adotar metodologias reconhecidas, como o GHG Protocol, e a incorporar soluções que diminuam impactos ambientais, promovendo uma cultura de sustentabilidade compartilhada. Essa abordagem não apenas melhora a transparência e a rastreabilidade das emissões, mas também gera um efeito multiplicador, acelerando a transição para uma economia de baixo carbono.	→ Produzir um efeito multiplicador: cada fornecedor que reduz suas emissões contribui para diminuir a pegada de carbono do produto final, acelerando a descarbonização do setor.
Tipo de Ação	→ Melhorar a eficiência no uso da terra, promovendo a restauração de ecossistemas degradados.	Descrição da Ação	→ A ação desenvolve competências e processos permanentes nos fornecedores, permitindo que eles incorporem práticas de gestão de emissões em sua rotina.
— Estruturante.	— A ação promove mudança concreta e rápida na realidade dos produtores e na percepção da empresa.	— Capacitar fornecedores para que adotem inventários de GEE e estratégias de mitigação consiste em oferecer treinamentos, ferramentas e suporte técnico para que empresas da cadeia de suprimentos aprendam a medir suas emissões, identificar fontes críticas e implementar planos de redução. Essa ação promove conhecimento sobre metodologias reconhecidas e boas práticas de gestão climática.	— Ambiental: redução de emissões de GEE
1.4.1.2 Oferta de Assessoria Técnica aos Produtores Terceiros de Plantios de Silvicultura (FOR.02)	Importância (Cobenefícios)	Forma de Mitigação	Nível de Esforço e Existência de Barreiras
A silvicultura é uma atividade estratégica para o setor Papel & Celulose e a crescente demanda por práticas sustentáveis e a pressão por redução de emissões de GEE têm impulsionado iniciativas de assessoria técnica voltadas a produtores terceiros, que fornecem madeira para a indústria.	— Ambiental: conscientização ambiental	— Essa iniciativa contribui para a descarbonização do setor ao:	— O nível de esforço para capacitar fornecedores a adotarem inventários de GEE e estratégias de mitigação exige treinamento técnico, suporte metodológico e acompanhamento para garantir a correta aplicação das ferramentas e padrões. As barreiras incluem falta de conhecimento sobre gestão de emissões, custos para implementação, resistência cultural e limitações de infraestrutura ou dados, especialmente entre fornecedores menores.
A oferta de assessoria técnica aos produtores terceiros é uma ação estratégica para acelerar a transição do setor Papel & Celulose rumo a uma economia de baixo carbono. Ao promover práticas sustentáveis, fortalecer capacidades locais e integrar pequenos produtores à cadeia de valor, essa iniciativa contribui para a competitividade do setor, a conservação ambiental e o desenvolvimento social.	— Social: conscientização social	→ Ao capacitar fornecedores: essa ação contribui diretamente para a descarbonização do setor de Papel & Celulose, principalmente no Escopo 3, que abrange emissões indiretas da cadeia de valor.	Tipo de Ação
Descrição da Ação	Nível de Esforço e Existência de Barreiras	→ Aumentar a maturidade climática: fornecedores passam a compreender a importância da gestão de emissões e se engajam em práticas sustentáveis.	— Estruturante.
— A oferta de assessoria técnica consiste em disponibilizar suporte especializado a produtores terceiros que mantêm plantios de silvicultura voltados à produção de papel e celulose. Essa ação envolve capacitação, acompanhamento técnico e orientação sobre práticas de manejo florestal sustentável, com foco na redução da pegada de carbono. A assessoria busca alinhar os plantios comerciais às melhores práticas ambientais e sociais.	— O nível de esforço para oferecer assessoria técnica aos produtores terceiros de silvicultura exige profissionais especializados, deslocamentos, materiais técnicos e acompanhamento contínuo para garantir boas práticas e conformidade socioambiental. As barreiras incluem resistência à adoção de novas práticas, limitações financeiras, falta de infraestrutura e desafios logísticos em áreas remotas, além da necessidade de sensibilização e capacitação dos produtores.	→ Produzir inventários padronizados: permite maior transparência e rastreabilidade das emissões, facilitando a definição de metas setoriais.	1.4.1.4 Incentivar nos Fornecedores a Inovação em Processos Industriais (FOR.04)
Forma de Mitigação	Tipo de Ação	→ Adotar de estratégias de mitigação: com conhecimento técnico, fornecedores podem implementar medidas como eficiência energética, uso de combustíveis renováveis e otimização logística.	— Incentivar a inovação em processos industriais, como a substituição de combustíveis fósseis por renováveis, consiste em promover soluções tecnológicas e operacionais que reduzam a dependência de fontes de energia de alta emissão. Essa ação envolve apoiar fornecedores e parceiros na adoção de alternativas mais limpas, além de fomentar pesquisa e desenvolvimento para processos de baixo carbono.
— Essa ação contribui diretamente para a descarbonização do setor ao:	— Estruturante.	Descrição da Ação	
→ Promover práticas de manejo de baixo carbono, como o uso racional de	1.4.1.3 Capacitar Fornecedores para que Adotem Inventários de GEE e Estratégias de Mitigação (FOR.03)		
	A capacitação de fornecedores para implementar inventários de GEE e desenvolver estratégias de mitigação é uma ação essencial para fortalecer a gestão climática na cadeia de valor. Essa iniciativa busca ampliar o conhecimento técnico e a conscientização dos parceiros sobre a importância de medir e reduzir suas emissões, alinhando práticas empresariais às metas globais de descarbonização. Ao oferecer treinamentos, ferramentas e suporte,		

- A ação consiste em promover soluções tecnológicas e operacionais que reduzam a dependência de combustíveis fósseis, incentivando a adoção de alternativas renováveis, como biomassa, reaproveitamento de resíduos e tecnologias verdes. Inclui apoio a fornecedores e parceiros, além de fomentar pesquisa e desenvolvimento para processos industriais de baixo carbono.

inovação e parcerias estratégicas. As barreiras incluem custos elevados, resistência à mudança, falta de conhecimento tecnológico e riscos percebidos pelos fornecedores, especialmente os de menor porte.

Tipo de Ação

- Estruturante.

Forma de Mitigação

- Essa iniciativa contribui para a descarbonização do setor ao:

→ Reduzir emissões diretas (escopo 1): a substituição de combustíveis fósseis por renováveis diminui significativamente as emissões de CO₂.

→ Estimular à inovação tecnológica: incentiva melhorias contínuas nos processos industriais, tornando-os mais eficientes e sustentáveis.

→ Gerar efeito coletivo: envolve toda a cadeia de valor, ampliando o impacto positivo da descarbonização.

→ Potencializar a redução de custos: tecnologias mais eficientes e reaproveitamento de resíduos podem reduzir custos operacionais no médio e longo prazo.

- Essa ação busca promover mudanças diretas e perceptíveis nos processos produtivos dos fornecedores, trazendo ganhos de eficiência, redução de impactos ambientais e melhoria tecnológica.

1.4.1.5 Apoiar a Rastreabilidade e Certificação da Cadeia de Valor (FOR.05)

Apoiar a rastreabilidade e a certificação da cadeia de valor é uma forma estratégica de mitigação que contribui diretamente para a descarbonização da indústria papelreira. Essa medida fortalece o controle sobre as emissões indiretas (Escopo 3), promove práticas sustentáveis e aumenta a transparência ambiental. Rastreabilidade permite reportar emissões com precisão, essencial para metas de descarbonização.

Descrição da Ação

- A ação consiste em implementar mecanismos que garantam a origem sustentável dos insumos e processos, por meio de sistemas de rastreabilidade e certificações reconhecidas. Isso envolve monitorar fornecedores, validar práticas socioambientais e assegurar conformidade com padrões internacionais, fortalecendo a transparência e a credibilidade da cadeia de valor.

Forma de Mitigação

- Como essa ação ajuda a descarbonizar o setor

→ Controle das emissões indiretas (Escopo 3): A rastreabilidade permite identificar e reduzir emissões associadas à produção e transporte de matérias-primas.

→ Promoção de práticas sustentáveis: Certificações exigem padrões que

incentivam manejo responsável e menor impacto ambiental.

→ Maior transparência: Dados confiáveis sobre emissões possibilitam reportes precisos e definição de metas robustas de descarbonização.

- Ações que garantem que a matéria-prima seja proveniente de áreas manejadas de forma sustentável, evitando emissões por desmatamento e permitem mensurar e reduzir emissões indiretas (Escopo 3) com dados confiáveis. É uma ação que estabelece mecanismos duradouros de controle e transparência, fundamentais para a sustentabilidade da cadeia.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: *compliance* ambiental
- Governança: fortalecimento da imagem corporativa e alinhamento com critérios ESG.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço para apoiar a rastreabilidade e certificação da cadeia de valor requer sistemas robustos de monitoramento, coleta de dados confiáveis e integração com padrões reconhecidos, além de auditorias e acompanhamento contínuo. As barreiras incluem custos elevados, complexidade técnica, falta de infraestrutura tecnológica, resistência de fornecedores e desafios para garantir transparência em toda a cadeia, especialmente em elos menores ou informais.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.4.2 Clientes

A indústria de Papel & Celulose ocupa uma posição singular na transição para uma economia de baixo carbono por estar

diretamente conectada aos recursos naturais, como florestas, água e solo e por ter acesso direto ao consumidor final. Esse protagonismo exige mais do que boas intenções. Ele demanda ações concretas de mitigação dos impactos climáticos, aliadas a estratégias inteligentes de engajamento, capazes de mobilizar clientes.

Estratégias de engajamento com clientes podem envolver os consumidores e parceiros no enfrentamento das mudanças climáticas, com ações como transparência e rastreabilidade, informando por exemplo a pegada de carbono dos produtos.

A indústria de Papel & Celulose tem o potencial de transformar seus clientes e parceiros em agentes ativos no intuito de minimizar os impactos das mudanças climáticas e para isso, criam estratégias de engajamento que vão além da comunicação tradicional com o intuito de gerar pertencimento, responsabilidade e ação.

Para isso, as organizações desenvolvem iniciativas colaborativas com seus clientes, promovendo o engajamento contínuo por meio de reuniões periódicas e eventos dedicados à sustentabilidade. Equipes especializadas mantêm contato frequente para apresentar as ações em curso, compartilhar dados relevantes e detalhar as frentes de atuação. Além disso, monitoram as emissões associadas ao processamento dos produtos dos clientes, fortalecendo a transparência e o compromisso mútuo com a descarbonização.

As empresas vêm desenvolvendo iniciativas colaborativas com seus clientes, voltadas à neutralização das emissões de carbono e à promoção de práticas mais sustentáveis. Além de fomentar a conscientização ambiental, essas organizações estão fortemente engajadas na comunicação transparente de suas ações, compartilhando dados, resultados e estratégias que refletem o compromisso do setor com a sustentabilidade.

1.4.2.1 Comercializar Produtos com Rotulagem Ambiental (CLI.01)

A crescente demanda por produtos

ambientalmente responsáveis tem impulsionado o setor Papel & Celulose a adotar práticas mais sustentáveis, especialmente no que diz respeito à rotulagem ambiental. Essa rotulagem tem se tornado uma ferramenta estratégica para comunicar ao consumidor o compromisso das empresas com a redução da pegada de carbono e com a transparência climática.

A rotulagem da pegada de carbono pode-se mostrar como uma vantagem decisiva para empresas que desejam atender às exigências de consumidores, investidores e reguladores alinhados à agenda ESG. A transparência climática na rotulagem fortalece a reputação da marca e estimula um ciclo virtuoso de inovação, eficiência e responsabilidade ambiental.

Descrição da Ação

- A rotulagem de carbono consiste em informar na embalagem do produto a quantidade de emissões de GEE geradas ao longo de seu ciclo de vida, desde a extração da matéria-prima até o descarte. Essa prática permite que o consumidor identifique produtos com menor impacto ambiental e tome decisões de compra mais conscientes.
- No setor Papel & Celulose, essa rotulagem pode incluir dados sobre o uso de matéria-prima de florestas plantadas certificadas, eficiência energética nos processos industriais, uso de fontes renováveis e logística otimizada. O objetivo é informar o consumidor e valorizar práticas sustentáveis na cadeia produtiva.

Forma de Mitigação

- Essa ação contribui para a descarbonização do setor ao:
 - Estimular práticas industriais de baixo carbono;
 - Promover o manejo florestal sustentável;
 - Incentivar a economia circular, com produtos recicláveis e biodegradáveis;

→ Reduzir emissões indiretas, por meio de cadeias logísticas mais eficientes.

- Ao tornar visível o impacto ambiental do produto, a rotulagem também pressiona os fornecedores a adotarem práticas mais limpas e transparentes. É uma ação de rotulagem e certificação em toda a linha de produtos estabelece uma base duradoura a longo prazo.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: redução das emissões de GEE, conservação de recursos naturais, estímulo à reciclagem.
- Social: valorização de práticas sustentáveis, geração de empregos verdes, educação ambiental do consumidor.
- Econômico: diferenciação de mercado, acesso a nichos sustentáveis, aumento da competitividade internacional.
- Governança: fortalecimento da imagem corporativa e alinhamento com critérios ESG.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço para comercializar produtos com rotulagem ambiental envolve adequação às normas de rotulagem, certificações, atualização de embalagens e comunicação clara ao consumidor. As barreiras incluem custos adicionais, complexidade regulatória, necessidade de comprovação técnica e possível falta de conhecimento dos fornecedores sobre requisitos ambientais.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.4.3 Público Interno (Funcionários)

Programas voltados ao público interno, com foco na redução de emissões, representam uma vertente essencial na jornada de

descarbonização do setor de Papel & Celulose. Transformar colaboradores em agentes climáticos exige mais do que informação, requer ações práticas, inspiradoras e integradas à cultura organizacional.

Ao engajar seus funcionários, a indústria não apenas fortalece sua cultura organizacional, mas também amplia significativamente seu impacto positivo. Esse envolvimento transforma os colaboradores em protagonistas da sustentabilidade, criando uma rede de pessoas comprometidas com a construção de um futuro mais responsável, ético e ambientalmente equilibrado.

Empresas que estabelecem metas ambiciosas de remoção de GEE frequentemente desenvolvem ações internas que envolvem seus colaboradores em projetos voltados à bioenergia, à inovação circular e à educação ambiental. Essas iniciativas não apenas promovem a sustentabilidade, mas também fortalecem o engajamento dos profissionais com os objetivos climáticos da organização.

Uma prática comum entre essas empresas é a realização de diagnósticos ESG internos, que funcionam como ferramentas para avaliar a percepção dos colaboradores sobre as práticas sustentáveis adotadas. A partir desses diagnósticos, são desenvolvidas estratégias específicas para ampliar o conhecimento ambiental dos funcionários e reforçar seu papel como agentes ativos na jornada de descarbonização.

Ao transformar os colaboradores em catalisadores da transformação sustentável, essas ações contribuem para o fortalecimento da cultura organizacional, promovem benefícios diretos aos profissionais envolvidos e reafirmam o compromisso social da companhia. Essa abordagem evidencia que a sustentabilidade não é apenas uma meta corporativa, mas uma prática que gera valor compartilhado entre empresa, pessoas e sociedade.

1.4.3.1 Estabelecer Bonificação Vinculada às Metas de Redução de Emissões de GEE (FUN.01)

- A crescente urgência em mitigar os efeitos das mudanças climáticas tem levado empresas e organizações a adotarem estratégias mais robustas de descarbonização. Uma dessas estratégias é a bonificação vinculada ao desempenho ambiental, especialmente às metas de redução de emissões GEE. Essa abordagem insere a sustentabilidade no centro da gestão corporativa, transformando metas climáticas em indicadores de desempenho que influenciam diretamente a remuneração de colaboradores e líderes.

Descrição da Ação

- A bonificação vinculada às metas de redução de emissões de GEE é uma estratégia corporativa que consiste em recompensar financeiramente colaboradores, gestores ou unidades produtivas que atingem ou superam metas específicas de descarbonização. Essa bonificação pode assumir diversas formas, como prêmios em dinheiro, aumentos salariais condicionados, participação nos lucros e reconhecimento público ou institucional.
- A lógica por trás da ação é alinhamento de incentivos e ao vincular o desempenho ambiental ao desempenho financeiro, a empresa estimula comportamentos e decisões que contribuem para a mitigação das emissões de GEE.

Forma de Mitigação

- Essa ação contribui para a descarbonização do setor ao:
 - Internalizar o custo das emissões: ao transformar metas climáticas em indicadores de desempenho, a empresa passa a tratar as emissões como parte do seu modelo de gestão.
 - Estimular inovação e eficiência: colaboradores são incentivados a buscar soluções de baixo carbono, como otimização de processos, redução de desperdícios e uso de energias renováveis.

- Fortalecer a cultura organizacional sustentável: metas ambientais deixam de ser apenas responsabilidade da área de sustentabilidade e passam a integrar todas as áreas da empresa.
- Melhorar a governança climática: ao vincular bonificações a metas de GEE, a empresa precisa medir, reportar e verificar suas emissões com maior rigor, fortalecendo sua transparência e conformidade regulatória.
- É uma ação institucional de gestão de emissões com governança e ferramentas permanentes, pois isso estabelece uma base duradoura a longo prazo.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: redução efetiva das emissões de GEE, melhoria da eficiência energética e menor impacto ambiental.
- Econômico: redução de custos operacionais, acesso a mercados sustentáveis, geração de créditos de carbono.
- Social: engajamento dos colaboradores, valorização da força de trabalho, fortalecimento da reputação corporativa.
- Governança: maior conformidade com exigências de reporte climático (GRI, CDP, CSRD, IFRS).

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço para estabelecer bonificação vinculada às metas de redução de emissões de GEE exige definição de métricas claras, integração com sistemas de gestão, monitoramento contínuo e alinhamento com políticas internas de remuneração. As barreiras incluem complexidade para mensurar resultados, resistência cultural, custos adicionais e necessidade de engajamento dos fornecedores para garantir transparência e confiabilidade dos dados.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.4.3.2 Oferecer Treinamento Interno sobre Descarbonização/Mudanças Climáticas (FUN.02)

Diante dos desafios globais impostos pelas mudanças climáticas, o setor Papel & Celulose tem intensificado seus esforços rumo à descarbonização. Nesse contexto, oferecer treinamento específico aos seus colaboradores sobre temas climáticos torna-se uma estratégia essencial para alinhar a força de trabalho aos compromissos ambientais da indústria.

O treinamento em descarbonização e mudanças climáticas visa capacitar os colaboradores com conhecimentos técnicos, práticos e estratégicos sobre os impactos das emissões de GEE, as metas de neutralidade de carbono, e as soluções aplicáveis ao contexto industrial. Ao compreender os fundamentos científicos, regulatórios e operacionais da agenda climática, os profissionais tornam-se agentes ativos na implementação de práticas sustentáveis, contribuindo diretamente para a redução da pegada de carbono da empresa.

Além de promover a conscientização ambiental, esse tipo de capacitação fortalece a cultura organizacional, estimula a inovação e prepara os empregados para atuar em um mercado cada vez mais orientado por critérios ESG. O engajamento interno é, portanto, um pilar estratégico na construção de uma indústria mais resiliente, responsável e alinhada às exigências das causas climáticas.

Descrição da Ação

- A oferta de treinamento específico sobre descarbonização e mudanças climáticas aos empregados do setor Papel & Celulose é uma iniciativa estratégica voltada à capacitação técnica e à sensibilização ambiental. Essa ação consiste em desenvolver programas educacionais, presenciais ou online, que abordem temas como:

- Fundamentos da mudança climática;

- Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE);
- Inventário de emissões (escopos 1, 2 e 3);
- Estratégias de mitigação e adaptação;
- Economia de baixo carbono;
- Tecnologias limpas e inovação circular.

- O objetivo é ampliar o conhecimento dos colaboradores sobre os impactos ambientais da cadeia produtiva e prepará-los para atuar de forma proativa na transição para uma operação mais sustentável. É uma ação de treinamento que prepara colaboradores e parceiros para compreender conceitos, práticas e estratégias relacionadas à descarbonização, criando uma base técnica e cultural essencial para ações futuras.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: redução de emissões, melhoria na gestão de recursos naturais, menor impacto ambiental.
- Social: valorização dos colaboradores, desenvolvimento de competências verdes, engajamento com a agenda climática.
- Econômico: aumento da eficiência operacional, redução de desperdícios, acesso a incentivos e financiamentos sustentáveis.
- Governança: fortalecimento da imagem institucional, alinhamento com padrões internacionais (GRI, CDP, IFRS S2).

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

O nível de esforço para oferecer treinamento sobre descarbonização e mudanças climáticas envolve desenvolvimento de conteúdo técnico, organização de sessões e engajamento dos participantes. As barreiras incluem falta de conhecimento prévio, resistência à mudança, disponibilidade de tempo dos fornecedores e custos associados à capacitação.

Forma de Mitigação

- Essa ação contribui diretamente para a descarbonização do setor ao:
 - Promover a conscientização interna sobre os impactos climáticos das atividades industriais;
 - Capacitar os profissionais para identificar oportunidades de redução de emissões em suas áreas de atuação;
 - Incentivar a adoção de boas práticas operacionais, como eficiência energética, uso racional de recursos e gestão de resíduos;
 - Fortalecer a cultura organizacional voltada à sustentabilidade, tornando os colaboradores agentes ativos da transformação.

- Ao integrar o conhecimento climático à rotina de trabalho, os treinamentos ajudam a reduzir emissões diretas e indiretas, além de melhorar a governança ambiental da empresa.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.4.4 Sociedade

A percepção pública tem se consolidado como um fator estratégico decisivo na forma como empresas estruturam suas ações de descarbonização. Em um cenário de crescente conscientização ambiental, organizações reconhecem que a opinião da sociedade, dos consumidores e dos investidores influencia diretamente sua reputação, valor de marca e competitividade no mercado.

Esse movimento tem gerado pressão por transparência, exigindo das empresas informações claras e acessíveis sobre suas emissões de GEE, metas climáticas e práticas sustentáveis. Como resposta, muitas corporações têm adotado relatórios

de sustentabilidade, buscado certificações ambientais e assumido compromissos públicos com metas de carbono zero, como forma de demonstrar responsabilidade e engajamento com a agenda climática.

A imagem corporativa tornou-se um ativo valioso. Empresas percebidas como comprometidas com a sustentabilidade tendem a atrair consumidores conscientes, investidores éticos e profissionais qualificados. A reputação ambiental positiva não apenas fortalece a marca, mas também abre portas para novas oportunidades de negócios e parcerias estratégicas.

Por outro lado, a ausência de ações climáticas pode gerar riscos regulatórios e reputacionais. Críticas públicas, boicotes, perda de licenças e até sanções legais são ameaças reais para empresas que negligenciam a descarbonização. Por isso, muitas organizações estão incorporando práticas climáticas como parte de sua gestão de riscos, antecipando pressões sociais e regulatórias.

Além disso, a performance climática das empresas tem se tornado um critério relevante para investimentos institucionais. Fundos de investimento, bancos e agências de fomento estão cada vez mais atentos ao compromisso ambiental das organizações, influenciando diretamente o acesso a capital, financiamentos verdes e linhas de crédito sustentáveis.

Em resumo, a percepção pública não é apenas um reflexo das ações empresariais, ela molda decisões estratégicas. As empresas que compreendem essa dinâmica estão transformando a descarbonização em valor, enquanto aquelas que ignoram esse movimento correm o risco de perder relevância e espaço no mercado.

1.4.4.1 Promover a Conscientização Pública sobre a Mitigação Climática (SOC.01)

Promover a conscientização pública é um fator estratégico para acelerar a transição para uma economia de baixo carbono. O setor de Papel e Celulose é altamente dependente do Capital Humano (empregados próprios e terceiros,

comunidade local e clientes), além de impactar direta e indiretamente todas as partes interessadas. Assim, as empresas do setor têm o papel de influenciar a conscientização pública para apoiar a mitigação das mudanças climáticas, as quais já estão e, cada vez mais estarão, impactando tanto as operações das empresas quanto seu capital humano e suas partes interessadas.

Portanto, ao apoiar campanhas e movimentos da sociedade civil ou promover ações próprias voltadas à promoção de uma conscientização pública sobre a mitigação climática, gera-se um ciclo virtuoso: maior demanda por produtos sustentáveis, pressão por regulamentações mais rigorosas e aceleração da transição para um modelo de baixo carbono.

Descrição da Ação

- A ação consiste em promover campanhas educativas e apoiar iniciativas da sociedade civil que promovam a conscientização pública sobre a mitigação climática, com temas, por exemplo, de incentivo práticas de consumo consciente (redução do desperdício, reutilização de materiais e escolha por produtos sustentáveis e/ou de baixo carbono), de estímulo a práticas sustentáveis no cotidiano da sociedade (como reciclagem, economia de energia e consumo consciente); e de incentivo a preservação de áreas nativas, combate a incêndios e o engajamento em projetos de reflorestamento. Além disso, esta ação busca engajar a população para pressionar governos e empresas a adotarem políticas climáticas mais ambiciosas e alinhadas às metas globais de descarbonização.

Forma de Mitigação

- Essa ação ajuda a descarbonizar o setor por:
 - Influenciar políticas públicas: a pressão social aumenta a probabilidade de implementação de regulamentações que incentivem a economia circular, reduzam emissões e promovam energias limpas.
 - Influenciar o comportamento do

consumidor: reduz-se a demanda por produtos intensivos em carbono, estimulando a escolha por alternativas sustentáveis. O incentivo à redução do desperdício, à reutilização e à reciclagem fortalece a economia circular, diminui o uso de fibra virgem e reduz emissões associadas à produção, ao consumo de energia e ao transporte na cadeia do setor.

- Fortalecer a cadeia de reciclagem: maior conscientização eleva as taxas de segregação e reciclagem, evitando que resíduos sejam destinados a aterros, onde há geração de metano.
- Promoção da preservação de áreas nativas, o combate a incêndios e o reflorestamento: ajuda a manter e ampliar os estoques de carbono florestal, essenciais para a neutralidade climática do setor. O engajamento da sociedade para pressionar governos e empresas por políticas climáticas mais ambiciosas também acelera a adoção de práticas produtivas e regulatórias alinhadas às metas globais de descarbonização.
- Essa ação estruturante atua como um habilitador sistêmico da descarbonização, criando as condições sociais, econômicas e políticas necessárias para reduzir emissões ao longo de toda a cadeia de valor do setor de papel e celulose.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: Redução da geração de resíduos, conservação de recursos naturais e mitigação da poluição.
- Social: Fortalecimento da cidadania, inclusão de comunidades na agenda climática e geração de empregos na cadeia de reciclagem.
- Econômico: Estímulo à economia circular, redução de custos com matérias-primas e criação de novos modelos de negócio sustentáveis.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço para promover a conscientização pública sobre mitigação climática envolve campanhas de comunicação, engajamento de diferentes públicos e produção de materiais educativos. As barreiras incluem custos elevados, dificuldade de alcançar ampla audiência, resistência cultural e falta de conhecimento sobre o tema.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.4.4.2 Campanhas de Conscientização Voltadas a Produtos Reciclados ou Recicláveis (SOC.02)

Campanhas de conscientização voltadas à promoção do consumo de produtos reciclados ou recicláveis desempenham um papel fundamental na construção de uma sociedade mais sustentável. Ao incentivar a preferência por itens como papel reciclado e embalagens reutilizáveis, essas iniciativas ajudam a reduzir a geração de resíduos, economizar recursos naturais e diminuir os impactos ambientais da produção e descarte. Além disso, fortalecem a cultura da responsabilidade ambiental entre consumidores, estimulando escolhas mais conscientes e pressionando o mercado a adotar práticas mais sustentáveis em seus processos e produtos.

Portanto, essas campanhas são uma ação indireta, mas estratégica, para apoiar a descarbonização, especialmente ao longo da cadeia de valor e no comportamento do consumidor.

Descrição da Ação

- Campanhas de conscientização voltadas à promoção do consumo de produtos reciclados ou recicláveis têm como objetivo sensibilizar a sociedade sobre os impactos ambientais do consumo e descarte de materiais. Elas incentivam a preferência por itens como papel reciclado e embalagens reutilizáveis, estimulando escolhas mais sustentáveis e pressionando o mercado a adotar práticas responsáveis.

Forma de Mitigação

- Essa ação contribui diretamente para a descarbonização do setor ao:
 - Reduzir a demanda por matéria-prima virgem: ao incentivar o consumo de papel reciclado e embalagens reutilizáveis, diminui-se a necessidade de produzir papel a partir de fibras virgens.
 - Economizar energia e emissões no processo produtivo: a produção de papel reciclado consome menos energia e água do que a produção a partir de celulose virgem. Como grande parte das emissões do setor vem do uso de energia térmica e elétrica, essa economia representa uma redução direta de CO₂.
 - Reduzir resíduos e emissões de metano: ensinar a população a segregar corretamente os resíduos aumenta a taxa de reciclagem e evita que papel vá para aterros, onde sua decomposição gera metano (CH₄), um gás de efeito estufa muito mais potente que o CO₂.
 - Estimular a economia circular: campanhas de conscientização criam uma cultura de consumo sustentável, fortalecendo cadeias de reciclagem e fechando o ciclo de materiais. Isso reduz a pressão por novos recursos e as emissões associadas à extração e processamento.
- Essas campanhas contribuem para a descarbonização ao promover o uso de materiais reciclados, que demandam menos energia e recursos naturais em sua produção, resultando em menores emissões de GEE. Além disso, ao reduzir o volume de resíduos e incentivar a reutilização, diminuem a necessidade de processos industriais intensivos em carbono e o envio de resíduos a aterros, que geram metano. A ação promove mudanças culturais e comportamentais duradouras, influenciando padrões de consumo e práticas de mercado.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: redução da geração de resíduos sólidos, economia de recursos naturais (água, energia, matérias-primas), estímulo à economia circular, fortalecimento da educação ambiental e valorização de empresas com práticas sustentáveis

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço para realizar campanhas de conscientização voltadas a produtos reciclados ou recicláveis envolve planejamento de comunicação, produção de materiais e engajamento do público-alvo. As barreiras incluem custos de divulgação, falta de conhecimento do consumidor sobre benefícios, resistência cultural e necessidade de canais eficazes para alcançar ampla audiência.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.4.4.3 Parcerias com Startups e Universidades para Inovação (SOC.03)

As parcerias entre empresas do setor de Papel & Celulose, *startups* e universidades têm se consolidado como uma estratégia-chave para impulsionar a inovação com foco na sustentabilidade e na descarbonização. Essas colaborações envolvem desde programas de inovação aberta, até convênios de pesquisa aplicada com instituições acadêmicas e centros tecnológicos. O objetivo é desenvolver soluções tecnológicas que reduzam as emissões de GEE, promovam a economia circular e acelerem a transição para uma bioeconomia de baixo carbono.

Descrição da Ação

- A ação de parcerias entre empresas do setor de Papel & Celulose com *startups* e universidades para inovação voltada à descarbonização refere-se à colaboração estratégica entre empresas do setor, instituições acadêmicas e empreendedores

inovadores com o objetivo de acelerar soluções sustentáveis e de baixo carbono.

Forma de Mitigação

- Essas parcerias estruturam a mitigação climática de diversas formas:
 - Desenvolvimento de novos materiais: substituição de produtos fósseis por bioprodutos à base de celulose, como bioplásticos, tecidos biodegradáveis e embalagens sustentáveis.
 - Digitalização e eficiência operacional: uso de tecnologias inteligência artificial e automação para otimizar processos, reduzir consumo de energia e minimizar perdas.
 - Melhoramento genético florestal: pesquisa em biotecnologia para aumentar a produtividade das florestas plantadas, ampliando a captura de carbono por hectare.
 - Aproveitamento de resíduos: *startups* desenvolvem soluções para transformar resíduos industriais em bioenergia, fertilizantes ou insumos para novos produtos.

- É uma ação que estabelece parcerias estratégicas com instituições de ensino e *startups* não é uma ação pontual; ela constrói um ecossistema de colaboração que sustenta projetos futuros.

Importância (Cobenefícios)

- Social: fomento à inovação nacional: fortalece o ecossistema de inovação brasileiro, gerando conhecimento e novas tecnologias. Geração de empregos qualificados: impulsiona a formação de profissionais em áreas estratégicas como biotecnologia, engenharia florestal e ciência de dados.
- Governança: valorização da marca e competitividade: empresas que lideram em inovação sustentável ganham vantagem competitiva e reputacional.

- Econômico: desenvolvimento regional: universidades e *startups* locais são integradas às cadeias produtivas, promovendo inclusão e dinamismo econômico.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço para estabelecer parcerias com *startups* e universidades para inovação envolve identificação de parceiros estratégicos, negociação de acordos, alinhamento de objetivos e gestão contínua da colaboração. As barreiras incluem diferenças culturais e de expectativas, complexidade jurídica nos contratos, necessidade de investimento financeiro e riscos relacionados à propriedade intelectual e confidencialidade.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.4.5 Comunidade Local

O avanço rumo à descarbonização vai além da adoção de tecnologias inovadoras e do cumprimento de metas empresariais ambiciosas, ele exige um compromisso com a justiça climática. Esse conceito reconhece que os efeitos da crise climática atingem de forma desproporcional as comunidades mais vulneráveis, e que essas mesmas comunidades têm o potencial de liderar soluções transformadoras. Nesse cenário, o setor de Papel & Celulose no Brasil ocupa uma posição estratégica por seu potencial de impulsionar o protagonismo comunitário na transição para uma economia de baixo carbono.

As comunidades locais, tradicionais e rurais são detentoras de conhecimentos ecológicos e práticas sustentáveis que desempenham um papel essencial na mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Seu engajamento em iniciativas como o reflorestamento, a agroecologia, o manejo sustentável dos recursos naturais e a economia circular fortalece a resiliência dos territórios e amplia o alcance das ações de descarbonização.

Em especial, povos indígenas, quilombolas e outras comunidades tradicionais atuam como verdadeiras guardiãs dos ecossistemas. Seu modo de vida está intrinsecamente ligado à preservação ambiental, o que os torna protagonistas na proteção da biodiversidade e na contenção do desmatamento, contribuindo diretamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a manutenção do equilíbrio climático.

Algumas empresas analisadas no estudo têm desenvolvido iniciativas voltadas à capacitação e geração de renda para comunidades localizadas no entorno das áreas de plantio. Essas ações incluem o fortalecimento de cooperativas de coleta seletiva, o incentivo à produção artesanal com resíduos florestais e o apoio à agricultura familiar. Ao promover essas práticas, o setor Papel & Celulose demonstra que soluções sustentáveis podem ser construídas em parceria com as comunidades locais, estimulando a autonomia energética e o uso responsável dos recursos naturais.

A promoção da educação ambiental e da inclusão social é um caminho fundamental para fortalecer o protagonismo comunitário no processo de descarbonização. Para que o setor de Papel & Celulose contribua de maneira efetiva para a descarbonização com protagonismo comunitário, é essencial implementar estratégias como a cocriação de projetos fundamentados no diálogo com os territórios. Além disso, o investimento em educação e formação técnica, o fortalecimento de cadeias produtivas locais sustentáveis, a garantia de transparência e rastreabilidade socioambiental nas operações, e o estabelecimento de parcerias com organizações da sociedade civil e movimentos sociais são caminhos fundamentais para promover uma transição justa e inclusiva.

A descarbonização não é apenas uma meta técnica, é uma oportunidade de transformação social. O setor de Papel & Celulose, com sua base florestal renovável e crescente compromisso com a sustentabilidade, pode ser um vetor de justiça climática se colocar as comunidades locais no centro de suas estratégias. Ao fazer isso, não apenas reduz sua pegada de carbono, mas amplia seu impacto positivo na construção de um futuro mais justo, resiliente e regenerativo.

1.4.5.1 Incentivar o Envolvimento das Comunidades na Adoção de Práticas Sustentáveis com Educação Ambiental (COM.01)

A educação ambiental é uma ferramenta essencial para enfrentar os desafios das mudanças climáticas, especialmente quando integrada às estratégias de descarbonização de setores produtivos como o de papel & celulose. Ao envolver escolas e comunidades em ações educativas, o setor não apenas dissemina conhecimento, mas também fortalece o protagonismo local na construção de soluções sustentáveis.

Descrição da Ação

- A ação consiste em implementar programas de educação ambiental voltados ao combate às mudanças climáticas, com foco específico nas realidades e impactos do setor Papel & Celulose. Esses programas podem incluir oficinas, materiais didáticos, visitas técnicas, projetos escolares, capacitações comunitárias e campanhas de conscientização. O objetivo é promover o entendimento sobre o papel das florestas plantadas, o ciclo do carbono, o uso sustentável dos recursos naturais e as práticas de baixo carbono adotadas pelo setor.

Forma de Mitigação

- Ao sensibilizar e capacitar estudantes, professores e moradores das comunidades vizinhas às operações florestais e industriais, a ação contribui para a descarbonização de forma indireta, mas estratégica. A educação ambiental:
 - Estimula práticas sustentáveis no cotidiano das comunidades (como reciclagem, economia de energia e consumo consciente);
 - Incentiva a preservação de áreas nativas e o engajamento em projetos de reflorestamento;
 - Promove a valorização de cadeias produtivas locais de baixo carbono;

→ Cria uma cultura de corresponsabilidade ambiental que fortalece a governança climática territorial.

- Educação ambiental e engajamento comunitário não são ações pontuais; elas constroem conhecimento e consciência coletiva, fundamentais para sustentar práticas sustentáveis no longo prazo.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: conscientização ambiental.
- Sociais: fortalecimento da cidadania ambiental, melhoria da relação entre empresas e comunidades, estímulo à inovação social e protagonismo juvenil, redução de conflitos socioambientais e apoio à formação de lideranças locais comprometidas com a sustentabilidade.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço para incentivar o envolvimento das comunidades na adoção de práticas sustentáveis com educação ambiental requer planejamento de ações educativas, mobilização social e recursos para atividades presenciais ou digitais. As barreiras incluem resistência cultural, falta de engajamento inicial, limitações de infraestrutura e custos para implementação de programas contínuos.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.4.5.2 Oferecer suporte técnico e financeiro a catadores autônomos e cooperativas de reciclagem (COM.02)

O setor Papel & Celulose, por sua natureza baseada em recursos renováveis e recicláveis, possui grande potencial para contribuir com a descarbonização da economia. Uma das formas mais eficazes de ampliar esse impacto é por meio do apoio técnico e financeiro aos catadores de recicláveis e às cooperativas que atuam na coleta, triagem e comercialização de

materiais como papel, papelão e embalagens. Essa ação fortalece a cadeia da reciclagem, promove inclusão social e reduz emissões de gases de efeito estufa.

Descrição da Ação

- A ação consiste em oferecer suporte técnico e financeiro a catadores autônomos e cooperativas de reciclagem, por meio de capacitações, fornecimento de equipamentos, melhoria da infraestrutura, acesso a crédito, formalização e inclusão em programas de logística reversa. O setor Papel & Celulose pode atuar como parceiro estratégico, promovendo a valorização do trabalho dos catadores e integrando-os de forma justa à cadeia produtiva.

Forma de Mitigação

- Essa ação contribui para a descarbonização do setor de forma direta e indireta:

→ Reduz de emissões: ao ampliar a reciclagem de papel e papelão, diminui-se a necessidade de produção de novos materiais, reduzindo o consumo de energia e as emissões associadas.

→ Evita emissões por descarte inadequado: A destinação correta de resíduos evita que materiais orgânicos se decomponham em aterros, liberando metano, um gás de efeito estufa altamente potente.

→ Fortalece a economia circular: A reciclagem eficiente prolonga o ciclo de vida dos produtos e reduz a pressão sobre recursos naturais.

- Apoiar projetos comunitários constrói capacidades locais, gera autonomia e fortalece a infraestrutura social para práticas sustentáveis de médio a longo prazo.

Importância (Cobenefícios)

- Social: geração de renda e inclusão social para populações vulneráveis, fortalecimento da organização comunitária

- e do cooperativismo.
- Ambiental: redução da poluição urbana e melhoria da gestão de resíduos sólidos e aumento da eficiência na logística reversa e cumprimento de metas de responsabilidade pós-consumo.
 - Governança: melhoria da imagem institucional e reputação socioambiental das empresas envolvidas.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço para oferecer suporte técnico e financeiro a catadores autônomos e cooperativas de reciclagem envolve disponibilização de recursos, capacitação, acompanhamento operacional e articulação com políticas públicas. As barreiras incluem limitações financeiras, falta de infraestrutura adequada, baixa organização das cooperativas, desafios logísticos e necessidade de engajamento contínuo para garantir resultados sustentáveis.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.4.6 Organizações e Associações Setoriais

- As organizações e associações setoriais desempenham um papel estratégico na promoção da descarbonização no setor de Papel & Celulose, especialmente por sua capacidade de articular políticas públicas, mobilizar atores locais e fomentar práticas sustentáveis. Sua atuação pode acelerar a transição para uma economia de baixo carbono ao integrar ações voltadas à inovação tecnológica, à qualificação profissional e ao fortalecimento de cadeias produtivas mais limpas.
- O engajamento em eventos nacionais e internacionais sobre descarbonização, biodiversidade e agenda climática tem se mostrado essencial para a troca de experiências, atualização técnica e

construção de parcerias. São espaços onde empresas do setor têm se posicionado como líderes em sustentabilidade e inovação.

- A educação ambiental também é reconhecida como uma ferramenta poderosa para transformar comportamentos e consolidar uma cultura de baixo carbono. Muitas empresas têm investido em programas educativos nas escolas, abordando temas como mudanças climáticas, consumo consciente e preservação da biodiversidade. Essas ações não apenas sensibilizam as novas gerações, mas também fortalecem o vínculo das empresas com as comunidades locais.
- Por fim, a participação ativa em redes colaborativas e a comunicação transparente sobre metas e resultados climáticos são elementos que reforçam a credibilidade das empresas perante a sociedade e os investidores. A construção de uma reputação sólida baseada em compromisso ambiental pode abrir caminhos para financiamentos verdes, acesso a mercados internacionais e atração de talentos engajados com propósito.

1.4.6.1 Oferta de Treinamentos, *Workshops* e Capacitação Técnica (SET.01)

- A promoção de treinamentos e *workshops* especializados é uma estratégia essencial para fortalecer competências técnicas e ampliar a compreensão sobre práticas sustentáveis nas organizações. Essa iniciativa busca preparar profissionais para enfrentar desafios atuais e futuros relacionados à transição para uma economia de baixo carbono e à gestão eficiente de recursos.

Descrição da Ação

- A oferta de treinamentos, *workshops* e capacitações técnicas consiste em iniciativas promovidas por empresas, associações setoriais, instituições de ensino ou organizações da sociedade civil com o objetivo de qualificar profissionais

e gestores em temas estratégicos da agenda climática. Os conteúdos abordam desde metodologias para elaboração de inventários de emissões de GEE até práticas de eficiência energética, economia circular e dinâmicas do mercado de carbono.

Forma de Mitigação

- Essa iniciativa atua em diferentes frentes:
 - Inventário de emissões de GEE: capacitar equipes para medir e monitorar emissões com precisão permite identificar as principais fontes de carbono nos processos industriais, possibilitando a definição de metas e planos de redução alinhados às melhores práticas globais.
 - Eficiência energética: treinamentos voltados à otimização do consumo energético ajudam a diminuir a dependência de combustíveis fósseis, reduzir custos operacionais e cortar emissões associadas à geração de energia. Economia circular: a capacitação para implementar modelos circulares incentiva o reaproveitamento de resíduos, a redução do uso de matérias-primas virgens e a minimização de emissões ao longo do ciclo de vida dos produtos.
 - Treinamentos e capacitações desenvolvem competências técnicas e culturais que permanecem no longo prazo, permitindo que práticas sustentáveis sejam incorporadas de forma consistente.

Importância (Cobenefícios)

- Governança: fortalecimento institucional: Empresas mais preparadas para lidar com exigências regulatórias e de mercado.
- Operacional: engajamento de colaboradores: Maior envolvimento com metas climáticas e sustentabilidade. Inovação e competitividade: Estímulo à adoção de soluções tecnológicas e modelos de negócio sustentáveis.

- Governança: redução de riscos legais.
- Econômico: acesso a financiamento verde: Empresas capacitadas têm mais chances de acessar linhas de crédito sustentáveis.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- O nível de esforço para oferecer treinamentos, *workshops* e capacitação técnica envolve planejamento de conteúdo, organização logística e engajamento dos participantes. As barreiras incluem custos de implementação, disponibilidade de tempo dos fornecedores, resistência à participação e necessidade de adaptar os temas à realidade de cada público.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.4.6.2 Elaboração de Guias Técnicos e Protocolos para Descarbonização Voltados ao Setor (SET.02)

- Diretamente as organizações e associações setoriais podem contribuir na capacitação e educação. A realização de *workshops*, seminários e treinamentos voltados à eficiência energética, gestão de resíduos e uso de biomassa pode ampliar o conhecimento técnico disponível no território com a elaboração de guias técnicos e protocolos para descarbonização voltados ao setor e preparar profissionais para atuar em processos industriais mais sustentáveis.

Descrição da Ação

- A iniciativa consiste em desenvolver materiais técnicos e protocolos padronizados que orientem empresas do setor de Papel & Celulose na implementação de práticas e processos voltados à redução das emissões de GEE. Esses guias reúnem metodologias reconhecidas, indicadores de desempenho, requisitos regulatórios e recomendações para adoção de tecnologias e soluções inovadoras.

Forma de Mitigação

- Como essa ação contribui para a descarbonização:
 - Padronização e clareza: fornece diretrizes práticas para medir, monitorar e reportar emissões, garantindo consistência e transparência nos inventários corporativos.
 - Apoio à tomada de decisão: orienta sobre estratégias de mitigação, eficiência energética e substituição de combustíveis fósseis, facilitando a escolha de soluções com maior impacto na redução de carbono.
 - Conexão com mercado de carbono: indica caminhos para geração de créditos e participação em mecanismos regulados e voluntários, agregando valor econômico à descarbonização.
- É uma ação que estabelece fundamentos técnicos e normativos duradouros, que sustentam toda a estratégia de descarbonização.

Importância (Cobenefícios)

- Operacional: padronização e Governança - Criação de diretrizes claras que aumentam a transparência e a credibilidade das ações ambientais. Facilita auditorias e certificações, fortalecendo a governança corporativa.
- Econômico: redução de Custos Operacionais - Protocolos orientam práticas de eficiência energética e otimização de processos, diminuindo desperdícios e custos com insumos e energia.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A elaboração de guias técnicos e protocolos para descarbonização voltados ao setor envolve padronização de metodologias, integração com normas regulatórias e alinhamento a padrões internacionais, além de demandar capacitação técnica

e engajamento setorial. As principais barreiras incluem desafios técnicos pela falta de dados consolidados, custos iniciais significativos, resistência organizacional à mudança e complexidade regulatória, que pode gerar obstáculos comerciais se não houver harmonização global. Apesar disso, esses instrumentos são fundamentais para garantir governança, transparência e eficiência na transição para práticas sustentáveis.

— Tipo de Ação

Estruturante

1.4.6.3 Parcerias com ONGs e Instituições Científicas Para Monitoramento Ambiental (SET.03)

Estabelecer parcerias com ONGs e instituições científicas é uma estratégia essencial para promover ações de monitoramento ambiental com base em conhecimento técnico. Essas colaborações permitem implementar projetos de restauração florestal, conservação da biodiversidade e acompanhamento contínuo dos impactos ambientais, garantindo resultados mensuráveis e alinhados às melhores práticas.

Além de contribuir diretamente para a captura de carbono por meio do reflorestamento, essas parcerias fortalecem a governança ambiental, engajam comunidades locais e ampliam a transparência das ações corporativas. Com isso, o setor de Papel & Celulose avança na descarbonização, cumpre exigências regulatórias e reforça seu compromisso com a sustentabilidade.

Descrição da Ação

- Estabelecimento de parcerias estratégicas com organizações não governamentais e instituições científicas para desenvolver projetos de monitoramento ambiental. Essas parcerias garantem conhecimento técnico, credibilidade e engajamento social, promovendo ações de restauração florestal e conservação da biodiversidade.

Forma de Mitigação

- Ajuda a descarbonizar o setor com:
 - Sequestro de carbono: áreas reflorestadas capturam CO₂ da atmosfera, compensando emissões do setor.
 - Monitoramento eficiente: uso de tecnologias e metodologias científicas para acompanhar estoques de carbono e garantir resultados mensuráveis.
 - Integração com metas corporativas: apoia estratégias de neutralidade de carbono e relatórios ESG, fortalecendo compromissos climáticos.
- É uma ação que cria uma base sólida e permanente para outras iniciativas de descarbonização.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: conservação da biodiversidade e proteção de recursos hídricos.
- Social: engajamento comunitário e geração de empregos locais.
- Governança: fortalecimento da imagem corporativa e acesso a mercados sustentáveis.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- Parcerias com ONGs e instituições científicas para monitoramento ambiental exigem articulação entre múltiplos atores, alinhamento de objetivos, definição de responsabilidades e integração de metodologias de monitoramento. As barreiras mais comuns incluem questões burocráticas, diferenças de governança e prioridades, limitações de financiamento e desafios técnicos para padronização de indicadores e validação científica.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.4.6.4 Promoção de Acordos Voluntários de Metas Climáticas, como Compromissos de Neutralidade de Carbono até 2040 ou 2050 (SET.04)

- A adoção de compromissos climáticos estabelece um marco de planejamento de longo prazo, que direciona investimentos para tecnologias limpas, eficiência energética e soluções circulares. Além de reduzir emissões diretas, essa ação mobiliza toda a cadeia produtiva, amplia a participação em mercados de carbono e fortalece a competitividade global.

Descrição da Ação

- A promoção de acordos voluntários consiste em incentivar empresas e organizações a assumirem compromissos públicos para reduzir suas emissões de GEE, estabelecendo metas ambiciosas como a neutralidade de carbono até 2040 ou 2050. Esses acordos não são impostos por regulamentações, mas representam uma postura proativa diante das mudanças climáticas e das exigências do mercado.

Forma de Mitigação

- Essa ação ajuda a descarbonizar o setor com:
 - Planejamento de longo prazo: obriga as empresas a estruturar planos robustos para reduzir emissões, incluindo eficiência energética, substituição de combustíveis fósseis e adoção de tecnologias limpas.
 - Engajamento da cadeia produtiva: estimula fornecedores e parceiros a também reduzir suas emissões, ampliando o impacto.
 - Inovação e investimento: incentiva pesquisa e desenvolvimento de soluções sustentáveis para atingir as metas.
- Caracteriza-se como uma ação com fundamentos duradouros e obrigatórios para toda a organização, garantindo alinhamento com a agenda climática global.

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: redução das emissões de GEE
- Operacional: redução de riscos regulatórios

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A promoção de acordos voluntários de metas climáticas, como compromissos de neutralidade de carbono até 2040 ou 2050 envolve negociação entre múltiplos *stakeholders*, definição de métricas confiáveis e integração com estratégias corporativas de longo prazo. As barreiras incluem falta de padronização internacional, riscos de *greenwashing*, custos para implementação e monitoramento, além da necessidade de engajamento contínuo para garantir credibilidade e cumprimento das metas.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.4.6.5 Criação de Plataformas de Compartilhamento de Boas Práticas e Benchmarking entre Empresas do Setor (SET.05)

A criação de plataformas colaborativas para compartilhamento de boas práticas e *benchmarking* é uma iniciativa estratégica que promove a troca de conhecimento entre empresas do setor de Papel & Celulose. Essas plataformas funcionam como espaços digitais ou físicos onde organizações podem divulgar experiências, indicadores de desempenho e soluções inovadoras relacionadas à sustentabilidade e descarbonização.

O compartilhamento de boas práticas e *benchmarking* promove sinergias e acelera a adoção de soluções coletivas para a redução de emissões.

Descrição da Ação

- É a criação de uma plataforma colaborativa, podendo ser digital ou com

fóruns presenciais, onde empresas do setor compartilham boas práticas, indicadores de desempenho e casos de sucesso em temas relacionados a descarbonização.

Forma de Mitigação

- Cria pressão positiva por desempenho: *Benchmarking* transparente incentiva metas mais ambiciosas.
- Uma plataforma de compartilhamento estabelece um mecanismo permanente de troca de informações, que fortalece a capacidade coletiva do setor de forma permanente essenciais para a transformação do setor a longo prazo

Importância (Cobenefícios)

- Ambiental: melhorias de metas ambientais.
- Operacional: engajamento e colaboração setorial - criação de uma rede de cooperação que aumenta a capacidade de resposta coletiva frente às metas climáticas.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A criação de plataformas de compartilhamento de boas práticas e *benchmarking* entre empresas do setor envolve desenvolvimento tecnológico, padronização de indicadores, garantia de segurança e confidencialidade dos dados, além de engajamento das partes interessadas para manter a plataforma ativa e relevante. As principais barreiras incluem custos de implementação, resistência à transparência por parte das empresas, desafios de interoperabilidade e falta de governança clara para assegurar credibilidade e atualização contínua.

Tipo de Ação

- Estruturante.

1.4.6.6 Realização de Campanhas de Conscientização Setorial sobre os Benefícios Econômicos e Reputacionais da Descarbonização (SET.06)

- A descarbonização é um dos pilares da transição para uma economia sustentável e de baixo carbono. No setor Papel & Celulose, que já possui características favoráveis como o uso de matéria-prima renovável e práticas de manejo florestal, ampliar o engajamento setorial é essencial para acelerar essa transformação. A realização de campanhas de conscientização voltadas para empresas, colaboradores e *stakeholders* do setor é uma estratégia eficaz para disseminar os benefícios econômicos, reputacionais e ambientais da descarbonização.

- O monitoramento e a transparência das emissões também devem ser fortalecidos. A implementação de mecanismos de acompanhamento das emissões do setor industrial, bem como o incentivo à certificação ambiental e à divulgação de relatórios de sustentabilidade, contribui para a responsabilização e para a melhoria contínua das práticas empresariais.

Descrição da Ação

- Essa ação consiste na criação e execução de campanhas informativas e educativas voltadas ao público interno e externo do setor Papel & Celulose. As campanhas podem incluir seminários, materiais digitais, vídeos, *workshops*, publicações em redes sociais, eventos setoriais e parcerias com associações e entidades representativas. O objetivo é sensibilizar os diferentes atores sobre como a descarbonização pode gerar valor econômico, fortalecer a reputação corporativa e atender às exigências de investidores, consumidores e reguladores.

Forma de Mitigação

- Essas ações ajudam a:
 - Mobilizar outras empresas a adotarem metas de redução de emissões;
 - Estimular investimentos em tecnologias

limpas e processos mais eficientes;

- Promover a adesão a certificações ambientais e compromissos climáticos;

- Criar uma cultura organizacional voltada à sustentabilidade e inovação.

- Ao aumentar o nível de conscientização, as campanhas ajudam a acelerar decisões estratégicas que resultam em menor emissão de gases de efeito estufa ao longo da cadeia produtiva. Campanhas de conscientização mudam a mentalidade empresarial, consolidando a percepção de que descarbonização é vantajosa economicamente e reputacionalmente criando condições para políticas e práticas sustentáveis prosperarem a longo prazo.

Importância (Cobenefícios)


- Ambiental: conscientização ambiental

- Governança: fortalecimento da imagem institucional e da reputação socioambiental.

Nível de Esforço e Existência de Barreiras

- A realização de campanhas de conscientização setorial sobre os benefícios econômicos e reputacionais da descarbonização envolve planejamento estratégico, produção de conteúdos claros e engajadores, além da mobilização de diferentes atores do setor. As barreiras mais comuns incluem falta de alinhamento entre empresas, resistência cultural à mudança, limitações orçamentárias e dificuldade em mensurar impactos tangíveis para justificar investimentos.

Tipo de Ação

- Estruturante. 

An aerial photograph of a lush tropical forest. A winding river or stream flows through the center of the image. The forest is composed of various types of trees, including a large section of palm trees in the lower-left corner. The overall color palette is vibrant green, with some brownish tones from the river and tree trunks. The text 'Making Future' is overlaid in the center in a white, sans-serif font.

Making Future