



NOTA TÉCNICA RENOVACALC: ESTUDO SOBRE A INCLUSÃO DE EMISSIONES FUGITIVAS NA ROTA DE BIOMETANO

PROJETO
APRIMORAMENTO DA RENOVACALC PARA A
ROTA DE BIOMETANO

PROJETO “APRIMORAMENTO DA RENOVACALC PARA A ROTA DE BIOMETANO”

EQUIPE i17

Coordenação Técnica: Alessandro Sanches Pereira

Líder da equipe: Vanice Nakano

Responsável técnica: Karina Guedes Cubas Amaral

Equipe técnica: Camila Ester Hollas, Karina Guedes Cubas Amaral, Marcela Valles Lange

Consultora sênior: Leidiane Ferronato Mariani

EQUIPE DE SUPERVISÃO EMBRAPA

Nilza Patrícia Ramos

Marília Ieda da Silveira Folegatti

Adriana Marlene Moreno Pires

Anna Leticia M T Pighinelli

PROJETO FINEP

nº 01.22.0591.00

Avisos e Orientações:

O presente documento constitui o produto resultante do Projeto “APRIMORAMENTO DA RENOVACALC PARA A ROTA DE BIOMETANO”, desenvolvido pelo Instituto 17, sob a supervisão técnica da Embrapa Meio Ambiente.

Todas as indicações, dados e resultados deste estudo foram compilados e cuidadosamente revisados pelos autores. Nem o Instituto 17 nem os autores podem ser responsabilizados por qualquer reivindicação, perda ou prejuízo direto ou indireto resultante do uso ou confiança depositada sobre as informações contidas neste estudo, ou diretamente resultante de eventuais erros, imprecisões ou omissões de informações nele presentes.

Agosto/2026.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	5
RESUMO EXECUTIVO.....	6
CAPÍTULO 1 - FUNDAMENTOS TÉCNICOS PARA A INCLUSÃO DE EMISSÕES FUGITIVAS NA ROTA DE BIOMETANO	7
1.1. FRONTEIRAS DO SISTEMA E ABORDAGEM <i>CUT-OFF</i>	8
1.2. FONTES DE EMISSÕES FUGITIVAS AO LONGO DA ROTA DE BIOMETANO	11
1.2.1. Síntese técnica das perdas de metano nas etapas anteriores à biodigestão	13
1.2.2. Emissões em aterros sanitários.....	15
1.2.3. Emissões em plantas de biodigestão	16
1.2.4. Emissões em <i>Flare</i>	18
1.2.5. Emissões em sistemas de armazenamento de biogás	19
1.2.6. Emissões do processo de <i>upgrading</i>	19
1.2.7. Armazenamento do biometano	21
1.2.8. Transporte do biometano até o uso	21
1.3. PRINCIPAIS CONSIDERAÇÕES	22
CAPÍTULO 2 - TRATAMENTO DAS EMISSÕES FUGITIVAS EM METODOLOGIAS, DIRETRIZES E CALCULADORAS INTERNACIONAIS.....	25
2.1 DIRETIVA EUROPEIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	25
2.2 METODOLOGIA BIOSURF.....	26
2.3 <i>LOW CARBON FUEL STANDARD</i> DA CALIFÓRNIA E CALCULADORAS CARB.....	27
2.4 <i>CLEAN FUELS STANDARD</i> DO ESTADO DE WASHINGTON	27
2.5 <i>GLOBAL METHANE INITIATIVE</i> E FERRAMENTAS EPA	28
2.6 SÍNTESE COMPARATIVA DAS METODOLOGIAS ANALISADAS	28
CAPÍTULO 3 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA APOIO À DECISÃO METODOLÓGICA.....	31
3.1 OBJETIVO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	31
3.2 SENSIBILIDADE ÀS DISTÂNCIAS DE TRANSPORTE DO BIOMETANO	31
3.3 DECISÕES DECORRENTES DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	34
CAPÍTULO 4 - ATUALIZAÇÕES RECOMENDADAS E INCORPORADAS À RENOVACALC.....	35
4.1 ESTRUTURA GERAL DAS ALTERAÇÕES NA RENOVACALC.....	35
4.2 CÁLCULO DAS EMISSÕES FUGITIVAS NO UPGRADING.....	36
4.3 DESTINO DO <i>OFF-GAS</i> E LÓGICA DE CÁLCULO	38

4.4 INSUMOS DA PLANTA DE <i>UPGRADING</i>	39
4.5 CONTROLE DE CONSISTÊNCIA DOS DADOS DE ENTRADA.....	41
4.6 ATUALIZAÇÕES INCORPORADAS NA VERSÃO ATUAL.....	41
4.7 SÍNTESE DA ATUALIZAÇÃO METODOLÓGICA	42
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
REFERÊNCIAS.....	45

APRESENTAÇÃO

O Projeto Aprimoramento da RenovaCalc para a rota de biometano foi desenvolvido pelo Instituto 17 (i17), sob a supervisão técnica da Embrapa Meio Ambiente, no âmbito do projeto macro “Aprimoramento da contabilidade de carbono no RenovaBio”, demandado pelo Ministério de Minas e Energia. Quando aplicável, o apoio financeiro e contratual deve ser descrito conforme o instrumento vigente.

A rota de biometano possui particularidades relevantes para a avaliação de intensidade de carbono, pois envolve o aproveitamento energético de gases gerados a partir de resíduos e efluentes, a purificação do biogás em biometano e a distribuição do combustível para uso final.

A nota técnica tem três objetivos principais. O primeiro é apresentar, de forma autossuficiente, a fundamentação técnica das emissões fugitivas de metano ao longo da cadeia do biometano. O segundo é comparar, em nível metodológico, como diretrizes e calculadoras internacionais tratam dessas emissões, evidenciando convergências e diferenças em relação à RenovaCalc. O terceiro é explicitar as decisões metodológicas adotadas ou não na atualização da ferramenta, distinguindo claramente o que foi estudado, o que foi incorporado e o que permanece como tema para futuras discussões regulatórias.

A nota foi organizada em quatro capítulos. O Capítulo 1 “*Fundamentos técnicos para a inclusão de emissões fugitivas na rota de biometano*”, apresenta a base conceitual e bibliográfica para a inclusão de emissões fugitivas. O Capítulo 2, “*Tratamento das emissões fugitivas em metodologias, diretrizes e calculadoras internacionais*”, sintetiza as abordagens internacionais. O Capítulo 3, “*Análise de sensibilidade para apoio à decisão metodológica*”, apresenta a análise de sensibilidade utilizada para apoiar decisões sobre transporte. O Capítulo 4, “*Atualizações recomendadas e incorporadas à Renovacalc*”, descreve as atualizações recomendadas e incorporadas à RenovaCalc, bem como os elementos avaliados que não foram adotados nesta etapa.

O trabalho mantém como referência os princípios da Avaliação de Ciclo de Vida, a abordagem *cut-off* adotada na RenovaCalc e a compatibilidade com as bases de inventário utilizadas na ferramenta. A discussão e a análise junto à Embrapa Meio Ambiente e suas definições como demandante do projeto foram norteadoras para a decisão sobre quais dados, informações e abordagens foram aplicados e pertinentes para a execução do estudo.

RESUMO EXECUTIVO

Esta nota técnica avaliou a inclusão de emissões fugitivas de metano na rota de biometano da RenovaCalc, considerando a fundamentação técnica das fontes de emissão ao longo da cadeia, a comparação com metodologias e calculadoras internacionais e uma análise de sensibilidade para apoiar as decisões metodológicas. A atualização manteve como referência os princípios da Avaliação de Ciclo de Vida, a abordagem *cut-off* adotada na RenovaCalc e a compatibilidade com as bases de inventário utilizadas na ferramenta.

A decisão metodológica central foi concentrar a atualização nas etapas diretamente associadas à produção e à disponibilização do biometano dentro da fronteira adotada, especialmente no processo de *upgrading*, no destino do off-gas e nos insumos da purificação. As emissões associadas ao tratamento dos resíduos não foram automaticamente transferidas ao biometano, em coerência com a manutenção da abordagem *cut-off* e com o tratamento dos substratos como resíduos.

Tema	Resultado ou decisão metodológica
Fronteira metodológica	Manutenção da abordagem <i>cut-off</i> , com os substratos classificados como resíduos, evitando atribuir ao biometano cargas associadas ao tratamento do resíduo.
Emissões fugitivas incorporadas	Inclusão das perdas de CH ₄ diretamente associadas ao <i>upgrading</i> , calculadas preferencialmente por balanço de massa, com uso de valores padrão por tecnologia quando necessário.
Destino do off-gas e purificação	Diferenciação do destino do <i>off-gas</i> e incorporação de insumos relevantes da planta de <i>upgrading</i> , permitindo representar diferenças tecnológicas e operacionais.
Temas analisados e não incorporados nesta etapa	Distância específica de transporte, emissões evitadas do manejo de resíduos, benefícios automáticos associados ao CO ₂ comercializado e alocação econômica sem regra metodológica consolidada.
Análise de sensibilidade do transporte	Nos cenários avaliados, a contribuição do transporte permaneceu inferior a 1% da intensidade total; por isso, foram mantidas as distâncias médias para preservar simplicidade e comparabilidade.
Efeito da atualização	A RenovaCalc passa a representar de forma mais transparente as emissões fugitivas diretamente associadas ao biometano e a diferenciar configurações tecnológicas e práticas operacionais da etapa de purificação.

A fundamentação técnica dessas decisões é apresentada nos Capítulos 1 a 3, e sua implementação na RenovaCalc é detalhada no Capítulo 4.

CAPÍTULO 1 - FUNDAMENTOS TÉCNICOS PARA A INCLUSÃO DE EMISSÕES FUGITIVAS NA ROTA DE BIOMETANO

O biogás, um recurso energético renovável, é gerado a partir da fermentação de matéria-prima orgânica mediada por microrganismos, resultando em uma mistura gasosa composta predominantemente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). O metano, que representa entre 50% e 70% do biogás bruto, é o componente inflamável responsável por sua utilização como biocombustível (Lins; Mito; Fernandes, 2015). Sua combustão transforma-o em dióxido de carbono, um gás com potencial de aquecimento global significativamente inferior ao do metano, o que destaca o papel estratégico do biogás na mitigação das mudanças climáticas. Contudo, as emissões fugitivas de metano, que ocorrem ao longo das etapas da cadeia produtiva antes da combustão, representam um desafio crítico. Essas emissões, amplificadas pelo elevado potencial de aquecimento global do metano — 28 vezes maior que o do CO_2 em um horizonte de cem anos (Myhre *et al.*, 2013), demandam atenção especial no desenvolvimento de estratégias de mitigação. As emissões fugitivas de metano demandam atenção metodológica, pois o CH_4 possui potencial de aquecimento global substancialmente superior ao do CO_2 no horizonte de 100 anos. Para fins de cálculo na RenovaCalc, deve ser utilizado o fator de caracterização de CH_4 definido na metodologia vigente da ferramenta.

A ferramenta RenovaCalc, desenvolvida no âmbito do programa RenovaBio, foi projetada para avaliar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas às cadeias produtivas de biocombustíveis, incluindo o biometano. Na versão 8 da RenovaCalc utilizada como base deste estudo (disponível no sítio eletrônico da ANP), a rota de biometano contempla três fases principais: industrial, de distribuição e de uso. A fase industrial abrange a produção do biometano, incluindo o transporte do substrato e o consumo de combustíveis e de eletricidade; a fase de distribuição engloba o transporte rodoviário e dutoviário; e a fase de uso, na qual a queima do biometano é contabilizada. Além disso, a nota técnica explicativa da RenovaCalc (Matsuura *et al.*, 2018) estabelece que, para resíduos como “vinhaça e outros efluentes agroindustriais”, “dejetos animais” e “Biogás de Aterro Sanitário”¹, as emissões são contabilizadas apenas a partir do recolhimento e do transporte até a unidade de processamento.

Apesar desses avanços, ainda existem lacunas importantes. As emissões fugitivas de metano, que podem ocorrer durante a biodigestão, a purificação do biogás para biometano e o transporte, não são atualmente incluídas na RenovaCalc.

A ausência de parâmetros específicos para emissões fugitivas nas etapas diretamente pertencentes ao sistema do biometano pode reduzir a precisão da intensidade de carbono calculada, especialmente quando perdas de CH_4 ocorrem no *upgrading*, no tratamento do *off-gas* ou na distribuição. Como resultado, limita a precisão dos cálculos das emissões totais e subestima o impacto ambiental do biometano. Embora as emissões relacionadas à cadeia de suprimentos, como o consumo de energia elétrica e de combustíveis na fase industrial, já sejam contabilizadas, a ausência de emissões fugitivas representa um ponto crítico a ser abordado, especialmente diante dos desafios técnicos e metodológicos envolvidos em sua quantificação.

¹ É importante destacar que esta nomenclatura pode gerar dúvidas já que “biogás” é o resultado do processamento da biomassa presente no “resíduo sólido urbano” destinado a aterro sanitário, podendo mudar a interpretação da fronteira a ser analisada.

Essa lacuna é particularmente relevante em um cenário de transição energética que exige ferramentas robustas para avaliar e promover tecnologias limpas. A subestimação das emissões fugitivas pode comprometer a credibilidade dos inventários de GEE e prejudicar o alinhamento do setor às metas climáticas nacionais e internacionais. Além disso, ao não contabilizar essas emissões, limita-se a identificação de oportunidades para melhorar a eficiência dos processos e mitigar impactos ao longo da cadeia produtiva.

Diante disso, este estudo, financiado pela Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Desenvolvimento (FAPED), tem como objetivo analisar os impactos da inclusão das emissões fugitivas de metano na rota de biometano definida pela RenovaCalc, com foco especial nos seguintes resíduos: a) vinhaça de usina sucroenergética; b) resíduo sólido urbano (RSU) em aterro sanitário; c) fração orgânica de RSU (FORSU) em biodigestores; e d) dejetos suínos em biodigestores. Por meio de uma revisão crítica da literatura científica, da análise de inventários de ciclo de vida e de diretrizes internacionais, bem como de discussões com especialistas, o estudo busca aprimorar a modelagem metodológica da ferramenta. Esse esforço é fundamental para garantir que a RenovaCalc reflita com maior precisão as condições e necessidades do contexto brasileiro, fortalecendo sua contribuição para a transição energética e a mitigação das mudanças climáticas.

1.1. FRONTEIRAS DO SISTEMA E ABORDAGEM *CUT-OFF*

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) exige a definição explícita das fronteiras do sistema e das regras de alocação aplicáveis, especialmente em processos multifuncionais. Em muitos sistemas produtivos, a mesma atividade pode gerar mais de um produto, coproduto ou fluxo residual. Nesses casos, é necessário estabelecer como as cargas ambientais serão atribuídas entre os diferentes sistemas de produto. Esse procedimento é denominado alocação.

A abordagem de alocação adotada na RenovaCalc é a de *cut-off*. De forma geral, essa abordagem estabelece um ponto de corte entre sistemas de produto, definindo quais cargas ambientais permanecem associadas ao sistema gerador e quais passam a ser atribuídas ao sistema que utiliza determinado fluxo como insumo. Trata-se de uma abordagem amplamente empregada em estudos de ACV e adotada em referências metodológicas como o Sistema Internacional de Declaração Ambiental de Produto (*Environmental Product Declaration - EPD*) e pela PAS 2050 (BSI, 2011) e pelo *Greenhouse Gas Protocol* (GHG, 2011).

A base de dados ecoinvent, utilizada na RenovaCalc como fonte de fatores de emissão para processos a montante e a jusante, também disponibiliza uma biblioteca baseada na abordagem *cut-off*. Nessa biblioteca, a aplicação das regras de alocação depende da distinção entre resíduos e subprodutos (denominados materiais recicláveis pela base ecoinvent). Para fins deste estudo, a classificação entre resíduo e subproduto é tratada como um critério metodológico, dependente da função do sistema, do arranjo contratual e da existência de mercado para o fluxo. A ausência ou presença de valor econômico, isoladamente, não deve ser usada como único critério de classificação (Instituto 17; Embrapa Meio Ambiente; ANP, 2025).

Essa distinção é relevante porque altera a fronteira do sistema. No caso dos subprodutos, a carga ambiental dos processos anteriores à geração do material é interrompida no ponto de corte, e o sistema que utiliza o subproduto passa a responder pelos impactos a partir de sua coleta, do transporte e do processamento. No caso dos resíduos, a carga ambiental do tratamento permanece

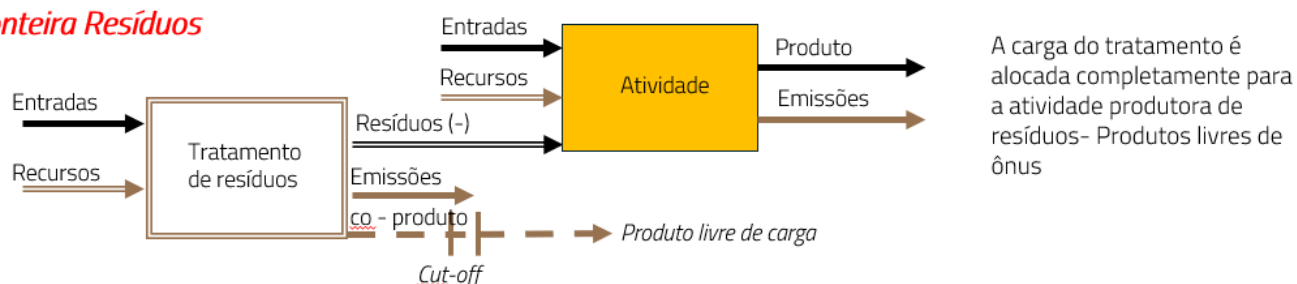
atribuída ao sistema gerador do resíduo; consequentemente, os produtos obtidos a partir desse tratamento podem ser disponibilizados ao sistema seguinte sem a carga ambiental do processo de tratamento. A Tabela 1 e Figura 1 sintetizam essa diferença conceitual.

Tabela 1. Diferenças na abordagem de Cut-off, conforme a classificação do substrato entre resíduo e reciclável (subproduto), de acordo com a biblioteca Cut-off do ecoinvent.

Classificação do substrato	Resíduo	Subproduto (Reciclável)
Alocação da carga ambiental do transporte*	Impactos são alocados ao sistema gerador do resíduo	Impactos alocados ao produto final (biometano)
Alocação da carga ambiental do processo de tratamento/biodigestão	Impactos são alocados ao sistema gerador do resíduo	Impactos alocados ao produto final (biometano)
Fronteira	A partir da geração do biogás	A partir da geração do substrato
Critério	Não possui valor de mercado e não há interesse na coleta sem compensação financeira.	Possui pouco ou nenhum valor de mercado, mas há interesse na coleta, mesmo sem compensação financeira, já que pode servir como insumo ou recurso para uma atividade de reciclagem / destinação.

* **Nota:** A alocação do transporte depende da fronteira adotada e da responsabilidade contratual pela coleta ou pela destinação. Quando o transporte for parte do serviço de tratamento do resíduo, a carga permanece no sistema gerador; quando for realizado para abastecer a planta de biometano como insumo, sua inclusão deve ser avaliada conforme a fronteira definida.

Fronteira Resíduos



Fronteira Subprodutos

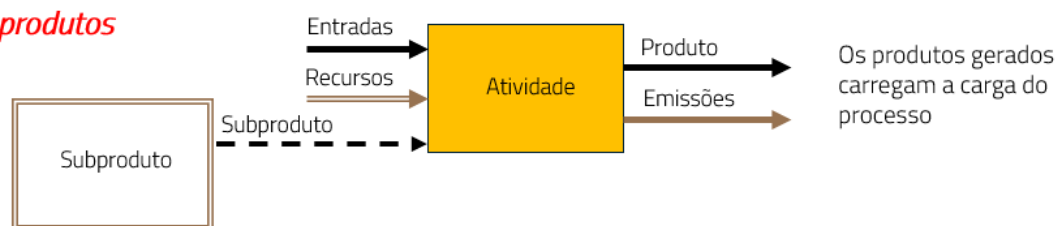


Figura 1. Fluxo de produção e fronteiras dos sistemas.

Na rota de biometano, a definição da fronteira depende, portanto, da classificação dos substratos utilizados na produção de biogás. No contexto brasileiro, os resíduos sólidos urbanos (RSU) destinados a aterros sanitários podem ser classificados como resíduos, uma vez que compreendem materiais pós-consumo, sem valor econômico agregado, cuja destinação geralmente ocorre por meio de serviços contratados pelas prefeituras junto a operadores de aterros sanitários. A fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) também pode ser enquadrada como resíduo, sobretudo porque os poucos projetos existentes no país ainda tendem a operar como prestação de serviço de coleta e tratamento, especialmente junto a grandes geradores.

Quando esses fluxos são classificados como resíduos, a carga ambiental associada ao tratamento, seja por aterramento, seja por biodigestão, permanece atribuída ao sistema gerador do resíduo. Nessa lógica, o biogás gerado pelo tratamento fica disponível para o sistema de produção de biometano, sem acarretar as emissões do processo de tratamento anterior. Assim, o impacto ambiental atribuído ao biometano passa a se iniciar nas etapas posteriores à geração ou coleta do biogás, incluindo armazenamento, purificação (*upgrading*), eventual tratamento do *off-gas*, distribuição e uso.

Raciocínio semelhante se aplica à vinhaça de usina sucroenergética e aos dejetos suínos. Em ambos os casos, o gerador é responsável pelo tratamento ou pela destinação ambientalmente adequada do resíduo. A produção de biogás e biometano constitui uma alternativa tecnológica para esse tratamento, com aproveitamento energético do biogás gerado. Embora existam iniciativas de valorização desses fluxos como insumos energéticos, o mercado brasileiro ainda não está suficientemente consolidado para tratá-los, de modo geral, como subprodutos (materiais recicláveis). A situação predominante ainda é de responsabilidade do gerador pelo manejo do resíduo, como no caso da vinhaça destinada à fertirrigação ou dos dejetos suínos encaminhados a esterqueiras e lagoas de tratamento.

A nota técnica explicativa da RenovaCalc (Matsuura et al., 2018) já enquadra como resíduos os fluxos de “vinhaça e outros efluentes agroindustriais”, “dejetos animais” e “biogás de aterro sanitário”. No entanto, a terminologia “biogás de aterro sanitário” pode levar a diferentes interpretações quanto à definição da fronteira. Como o biogás é resultado da degradação da fração orgânica dos resíduos no aterro, sua inclusão como “resíduo” pode sugerir que a fronteira da rota de biometano se inicia com a geração ou coleta do biogás, excluindo do cálculo do biometano as emissões associadas ao processo de aterramento propriamente dito.

Essa interpretação evidencia uma diferença importante entre a lógica de *cut-off* do ecoinvent e a forma como a rota de biometano vinha sendo representada na RenovaCalc. Na abordagem *cut-off* do ecoinvent, quando o substrato é tratado como resíduo, a carga ambiental do tratamento permanece atribuída ao sistema gerador. Na versão analisada da RenovaCalc, embora os substratos da rota de biometano sejam tratados como resíduos, determinados campos de entrada permitem informar etapas associadas à geração, à coleta ou ao transporte do substrato. Essa estrutura pode, em alguns casos, deslocar o ponto inicial da contabilização para etapas anteriores à geração ou à coleta do biogás, aproximando a modelagem de uma fronteira mais semelhante à aplicada a subprodutos do que à lógica *cut-off* estrita utilizada pelo ecoinvent para resíduos. A **Tabela 2** resume essa distinção.

Tabela 2. Comparação entre as abordagens de alocação e fronteiras na biblioteca *cut-off* do ecoinvent e na calculadora *RenovaCalc*, por substrato

Fronteira do sistema	ecoinvent <i>cut off</i>	RenovaCalc
A partir da geração do biogás	substratos considerados Resíduos	-
A partir do transporte do substrato	substratos considerados subprodutos	“biogás de aterro sanitário”, “vinhaça e outros efluentes agroindustriais”, “dejetos animais”

Essa distinção é central para a atualização metodológica da rota de biometano. A classificação dos substratos como resíduos implica que as emissões decorrentes do tratamento do resíduo, como a biodigestão ou o aterramento, não devem ser automaticamente transferidas ao biometano quando esse tratamento é responsabilidade do sistema gerador. Por outro lado, as emissões associadas às etapas específicas de produção, purificação, distribuição e uso do biometano devem ser avaliadas e, quando aplicável, incorporadas à ferramenta.

Cabe destacar que a classificação de um fluxo como resíduo ou reciclável pode evoluir ao longo do tempo. O desenvolvimento do mercado de biogás e biometano, a ampliação de incentivos regulatórios, as mudanças nas exigências ambientais e o aumento do interesse econômico por determinados substratos podem alterar a forma como esses fluxos são tratados em estudos de ACV. Caso determinados resíduos passem a ter valor de mercado ou sejam coletados sem compensação financeira por interesse direto no seu aproveitamento, sua classificação poderá se aproximar da lógica aplicada a materiais recicláveis. Nesse caso, etapas como coleta, transporte e tratamento poderiam passar a ser atribuídas ao sistema de produto do biometano.

Diante dessa complexidade, este estudo adotou duas camadas de análise. A primeira, mais abrangente, mapeou as emissões fugitivas potenciais ao longo de toda a cadeia produtiva, desde o manejo dos substratos até a distribuição do biometano, com o objetivo de compreender a relevância técnica de cada etapa e subsidiar futuras atualizações. A segunda, aplicada à atualização da *RenovaCalc*, adotou a abordagem *cut-off*, considerando os substratos tratados como resíduos e concentrando a incorporação das emissões nas etapas diretamente associadas à produção e disponibilização do biometano, especialmente no processo de *upgrading*, no tratamento do *off-gas* e na distribuição.

1.2. FONTES DE EMISSÕES FUGITIVAS AO LONGO DA ROTA DE BIOMETANO

As emissões fugitivas na rota de biometano correspondem à liberação não intencional de gases, principalmente metano (CH_4), ao longo das etapas de geração, processamento, purificação, armazenamento e distribuição do biogás e do biometano. Essas emissões podem ocorrer em diferentes pontos da cadeia, incluindo o transporte e a manipulação dos resíduos orgânicos, a digestão anaeróbia, os sistemas de armazenamento de biogás, os dispositivos associados aos

biodigestores e aterros sanitários, o processo de purificação do biogás a biometano (*upgrading*), o tratamento do *off-gas*, o armazenamento do biometano e sua distribuição até o uso final.

A Figura 2 apresenta, de forma esquemática, as principais fontes potenciais de emissões fugitivas mapeadas ao longo da rota de biometano. Esse mapeamento tem caráter abrangente e visa identificar os pontos críticos da cadeia. A incorporação dessas emissões à RenovaCalc, contudo, depende da fronteira metodológica adotada e da classificação dos substratos conforme a abordagem *cut-off* discutida na seção anterior.

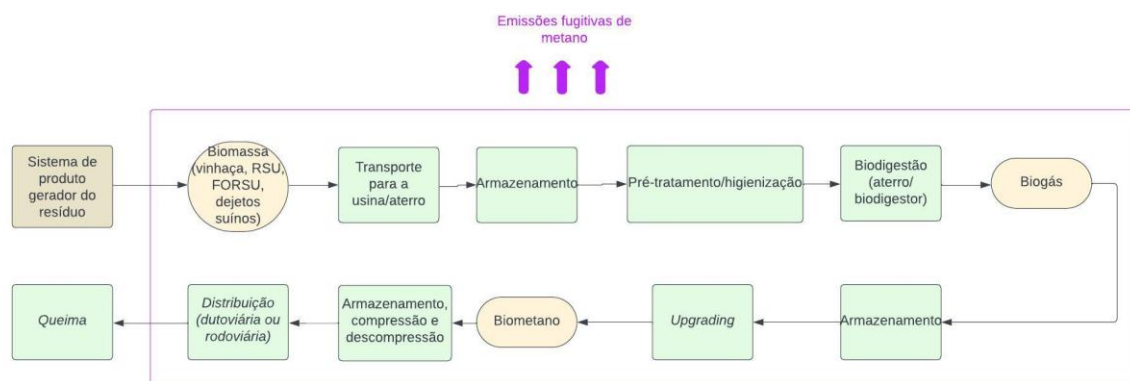


Figura 2. Emissões fugitivas dentro das fronteiras dos sistemas de produto avaliados na rota de biometano da RenovaCalc.

O mapeamento apresentado na Figura 2 tem finalidade diagnóstica e não implica, por si só, atribuição integral dessas emissões ao biometano. A incorporação na RenovaCalc depende da fronteira *cut-off* adotada, da responsabilidade pelo tratamento do resíduo e da disponibilidade de parâmetros verificáveis.

A literatura científica demonstra que as emissões fugitivas podem variar de forma expressiva entre plantas, tecnologias e condições operacionais. SCHEUTZ e FREDENSLUND (2019), por exemplo, avaliaram perdas de metano em 23 usinas de biogás na Dinamarca utilizando o método de dispersão com gás traçador. As plantas analisadas diferiam quanto ao porte, aos substratos utilizados e ao destino do biogás. As taxas de emissão variaram de 2,3 a 33,5 kg CH₄ h⁻¹, enquanto as perdas relativas variaram de 0,4% a 14,9% da produção de metano. A perda média observada foi de 4,6%, com valores geralmente menores em plantas de maior porte. Os autores também observaram perdas mais elevadas em estações de tratamento de águas residuais, com média de 7,5%, em comparação com plantas agrícolas de biogás, cuja média foi de 2,4%.

FLESCHE, DESJARDINS e WORTH (2011) avaliaram as emissões fugitivas de CH₄ em uma instalação de digestão anaeróbica no Canadá, alimentada por esterco bovino e outros materiais orgânicos. As medições foram realizadas em quatro campanhas sazonais e evidenciaram forte influência do estado operacional da planta. As taxas médias de emissão foram de 0,8 kg CH₄ h⁻¹ durante a manutenção, 26,6 kg CH₄ h⁻¹ durante a queima e 3,2 kg CH₄ h⁻¹ durante a operação normal. Nessa condição, o depósito de matéria-prima foi identificado como a principal fonte de emissões. Em termos relativos, as emissões fugitivas representaram 3,1% da produção de biogás durante a

operação normal, o que indica a importância de considerar não apenas a tecnologia instalada, mas também as condições de operação e de manejo.

BALDÉ *et al.* (2022) quantificaram as perdas fugitivas de CH₄ em duas instalações de biogás no Canadá ao longo de um ano, considerando fontes como o armazenamento de digestato, os digestores e o *flare*. Na Instalação A, as principais perdas estiveram associadas ao armazenamento de digestato, equivalente a 5,8% do biogás produzido, seguidas por vazamentos ou ventilação, com 5,5%, e pela queima em *flare*, com 0,2%. Na Instalação B, as perdas no armazenamento de digestato foram ainda mais relevantes, atingindo 10,7%, devido à menor retenção hidráulica e à ausência de prensa de rosca. O estudo também mostrou que vazamentos inicialmente estimados em 3,8% foram reduzidos para 0,6% após reparos na membrana da cúpula, evidenciando o potencial de mitigação por meio de manutenção e controle operacional.

As emissões fugitivas também dependem da tecnologia empregada no processo de *upgrading*. KVIST e ARYAL (2019) investigaram as emissões de CH₄ em nove plantas de purificação de biogás na Dinamarca, considerando tecnologias de membrana, de amina e de *water scrubbing*. Entre as tecnologias avaliadas, o *water scrubbing* apresentou a maior perda de CH₄, equivalente a 1,97%, enquanto a tecnologia baseada em amina apresentou a menor perda, de 0,04%. Considerando o conjunto de plantas avaliadas, a perda média foi de 0,81%, o que reforça a ideia de que a escolha tecnológica e o desempenho operacional do sistema de purificação influenciam diretamente a intensidade das emissões fugitivas.

Esses estudos indicam que as emissões fugitivas ao longo da rota de biometano são influenciadas por múltiplos fatores, como o tempo e a distância de transporte dos substratos, o tipo de resíduo tratado, a tecnologia de biodigestão, as características do aterro sanitário, o sistema de armazenamento de biogás, a eficiência dos *flares*, a tecnologia de *upgrading*, o tratamento do *off-gas* e o modo de distribuição do biometano. Por essa razão, as emissões fugitivas devem ser avaliadas por etapa do processo, distinguindo-se as fontes relevantes para o mapeamento técnico da cadeia daquelas efetivamente incorporáveis à ferramenta, conforme a fronteira metodológica adotada.

1.2.1. Síntese técnica das perdas de metano nas etapas anteriores à biodigestão

As etapas anteriores à digestão anaeróbia incluem o transporte do substrato até a planta ou o aterro, o armazenamento ou a recepção do material, a alimentação do biodigestor e, quando aplicável, os processos de pré-tratamento e higienização. Embora essas etapas geralmente apresentem menor contribuição relativa quando comparadas a aterros, biodigestores, lagoas de digestato e processos de *upgrading*, podem gerar emissões de metano em situações específicas, principalmente quando há retenção prolongada de resíduos orgânicos em condições favoráveis à degradação anaeróbia.

A Tabela 3 apresenta valores de referência identificados na literatura e em bases de dados para as perdas de metano nessas etapas.

Tabela 3. Tabela resumo de emissões fugitivas de metano (%) nos processos de transporte, armazenamento, alimentação e pré-tratamento do substrato, com base nas fontes pesquisadas

Processos	Perda de metano (%) por fonte da literatura				
	EPA (2022)	LIEBETRAU et al. (2010)	JONERHOLM e LUNDBORG (2012)	ecoinvent 3.10	CARB
Transporte do substrato para usina/aterro	Calculado	-	-	0,28	-
Armazenamento do substrato	-	0,004	0 – 0,1		-
Alimentação do substrato no biodigestor	-	0,1 – 0,27			1
Pré-tratamento e higienização	-	-	0 – 0,5		-

No caso do transporte, a relevância das emissões fugitivas depende do modelo de negócio e da distância entre o ponto de geração do resíduo e a unidade de tratamento. Em sistemas nos quais os resíduos são tratados em local distinto de sua geração, o transporte pode favorecer emissões de metano durante o trajeto, a depender do tempo de permanência do material, da temperatura, do teor de matéria orgânica e das condições de acondicionamento. Embora a literatura ainda não apresente valores específicos consolidados para essa etapa, as emissões podem ser estimadas por meio de modelos baseados na degradação de sólidos voláteis presentes na biomassa, uma abordagem semelhante à utilizada para estimar as emissões de pré-estocagem.

A *Global Methane Initiative* considera as emissões decorrentes do armazenamento ou estocagem antes de sua entrada no biodigestor. A ferramenta apresentada pela EPA (2022), permite estimar essas perdas com base no tempo de armazenamento, no potencial de geração de metano do substrato e nas características do sistema de manejo. Essa abordagem é particularmente útil quando há retenção do material por períodos longos o suficiente para o início da degradação anaeróbia.

Com relação ao armazenamento na planta, em muitos sistemas o substrato é alimentado diretamente no biodigestor, reduzindo a possibilidade de emissões. Entretanto, algumas plantas utilizam tanques ou estruturas de recepção para gerenciar os volumes recebidos. JONERHOLM e LUNDBORG (2012), indicam emissões de metano de 0 a 0,1% durante a recepção do substrato, valores considerados baixos no balanço total de emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do biometano. Ainda assim, emissões podem ocorrer em casos de atrasos no processamento ou em sistemas de armazenamento com condições favoráveis à metanogênese. Em geral, o baixo pH de determinados reservatórios pode limitar a magnitude dessas emissões.

As etapas de pré-tratamento e higienização são mais comuns em resíduos sólidos, como a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU), que pode exigir separação, trituração, peneiramento, homogeneização ou higienização antes da digestão anaeróbia. Como esses processos normalmente não ocorrem em ambientes estritamente anaeróbios, as emissões de metano tendem a ser pouco significativas. Contudo, instalações com tanques de mistura ou tempos de retenção prolongados podem apresentar emissões fugitivas. Nesses casos, além de metano, podem ocorrer emissões de compostos orgânicos voláteis, sulfeto de hidrogênio e amônia, ainda que, segundo JONERHOLM e LUNDBORG (2012), as emissões de GEE nessa etapa sejam geralmente pouco relevantes.

1.2.2. Emissões em aterros sanitários

Os aterros sanitários representam uma fonte significativa de emissões de metano decorrentes da decomposição anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos. Mesmo quando há sistemas de captação de biogás destinados ao aproveitamento energético ou à produção de biometano, parte do metano gerado pode escapar para a atmosfera como emissão fugitiva. Além disso, sistemas de tubulação, poços de captação, conexões e dispositivos de queima, como os *flares*, também podem contribuir para perdas adicionais.

A Tabela 4 apresenta valores de perdas de metano em aterros sanitários reportados em diferentes estudos e bases de dados.

Tabela 4. Resumo de emissões fugitivas de metano (%) em aterros sanitários, com base nas fontes pesquisadas

Fonte	Perda de metano (%)
CANDIANI e VIANA (2018)	31,4
SILVA; DE FREITAS e CANDIANI (2013)	16 / 35
AUDIBERT e FERNANDES (2013)	84,8
DAMASCENO (2018)	12
ecoinvent 3.10	35,07

Os valores apresentados na Tabela 4 evidenciam a elevada variabilidade das emissões fugitivas de metano em aterros sanitários, associada a diferenças de projeto, de operação, de cobertura, de idade dos resíduos e de eficiência dos sistemas de captação. Sua utilização como referência para fins regulatórios ou como fator padrão na RenovaCalc exigiria avaliação adicional de representatividade, comparabilidade metodológica e aderência às condições operacionais dos aterros considerados.

Mesmo aterros sanitários com sistemas eficientes de captação não conseguem coletar 100% do metano gerado. Estudos indicam que a eficiência média de captação pode girar em torno de 60% (Spokas *et al.*, 2006), deixando escapar uma fração significativa do gás para a atmosfera. Em aterros brasileiros, as emissões fugitivas pela superfície podem variar de 12% a 84,8% do total de metano gerado, conforme apresentado na Tabela 4. Essa ampla variação evidencia a influência das condições locais, do projeto do aterro, da operação do sistema de captação e das características dos resíduos depositados.

Diversos fatores influenciam as emissões de metano em aterros sanitários, entre eles, as características da camada de cobertura, a pressão dos gases no contato solo-resíduo, a idade dos resíduos, o teor de umidade, a composição gravimétrica e as condições climáticas da região. (Mariano; Jucá, 2010). A camada de cobertura é especialmente relevante, pois sua espessura, grau de compactação, saturação e qualidade geotécnica afetam tanto o fluxo de biogás quanto a oxidação parcial do metano antes de sua emissão à atmosfera.

Além das emissões na superfície do aterro, ocorrem perdas associadas à eficiência de queima dos *flares*. Especialistas e referências técnicas indicam que a eficiência de queima pode variar amplamente: valores menores são observados em *flares* antigos ou mal operados, enquanto *flares* enclausurados tendem a apresentar maior eficiência. Considerando, por exemplo, um aterro com

emissões fugitivas superficiais próximas de 36% e a utilização de *flare* aberto para queima, as emissões totais associadas ao aterro podem representar uma parcela significativa do biogás gerado. Portanto, em rotas que envolvem aproveitamento de biogás de aterro, a eficiência de captação e de queima é determinante para o desempenho ambiental.

No contexto da abordagem *cut-off*, entretanto, é importante distinguir o mapeamento técnico dessas emissões da sua atribuição ao biometano. Quando o aterro é entendido como etapa de tratamento do resíduo e o biogás é considerado um fluxo resultante desse tratamento, as emissões associadas ao aterramento propriamente dito tendem a permanecer atribuídas ao sistema gerador do resíduo. Já as emissões posteriores à coleta do biogás, incluindo a purificação, o tratamento do *off-gas* e a distribuição, podem ser atribuídas ao sistema de produção de biometano, conforme a fronteira adotada.

1.2.3. Emissões em plantas de biodigestão

Os biodigestores são sistemas projetados para operar em ambiente anaeróbio controlado, com captura do biogás gerado durante a degradação da matéria orgânica. Idealmente, por serem sistemas fechados, não deveriam apresentar perdas significativas de metano. Na prática, contudo, podem ocorrer emissões fugitivas em membranas, juntas, válvulas, fissuras, tubulações, compressores, agitadores, dispositivos de alívio de pressão e outros componentes da planta.

A Tabela 5 apresenta valores de referência para emissões fugitivas em biodigestores e lagoas de digestato, de acordo com diferentes metodologias, bases de dados e diretrizes.

Tabela 5. Resumo de emissões fugitivas de metano (%) em biodigestores e lagoa de digestato, com base nas fontes pesquisadas

Biodigestores		
Fonte	Tipologia do biodigestor	%
CDM (2015)	Aço ou concreto revestido ou fibra de vidro	2,8
	Digestores tipo UASB	5
	Alvenaria de concreto, ferrocimento ou tijolo	10
IPCC (2006b)	Baixa qualidade	10
	Alta qualidade	1
	Ausência de informações	5
Ecoinvent	Biodigestor de resíduos biológicos	5,08
	Biodigestor de dejetos suínos e bovinos	1,18
Biosurf (EU)	Biodigestor	1
Lagoas de Digestato		
Fonte	Destino do digestato	%
CDM (2015)	Lagoas anaeróbias cobertas	10
	Digestores tipo UASB / Digestores de leito filtrante anaeróbio / Digestores anaeróbicos de leito fluidizado	15
	Digestores convencionais	20
	Digestores de dois estágios	5
Diretiva europeia	Dejetos animais	4,98
	Resíduos orgânicos	1

JONERHOLM e LUNDBORG (2012) identificaram que as emissões de metano durante a digestão podem variar de 0 a 0,2%, sendo as válvulas de segurança uma das principais fontes dessas emissões. Estudos mais amplos, como o de FREDENSLUND *et al.* (2018), em quatro usinas dinamarquesas, mostram emissões variando de 0,12% a 3,4%. REINELT; LIEBETRAU e NELLES (2016) por sua vez, observaram emissões entre 0,06% e 3,88% em usinas agrícolas na Alemanha, causadas principalmente por dispositivos de alívio de pressão.

O nível tecnológico e o estado de conservação da planta são fatores determinantes. BALDÉ *et al.* (2022), ao analisarem instalações no Canadá, observaram vazamentos entre 0,6% e 3,8% associados a problemas estruturais nos digestores. De forma semelhante, REINELT *et al.* (2017) e LIEBETRAU *et al.* (2013) relataram taxas médias de vazamento entre 0,014% e 0,11% em instalações europeias. Esses resultados indicam que, embora as perdas em biodigestores possam ser baixas em sistemas bem projetados e operados, falhas de manutenção ou problemas estruturais podem aumentar significativamente as emissões fugitivas.

Metodologias para estimativa de emissões fugitivas, como a ferramenta “*Project and leakage emissions from anaerobic digesters*” do CDM (2015), consideram parâmetros como manutenção, vazamentos físicos e liberações por válvulas de segurança. As diretrizes do IPCC (2006a; 2019) classificam as plantas por qualidade tecnológica, adotando valores de referência de 10% para digestores de baixa qualidade, 1% para digestores de alta qualidade e 5% na ausência de informações detalhadas. O IPCC (2019) também permite estimar conjuntamente as perdas em digestores e no armazenamento de digestato em lagoas anaeróbias por meio do fator de conversão de metano (MCF), considerando diferentes tipos de resíduos orgânicos e temperaturas ambientais.

Após a biodigestão, o digestato pode ser encaminhado a lagoas, tanques ou outras formas de armazenamento. Em plantas pecuárias, especialmente, o digestato é frequentemente armazenado em lagoas abertas, que podem apresentar elevado potencial de emissões contínuas de metano caso ainda haja sólidos voláteis remanescentes. Estudos indicam que essa etapa pode ser uma das principais fontes de emissões em plantas de digestão anaeróbia (Jonerholm; Lundborg, 2012).

HRAD; PIRINGER e HUBER-HUMER (2015) verificaram perdas de 3% a 4% do metano gerado em plantas de codigestão devido às emissões das lagoas. As condições operacionais, como o nível de preenchimento, a agitação e o tempo de armazenamento, bem como fatores climáticos, como o vento, a temperatura e a radiação solar, influenciam diretamente as taxas de emissão. FREDENSLUND *et al.* (2018) observaram que 53,1% das emissões de uma planta alimentada com lodo de tratamento de águas residuais provinham das lagoas, o que corresponde a 4,4% da produção total de CH₄. Estudos recentes, como os de WECHSELBERGER *et al.* (2023), envolvendo 33 usinas na Europa, confirmam que o armazenamento de digestato em tanques abertos é uma fonte importante de emissões, responsável por até 5,6% do metano produzido.

Esses dados reforçam a importância dos avanços tecnológicos e das boas práticas de manejo para minimizar as emissões fugitivas em biodigestores e em sistemas de armazenamento de digestato. Entre as medidas relevantes estão o uso de coberturas, a captura do biogás residual, a redução do tempo de armazenamento, a melhoria da eficiência da digestão, a manutenção preventiva e o monitoramento contínuo de vazamentos.

1.2.4. Emissões em *Flare*

Em plantas de biogás e em aterros sanitários, os sistemas de *flare* são utilizados para queimar biogás excedente ou gás residual quando o aproveitamento energético, a purificação ou a injeção na rede não são possíveis. Esse excedente pode ocorrer devido a limitações na capacidade da tecnologia de *upgrading*, oscilações na produção, paradas de manutenção, falhas operacionais ou ausência temporária de demanda. A eficiência de queima do *flare* varia conforme o tipo de equipamento, as condições operacionais e o controle de combustão.

A Tabela 6 apresenta valores de referência para perdas de metano em *flares*.

Tabela 6. Resumo de emissões fugitivas de metano (%) em *flares*, com base nas fontes pesquisadas

Fonte	Tipologia do <i>flare</i>	Perda de metano (%)*
CDM (2009)	<i>flare</i> fechado	10-50%
	<i>flare</i> aberto contínuo	50%
EPA (2022)	<i>flare</i> aberto contínuo	4%
	<i>flare</i> aberto não contínuo	50%
	<i>flare</i> fechado	0,5%
WAGNER et al. (2017)	<i>flare</i> fechado	2%

***Nota:** Os percentuais representam frações residuais de CH₄ não destruídas ou parâmetros conservadores derivados das metodologias citadas. Os valores não são diretamente comparáveis sem considerar a definição do fator, o regime de operação, o monitoramento de chama, a disponibilidade do equipamento e a eficiência de destruição.

Os *flares* podem ser classificados, de forma geral, em "fechados" e "abertos". O *flare* fechado conduz o biogás ou gás residual para uma câmara de combustão enclausurada, possibilitando maior controle da temperatura, do tempo de residência e das condições de queima. Como consequência, tende a apresentar maior eficiência de combustão e menores emissões residuais de metano. O *flare* aberto, por sua vez, realiza a queima por chama aberta, geralmente em torre ou em tubulação elevada. Embora seja uma solução tecnicamente simples e amplamente utilizada, sua eficiência pode ser mais variável, especialmente em condições de operação intermitente ou quando há dificuldades no controle da mistura ar-combustível.

Segundo a ferramenta "*Tool to determine project emissions from flaring gases containing methane*", da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (CDM, 2009), as emissões provenientes da queima de gases contendo metano são calculadas com base na eficiência do *flare* e na massa de metano enviada à queima. A eficiência considerada depende tanto da eficiência real de combustão quanto do tempo durante o qual o *flare* permanece em operação. No caso de *flares* abertos, a eficiência não pode ser medida com a mesma confiabilidade, pois o ar ambiente se mistura ao gás e dilui o metano remanescente nos gases de exaustão. Por essa razão, a metodologia pode adotar valores padrão, desde que seja demonstrado que o *flare* está efetivamente operacional, por exemplo, por meio de um detector de chama.

A ferramenta da *Global Methane Initiative*, estima as emissões de metano liberadas por queima incompleta considerando a quantidade de metano enviada ao *flare* e a eficiência do processo de combustão. Segundo EPA (2022) as eficiências de combustão podem variar conforme o tipo de *flare*:

96% para *flare* aberto contínuo, 50% para *flare* aberto não contínuo e 99,5% para *flare* fechado. Essas diferenças demonstram a importância de selecionar, dimensionar e operar corretamente os sistemas de queima, principalmente quando o *flare* é utilizado para tratamento do *off-gas* ou do biogás excedente. Em termos metodológicos, a emissão associada ao flare pode estar relacionada tanto ao tratamento do biogás excedente quanto ao do *off-gas* do upgrading. No caso da atualização da RenovaCalc, sua relevância é particularmente importante quando o destino do *off-gas* influencia a quantidade de metano residual emitida à atmosfera.

1.2.5. Emissões em sistemas de armazenamento de biogás

Após sua geração, o biogás pode ser armazenado temporariamente antes de ser destinado ao uso energético, ao *upgrading*, à queima em *flare* ou a outra forma de aproveitamento. Os reservatórios e sistemas de armazenamento são projetados para conter o gás e evitar vazamentos; entretanto, falhas de conservação, defeitos em membranas, conexões, válvulas ou sistemas de vedação podem causar perdas significativas de metano.

ADAMS (2017) destaca que instalações mal conservadas podem causar vazamentos com potencial para gerar emissões relevantes. Apesar disso, em condições normais de operação e de manutenção adequadas, o armazenamento de biogás tende a ser uma fonte de menor relevância relativa, com perdas estimadas entre 0% e 0,2% da produção total de biogás (Jonerholm; Lundborg, 2012).

Estudos recentes também indicam que a permeabilidade de membranas duplas infladas com ar é geralmente baixa. WECHSELBERGER *et al.* (2023) reportaram mediana inferior a 0,01% e valor máximo de 0,79% de perdas por permeabilidade nos sistemas avaliados. Dessa forma, durante a operação normal, as perdas de metano em reservatórios de biogás podem ser consideradas pouco significativas, embora devam ser monitoradas devido ao risco de falhas localizadas.

1.2.6. Emissões do processo de *upgrading*

O processo de *upgrading* é a etapa em que o biogás é purificado para elevar o teor de metano e atender aos requisitos de qualidade do biometano. Durante esse processo, uma fração do metano pode ser perdida no gás residual ou em vazamentos operacionais. A magnitude dessas perdas depende da tecnologia empregada, da composição do biogás, das condições de operação, da manutenção, da eficiência dos equipamentos e do tratamento do *off-gas* (Starr *et al.*, 2012; Sun *et al.*, 2015).

Diversas tecnologias de *upgrading* estão disponíveis comercialmente. A escolha da tecnologia mais adequada depende de fatores como a composição do biogás, a presença de CO₂, H₂S, N₂, O₂ e siloxanos, o volume e a continuidade da produção, a escala da planta, os requisitos de qualidade do biometano, a eficiência energética e o custo operacional (Adams, 2017; Freddo *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2015). Os processos de purificação mais utilizados baseiam-se em absorção, adsorção, separação por membranas e resfriamento.

A Tabela 7 apresenta um resumo das principais tecnologias de *upgrading* e as emissões associadas.

Tabela 7. Resumo de emissões fugitivas de metano (%) nos processos de upgrading de biogás, com base nas fontes pesquisadas

Fonte	% Perdas de metano						
	Princípio						
	Absorção				Adsorção	Filtração	Resfriamento
	<i>Water scrubbing</i>	Aminas	Química	Física com solventes orgânicos	PSA (<i>Pressure swing adsorption</i>)	Separação por membrana	Crio-separação
ADAMS (2017)	1-2	< 0,1	-	-	2-4	0,5 - 1	<0,1
JONERHOLM e LUNDBORG (2012)	3,1	-	0,4	-	1,5	-	-
PETERSSON e WELLINGER (2009)	<1 / <2	-	<0,1	2-4	3 / 6-10	-	-
BAUER <i>et al.</i> (2013)	1	0,1	-	-	1,8 - 2	0,5	-
KVIST e ARYAL (2019)	1,52	0,05	-	-	-	0,52	-
WECHSELBERGER <i>et al.</i> (2023)	2,9	-	<0,1	-	-	-	-
BEIL <i>et al.</i> (2013)	0,5 - 2	-	0,1	1-4	1-5	2-8	-
ecoinvent 3.10		0,06	-	-	1,25	0,64	-
CARB	2						
BIOSURF	0,2						
Diretiva europeia	3						

As emissões de metano no processo de purificação podem ocorrer por difusão através de membranas, por vazamentos em conexões e válvulas de alta pressão, e por falhas em motores, compressores, tubulações e demais componentes do sistema (Adams, 2017). Além disso, parte das perdas está associada ao *off-gas*, isto é, ao gás residual resultante da remoção de CO₂ e de outros componentes do biogás. Dependendo da tecnologia, esse fluxo pode conter frações residuais de metano e, caso seja liberado diretamente à atmosfera, contribuir significativamente para a intensidade de carbono do biometano.

JONERHOLM; LUNDBORG (2012), classificam as emissões fugitivas em unidades de *upgrading* em três categorias principais: gás residual (*off-gas*), ventilação e vazamentos em equipamentos e tubulações. O *off-gas* contém predominantemente dióxido de carbono, mas pode conter metano em proporções variáveis, dependendo da eficiência da tecnologia de separação. Esse fluxo pode ser tratado por meio de oxidação, combustão, incineração, retorno ao processo ou por outra tecnologia de mitigação. A ventilação das salas de processo pode conter baixos níveis de metano provenientes de emissões menores de equipamentos instalados. Já os vazamentos em tubulações, conexões e equipamentos constituem fontes pontuais que exigem inspeção e manutenção contínuas.

A gestão adequada do *off-gas* é um ponto central na avaliação ambiental do *upgrading*. Tecnologias com menor perda intrínseca de metano tendem a apresentar melhor desempenho, mas o resultado final também depende do destino do gás residual. Quando o *off-gas* é tratado em um *flare*, incinerador ou outro sistema de oxidação eficiente, as emissões de metano podem ser substancialmente reduzidas. Por outro lado, a liberação direta à atmosfera pode comprometer o desempenho climático do biometano, mesmo quando o consumo energético da tecnologia é relativamente baixo.

Para minimizar os impactos ambientais e assegurar a segurança operacional, são necessárias estratégias de monitoramento e controle. Entre elas estão inspeções regulares, manutenção preventiva, uso de detectores de vazamento, controle de pressão, verificação de válvulas, monitoramento da composição do *off-gas* e adoção de tecnologias de tratamento do gás residual. Esses procedimentos reduzem as emissões fugitivas e contribuem para uma operação mais eficiente, segura e alinhada às metas de mitigação dos gases de efeito estufa.

1.2.7. Armazenamento do biometano

A literatura específica sobre emissões fugitivas no armazenamento de biometano ainda é limitada. Por isso, estudos e inventários relacionados ao armazenamento de gás natural são frequentemente utilizados como referência aproximada, com as devidas ressalvas quanto à composição do gás, às condições de operação e às diferenças entre sistemas fósseis e renováveis.

O biometano pode ser armazenado na forma comprimida ou liquefeita, dependendo da rota de distribuição e do uso final. Assim como ocorre no setor de gás natural, as principais fontes potenciais de emissões incluem vazamentos em válvulas, conexões, compressores, sistemas pneumáticos e tanques. No caso do gás natural, a transmissão ocorre em dutos de alta pressão e grande diâmetro, que transportam o gás por longas distâncias desde áreas de produção e processamento até sistemas de distribuição ou grandes consumidores. Durante essa fase, as emissões de metano provêm principalmente de vazamentos em estações de compressão e da ventilação pneumática dos sistemas.

Quando o gás é armazenado em formações subterrâneas ou liquefeito em tanques acima do solo, também podem ocorrer emissões associadas a perdas operacionais, à ventilação e a vazamentos em compressores. Segundo dados da calculadora CARB, as perdas de metano associadas ao armazenamento de Bio-GNL variam entre 0,13% (quando há recuperação de metano) e 0,63% (quando não há recuperação). Esses valores indicam que a infraestrutura de armazenamento e a existência de sistemas de recuperação influenciam diretamente a magnitude das emissões. No inventário de GEE dos Estados Unidos, as emissões de metano do segmento de transmissão e armazenamento representaram aproximadamente 23% das emissões provenientes dos sistemas de gás natural (EPA, 2024-).

Embora o armazenamento de biometano ainda careça de literatura específica robusta, as evidências disponíveis sugerem que essa etapa deve ser considerada em avaliações mais abrangentes, especialmente em rotas que envolvem liquefação, armazenamento em alta pressão ou operações de transferência frequentes. No caso da RenovaCalc, a inclusão ou não de emissões associadas ao armazenamento depende da fronteira adotada, do tipo de distribuição considerado e da disponibilidade de fatores de emissão representativos.

1.2.8. Transporte do biometano até o uso

O biometano pode ser transportado na forma de gás comprimido ou liquefeito, como Bio-GNC ou Bio-GNL, por caminhões equipados com sistemas de armazenamento apropriados, ou pode ser injetado em redes de gás natural e distribuído por gasodutos (Freddo *et al.*, 2020). Assim como nas

demais etapas da cadeia, o transporte também está sujeito a emissões fugitivas de metano, seja por vazamentos em sistemas dutoviários, operações de compressão, transferência, abastecimento ou armazenamento intermediário.

A Tabela 8 resume perdas associadas a diferentes etapas de armazenamento, transporte e abastecimento do biometano, com base em referências como CARB e ecoinvent.

Tabela 8. Resumo de emissões fugitivas de metano (%) nos processos de transporte e abastecimento do biometano, com base nas fontes pesquisadas

Etapa	Combustível	Perda de metano (%)	
		CARB	ecoinvent 3.10
Armazenamento	Bio-GNL	0,13 com recuperação de metano	-
		0,63 sem recuperação de metano	-
Transporte dutoviário	biometano	1,20	0,7
Transporte rodoviário	Bio-GNL	0,002 com recuperação de metano	-
		0,01 sem recuperação de metano	
Abastecimento	biometano	-	0,02

A maior parte dos estudos disponíveis refere-se a perdas em sistemas de transmissão e distribuição de gás natural. Em estudo realizado na Rússia, LELIEVELD *et al.* (2005). estimaram emissões em sistemas de transmissão de alta pressão da ordem de 6.531 m³/km.ano. Estudos nos Estados Unidos reportaram perdas médias de 2,7% em gasodutos de gás natural. LAMB *et al.* (2015) ao medir 230 vazamentos em tubulações subterrâneas, estimaram contribuição de 197 Gg CH₄/ano, com fatores de emissão superiores aos utilizados em bases anteriores da GRI/EPA (Matthew R. Harrison *et al.*, 1997).

Embora esses valores sejam derivados majoritariamente de sistemas de gás natural fóssil, eles fornecem referências úteis para avaliar potenciais perdas em sistemas de transporte e distribuição de biometano. No entanto, é necessário cuidado na transposição direta desses fatores, pois a infraestrutura, a escala, a idade dos dutos, os sistemas de compressão, a pressão de operação e o nível de controle podem diferir substancialmente entre sistemas.

Em síntese, o transporte do biometano pode envolver perdas relevantes, especialmente em rotas dutoviárias extensas, sistemas com múltiplas etapas de compressão ou operações de transferência frequentes. Por isso, o monitoramento de vazamentos, a manutenção de dutos e conexões, a eficiência dos sistemas de compressão e a escolha do modo de distribuição são aspectos importantes para reduzir emissões e melhorar o desempenho ambiental da rota.

1.3. PRINCIPAIS CONSIDERAÇÕES

A revisão da literatura permitiu identificar as principais etapas em que podem ocorrer perdas de CH₄ ao longo da rota de biometano, bem como a magnitude aproximada dessas perdas em diferentes tecnologias e condições operacionais. A Figura 3 ilustra a contribuição de cada etapa do processo de biometano e destaca os principais fatores que influenciam as perdas de CH₄.

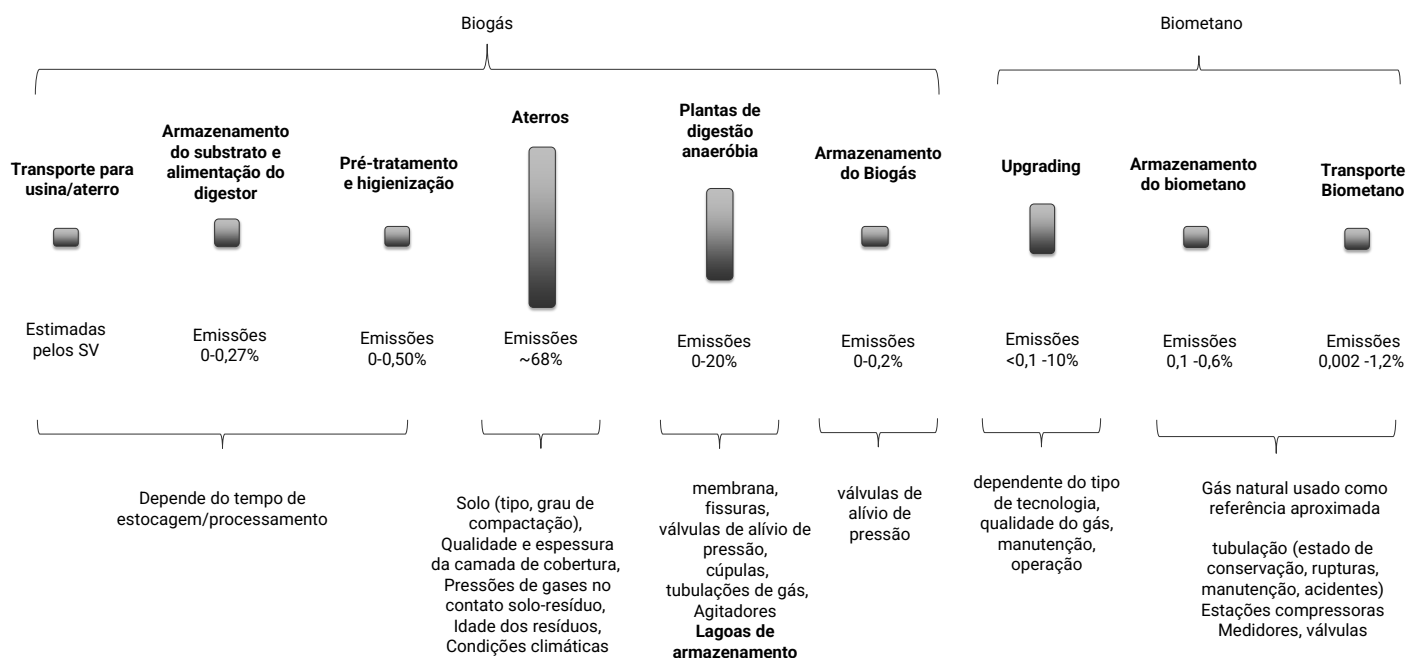


Figura 3. Contribuição de emissões fugitivas por etapa do processo de biometano.

As emissões fugitivas identificadas podem ser organizadas em dois grupos principais. O primeiro está relacionado às etapas de geração do biogás, seja em aterros sanitários ou em plantas de digestão anaeróbia. Nesse grupo, as fontes e as taxas de emissão variam consideravelmente, mas os aterros sanitários, os sistemas de captação de biogás, os biodigestores com falhas operacionais e as lagoas de armazenamento de digestato destacam-se como fontes potencialmente relevantes. A magnitude dessas emissões depende fortemente da tecnologia empregada, da eficiência de captação, das condições de manutenção, do manejo do digestato e das características locais.

O segundo grupo envolve as etapas posteriores à geração ou coleta do biogás, incluindo armazenamento, *upgrading*, tratamento do *off-gas*, distribuição e abastecimento do biometano. Nesse grupo, o processo de *upgrading* merece destaque, pois diferentes tecnologias apresentam perdas distintas de metano e diferentes demandas energéticas. Além disso, o destino do *off-gas* é determinante para o resultado final: a liberação direta à atmosfera tende a aumentar a intensidade de carbono, enquanto o tratamento por combustão, oxidação, incineração ou reaproveitamento pode reduzir substancialmente as emissões de CH₄.

A atualização da RenovaCalc com a inclusão de emissões fugitivas representa um avanço metodológico importante, pois permite que a intensidade de carbono do biometano reflita melhor as características tecnológicas e operacionais das plantas. Ao distinguir tecnologias de *upgrading*, formas de tratamento do *off-gas* e etapas de distribuição, a ferramenta passa a reconhecer diferenças relevantes de desempenho entre rotas e configurações de projeto. Esse aprimoramento também pode criar sinal regulatório para adoção de tecnologias mais eficientes, manutenção adequada e mitigação de vazamentos.

Por fim, o tratamento adequado das emissões fugitivas é essencial para a melhoria contínua da sustentabilidade do biometano. A redução de perdas em aterros, biodigestores, sistemas de armazenamento, *upgrading*, *off-gas* e distribuição contribui para aumentar o benefício climático do biometano e fortalecer sua posição como combustível renovável de baixo carbono. A combinação de melhor tecnologia, boas práticas operacionais, monitoramento contínuo e regras metodológicas claras é fundamental para garantir consistência, transparência e credibilidade na contabilização das emissões da rota.

CAPÍTULO 2 - TRATAMENTO DAS EMISSÕES FUGITIVAS EM METODOLOGIAS, DIRETRIZES E CALCULADORAS INTERNACIONAIS

A análise de metodologias, diretrizes e calculadoras internacionais permite compreender como diferentes programas de descarbonização tratam as emissões fugitivas na rota de biometano e quais elementos metodológicos podem orientar o aprimoramento da RenovaCalc. Essa comparação não tem como objetivo importar integralmente regras de outros contextos regulatórios, uma vez que cada programa possui objetivos, fronteiras, critérios de elegibilidade, fatores de emissão e formas próprias de tratar coprodutos, emissões evitadas e dados primários. O objetivo é identificar convergências metodológicas relevantes para a rota de biometano, especialmente quanto à contabilização das perdas de metano associadas à produção de biogás, ao processo de purificação, ao tratamento do gás residual, ao armazenamento e à distribuição.

De modo geral, as metodologias internacionais analisadas reconhecem que as emissões fugitivas de metano podem afetar significativamente a intensidade de carbono do biometano. Essa preocupação decorre do elevado potencial de aquecimento global do metano e da possibilidade de perdas ocorrerem em diferentes etapas da cadeia produtiva. As abordagens variam, contudo, quanto à fronteira adotada, ao nível de detalhamento tecnológico, à possibilidade de uso de dados medidos e à forma de tratar as emissões associadas ao manejo de resíduos antes da geração do biogás.

Foram consideradas, nesta análise, a Diretiva Europeia de Energias Renováveis, metodologias associadas ao contexto europeu, como o BIOSURF, as calculadoras do Low Carbon Fuel Standard da Califórnia, o *Clean Fuels Standard* do estado de Washington, e ferramentas técnicas da *Global Methane Initiative/EPA*. A análise está organizada por referência metodológica e, ao final, apresenta uma síntese comparativa dos principais elementos relevantes para a RenovaCalc.

2.1 DIRETIVA EUROPEIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

A Diretiva Europeia de Energias Renováveis estabelece critérios de sustentabilidade e de redução de emissões de gases de efeito estufa para biocombustíveis, biolíquidos e combustíveis de biomassa. No caso dos combustíveis renováveis, a abordagem europeia adota uma lógica de ciclo de vida, incluindo as emissões associadas à obtenção da matéria-prima, ao transporte, ao processamento, à distribuição e ao uso. A metodologia também prevê termos específicos para situações como alterações no estoque de carbono, melhorias de manejo agrícola, captura e armazenamento geológico de carbono, captura e substituição de CO₂ e emissões evitadas, quando aplicáveis e devidamente enquadradas nas regras da diretiva.

No caso do biometano, essa estrutura é relevante porque permite tratar de forma diferenciada as emissões associadas à produção do biogás, à purificação e ao destino do gás residual. As emissões fugitivas não são tratadas apenas como um detalhe operacional, mas como componentes que podem alterar a intensidade de carbono do combustível final. A depender da rota e da tecnologia,

perdas de metano podem ocorrer durante a digestão anaeróbia, no armazenamento do digestato, no processo de *upgrading* e na distribuição.

A abordagem europeia também reconhece que determinadas práticas de manejo podem reduzir as emissões em comparação com sistemas convencionais. Por exemplo, a utilização de resíduos orgânicos em digestão anaeróbia pode evitar emissões que ocorreriam em sistemas alternativos de manejo, como o armazenamento aberto de dejetos ou a decomposição não controlada de resíduos orgânicos. No entanto, esses efeitos são considerados apenas quando a metodologia estabelece explicitamente como devem ser calculados, verificados e atribuídos. Assim, a existência de termos relacionados a emissões evitadas ou captura de carbono na metodologia europeia não significa que tais benefícios possam ser automaticamente aplicados a qualquer calculadora sem regra própria.

Para a RenovaCalc, a principal contribuição da Diretiva Europeia é evidenciar que as emissões fugitivas devem ser consideradas dentro de uma fronteira metodológica claramente definida. A diretiva demonstra que as perdas de metano no digestato, no *upgrading* e no gás residual podem ser relevantes.

2.2 METODOLOGIA BIOSURF

O BIOSURF foi desenvolvido no contexto europeu para apoiar o cálculo e a certificação de emissões de gases de efeito estufa na produção e uso de biometano. Sua metodologia segue a lógica geral da Diretiva Europeia, mas com aplicação voltada especificamente ao biogás e ao biometano. Por isso, apresenta relevância direta para a discussão da RenovaCalc, especialmente por tratar de forma simplificada algumas perdas de metano ao longo da rota.

A metodologia considera emissões associadas à produção do biogás, à purificação a biometano, ao transporte e ao uso do combustível. Em relação às emissões fugitivas, adota valores de referência para perdas em etapas específicas, permitindo que a intensidade de carbono seja estimada mesmo quando dados medidos não estão disponíveis. Essa característica é importante em contextos nos quais há baixa disponibilidade de dados primários ou quando a medição direta das perdas de metano ainda não é rotina nas plantas.

O uso de valores padrão, contudo, envolve uma escolha metodológica relevante. Valores *default* simplificam a aplicação da ferramenta e aumentam a comparabilidade entre projetos, mas podem não refletir adequadamente a realidade operacional de plantas com tecnologias mais eficientes ou, ao contrário, de plantas com problemas de manutenção. Por isso, metodologias desse tipo tendem a funcionar melhor quando combinam valores padrão conservadores com a possibilidade de substituição por dados primários verificados.

Para a RenovaCalc, a experiência do BIOSURF reforça a utilidade de valores padrão para tecnologias e etapas nas quais dados primários ainda são limitados. Ao mesmo tempo, indica a importância de permitir que plantas com medição robusta e verificável possam informar dados específicos, desde que estes estejam sujeitos a critérios de consistência, rastreabilidade e auditoria.

2.3 LOW CARBON FUEL STANDARD DA CALIFÓRNIA E CALCULADORAS CARB

O *Low Carbon Fuel Standard* da Califórnia, administrado pelo *California Air Resources Board*, é uma das referências internacionais mais detalhadas para o cálculo da intensidade de carbono de combustíveis de transporte. No caso do biometano, as calculadoras associadas ao CARB adotam rotas específicas conforme a origem do gás, como biogás de aterro, digestão anaeróbia de resíduos orgânicos e digestão de dejetos animais. Essa diferenciação é relevante porque as fontes de emissões fugitivas, os cenários de referência e as possibilidades de crédito variam conforme o substrato e a função do sistema.

Nas rotas de biometano a partir de aterros, a metodologia considera elementos relacionados à captação de gás, à eficiência de queima, ao tratamento do biogás, à purificação, à compressão, ao transporte e ao uso final. Em rotas envolvendo digestão anaeróbia, especialmente de dejetos animais, o CARB pode considerar emissões associadas ao manejo do substrato e, em alguns casos, emissões evitadas em relação ao cenário de referência. Esse ponto é metodologicamente relevante porque a calculadora não trata todos os substratos da mesma forma: o tratamento depende da rota, da linha de base e da regra de elegibilidade definida pelo programa.

O CARB também apresenta uma abordagem detalhada para as perdas associadas ao armazenamento, ao transporte e à distribuição de biometano, incluindo situações com Bio-GNC, Bio-GNL e transporte dutoviário. Em algumas rotas, são considerados valores específicos para perdas durante armazenamento de Bio-GNL, transporte rodoviário, transporte por dutos e abastecimento. Além disso, a metodologia diferencia o tratamento do gás residual e a eficiência de equipamentos como *flares* ou sistemas de oxidação, reconhecendo que o destino do *off-gas* pode alterar substancialmente a intensidade de carbono final.

A principal contribuição do CARB para a RenovaCalc é demonstrar a importância de diferenciar rotas e tecnologias. A metodologia californiana evidencia que não basta atribuir um único fator médio para o biometano; é necessário considerar a origem do gás, a tecnologia de purificação, a eficiência do controle de metano, o tratamento do *off-gas* e a forma de distribuição. Por outro lado, a experiência do CARB também mostra que emissões evitadas e créditos associados à mudança no manejo de resíduos só devem ser aplicados quando a metodologia define explicitamente a linha de base, os critérios de elegibilidade, as regras de monitoramento e a forma de verificação.

2.4 CLEAN FUELS STANDARD DO ESTADO DE WASHINGTON

O *Clean Fuels Standard* do estado de Washington adota uma abordagem de ciclo de vida para combustíveis de transporte e utiliza modelos derivados da estrutura do GREET, adaptados ao contexto regulatório estadual. Suas rotas de biometano são semelhantes às utilizadas na Califórnia, com diferenciação entre fontes de biogás, tecnologias de produção e formas de distribuição.

Assim como no LCFS da Califórnia, o modelo de Washington considera emissões associadas à produção, processamento, transporte e uso do combustível. No caso do biometano, as emissões

fugitivas podem ser tratadas por meio de parâmetros relacionados à produção de biogás, purificação, transporte dutoviário, distribuição, armazenamento e abastecimento. A estrutura metodológica confirma a tendência internacional de tratar perdas de metano como componentes relevantes da intensidade de carbono, e não como aspectos marginais.

A experiência de Washington é importante porque demonstra que a contabilização de emissões fugitivas não está restrita a uma única jurisdição ou ferramenta. Ao contrário, programas de combustíveis de baixo carbono vêm consolidando a prática de incluir perdas de metano na modelagem do biometano, especialmente em etapas tecnológicas diretamente associadas à disponibilização do combustível ao consumidor final.

2.5 GLOBAL METHANE INITIATIVE E FERRAMENTAS EPA

As ferramentas da *Global Methane Initiative* e da EPA têm caráter mais técnico-operacional do que regulatório. Elas são voltadas à estimativa de emissões de metano em sistemas de manejo de resíduos, digestão anaeróbia, armazenamento de substratos e queima em *flares*. Sua contribuição reside principalmente no fornecimento de equações, parâmetros e procedimentos de estimativa quando não há medições diretas disponíveis.

No caso de resíduos orgânicos, essas ferramentas podem estimar as emissões com base na degradação de sólidos voláteis, no potencial máximo de geração de metano, no fator de conversão de metano e no tempo de armazenamento ou de manejo. Essa abordagem é útil para estimar emissões em etapas anteriores à entrada no biodigestor, como o armazenamento e a pré-estocagem de substratos, especialmente quando o tempo de retenção pode favorecer a geração de metano.

As ferramentas também tratam a eficiência de *flares*, distinguindo equipamentos abertos, fechados, contínuos e não contínuos. Essa diferenciação é relevante porque a queima incompleta do metano pode representar uma fonte significativa de emissões fugitivas. Em sistemas de biogás e biometano, os *flares* podem ser utilizados tanto para a queima de biogás excedente quanto para o tratamento do gás residual, dependendo da configuração da planta.

Para a RenovaCalc, a Global Methane Initiative/EPA pode servir como suporte técnico complementar, especialmente em situações em que se deseja estimar emissões sem dados primários medidos. Entretanto, por se tratar de uma ferramenta de apoio, e não de metodologia regulatória específica para a certificação de intensidade de carbono, sua aplicação deve ser compatibilizada com as fronteiras e regras da RenovaCalc.

2.6 SÍNTESE COMPARATIVA DAS METODOLOGIAS ANALISADAS

A Tabela 9 resume os principais elementos das metodologias, diretrizes e bases analisadas, com foco na fronteira geral, no tratamento das emissões fugitivas e na contribuição potencial para a atualização da RenovaCalc.

Tabela 9. Tratamento de emissões fugitivas em metodologias, diretrizes e calculadoras internacionais.

Referência	Fronteira geral	Tratamento das emissões fugitivas	Relevância metodológica
Diretiva Europeia de Energias Renováveis	Considera emissões da matéria-prima, transporte, processamento, distribuição e uso, além de termos específicos para melhorias de manejo agrícola e captura/substituição de carbono quando aplicáveis.	Inclui recomendações para perdas em armazenamento aberto de digestato e para emissões de metano no <i>off-gas</i> do <i>upgrading</i> . Em algumas rotas, considera ausência de emissão quando o gás residual é queimado.	Mostra que fugitivas de digestato e <i>upgrading</i> são reconhecidas como relevantes.
BIOSURF	Metodologia alinhada à lógica europeia para cálculo de emissões de GEE em rotas de biometano.	Inclui perdas de metano na produção de biogás e na purificação, com valores simplificados de referência.	Reforça a utilidade de valores padrão quando dados primários não estão disponíveis.
CARB / Low Carbon Fuel Standard	Utiliza modelos e calculadoras por rota, com fronteiras diferentes para aterros, resíduos orgânicos e dejetos animais.	Considera emissões de ventilação, lagoas, <i>flaring</i> , <i>upgrading</i> , transporte dutoviário, distribuição e armazenamento/transporte de Bio-GNL, conforme a rota.	Mostra a importância de diferenciar rotas e tecnologias; também evidencia que emissões evitadas são usadas apenas quando a metodologia as define explicitamente.
Washington Clean Fuels Standard	Baseado em abordagem de ciclo de vida para combustíveis de transporte, com modelo WA-GREET derivado do CA-GREET.	Adota rotas semelhantes às da Califórnia e valores de emissões fugitivas equivalentes para produção e transporte de biometano.	Confirma a consolidação da abordagem de contabilizar fugitivas no cálculo de intensidade de carbono.
Global Methane Initiative / EPA	Ferramentas de triagem e cálculo para digestão anaeróbia e manejo de resíduos.	Permite estimar emissões por degradação de sólidos voláteis, armazenamento e eficiência de <i>flare</i> .	Útil como suporte técnico, especialmente para estimativas quando não há medição direta.

A comparação mostra que há convergência internacional quanto à relevância das emissões fugitivas na intensidade de carbono do biometano. As metodologias mais completas distinguem perdas associadas à produção do biogás, ao armazenamento de digestato, ao processo de *upgrading*, ao tratamento do gás residual, ao armazenamento e à distribuição. Também é comum que as ferramentas combinem valores padrão com a possibilidade de uso de dados primários, desde que estes sejam verificáveis.

Ao mesmo tempo, a análise evidencia que não existe uma fronteira única universal. Algumas metodologias iniciam a contabilização a partir da geração ou coleta do biogás, especialmente quando o substrato é tratado como resíduo. Outras incluem etapas anteriores, como o manejo de dejetos ou o tratamento de resíduos orgânicos, principalmente quando a metodologia adota uma abordagem consequencial ou reconhece emissões evitadas em relação a um cenário de referência. Essa diferença reforça que a classificação do substrato, a função do sistema e o objetivo regulatório da ferramenta são determinantes para a fronteira adotada.

Outro ponto central é o tratamento de créditos, de emissões evitadas e de coprodutos. A Diretiva Europeia e o CARB apresentam mecanismos para reconhecer reduções associadas ao manejo, à captura ou à substituição de carbono, mas esses mecanismos são aplicados sob regras específicas. Portanto, a adoção de uma abordagem dessa natureza exigiria definição regulatória explícita, critérios de elegibilidade, mecanismos de verificação e salvaguardas contra dupla contagem.

Para a RenovaCalc, a principal lição da análise internacional é que a inclusão das emissões fugitivas deve priorizar as etapas claramente pertencentes ao sistema de produto do biometano dentro da fronteira adotada. A etapa de *upgrading* é especialmente relevante porque está presente em todas as rotas que purificam biogás a biometano e porque suas perdas dependem diretamente da tecnologia utilizada e do destino dado ao *off-gas*. A distribuição e o abastecimento também devem ser considerados, com base em fatores representativos e compatíveis com a realidade brasileira.

Dessa forma, a comparação internacional sustenta a inclusão de emissões fugitivas na RenovaCalc, mas também reforça a necessidade de prudência metodológica. A atualização deve diferenciar aquilo que é componente direto da rota de biometano, como perdas no *upgrading*, tratamento do *off-gas*, insumos de purificação e distribuição, daquilo que pertence a abordagens mais amplas, como emissões evitadas, créditos por CO₂ ou alocação econômica entre coprodutos. Esses últimos elementos podem ser analisados em estudos de sensibilidade ou em futuras revisões regulatórias, mas não devem ser incorporados ao cálculo principal sem base metodológica e regulatória específica.

CAPÍTULO 3 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA APOIO À DECISÃO METODOLÓGICA

3.1 OBJETIVO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade foi realizada para avaliar temas que poderiam alterar a estrutura da RenovaCalc, mas que exigiam verificação prévia antes de eventual incorporação à ferramenta. Foi considerada a substituição das distâncias médias de transporte por distâncias específicas de cada empreendimento.

A distância de transporte afeta diretamente a fase de distribuição do biometano e poderia diferenciar os empreendimentos conforme a localização do consumidor final.

As simulações foram realizadas na versão atualizada da RenovaCalc (conforme apresentado no Capítulo 4), considerando os novos fatores, insumos e emissões fugitivas associados à planta de *upgrading*. O cenário-base utilizado para a análise corresponde a uma planta hipotética de biometano, com purificação por PSA. A Tabela 10 apresenta os principais dados de inventário utilizados.

Tabela 10. Inventário-base utilizado na análise de sensibilidade.

Inventário		
Entradas	Biogás (teor de CH ₄ = 57% e CO ₂ = 43%)	12.980.138 Nm ³ /ano
	Eletricidade da rede - mix médio	3.296 MWh/ano
	Odorante ^a	103,5 kg/ano
	Tecnologia de purificação	PSA
	Destino do <i>off-gas</i>	Comercialização de CO ₂
	Tipologia do sistema de transporte	100% dutoviário
	Vazão de biometano direcionada para o <i>flare</i> enclausurado	285.362 Nm ³ /ano
Saídas	Biometano (teor de CH ₄ = 96,5%)	6.900.322 Nm ³ /ano ^b

^a Baseado no valor mínimo apresentado pela deliberação ARSESP Nº 546 de 2015, que estabelece padrões do indicador de Concentração de Odorante no Gás no gás natural canalizado para o estado de São Paulo..

^b Valor estimado considerando uma perda média de 10% no *upgrading* pela tecnologia de PSA, como valor médio relatado na literatura e apresentado pelos fornecedores como já discutido.

3.2 SENSIBILIDADE ÀS DISTÂNCIAS DE TRANSPORTE DO BIOMETANO

Foram avaliadas variações de distância para os modais rodoviário e dutoviário. No transporte rodoviário, foram considerados cenários com 5 km, 30 km, 150 km e 43 km, este último

representando a distância média utilizada na simulação de referência. Já no transporte dutoviário, foram considerados cenários com 5 km, 30 km, 150 km e 24 km, este último representando a distância média de referência. Também foram avaliadas diferentes composições de combustível para a frota: 100% diesel, 100% biometano, 50% diesel/50% biometano e 50% biometano/50% GNV.

Os resultados indicaram que a distância rodoviária teve baixa influência sobre a intensidade de carbono do biometano (Figura 4). O aumento de 145 km na distância percorrida resultou em acréscimo de aproximadamente $0,18 \pm 0,01$ gCO₂eq/MJ nos cenários em que a carga foi atribuída integralmente ao biometano. Esse acréscimo correspondeu a apenas $0,29 \pm 0,022\%$ da intensidade de carbono total nos cenários com 150 km.

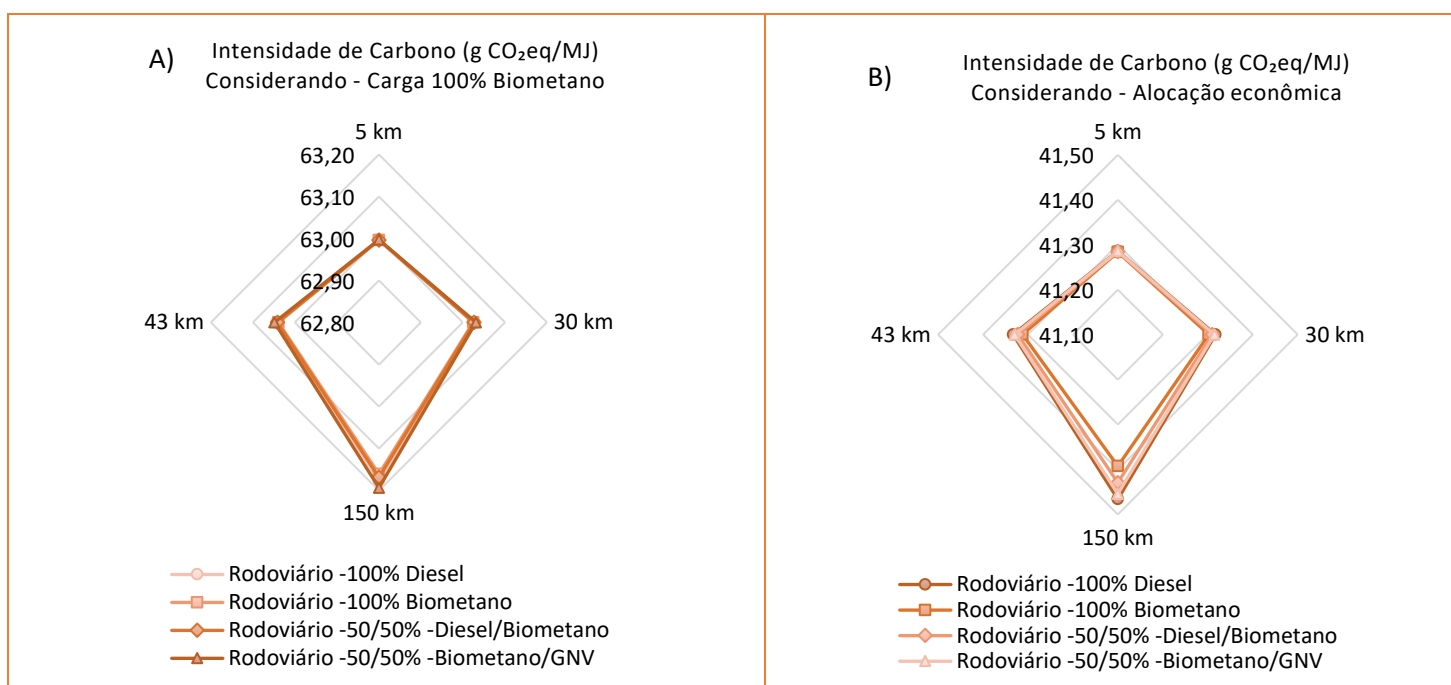


Figura 4. Resultados da análise de sensibilidade para distâncias de transporte rodoviário. A) carga 100% atribuída ao biometano; B) alocação econômica entre biometano e CO₂.

Nos cenários rodoviários com carga integralmente atribuída ao biometano, a contribuição da etapa de transporte foi de aproximadamente $0,01 \pm 0,001\%$ da intensidade total para a distância de 5 km. Mesmo quando considerada a alocação econômica, a influência da distância permaneceu limitada: a contribuição do transporte foi de cerca de $0,01 \pm 0,003\%$ nos cenários com 30 km e de $0,38 \pm 0,078\%$ nos cenários com 150 km.

A análise do transporte dutoviário apresentou comportamento semelhante (Figura 5). O aumento de 145 km na distância resultou em acréscimo de aproximadamente $0,28$ gCO₂eq/MJ, tanto no cenário com carga integralmente atribuída ao biometano quanto no cenário com alocação

econômica. Nos cenários com distância de 150 km, a contribuição média do transporte dutoviário correspondeu a $0,572 \pm 0,167\%$ da intensidade de carbono total.

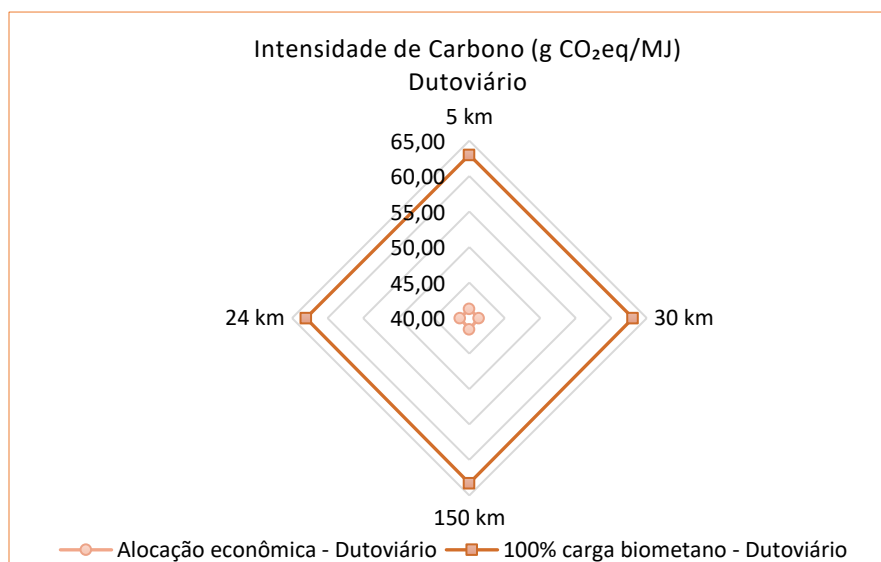


Figura 5. Resultados da análise de sensibilidade para distâncias de transporte dutoviário.

A Tabela 11 resume os principais resultados da sensibilidade de transporte.

Tabela 11. Síntese dos resultados da análise de sensibilidade para distâncias de transporte.

Tema avaliado	Resultado observado	Implicação metodológica
Distância rodoviária	Aumento de 145 km resultou em acréscimo de $0,18 \pm 0,01$ gCO ₂ eq/MJ no cenário com carga 100% atribuída ao biometano.	Baixa influência sobre a intensidade total.
Participação do transporte rodoviário	Em cenários de 150 km, a contribuição foi de $0,29 \pm 0,022\%$ da intensidade total com carga 100% biometano e de $0,38 \pm 0,078\%$ com alocação econômica.	A distância não se mostrou variável determinante para a nota final.
Distância dutoviária	Aumento de 145 km resultou em acréscimo de $0,28$ gCO ₂ eq/MJ.	Efeito absoluto pequeno frente à intensidade total.
Participação do transporte dutoviário	Em cenários de 150 km, a contribuição média foi de $0,572 \pm 0,167\%$ da intensidade total.	Baixa sensibilidade relativa.
Combustível no transporte rodoviário	A composição da frota altera a contribuição do transporte, mas o efeito total permanece limitado frente às etapas principais.	Pode ser monitorado em futuras atualizações, mas não justifica mudança estrutural na ferramenta nesta etapa.

Diante desses resultados, a substituição da distância média por distância específica de cada empreendimento não foi incorporada à versão atual. A manutenção da distância média preserva a simplicidade da ferramenta, evita aumento de complexidade declaratória e mantém a comparabilidade entre produtores, sem perda significativa de precisão para a maioria dos casos avaliados.

3.3 DECISÕES DECORRENTES DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade mostrou que as distâncias de transporte, tanto rodoviárias quanto dutoviárias, exercem influência limitada sobre a intensidade de carbono do biometano. Mesmo em cenários com aumento expressivo da distância, a contribuição do transporte permaneceu inferior a 1% da intensidade total. Por outro lado, a etapa industrial, especialmente o processo de *upgrading* e o tratamento do *off-gas*, permanece como componente mais relevante para a atualização da ferramenta.

A Tabela 12 resume os temas avaliados e a decisão metodológica adotada.

Tabela 12. Temas avaliados na análise de sensibilidade e decisão adotada na versão atual.

Tema avaliado	Status na atualização	Justificativa
Distância específica de transporte	Não incorporada	A sensibilidade mostrou baixa influência na intensidade de carbono; manteve-se a distância média para preservar simplicidade e comparabilidade.
Combustível do transporte rodoviário	Não tratado como variável central da atualização	A composição da frota altera a contribuição do transporte, mas o efeito total foi pequeno frente às etapas industriais.
Emissões evitadas do manejo de resíduos	Não incorporadas	Pertencem a abordagem consequencial ou de linha de base, não à fronteira <i>cut-off</i> adotada para a versão atual.
Emissões fugitivas de <i>upgrading</i> e <i>off-gas</i>	Incorporadas	São emissões diretas da etapa de purificação do biogás, pertencente ao sistema do biometano na fronteira adotada.

Com base nesses resultados, a atualização da RenovaCalc deve priorizar os elementos com maior relevância metodológica e aderência à fronteira adotada: emissões fugitivas no *upgrading*, destino do *off-gas*, insumos da etapa de purificação e fatores associados à disponibilização do biometano.

CAPÍTULO 4 - ATUALIZAÇÕES RECOMENDADAS E INCORPORADAS À RENOVACALC

A atualização da RenovaCalc foi orientada por três princípios. O primeiro é a coerência com a abordagem *cut-off* e com a decisão de tratar os substratos como resíduos. O segundo é a valorização de informações capazes de diferenciar tecnologias e práticas operacionais relevantes para a intensidade de carbono do biometano. O terceiro é a manutenção da operacionalidade da ferramenta, evitando a inclusão de variáveis cuja influência seja pequena, cuja verificação seja difícil ou cuja base regulatória ainda não esteja consolidada.

Com base nesses princípios, a atualização concentrou-se nas emissões fugitivas associadas ao processo de *upgrading* e ao destino do *off-gas*. Também foram considerados insumos e fatores de emissão associados à purificação do biogás.

4.1 ESTRUTURA GERAL DAS ALTERAÇÕES NA RENOVACALC

A atualização da planilha concentrou-se na criação e reorganização de campos associados à planta de *upgrading*. A estrutura passou a permitir a entrada de dados sobre o biogás direcionado à produção de biometano, os produtos gerados, os insumos consumidos, a tecnologia de purificação, o destino do *off-gas* e a distribuição do biometano (Figura 6).

Entradas da planta de upgrading	
Vazão de biogás direcionada para produção de biometano:	Nm ³ /ano
Teor de metano	57.00% % molar

Produtos	
Teor de metano no biometano	% molar
Produção de biometano	Nm ³ /ano
Poder calorífico inferior	MJ/Nm ³
CO ₂ comercializado	Nm ³ /ano
Elettricidade comercializada a partir do <i>off-gas</i>	kWh/ano

Insumos para a planta de upgrading	
Odorante	kg/ano
Gás natural	Nm ³ /ano
Monoetanolamina (MEA)	kg/ano
Dietanolamina (DEA)	kg/ano
Metildietanolamina (MDEA)	kg/ano

Tecnologia da Planta de upgrading	
Selecionar	
☐ PSA	☐ Membranas 2 estágios
☐ Water Scrubbing	☐ Membranas 3 estágios
☐ Membranas 1 estágio	☐ Torre de aminas
Destino do <i>off-gas</i> ?	
Atmosfera	
Vazão de biometano direcionada para o <i>flare</i> enclausurado:	Nm ³ /ano
Vazão de biometano direcionada para o <i>flare</i> aberto:	Nm ³ /ano

Figura 6. Campos de entrada para caracterização da planta de upgrading e dos produtos gerados.

As principais informações necessárias para o cálculo são:

Grupo de dados	Campos principais	Função no cálculo
Entrada da planta de <i>upgrading</i>	Vazão de biogás direcionada à produção de biometano; teor de CH ₄ no biogás.	Estimar a massa de metano que entra no sistema de purificação.
Produto biometano	Vazão de biometano; teor de CH ₄ no biometano; poder calorífico inferior.	Estimar a massa de metano recuperada e a energia final do biometano.
Coprodutos e fluxos associados	CO ₂ gerado ou comercializado; energia elétrica eventualmente gerada a partir do <i>off-gas</i> .	Registrar fluxos relevantes, sem atribuir automaticamente benefício climático ou alocação econômica na versão atual.
Consumos da planta	Eletricidade, combustíveis, calor e demais insumos do <i>upgrading</i> .	Calcular emissões de segundo plano associadas à etapa de purificação.
Tecnologia de purificação	PSA, membranas, aminas, <i>water scrubbing</i> ou combinações.	Definir valores padrão e lógica de cálculo quando o balanço de massa não for suficiente.
Destino do <i>off-gas</i>	Atmosfera, <i>flare</i> , incinerador, retorno/recuperação de CH ₄ , geração de energia ou aproveitamento de CO ₂ .	Definir o fator aplicado à perda de metano calculada.

Essa estrutura melhora a rastreabilidade do cálculo porque separa a caracterização física do processo, vazões, composições e tecnologia, da decisão metodológica sobre o destino do gás residual e dos fatores de emissão associados.

4.2 CÁLCULO DAS EMISSÕES FUGITIVAS NO UPGRADING

A principal atualização incorporada à RenovaCalc foi a contabilização das emissões fugitivas de metano no processo de *upgrading*. Essa etapa é central porque está diretamente associada à conversão do biogás em biometano e ocorre dentro da fronteira do sistema do combustível, conforme a abordagem *cut-off* adotada.

A estimativa deve ser realizada, preferencialmente, por balanço de massa entre o metano que entra no sistema com o biogás e o metano que sai no biometano especificado. De forma simplificada:

$$M_{CH_4,perdida} = \left[\frac{P \cdot (V_{biogás} \cdot \%CH_{4biogás} \cdot 1000) \cdot M_{CH_4}}{R \cdot T} \right] - \left[\frac{P \cdot (V_{biometano} \cdot \%CH_4 \cdot 1000) \cdot M_{CH_4}}{R \cdot T} \right] \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:

$M_{CH_4,perdida}$ é a perda bruta de CH₄ no *upgrading* (gCH₄ ano⁻¹); P é a pressão normal (1 atm); V_{biogás} é o Volume normalizado seco de biogás que entra na planta (Nm³ ano⁻¹); %CH_{4biogás} é a fração molar de metano no biogás seco; M_{CH₄} é a massa molar de metano (16,04 g mol⁻¹); R é a constante universal

de gases perfeitos ($0,082 \text{ atm L mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$); T equivale a Temperatura (273 K); $V_{\text{biometano}}$ é o Volume normalizado seco de saída de biometano da planta ($\text{Nm}^3 \text{ ano}^{-1}$); e $\%CH_4$ é a fração molar de metano no biometano seco.

A perda bruta de metano não necessariamente corresponde à emissão final para a atmosfera. O resultado depende do destino do *off-gas*. Quando o gás residual é liberado diretamente, a emissão corresponde à perda calculada. Quando o gás residual é direcionado a *flare*, incinerador, motogerador, sistema de oxidação, recuperação ou retorno de metano, a emissão deve ser ajustada pela eficiência do sistema de tratamento.

Assim, a emissão final de CH_4 associada ao *upgrading* pode ser representada como:

$$E_{CH_4,upgrading} = M_{CH_4,perdida} \times f_{destino}$$

Em que $f_{destino}$ representa os diferentes fatores de emissão considerados para os diferentes destinos do gás de escape, não recuperada ou efetivamente emitida após o tratamento do *off-gas*. A Tabela 13 apresenta os fatores aplicáveis ao destino do *off-gas*, expressos como fração de metano residual emitida após o tratamento.

Tabela 13. Fração residual de metano emitida conforme o destino do *off-gas*.

Tecnologia	%perda	Referência
Liberação a atmosfera	100%	-
Aproveitamento/comercialização de CO ₂ sem recuperação de CH ₄	100%	-
Recuperação, liquefação ou retorno de CH ₄ ao processo	0%	-
<i>flare</i> fechado	0.5%	(EPA, 2022)
<i>Flare</i> aberto	50.0%	(EPA, 2022)
Oxidador térmico/incinerador	0.5%	(Kvist; Aryal, 2019)
Geração de energia autoconsumo	0%	-
Geração de energia comercialização (Motogerador)	0.2%	Heat, central or small-scale, other than natural gas {RoW} heat and power co-generation, biogas, gas engine Cut-off, U (Ecoinvent, 2024)

A emissão de metano é então convertida em dióxido de carbono equivalente por meio do fator de caracterização adotado para o CH_4 :

$$E_{CO_2eq,upgrading} = E_{CH_4,upgrading} \times GWP_{CH_4}$$

Em que:

$E_{CO_2eq,upgrading}$ é a emissão anual associada ao *upgrading*, expressa em $\text{g CO}_2\text{eq ano}^{-1}$; GWP_{CH_4} é o potencial de aquecimento global do metano adotado na metodologia.

Por fim, a contribuição do *upgrading* para a intensidade de carbono do biometano é obtida pela divisão da emissão anual pela energia anual do biometano produzido:

$$IC_{upgrading} = E_{CO_2eq,upgrading} / E_{biometano}$$

Em que:

$IC_{upgrading}$ é a intensidade de carbono associada ao *upgrading*, expressa em g CO₂eq MJ⁻¹; $E_{biometano}$ é a energia anual do biometano produzido, expressa em MJ ano⁻¹.

Essa abordagem permite que a ferramenta reconheça diferenças tecnológicas e operacionais. Plantas com melhor recuperação de metano, menor perda no *upgrading* ou tratamento eficiente do *off-gas* apresentam menor emissão atribuída ao biometano. Ao mesmo tempo, plantas sem dados consistentes ou com balanços incompatíveis podem ser avaliadas com valores padrão, evitando resultados fisicamente irreais.

4.3 DESTINO DO OFF-GAS E LÓGICA DE CÁLCULO

O *off-gas* é o fluxo residual resultante da separação do CO₂ e de outros componentes do biogás durante a purificação. Embora seja composto majoritariamente por CO₂, pode conter metano residual em proporções variáveis. O destino desse fluxo é decisivo para a intensidade de carbono do biometano.

A atualização incorporou diferentes possibilidades de destino do *off-gas*, conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14. Destinos do *off-gas* considerados na atualização e tratamento metodológico.

Destino do <i>off-gas</i>	Tratamento no cálculo	Efeito esperado
Liberação à atmosfera	A perda de CH ₄ calculada por balanço de massa é considerada emissão direta.	Maior emissão fugitiva.
Aproveitamento/comercialização de CO ₂ sem recuperação de CH ₄	A perda de CH ₄ no gás residual continua sendo considerada emissão, salvo tratamento específico.	Não gera crédito automático ao biometano.
<i>Flare</i> aberto	A perda de CH ₄ é ajustada pela eficiência de queima do <i>flare</i> aberto.	Redução parcial da emissão, dependente da eficiência.
<i>Flare</i> enclausurado	A perda de CH ₄ é ajustada pela eficiência de queima do <i>flare</i> enclausurado.	Redução significativa da emissão.
Incinerador/oxidador térmico	A perda de CH ₄ é ajustada pela eficiência do sistema de incineração.	Redução significativa da emissão.
Recuperação, liquefação ou retorno de CH ₄ ao processo	A emissão fugitiva pode ser reduzida substancialmente ou anulada, desde que comprovada.	Melhor desempenho ambiental.
Geração de energia com <i>off-gas</i>	A emissão depende da tecnologia e do destino da energia gerada.	Pode reduzir a emissão de CH ₄ , mas não implica crédito automático.

A Figura 7 apresenta os campos de entrada associados às tecnologias utilizadas na planta de *upgrading*, incluindo a destinação do *off-gas*. Esses campos permitem selecionar os processos e rotas em operação e, consequentemente, orientar as estimativas de emissões fugitivas da planta de *upgrading*.

Figura 7. Inserção dos dados referentes ao destino do *off-gas* gerado no processo de *upgrading*.

4.4 INSUMOS DA PLANTA DE *UPGRADING*

Além das emissões fugitivas de metano, a atualização da RenovaCalc passou a representar insumos relevantes utilizados na etapa de purificação do biogás a biometano. Esses insumos variam conforme a tecnologia de *upgrading* empregada e as exigências de especificação do produto final. De forma geral, podem incluir eletricidade, calor, solventes de absorção, odorante, gás natural para enriquecimento e outros produtos químicos utilizados no processo.

A inclusão desses fluxos tem como objetivo contabilizar as emissões de segundo plano associadas à operação da planta de *upgrading*, mantendo coerência com a base de inventários adotada na ferramenta. A odorização foi incluída porque o biometano destinado a determinadas formas de distribuição deve atender às exigências regulatórias de segurança. O biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto deve ser odorizado conforme a Resolução ANP Nº 886/22 (ANP, 2022), enquanto o biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvipastoris e comerciais deve atender à Resolução ANP Nº 906/22 (Brasil, 2022). Na prática, podem ser utilizados compostos odorantes à base de mercaptanas ou outros produtos com função equivalente.

Tabela 15 apresenta os principais insumos e inventários utilizados.

A eletricidade é o principal insumo comum às tecnologias de purificação consideradas, uma vez que está associada à compressão, bombeamento, separação e demais operações auxiliares da planta. Em tecnologias baseadas em absorção química, como torres de aminas, também podem ser necessários calor e solventes específicos, como monoetanolamina, dietanolamina ou aminas terciárias. Esses fluxos foram representados por inventários disponíveis na base ecoinvent, mantendo a consistência com os demais processos de segundo plano utilizados na RenovaCalc.

A odorização foi incluída porque o biometano destinado a determinadas formas de distribuição deve atender às exigências regulatórias de segurança. O biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto deve ser odorizado conforme a Resolução ANP Nº 886/22 (ANP, 2022), enquanto o biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvipastoris e comerciais deve atender à Resolução ANP Nº 906/22 (Brasil, 2022). Na prática, podem ser utilizados compostos odorantes à base de mercaptanas ou outros produtos com função equivalente.

Tabela 15. Insumos e inventários considerados para tecnologias de upgrading.

Tecnologia ou fluxo	Insumo considerado	Inventário ou abordagem utilizada
PSA	Eletricidade	Electricity, high voltage {BR} / market group for electricity, high voltage / Cut-off
Membranas	Eletricidade	Electricity, high voltage {BR} / market group for electricity, high voltage / Cut-off
Torre de aminas	Eletricidade	Electricity, high voltage {BR} / market group for electricity, high voltage / Cut-off
Torre de aminas	Calor	Market for heat, central or small-scale, natural gas / Cut-off
Torre de aminas	Monoetanolamina	Monoethanolamine {GLO} / market for monoethanolamine / Cut-off
Torre de aminas	Dietanolamina	Diethanolamine {GLO} / market for diethanolamine / Cut-off
Torre de aminas	Amina terciária / MDEA ou equivalente	Inventário representativo de amina disponível na base ecoinvent
Odorização	Odorante	Chemical, organic {GLO} / market for chemical, organic / Cut-off
Enriquecimento do biometano	Gás natural	Inventário de gás natural compatível com a base da ferramenta

Como a composição e a dosagem dos odorantes podem variar conforme a regulação local, a prática operacional e o produto utilizado por cada planta, adotou-se um inventário agregado para representar esse fluxo. Essa escolha evita a criação de complexidade excessiva para um insumo de baixa contribuição relativa, ao mesmo tempo em que permite contabilizar as emissões associadas à exigência de odorização.

O gás natural para enriquecimento também foi previsto como insumo porque, em algumas situações, pode ser utilizado para adequar o biometano aos requisitos de qualidade, poder calorífico ou especificação para comercialização e injeção em rede. Quando utilizado, esse consumo deve ser

informado como entrada da planta de *upgrading*, sendo tratado como insumo adicional do processo, e não como substituição, crédito ou benefício ambiental.

A Figura 8 apresenta os campos de entrada associados aos insumos da planta de *upgrading*, incluindo eletricidade, calor, odorante, gás natural para enriquecimento e solventes aplicáveis. Esses campos permitem representar as emissões indiretas associadas aos principais fluxos consumidos na etapa de purificação, quando materialmente relevantes para a rota avaliada.

Insumos para a planta de upgrading		
Odorante		kg/ano
Gás natural		Nm ³ /ano
Monoetanolamina (MEA)		kg/ano
Dietanolamina (DEA)		kg/ano
Metildietanolamina (MDEA)		kg/ano

Figura 8. Campos de entrada para insumos utilizados na planta de upgrading.

4.5 CONTROLE DE CONSISTÊNCIA DOS DADOS DE ENTRADA

A atualização também incorporou uma lógica de controle de consistência. O cálculo por balanço de massa depende de dados confiáveis de vazão e composição do biogás e do biometano. Quando esses dados são ausentes, inconsistentes ou geram resultados fisicamente incompatíveis, a ferramenta deve recorrer a valores padrão compatíveis com a tecnologia selecionada.

Esse procedimento evita três problemas:

Problema potencial	Consequência se não houver controle	Tratamento recomendado
Vazão ou composição ausente	Impossibilidade de estimar perda por balanço de massa	Uso de valor padrão por tecnologia
Balanço negativo de metano	Interpretação incorreta de ausência de emissão ou captura de metano	Alerta de inconsistência e revisão dos dados
Dados de diferentes períodos	Balanço artificialmente alto ou baixo	Exigir compatibilidade temporal entre medições
Teor de CH ₄ incompatível com especificação	Subestimação ou superestimação da recuperação de metano	Aplicar limites de consistência e validação
Destino do <i>off-gas</i> não informado	Risco de não contabilizar emissão relevante	Aplicar condição conservadora ou exigir preenchimento

Esse controle é especialmente importante em uma ferramenta regulatória, pois melhora a robustez do cálculo e reduz o risco de resultados não representativos.

4.6 ATUALIZAÇÕES INCORPORADAS NA VERSÃO ATUAL

A Tabela 16 sintetiza as atualizações efetivamente incorporadas ou recomendadas para a versão atual da RenovaCalc.

Tabela 16. Atualizações incorporadas na versão atual da RenovaCalc.

Componente	Atualização incorporada	Finalidade
Fronteira metodológica	Manutenção da abordagem <i>cut-off</i> , com substratos classificados como resíduos.	Evitar atribuição ao biometano de cargas associadas ao tratamento do resíduo.
Entrada de biogás	Inclusão de vazão de biogás e teor de CH ₄ direcionados ao <i>upgrading</i> .	Estimar a massa de metano que entra no sistema.
Saída de biometano	Inclusão de vazão, teor de CH ₄ e poder calorífico do biometano.	Estimar metano recuperado e energia do produto final.
Emissões fugitivas do <i>upgrading</i>	Cálculo por balanço de massa ou valor padrão por tecnologia.	Capturar perdas diretas de CH ₄ na purificação.
Destino do <i>off-gas</i>	Diferenciação entre atmosfera, <i>flare</i> , incinerador, recuperação, retorno de CH ₄ e geração de energia.	Representar o efeito do tratamento do gás residual.
Tecnologias de purificação	Diferenciação entre PSA, membranas, aminas, <i>water scrubbing</i> e combinações.	Refletir diferenças de desempenho tecnológico.
Valores padrão	Inclusão de fatores default para perdas por tecnologia e tratamento do <i>off-gas</i> .	Permitir cálculo quando não houver dados primários confiáveis.
Insumos do <i>upgrading</i>	Inclusão de eletricidade, calor, solventes, odorante e enriquecimento com gás natural quando aplicável.	Refinar emissões de segundo plano da purificação.
Odorização	Inclusão de inventário agregado para odorante.	Representar exigência regulatória com baixa complexidade.
Controle de consistência	Tratamento de balanços negativos ou dados ausentes.	Evitar resultados fisicamente incompatíveis.

4.7 SÍNTESE DA ATUALIZAÇÃO METODOLÓGICA

A atualização da RenovaCalc para a rota de biometano incorporou as emissões fugitivas diretamente associadas à etapa de purificação do biogás. Foram incluídos o cálculo das perdas de CH₄ no *upgrading*, preferencialmente por balanço de massa, a diferenciação do destino do *off-gas*, valores padrão por tecnologia quando necessários, insumos relevantes da purificação e controles de consistência dos dados de entrada.

A atualização manteve a abordagem *cut-off*, com os substratos tratados como resíduos. Dessa forma, as cargas associadas ao tratamento do resíduo não são automaticamente transferidas ao biometano. Também não foram incorporados nesta etapa benefícios automáticos associados ao CO₂ comercializado, alocação econômica sem regra consolidada, emissões evitadas do manejo de resíduos ou a substituição das distâncias médias de transporte por distâncias específicas.

Com essa estrutura, a ferramenta passa a diferenciar tecnologias e práticas operacionais diretamente relacionadas à produção e à disponibilização do biometano, preservando sua operacionalidade e sua aderência à fronteira metodológica adotada. Temas que exigem regras metodológicas ou regulatórias adicionais permanecem passíveis de avaliação em futuras revisões.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo evidenciou que as emissões fugitivas de metano constituem um componente relevante na avaliação da intensidade de carbono do biometano. Embora o biometano desempenhe papel estratégico na descarbonização da matriz energética, sua contribuição climática depende da eficiência com que o biogás é captado, purificado, tratado e distribuído. Nesse contexto, a inclusão das emissões fugitivas na RenovaCalc representa um avanço metodológico importante, pois permite que a ferramenta reflita de forma mais adequada as condições tecnológicas e operacionais das plantas de biometano.

A revisão técnica demonstrou que as perdas de metano podem ocorrer em diferentes etapas da cadeia produtiva, incluindo aterros sanitários, biodigestores, armazenamento de digestato, sistemas de armazenamento de biogás, flares, processos de purificação, armazenamento e distribuição de biometano. No entanto, a atribuição dessas emissões ao biometano depende da fronteira metodológica adotada. A manutenção da abordagem *cut-off*, com os substratos tratados como resíduos, permite distinguir as emissões associadas ao tratamento do resíduo das diretamente vinculadas à produção e disponibilização do biometano.

Com base nessa lógica, a atualização da RenovaCalc concentrou-se nas etapas que pertencem diretamente ao sistema de biometano dentro da fronteira adotada, especialmente o processo de *upgrading*, o destino do *off-gas* e os insumos relevantes para a purificação do biocombustível. A representação dessas etapas permite diferenciar configurações tecnológicas e práticas operacionais, reconhecendo que plantas com maior recuperação de metano, controle adequado do gás residual e menor consumo de insumos tendem a apresentar melhor desempenho ambiental.

A análise de sensibilidade mostrou que a distância de transporte, embora relevante para a caracterização logística das rotas, apresentou influência limitada sobre a intensidade de carbono total nos cenários avaliados. Por essa razão, a atualização preservou a abordagem baseada em distâncias médias, mantendo a simplicidade, a comparabilidade e a operacionalidade da ferramenta. Essa decisão evita a inclusão de variáveis de difícil verificação cujo efeito, na maior parte dos casos analisados, não justificaria uma mudança estrutural na RenovaCalc.

Dessa forma, a atualização proposta fortalece a consistência técnica da RenovaCalc sem deslocar a ferramenta para uma abordagem consequencial ou para uma lógica de créditos não regulamentados. O aprimoramento permite tratar, de forma mais transparente, as emissões fugitivas diretamente associadas ao biometano, ao mesmo tempo em que preserva a coerência com a abordagem *cut-off* e com as regras metodológicas atualmente adotadas.

Por fim, o estudo reforça que a redução das emissões fugitivas depende não apenas da modelagem da calculadora, mas também da adoção de boas práticas operacionais, do monitoramento de vazamentos, da manutenção adequada, da eficiência no tratamento do *off-gas* e da seleção de tecnologias de purificação mais robustas. Ao incorporar esses aspectos à avaliação da intensidade de carbono, a RenovaCalc passa a oferecer um sinal técnico mais claro para a melhoria contínua das plantas de biometano e para o fortalecimento desse combustível renovável no contexto da descarbonização no Brasil.

REFERÊNCIAS

ADAMS, Paul. GHG Emissions From Biomethane Gas-to-Grid Injection via Anaerobic Digestion. *In: GREENHOUSE GAS BALANCES OF BIOENERGY SYSTEMS*. [S. l.]: Elsevier Inc., 2017. p. 141–158. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101036-5.00009-4>.

ANP. **AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. RESOLUÇÃO ANP Nº 886, DE 29 DE SETEMBRO DE 2022**. [S. l.], 2022.

ARSESP. **DIRETORIA DA AGÊNCIA REGULADORA DE SANEAMENTO E ENERGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO. DELIBERAÇÃO ARSESP Nº 546. Dispõe sobre procedimentos e padrões do indicador de Concentração de Odorante no Gás - COG no gás natural canalizado**. 2015.

AUDIBERT, Jorge Luiz; FERNANDES, Fernando. Avaliação preliminar qualitativa e quantitativa de gases originados da biodigestão de resíduos sólidos no aterro de Londrina, Estado do Paraná, Brasil. **Acta Scientiarum - Technology**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 45–52, 2013.

BALDÉ, Hambaliou *et al.* Fugitive methane emissions from two agricultural biogas plants. **Waste Management**, [s. l.], v. 151, n. July, p. 123–130, 2022.

BRASIL. **RESOLUÇÃO ANP Nº 886**. [S. l.: s. n.], 2022.

CANDIANI, Giovano; VIANA, Ednilson. Emissões fugitivas de metano em aterros sanitários. **GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)**, [s. l.], v. 21, n. 3, p. 845, 2018.

CDM. Methodological tool: Project and leakage emissions from biomass - Version 02.0. [s. l.], p. 29, 2015.

CDM. Tool to determine project emissions from flaring gases containing methane. Annex 13. **UNEP FI [Online] Available: ...**, [s. l.], p. 1–14, 2009.

DAMASCENO, Larissa Aparecida Góes. **EMIÇÃO FUGITIVA DE METANO ATRAVÉS DO SISTEMA DE COBERTURA DE UM ATERRO SANITÁRIO CONSIDERANDO A OCORRÊNCIA DE ZONAS COM FISSURAMENTO**. 2018. 2499–2508 f. - UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, [s. l.], 2018.

ECOINVENT. **Life Cycle Inventory Database Ecoinvent Version 3.10 Zürich, Switzerland**. Zürich, Switzerland.: [s. n.], 2024.

EPA. **Draft Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2022. U.S. Environmental Protection Agency, EPA 430-D-24-001**. [S. l.: s. n.], 2024-. ISSN 1984-6398.

EPA; GLOBAL METHANE INITIATIVE. Anaerobic Digestion (AD) Screening Tool. **User Manual**, [s. l.], v. version 2., 2022.

FLESCHE, Thomas K.; DESJARDINS, Raymond L.; WORTH, Devon. Fugitive methane emissions from an agricultural biodigester. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 35, n. 9, p. 3927–3935, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.009>.

FREDDO, Alessandra *et al.* **Biometano: biocombustível verde. Guia Técnico**. [S. l.: s. n.], 2020.

FREDENSLUND, Anders M. *et al.* On-site and ground-based remote sensing measurements of methane emissions from four biogas plants: A comparison study. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 270, n. June, p. 88–95, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.080>.

HRAD, Marlies; PIRINGER, Martin; HUBER-HUMER, Marion. Determining methane emissions from biogas plants - Operational and meteorological aspects. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 191, p. 234–243, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.016>.

INSTITUTO 17; EMBRAPA MEIO AMBIENTE; AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resíduos no âmbito do RenovaBio: revisão de literatura**. [S. l.]: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/arq/arquivos-estudos-relatorio-e-seminarios/revisao-literatura-residuos.pdf>.

IPCC. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by Eggleston, H.S Buendia, Leandro Miwa, Kyoko Ngara, Todd Tanabe, Kiyoto**. [S. l.: s. n.], 2006.

IPCC. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 10 Emissions From Livestock and Manure Management. **Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, [s. l.], v. 4, p. 87, 2019.

IPCC. Volume 5 Waste - Chapter 4 Biological Treatment of Solid Waste. *In*: 2006 IPCC GUIDELINES FOR NATIONAL GREENHOUSE GAS INVENTORIES. [S. l.: s. n.], 2006. p. 4.1-4.8. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>.

JONERHOLM, Katarina; LUNDBORG, Hans. Methane losses in the biogas system. **Baltic Biogas Bus Project**, [s. l.], 2012.

KVIST, Torben; ARYAL, Nabin. Methane loss from commercially operating biogas upgrading plants. **Waste Management**, [s. l.], v. 87, p. 295–300, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.023>.

LAMB, Brian K. *et al.* Direct measurements show decreasing methane emissions from natural gas local distribution systems in the United States. **Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 49, n. 8, p. 5161–5169, 2015.

LELIEVELD, J. *et al.* Low methane leakage from gas pipelines. **Nature**, [s. l.], v. 434, n. 7035, p. 841–842, 2005.

LIEBETRAU, J. *et al.* Analysis of greenhouse gas emissions from 10 biogas plants within the agricultural sector. **Water Science and Technology**, [s. l.], v. 67, n. 6, p. 1370–1379, 2013.

LIEBETRAU, Jan *et al.* Methane emissions from biogas-producing facilities within the agricultural sector. **Engineering in Life Sciences**, [s. l.], v. 10, n. 6, p. 595–599, 2010.

LINS, L P; MITO, J Y L; FERNANDES, D M. Composição Média Do Biogás De Diferentes Tipos De Biomassa. *In*: , 2015. **V Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais 05 a 07 de Maio de 2015 – Rio de Janeiro - RJ**. [S. l.: s. n.], 2015. p. 5–8.

MARIANO, Maria Odete Holanda; JUCÁ, José Fernando Thomé. Ensaios de campo para determinação de emissões de biogás em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 223–228, 2010.

MATTHEW R. HARRISON *et al.* Methane Emissions from the Natural Gas Industry Project Summary. [s. l.], v. volume 1:, n. June, 1997.

MYHRE, G. *et al.* Anthropogenic and natural radiative forcing. *In*: STOCKER, T.F., D. QIN, G.-K. PLATTNER, M. TIGNOR, S.K. ALLEN, J. BOSCHUNG, A. NAUELS, Y. XIA, V. Bex and P.M. Midgley (org.).

Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: Cambridge University Press, 2013. v. 9781107057, p. 659–740.

REINELT, Torsten *et al.* Comparative use of different emission measurement approaches to determine methane emissions from a biogas plant. **Waste Management**, [s. l.], v. 68, p. 173–185, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.053>.

REINELT, Torsten; LIEBETRAU, Jan; NELLES, Michael. Analysis of operational methane emissions from pressure relief valves from biogas storages of biogas plants. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 217, p. 257–264, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.073>.

ROCHA, Rodrigo Douglas; COSTA, Rodrigo Souza Meireles Da; ALMEIDA, Julio Cesar Mota M. De. A Viabilidade Do Uso De GNV No Transporte Rodoviário De Cargas : Estudo De Caso De Uma Transportadora. *In:* , 2021, Mogi Das Cruzes. **XII Fateclog - Gestão Da Cadeia De Suprimentos No Agronegócio: Desafios E Oportunidades No Contexto Atual**. Mogi Das Cruzes: FATEC, 2021.

SCANIA. Camiones SCANIA movidos a gas. [s. l.], 2020.

SCHEUTZ, Charlotte; FREDENSLUND, Anders M. Total methane emission rates and losses from 23 biogas plants. **Waste Management**, [s. l.], v. 97, p. 38–46, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.029>.

SILVA, Tiago Nascimento; DE FREITAS, Fernando Souza Nazareth; CANDIANI, Giovano. Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 95–104, 2013.

SPOKAS, K. *et al.* Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems?. **Waste Management**, [s. l.], v. 26, n. 5, p. 516–525, 2006.

STARR, Katherine *et al.* Life cycle assessment of biogas upgrading technologies. **Waste Management**, [s. l.], v. 32, n. 5, p. 991–999, 2012.

SUN, Qie *et al.* Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 51, p. 521–532, 2015.

WAGNER, Luiz Gustavo *et al.* AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA QUEIMA DE BIOGÁS PROVENIENTE DO TRATAMENTO DE ESGOTO UTILIZANDO UM QUEIMADOR ENCLAUSURADO. *In:* , 2017. **Congresso ABES FENASAN 2017**. [S. l.]: ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental AESABESP - Associação dos Engenheiros da Sabesp, 2017. p. 2–8.

WECHSELBERGER, Viktoria *et al.* Methane losses from different biogas plant technologies. **Waste Management**, [s. l.], v. 157, n. November 2022, p. 110–120, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.12.012>.