

# RELATÓRIO CICLO-OTTO

## GT - CÉLULA COMBUSTÍVEL

AVALIAÇÃO TÉCNICA DOS REQUISITOS  
PARA DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA  
DE CÉLULA COMBUSTÍVEL A ETANOL

---

5 DE JUNHO DE 2022

---

GT – CÉLULA COMBUSTÍVEL  
COORDENAÇÃO: MME/ME



# Relatório do GT-E2G

**Avaliação Técnica dos Requisitos para  
Desenvolvimento da Tecnologia de Célula  
Combustível a Etanol**

**COMPONENTES  
DO GT-CÉLULA  
COMBUSTÍVEL**

**O GT – E2G CONTOU COM A  
PARTICIPAÇÃO DE  
REPRESENTANTES DE  
GOVERNO, INICIATIVA  
PRIVADA, ACADEMIA E  
EXPERTS DA ENGENHARIA  
NACIONAL.**

**ABBI  
BNDES  
EPE  
FINEP  
LNBR/CNPEM  
MAPA  
ME  
MME  
UNICAMP**

---

## Coordenação ME/MME:

ME – Margarete Gandini

MME – Marlon Arraes Jardim

## Estrutura do Documento

1. Introdução
2. O que são Células Combustível?
  - 2.1 Tipos de Célula Combustível
    - 2.1.1 PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
      - 2.1.1.1 HT-PEMFC (High Temperature PEMFC)
    - 2.1.2 AFC (Alkaline Fuel Cell)
    - 2.1.3 SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)
      - 2.1.3.1 MS-SOFC (Metal Supported SOFC)
3. Mercado de Célula Combustível
4. Infraestrutura e Distribuição
5. Benefícios ao Ambiente
6. Desenvolvimento das células apontadas como viáveis e recomendações ao Subcomitê PD&I
  - 6.1 PEMFC
  - 6.2 SOFC
7. Roadmap Tecnológico
8. Conclusão
9. Referências Bibliográficas



---

## CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

### *Do contexto atual da indústria automotiva e tendência de eletrificação da mobilidade urbana.*

A mobilidade urbana sustentável impõe desafios importantes para a sociedade. Novas tecnologias surgem a cada ciclo de desenvolvimento da indústria automotiva e o desafio do enfrentamento das questões relacionadas à mudança climática cada vez mais impõe diretrizes para as políticas públicas. Além disso, o consumidor gradativamente busca dissociar seus hábitos de consumo com o aumento das emissões de gases de efeito estufa.

O surgimento de uma “economia verde”, sustentável e capaz de mitigar os efeitos das mudanças climáticas, promove alterações significativas no desenho de políticas públicas setoriais, cujo objetivo passa a ser a integração de metas de menores emissões de gases de efeito estufa com maior eficiência energética.

O Brasil está bem situado neste contexto de sustentabilidade da mobilidade principalmente quando se leva em consideração a larga contribuição dos biocombustíveis. A matriz energética brasileira conta com 48,4% (BEN, 2021) de participação das fontes renováveis na oferta primária de energia, sendo que a segunda maior fonte são os derivados da cana-de-açúcar, atrás apenas dos derivados do petróleo. No mundo, a participação dos renováveis foi de apenas 11,2% (RENEWABLES 2021 GLOBAL STATUS REPORT).

Ou seja, sob qualquer aspecto, o Brasil tem todas as condições de liderar o processo da transição energética em curso seja porque possui uma matriz energética limpa seja porque pode desenvolver tecnologias de mobilidade utilizando o potencial de produção de bioenergia consolidado há décadas.

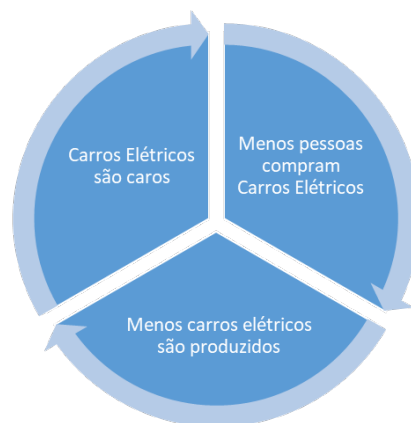
Inegavelmente, um dos símbolos da descarbonização da matriz de transporte tem sido o carro elétrico a bateria. Apresentado ao consumidor global como a solução definitiva para as emissões no segmento de transporte, o carro elétrico a bateria tem desafios importantes a superar, tais como seu custo elevado e a sustentabilidade de sua produção, entre outros. Em seu novo livro, “The New Map”, ainda sem tradução para o português, o especialista Daniel Yergin afirma que “(...) hoje, o veículo elétrico (EV) tornou-se uma questão existencial para a indústria automotiva global, que está correndo para se certificar que ela possa garantir seu futuro” (YERGIN, D. The New Map, 2021).

---

Embora as emissões “de escapamento” do veículo elétrico sejam nulas pelo simples fato de sua inexistência nesses veículos, resta óbvio que a energia utilizada para carregar as baterias foi gerada em alguma instalação tendo sido transportada até o ponto de carregamento.

A matriz elétrica tem fontes diversas em sua geração, tais como hidráulica, biomassa, eólica, solar, nuclear etc. Cada uma delas possui uma “pegada de carbono” associada à sua produção. Ou seja, se considerarmos que se deve buscar a menor emissão por quilômetro rodado ao menor preço, deve-se necessariamente avaliar a emissão total no chamado ciclo de vida da produção da energia. Em síntese, deve-se avaliar o conjunto das emissões no conceito chamado “poço à roda”.

### O problema do veículo elétrico a bateria é apenas a escala de produção?



Em 2020, a SAE publicou artigo sobre os custos de produção de veículos elétricos. Existe, segundo o estudo, um “purchase cost penalty” (penalidade de custo de aquisição) da ordem de US\$ 10 mil a US\$ 12 mil. Os custos de manutenção dos veículos podem ser menores, porém o custo adicional de aquisição é elevado.

A aquisição de um automóvel, no entanto, não tem sua decisão baseada exclusivamente em custo. Se assim fosse, não haveria marcas ou veículos denominados *premium* (alto luxo) porque o consumidor buscaria sempre o carro mais eficiente e mais barato, mesmo que fossem simples.

O maior custo de um veículo elétrico importa, neste contexto, quando se trata da margem das montadoras. No mesmo artigo da SAE, para ser lucrativo, um veículo elétrico deve ser comercializado a valores superiores a US\$ 48 mil.

---

Como alternativa aos veículos a bateria, apresenta-se a tecnologia célula combustível, a qual têm sido alvo de pesquisas e investimentos do setor automobilístico, operando com combustíveis como hidrogênio ou etanol.

No ano de 2017, a Nissan apresentou ao governo brasileiro dois protótipos de veículos movidos a célula combustível, mais especificamente a SOFC (Solide Oxide Fuel Cell). Estes protótipos eram vans elétricas do modelo e-NV200, as quais já eram vendidas normalmente no Japão. Ambos os veículos trafegaram utilizando etanol como combustível e tinham autonomia de 600 quilômetros com um tanque de 60 litros.

Modelos mais atuais da Nissan possuem autonomia de 600 quilômetros utilizando 30 litros de etanol. O percentual de mistura deste combustível é de 97% etanol, 3% água, mas há estudos sendo dirigidos para aperfeiçoar esta mistura até o patamar de 55% água, 45% etanol, o que tornaria o veículo mais limpo ecologicamente.

Na Europa, há modelos de caminhões movidos a hidrogênio sendo testados para transporte de bens entre países por meio rodoviário.

***Dos custos associados a essa mudança e ônus para a economia brasileira uma vez que os veículos elétricos (eletrificação) está calcada em subsídios vultuosos.***

A adoção em larga escala de veículos elétricos a bateria traz consigo um forte impacto à economia, já que requer, como já visto em países desenvolvidos, subsídios públicos vultuosos, uma vez que não há infraestrutura preparada para essa implementação prática em larga escala no Brasil.

Um ponto a ser destacado é o de que a natureza da matriz energética brasileira é predominantemente renovável. Isso significa que o efeito poluente das recargas dos veículos a bateria é de menor amplitude, se comparado àquele americano ou europeu. Além disso, é notável também que a implementação de uma frota a bateria não acarretaria um colapso energético, uma vez que o fornecimento brasileiro é capaz de suprir esta demanda.

Dilema da indústria: escala de produção x custos de produção.

- Necessidade de conciliar as limitações da economia nacional (renda) com as novas tecnologias para a mobilidade (eletrificação).

- 
- Necessidade de prover a descarbonização da matriz de transporte ao menor custo para a sociedade.

Diante do exposto, vê-se necessária a descarbonização da matriz de transporte brasileira, mantendo olhar atento e vigoroso aos custos por ela gerados à sociedade.



---

## CAPÍTULO II – O QUE SÃO CÉLULAS-COMBUSTÍVEL?

Célula a combustível (“fuel cell”) é um dispositivo eletroquímico que converte a energia química de um combustível diretamente em energia elétrica (Barbir, 2005). Esse processo é diferente daquele referente à produção de energia elétrica por um motor de combustão interna, uma vez que neste tipo de motor, são necessárias três conversões: de energia química para calor, de calor para energia mecânica e de mecânica para elétrica. Células a combustível, em geral, são compostas por três partes: um ânodo, um cátodo e um eletrólito (Kreuer, 2013).

A depender do tipo de célula combustível, as reações químicas ocorrem de maneiras diferentes, utilizando diversos materiais. As células a combustível têm elevada eficiência, não sendo limitada pelo ciclo de Carnot e, por isso, atingem na prática eficiência muito superior à dos motores a combustão.

Elas não emitem poluição particulada ou sonora, não possuem partes móveis e sua construção modular permite arranjos em diferentes escalas de potência. Esses dispositivos são extremamente confiáveis, tendo sua primeira aplicação nas espaçonaves do programa espacial norte-americano em meados do século XX.

No uso estacionário, uma usina baseada em combustão normalmente gera eletricidade em eficiências de 33 a 35%, que com cogeração podem atingir 40 a 45%, enquanto sistemas de célula a combustível podem gerar eletricidade com eficiências de 65% e equipamentos já em fase comercial indicam eficiência combinada da ordem de 85% (Bosch Global, 2021).

A tecnologia também será adequada para uma variedade de aplicações de curto prazo, como unidade de energia auxiliar portáteis/móveis, fontes de alimentação distribuídas (industriais, residencial, data centers) entre outras. Tendo as aplicações estáticas, anterior a veicular, como um impulso para outros players perceberem seu potencial em todos os campos de interesse.

---

## **2.1 TIPOS DE CÉLULA COMBUSTÍVEL**

Nesta seção, apresenta-se a descrição das células combustíveis disponíveis para uso em transporte rodoviário atualmente, indicando funcionamento, vantagens e desvantagens de cada uma, em sua utilização em veículos automotores.

### **2.1.1 PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)**

Na PEMFC, hidrogênio é injetado na célula e seus íons atravessam uma membrana polimérica umidificada a fim de reagir com oxigênio no cátodo do dispositivo, enquanto os elétrons são deslocados por um circuito externo gerando corrente elétrica (EMSA, 2017).

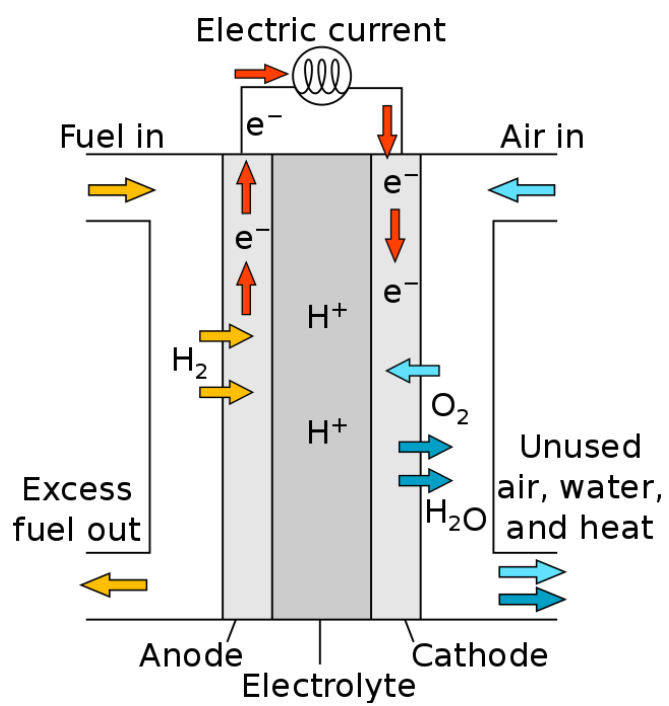
Neste dispositivo, o hidrogênio é usado como combustível, e caso um reformador seja instalado, é possível usar outros combustíveis primários, como etanol (Powercell, 2017). No entanto, essa reforma necessita de etapas adicionais de purificação, uma vez que os subprodutos da reforma a vapor do etanol envenenam a PEMFC e reduzem significativamente sua vida útil, visto que esta célula é altamente sensível à impureza de monóxido de carbono (EMSA, 2017). Este fato também implica que o hidrogênio a ser utilizado neste dispositivo deve ter alto nível de pureza. Este dispositivo possui maior razão entre potência e peso/volume se comparado aos outros (HOLMGREN, 2019). O tempo de inicialização da célula polimérica é de menos de 15 segundos (NREL, 2005). PEMFC é uma tecnologia compacta e leve, e opera em temperaturas entre 50°C e 100°C. Sua eficiência encontra-se entre 50% e 60% (EMSA, 2017).

A vida útil desta célula varia entre 5.000 e 35.000 horas, a depender do uso do dispositivo (Holmgren, 2019).

Uma desvantagem a nível de custo de produção da PEMFC é a de que o material usado como catalisador é principalmente platina, um material excessivamente caro (HOLMGREN, 2019).

Um veículo movido a PEMFC tem autonomia de 100 quilômetros por quilograma de hidrogênio.

## Estrutura da PEMFC



---

#### **2.1.1.1 HT-PEMFC (High Temperature PEMFC)**

Um outro modelo PEMFC opera entre 150-200°C e é chamado de HT-PEMFC (do inglês High Temperature PEMFC). Essa temperatura de operação é possibilitada pelo fato de que o eletrólito é composto por ácido mineral ou polímeros que substituem o Nafion, que é o eletrólito estado-da-arte das células PEMFC convencionais (HOLMGREN, 2019).

O aumento da temperatura de operação resulta em maior tolerância de CO, e em melhor performance. Há potencial para o uso de calor desperdiçado pela HT-PEMFC a fim de aumentar sua eficiência, a qual, caso contrário, seria bastante similar à da PEMFC (EMSA, 2017).

Atualmente, há desenvolvimento de PEEK e PBI membranas para operação nestas faixas de temperatura.

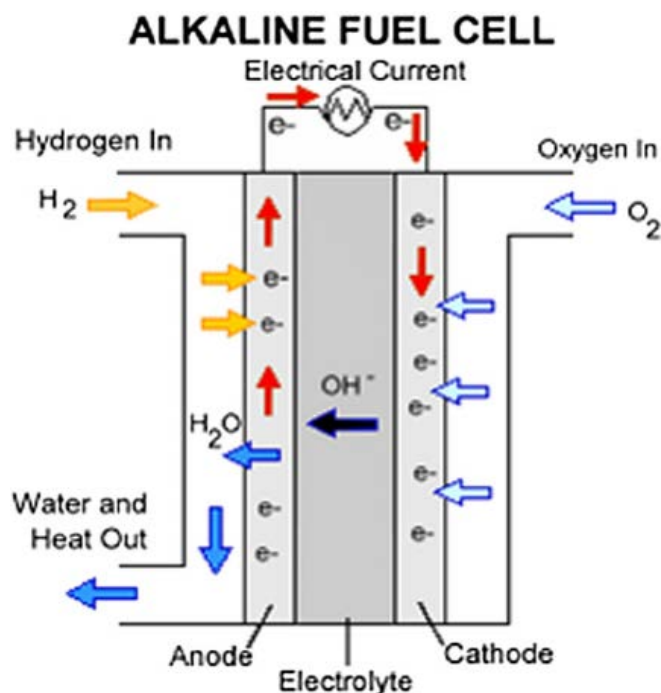
#### **2.1.2 AFC (Alkaline Fuel Cell)**

A AFC utiliza um eletrólito alcalino numa solução aquosa para gerar eletricidade (Mekhilef, 2012). Esta célula opera entre 60°C e 90°C e tem eficiência de 50% a 60% (Mekhilef, 2012).

Este dispositivo é excessivamente sensível à presença de CO<sub>2</sub> na célula. Portanto, normalmente precisa usar ar purificado ou oxigênio puro para operar, o que dificulta muito seu uso para o transporte urbano (Mekhilef, 2012).

Entretanto, as novas células alcalinas PEMFC (AEMFC) têm surgido como uma grande revolução nesse campo. A substituição do eletrólito alcalino aquoso por membranas poliméricas condutoras de íons OH<sup>-</sup> tem possibilitado enormes avanços destes dispositivos, que têm como uma de suas principais vantagens dispensar o uso de metais preciosos, como a platina, nos eletrodos reduzindo significativamente os custos destas células.

O desafio de pesquisa e desenvolvimento P&D nas AEMFC é aumentar a durabilidade dos eletrólitos uma vez que estes dispositivos já demonstraram densidades de potências equivalentes às de células PEMFC (> 1 W/cm<sup>2</sup>).



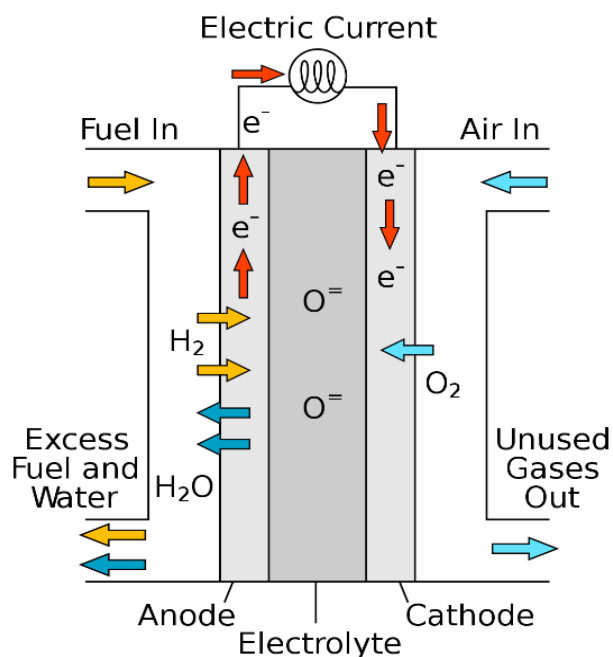
### 2.1.3 SOFC (Solide Oxide Fuel Cell)

A SOFC é composta por um ânodo poroso, um cátodo poroso, e um eletrólito sólido cerâmico pelo qual atravessam íons de oxigênio em direção ao ânodo a fim de reagir com o combustível (EMSA, 2017). Este tipo de célula opera entre as temperaturas de 500°C e 1000°C. A SOFC possui eficiência entre 50% e 60%, mas ao reutilizar o calor gerado, essa eficiência pode chegar a 85% (EMSA, 2017). As altas temperaturas de operação da SOFC permitem o uso de diferentes combustíveis, tais quais o hidrogênio, o etanol, e o diesel. Isso se torna possível pela baixa sensibilidade do dispositivo a impurezas (HOLMGREN, 2019).

Desvantagens graves da SOFC são sua demora de inicialização (US Department of Energy, 2019), e sua baixa resistência mecânica a vibrações, impacto, entre outros.

A SOFC tem vida útil em média de 56.000 horas (HOLMGREN, 2019).

## Estrutura da SOFC



### 2.1.3.1 MS-SOFC (Metal Supported SOFC)

As células a combustível de óxidos sólidos SOFC são as únicas células a combustível estritamente de estado sólido e por isso têm demonstrado uma rápida evolução. Essa característica permite que esse dispositivo seja projetado em diversas configurações, como planar, tubular, e, utilizando as tecnologias da indústria eletrônica, pode-se construir SOFC de filmes finos, permitindo uma ampla gama de soluções tecnológicas.

Nas últimas décadas, com o desenvolvimento das SOFC suportadas no anodo, por exemplo, foi possível baixar as temperaturas de operação da SOFC de cerca de 1000 °C para a faixa de 800-600 °C atuais. Neste contexto, os desenvolvimentos de SOFC têm se diversificado em diferentes designs e composições, visando ampliar a gama de materiais e a redução de temperatura de operação, aumentando o desempenho e a durabilidade destes dispositivos.

Sob essas circunstâncias, as células SOFC suportadas em substratos metálicos (MS-SOFC) apresentam vantagens em relação à SOFC, como alta resistência mecânica, maior

condutividade elétrica e maior distribuição de condução térmica, o que resulta em um tempo de inicialização mais veloz.

	Convencional SOFC cerâmico	Sistemas atuais Metal Suporte	Proposto Metal Suporte
Densidade de Potência (W/cm <sup>3</sup> )	0.9	1	2.3
Tempo de inicialização (operação)	>1h	<10min	<3min
Tolerância Ciclo Térmico	Baixo	Centenas	Milhares
Tolerância a Oxidação	Baixo	Excelente	Excelente

A MS-SOFC apresenta menor custo de produção em relação à SOFC. Estas propriedades da MS-SOFC possibilitaram uma quebra de paradigma no campo das células a combustível ao serem demonstradas com sucesso em aplicações de tração veicular, antes limitadas às células PEMFC.

Dado o potencial da SOFC de ser um conversor multi-combustível, seu uso em veículos tem enorme potencial de contribuir para uma penetração mais rápida de veículos limpos e mais eficiente no mercado, dispensando uma infraestrutura ainda inexistente de produção e distribuição do hidrogênio.

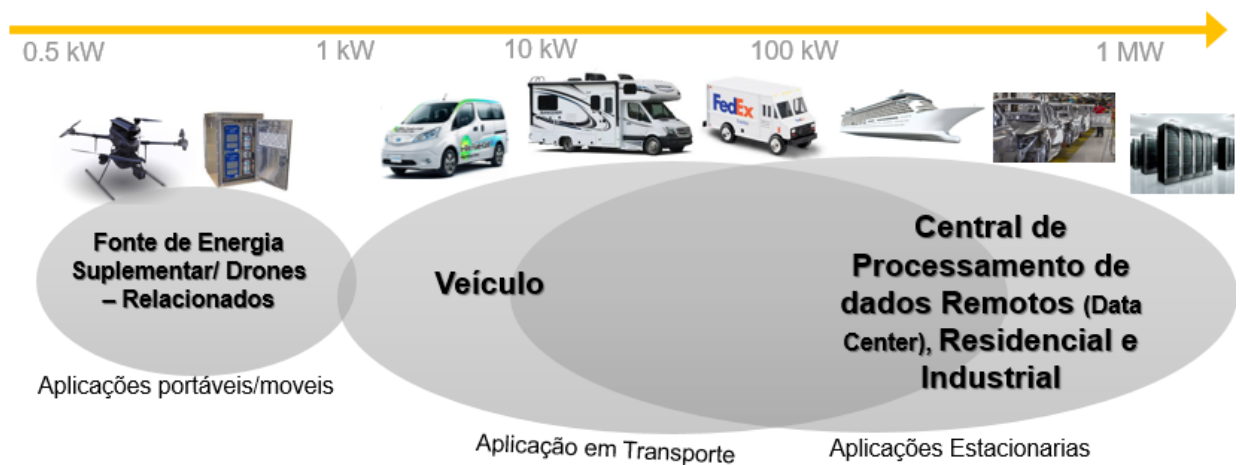
Além disso, deve-se considerar que a possibilidade do uso de combustíveis líquidos permite carregar a bordo elevadas quantidades de energia que viabilizam grande autonomia para veículos pesados.

A tecnologia MS-SOFC promete alta eficiência, altas densidades de potência, boa durabilidade e baixo custo e, portanto, está recebendo muita atenção industrial.

A aplicação deste dispositivo, sem utilização de hidrogênio, pode se dar em diferentes setores e segmentos dependendo da potência gerada necessitada e aplicação desejada.

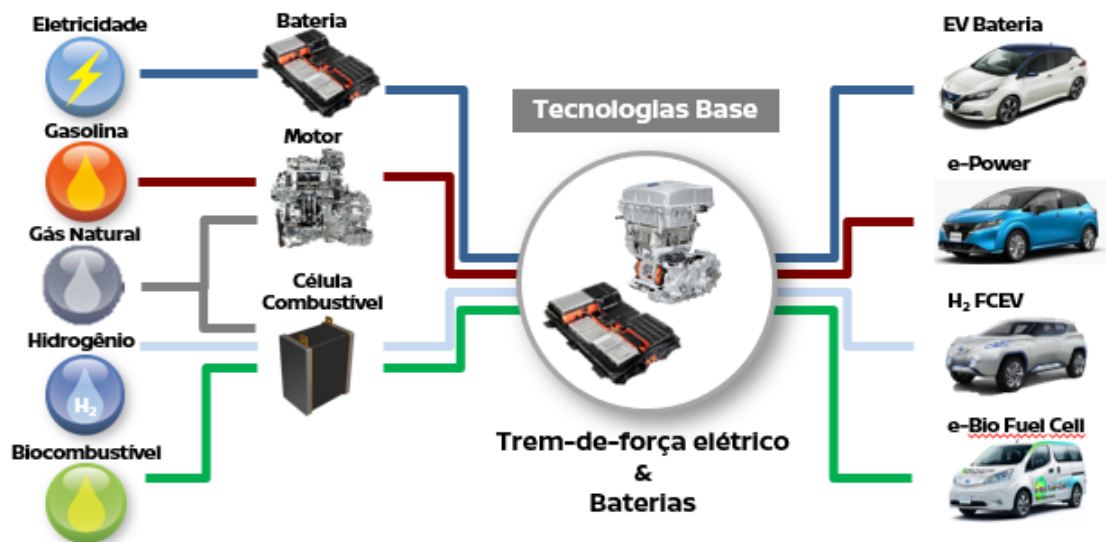
O Sistemas SOFC podem ser aplicados em diferentes frentes como:

- Portáteis/Móveis: Aplicações menor porte e consequentemente menor potência gerada, por exemplo em drones e geradores móveis
- Estacionárias (estáticas): Aplicações de grande consumo, industriais ou centros de tratamento de dados remotos.
- Transporte: Potência dependendo do tipo de aplicação. Potencial para aplicações veiculares, passando por indústria marítima e aeronáutica, além da rodoviária.



- No âmbito veicular a tecnologia SOFC pode ocorrer com diferentes combustíveis, dependendo da aplicação desejada, dando flexibilidade a introdução em diferentes mercados consumidores. O Sistema SOFC proporciona uma fonte de energia de alta eficiência sendo aplicado em conjunto com tecnologias já bastante desenvolvida no setor automobilístico (bateria e trem-de-força elétrico – motor e sistemas de controle).

#### Caso Nissan – Eletrificação com diferentes fontes de energia



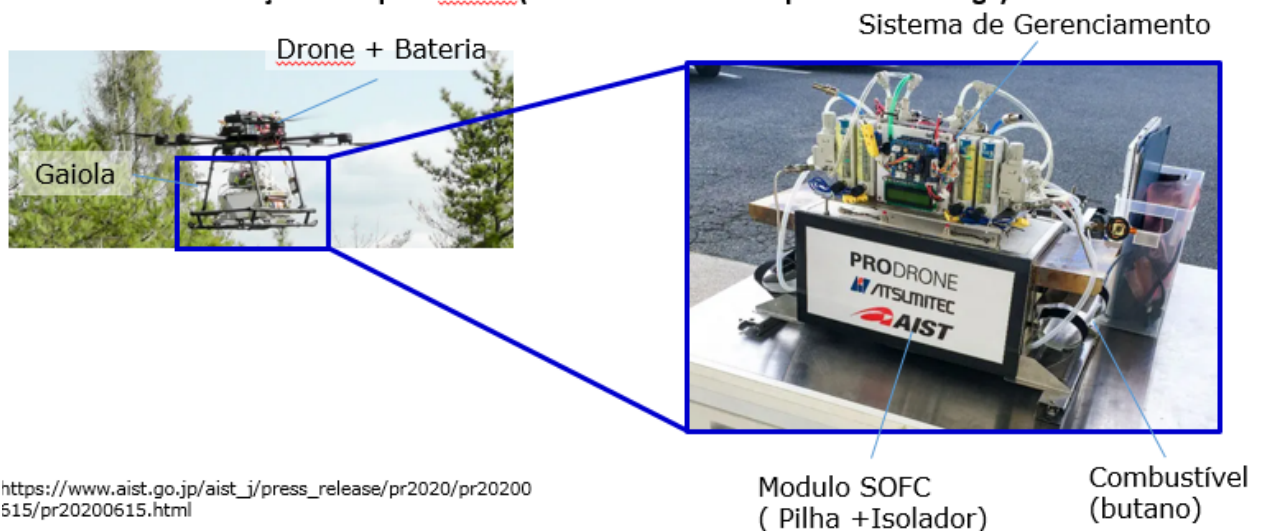
- A aplicação da tecnologia SOFC como fonte suplementar ou alternativa na rede pode ocorrer em diferentes frentes, sistemas suplementares de energia de alta potência podem auxiliar nas metas de neutralidade de emissões de carbono



alterando a fonte primária de energia (carvão, diesel, gasolina, etc) por Biocombustíveis, como etanol. Aplicação de eletrificação de processos produtivos, com utilização de fontes renováveis ou alternativas, é desejável em países que apresentam matriz energética baseada em fontes não renováveis. Os sistemas SOFC utilizando biocombustível, especificamente o etanol de cana-de-açúcar, podem ter papel de destaque para reduções de CO<sub>2</sub>.

- A utilização de diferentes combustíveis (não hidrogênio puro) da tecnologia SOFC é um fator diferencial verso outras tecnologias, um exemplo são projetos para geração de energia para drone com o foco logístico (transporte de carga). A utilização de combustíveis com alta densidade de energia (ex. butano e propano) independente da técnica de armazenamento, proporciona junto ao sistema SOFC maior autonomia e capacidade de carga comparados aos drones à bateria ou PEMFC, este último ainda possui emissão de água líquida como desvantagem.

**Caso Nissan – Utilização SOFC para Drone (aumento alcance e capacidade de carga)**



- Com relação a qualidade do combustível, o contaminante que causa maior degradação ao sistema SOFC é o Enxofre (S). Ações para combater a degradação devido ao enxofre devem ser consideradas. Algumas possíveis ações são:
  - Desenvolvimento/controle do nível de enxofre no processo produtivo para valores característicos para utilização em célula combustível (abaixo de 700ppb);
  - Desenvolvimento de células combustíveis tolerantes à presença do enxofre (novos catalizadores);

- Sistemas compactos para remoção de enxofre (ex. sistema de remoção de enxofre no veículo, ou no próprio posto de combustível).

Nível de contaminantes requerido baseado nos estudos atuais, estado da arte, tem como referência alguns valores a serem considerados:

*(tentative, assuming linear dependence)*

Impurities	Impurity concentration threshold and its precondition (0.2 A cm <sup>-2</sup> )	
<u>Sulfur (S)</u> (H <sub>2</sub> S, COS, CH <sub>3</sub> SH)	700 ppb	50%-prereformed CH <sub>4</sub> fuel (S/C = 2.5) at 800°C, provided the reversible voltage loss is excluded
<u>Chlorine (Cl)</u> (Cl <sub>2</sub> , HCl)	400 ppb	3%-humidified H <sub>2</sub> fuel at 800°C
<u>Phosphorus (P)</u>	3 ppb	3%-humidified H <sub>2</sub> fuel at 800°C
	2 ppb	50%-prereformed CH <sub>4</sub> fuel (S/C = 2.5) at 800°C
<u>Boron (B)</u>	5 ppb	3%-humidified H <sub>2</sub> fuel at 800°C
<u>Siloxane (Si)</u> (D5)	2 ppm	3%-humidified H <sub>2</sub> fuel at 800°C for a 1kW SOFC stack having an anode area of 5000 cm <sup>2</sup>
<u>Sulfur (SO<sub>2</sub>)</u>	4ppm	air (dry) for LSM
	0.5ppm	air (dry) for LSCF

Valor de enxofre referência, limite 700 ppb (700 partes por bilhão).

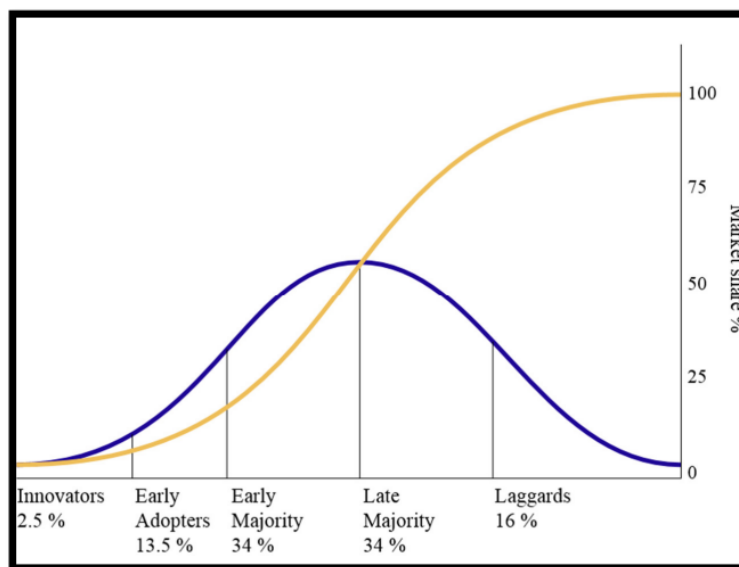
### CAPÍTULO III – MERCADO DE CÉLULA COMBUSTÍVEL

Ainda que seja claro que a indústria automobilística passará por grandes mudanças nos próximos anos, as características dessa transição deixam perguntas: ela será rápida e disruptiva ou incremental e longa?

A implementação de uma nova tecnologia depende, inicialmente, dos desafios por ela enfrentados para se tornar competitiva à atual. Quando essa nova tecnologia se torna competitiva, sua disseminação, em geral, não é imediata, mas sim progressiva, sendo seu ritmo dependente das características socioeconômicas e comportamentais dos consumidores.

Cabe ressaltar que mudanças energéticas usualmente são relativamente lentas, mesmo que haja grande entusiasmo acerca da nova tecnologia. Tal fato é evidenciado ao verificar a curva de penetração de uma nova tecnologia no mercado e os processos de transição energética ao longo da história.

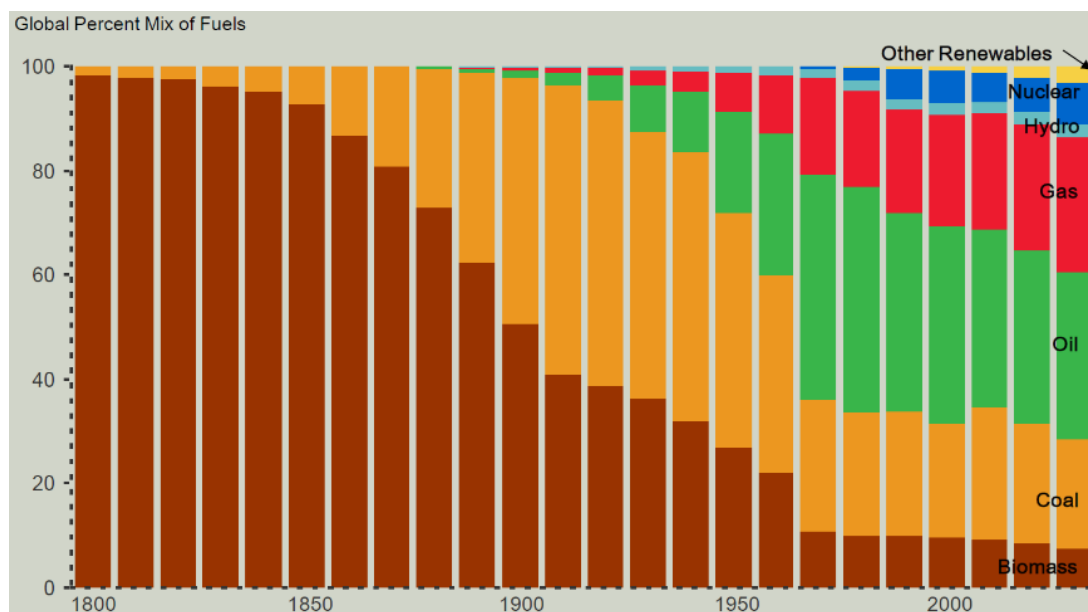
#### Curva de Penetração Genérica em Mercado



Fonte: UK Office for Low Emission Vehicles (2015)

Nota: Baseado em Rogers, Everett (1962). *Diffusion of Innovations*, 1st Edition, 1962, Free Press of Glencoe.

## Adoção Histórica de Combustíveis



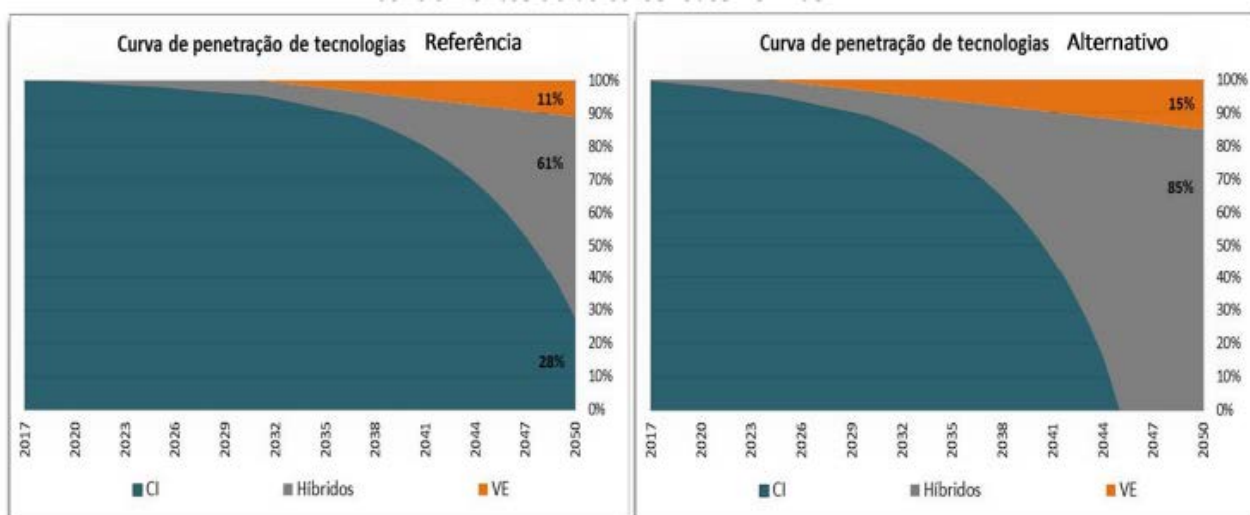
Diante do exposto, para estimar o mercado de célula combustível no Brasil, será feita a suposição de que a curva de penetrabilidade desta tecnologia seria semelhante àquela dos veículos elétricos a bateria.

A EPE identifica para o Brasil dois possíveis cenários de penetrabilidade da nova tecnologia no ramo automobilístico:

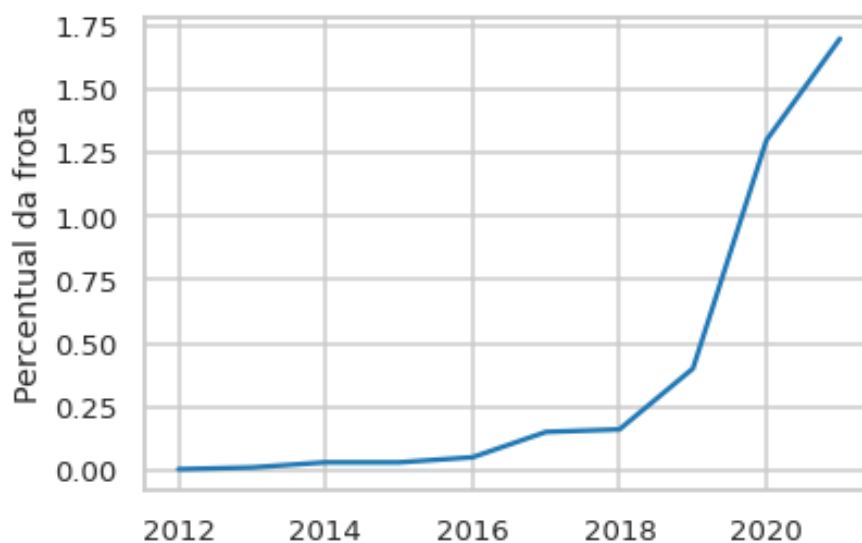
- Cenário de referência (Transição energética longa)
- Cenário alternativo (Transição energética curta)

O cenário de referência se caracteriza por uma entrada lenta da mobilidade eletrificada no Brasil. Desta forma, nele se faz presente a coexistência de veículos a combustão interna e veículos eletrificados, ainda com vantagens àqueles a combustão interna devido às suas faixas de preço.

Por outro lado, o cenário alternativo indica uma rápida entrada dos veículos a célula combustível devido à superação ágil dos gargalos enfrentados pela tecnologia, com substituição total dos veículos a combustão interna até 2045. Para a ocorrência deste cenário, incentivos públicos devem ser adotados, além de investimentos robustos por parte da iniciativa privada para aumentar a escala de veículos eletrificados.



A evolução anual do licenciamento de veículos híbridos e elétricos e sua participação no total da venda de veículos leves desde 2012, segundo a EPE e a ANFAVEA, são apresentadas na figura abaixo.



---

## **CAPÍTULO IV - INFRAESTRUTURA E DISTRIBUIÇÃO**

As principais tecnologias de célula combustível avaliadas neste relatório são abastecidas por hidrogênio ou etanol. Sob este aspecto, um tópico de suma importância a ser abordado é o de infraestrutura e distribuição destes combustíveis.

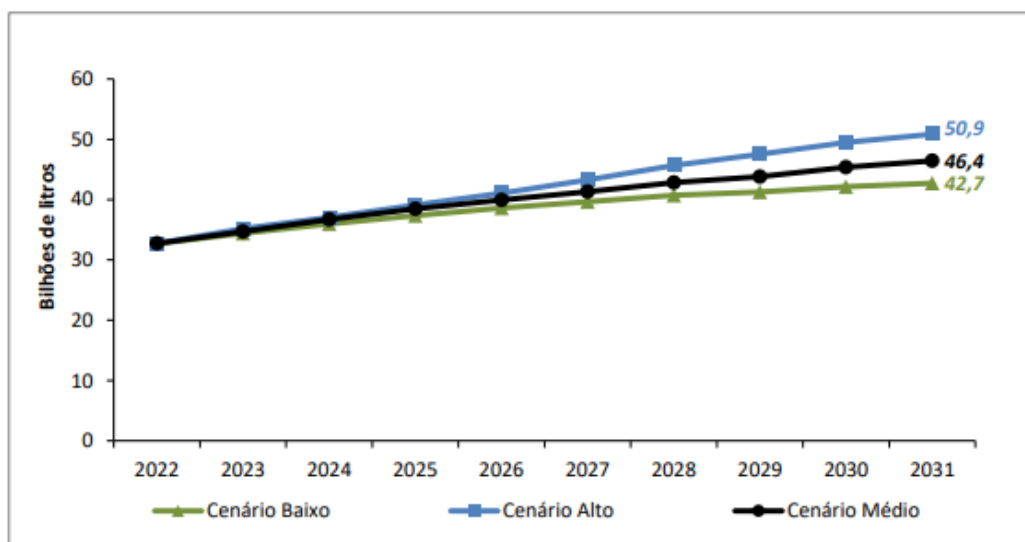
A infraestrutura e cadeia de distribuição do etanol já se encontram presentes e atuando no Brasil, com inúmeros postos de abastecimento, planos e metas traçadas para suprir logisticamente a demanda atual. Caso a tecnologia de célula combustível seja adotada em larga escala no país, essa rede seria de grande utilidade, sendo necessária apenas sua ampliação para que melhor possa se adequar à realidade nacional.

Acerca de preocupações a nível de oferta de etanol ao mercado consumidor caso haja grande penetração de células a este combustível, será feita uma estimativa do suporte à demanda no país.

Em 2020, o Brasil tem uma frota de veículos leves de 68.523.426 unidades (IBGE), os quais têm uma quilometragem média anual rodada de 13.000 quilômetros (KBB). Considerando que um veículo movido a SOFC tem eficiência de 20 quilômetros por litro a um nível de mistura de 97% etanol e 3% água, temos que:

Fazendo uma estimativa assaz arrojada de que todos os veículos leves no Brasil serão movidos a células combustível a etanol, supõe-se que seriam necessários 45 bilhões de litros para atender à demanda caso não haja avanços a nível de redução da concentração de etanol na mistura. Caso o objetivo de que haja concentração de 45% etanol e 55% água na mistura do combustível da célula, esta demanda seria de 20 bilhões de litros.

Abaixo, observa-se a previsão de oferta total de etanol no Brasil feita pela EPE em dezembro de 2021. Dela, depreende-se que a oferta de etanol média conseguiria suprir a demanda nacional mesmo que todos os veículos do país usassem a tecnologia célula combustível movida a este produto no nível tecnológico atual.



Nota: Em 2020, a oferta total de etanol foi de 33,6 bilhões de litros (CONAB, 2021a; MAPA, 2021; ME, 2021).

Quanto à situação do hidrogênio, se fazem necessários investimentos nas áreas de transporte e armazenamento, uma vez que estes processos devem ser realizados com cautela, visto que este combustível implica em uma curva de aprendizado para seu uso de maneira segura e eficiente.

Aliado a esses desafios, cabe ressaltar que, mesmo que as células combustíveis tenham altíssima eficiência como dispositivo, o hidrogênio ainda apresenta menor eficiência energética do que o carregamento de um carro a bateria.

Autonomia também é um aspecto importante. Isso porque, nos processos de hidrólise, compressão e liquefação desse elemento, há gasto de energia significativo, o que não ocorreria em outros veículos elétricos.

O Nordeste, com destaque aos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Bahia, Pernambuco e Piauí, possui potencial ainda inexplorado de produção de hidrogênio.

A produção de hidrogênio verde no Brasil tem atraído a atenção de investidores por todo o mundo, sendo considerado um possível polo produtor de H<sub>2</sub>V para o futuro próximo.

A fim de atrair indústrias voltadas para a produção de hidrogênio e amônia verdes na Bahia, a isenção do ICMS se dará nas saídas internas de energia elétrica, desde que gerada com base em fontes renováveis e destinada a estabelecimento industrial.

---

A movimentação é intensa porque o Brasil “tem plenas condições de assumir posição de liderança dessa nova commodity energética”, afirma um estudo recém-publicado do Grupo de Estudos do Setor Elétrico, ligado à UFRJ.

O Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) se propõe a definir um conjunto de ações a fim de facilitar o desenvolvimento do uso de hidrogênio por meio de avanços em políticas públicas, tecnologia e mercado.

As diretrizes do programa estão estruturadas em seis eixos, que englobam o fortalecimento das bases científico-tecnológicas, a capacitação de recursos humanos, o planejamento energético, o arcabouço legal e regulatório-normativo, a abertura e crescimento do mercado e competitividade e a cooperação internacional.

**O Brasil tem potencial para se tornar polo de produção de H2, o que justifica/ corrobora visão de futuro no incentivo à pesquisa de Fuel Cell.**

A produção anual de hidrogênio de baixas emissões (o que inclui, além da verde, a versão azul, feita a partir de combustíveis fósseis, mas com captura do CO2 no processo) foi de 0,36 milhão de tonelada em 2019 e pode chegar a 7,9 milhões de toneladas em 2030, de acordo com uma projeção da Agência Internacional de Energia.

O hidrogênio verde será parte do processo de descarbonização no Brasil, mas a tecnologia ainda está em desenvolvimento.

As células combustíveis abastecidas por etanol possuem vantagens em relação às abastecidas exclusivamente por hidrogênio, uma vez que já existem cadeias produtivas, políticas públicas e infraestrutura preparadas para este combustível no Brasil, ao contrário do hidrogênio.

Adicionalmente, tecnologias de captura de carbono que podem possibilitar valores negativos da pegada de carbono são altamente desejáveis (Etanol de Segunda Geração + Sistemas de captura e armazenamento de carbono).



---

## **CAPÍTULO V – BENEFÍCIOS AO AMBIENTE**

Um dos principais objetivos mundiais na contemporaneidade é o de preservação do meio ambiente. Veículos movidos a combustíveis fósseis são responsáveis por grandes danos à atmosfera devido a sua grande emissão de gases poluentes.

Carros movidos à célula combustível têm menor impacto ambiental, visto que, no caso do hidrogênio, o único subproduto de sua reação química é água, o que torna esse dispositivo completamente zero emissão. Quanto ao etanol, há emissão de CO<sub>2</sub> pelo escapamento do veículo. No entanto, este dispositivo tem um ciclo considerado limpo, uma vez que o gás liberado no funcionamento da célula é absorvido durante o cultivo da matéria-prima do etanol.

Deve-se ainda considerar que as biorefinarias de etanol e biodiesel têm um enorme potencial ainda inexplorados de produção de insumos, conversão de moléculas e descarbonização de processos que transformariam o biocombustível brasileiro em um poço capturador de carbono (carbon sink), permitindo novos negócios e diminuindo muito o impacto ambiental dos biocombustíveis.

Cabe frisar que veículos elétricos a bateria não são totalmente livres de poluição, tendo em vista que cobalto, cobre e neodímio são alguns dos materiais necessários para a produção das baterias de íon lítio, importantes para o funcionamento desse tipo de carro. A extração desses materiais contamina solos, água e causa desmatamento.

Além disso, a produção das baterias lança no meio ambiente quantidades significativas de monóxido de carbono, substância que colabora com o aumento do efeito estufa no planeta. O Instituto Fraunhofer de Física de Construção (Ifec) informa que cada quilowatt/hora de capacidade elétrica desse componente corresponde à emissão de 125 quilogramas de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

A maioria das baterias, quando obsoletas, são exportadas para a Ásia, onde países como China e Coreia do Sul realizam sua reciclagem. Porém, o processo requer um alto consumo de energia e também gera gases poluentes.

---

## **CAPÍTULO VI – DESENVOLVIMENTO DAS CÉLULAS APONTADAS COMO VIÁVEIS – RECOMENDAÇÕES AO SUBCOMITÊ PD&I**

As tecnologias de célula a combustível têm sido desenvolvidas nas últimas décadas para superar os desafios encontrados na sua aplicação em transportes urbanos.

### **6.1 PEMFC**

A PEMFC é objeto de estudo principalmente na Europa e nos Estados Unidos, visto que esses países têm preferência pelo uso de hidrogênio sobre o etanol. Essas pesquisas indicam pontos ainda a serem desenvolvidos para que este dispositivo possa se tornar comercializável.

É necessário controlar o nível de concentração de água nas regiões desta célula, o que é um desafio nas temperaturas de operação da PEMFC.

É de extrema importância a nível de competitividade de mercado para a PEMFC que haja redução de custos de produção do dispositivo. A forma mais direta de se alcançar este objetivo é encontrando outros materiais para a implementação dos eletrólitos, visto que atualmente se usam metais nobres, encarecendo a célula.

Uma preocupação a ser estudada se trata dos riscos à vida causados indiretamente pelo hidrogênio. Este combustível, devido à sua natureza de alta volatilidade e inflamabilidade, pode ser causa de acidentes graves. A implementação dele em veículos rodoviários deve levar em consideração a segurança pública, uma vez que vazamentos devem ser evitados a todo custo, especialmente em caso de choque mecânico ao trafegar pelas cidades.

### **6.2 SOFC**

Nos últimos dez anos, as SOFC têm sido alvo de pesquisas com a finalidade de reduzir sua temperatura de funcionamento. Houve avanços nessa redução, uma vez que essas células alcançaram bons resultados operando a 700°C. O objetivo é de que essa temperatura chegue a 500°C com sua boa eficiência de potência sendo mantida.

Um problema a ser enfrentado pelas células deste modelo é o desenvolvimento dos materiais adequados para o dispositivo a fim de que nenhuma peça seja danificada

---

durante o seu aquecimento rápido. Este desafio se dá pelo fato de que diferentes materiais possuem diferentes coeficientes de dilatação, o que implica em distintas expansões dentro de uma mesma peça.

As principais pesquisas desenvolvidas atualmente têm como objetivo a miniaturização dos protótipos, em especial do reformador, para o embarque nos veículos e a integração do reformador à célula, o qual deve ter uma taxa de conversão de etanol em H<sub>2</sub> e CO otimizada mesmo com tamanho e peso reduzidos.

A fim de obter a tensão e corrente necessárias para o arranque do veículo, é necessário conduzir pesquisas de associações desta célula em stacks. Devido a suas dimensões, o método indicado para essa associação é o de micro soldagem a laser, o que também garantiria sua selagem, evitando quaisquer vazamentos de combustível para o meio externo. Atualmente poucas empresas no mundo possuem processo de manufatura de células SOFC suportada no metal (MS-SOFC) e condicionamento em pilhas (Stack). O desenvolvimento do processo de manufatura é necessário tanto para fase de pesquisa como industrialização.

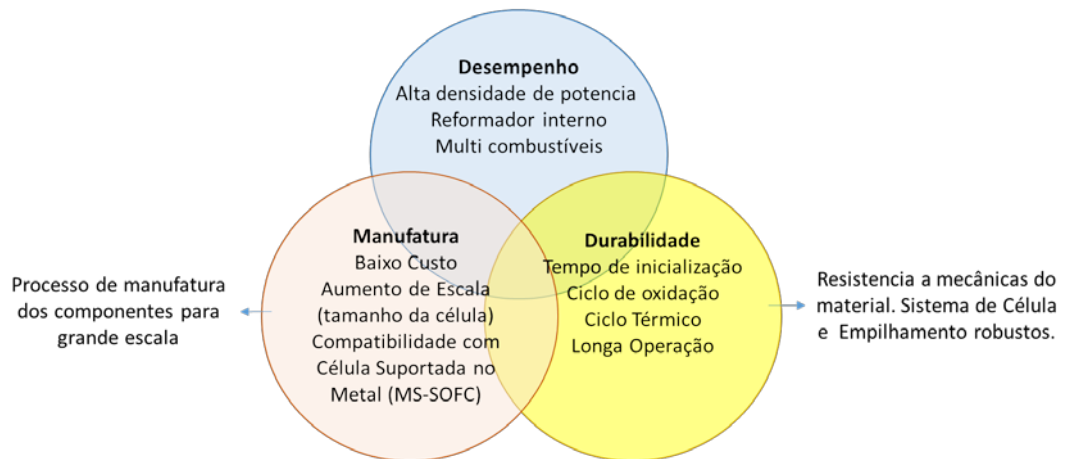
Além destes tópicos, avanços são notados no estudo das geometrias mais eficientes dessa célula a fim de aumentar sua potência, sejam elas planas ou tubulares.

É de importância razoável o aumento de durabilidade e de resistência mecânica deste dispositivo.

Também cabe ressaltar a importância do percentual de mistura etanol-água na célula. O patamar atual de trabalho da SOFC é de 97% etanol, 3% água, mas pode-se trabalhar até a faixa de 55% água, 45% etanol.

Segundo a Nissan, espera-se que próximo a 2030 haja modelos de veículos movidos a SOFC em mercado sendo comercializados no Brasil.

### Requerimentos SOFC aplicação Automotiva (desafios)



## CAPÍTULO VII – ROADMAPPING

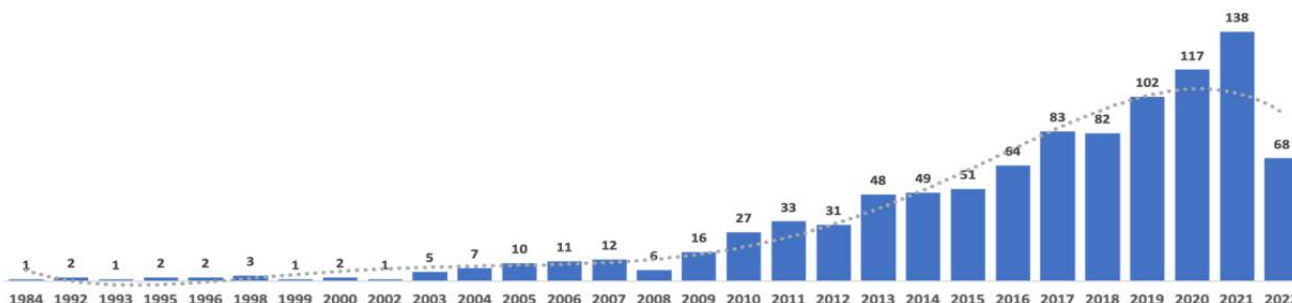
A fim de auxiliar no planejamento estratégico de desenvolvimento de mercado, produto e tecnologia de maneira integrada ao longo do tempo, pode-se elaborar um chamado Roadmap. Isto é, um gráfico unidimensional em formato de linha do tempo contendo informações que concernem aos avanços de pesquisas, patentes e usos práticos da nova tecnologia em questão.

Esta técnica facilita a compreensão de quais são os pontos chave mais avançados para a implementação de produtos, assim como quem são os principais responsáveis por esses avanços.

O primeiro passo para a criação de um Roadmap tecnológico é averiguar a relevância do tema a ser estudado e os agentes de inovação. Isto é possível por meio da busca por artigos relacionados à tecnologia utilizando palavras chave adequadas.

O estudo sobre a evolução de pesquisas e da relevância da Célula Combustível indica crescimento de publicações no tema ao longo do tempo.

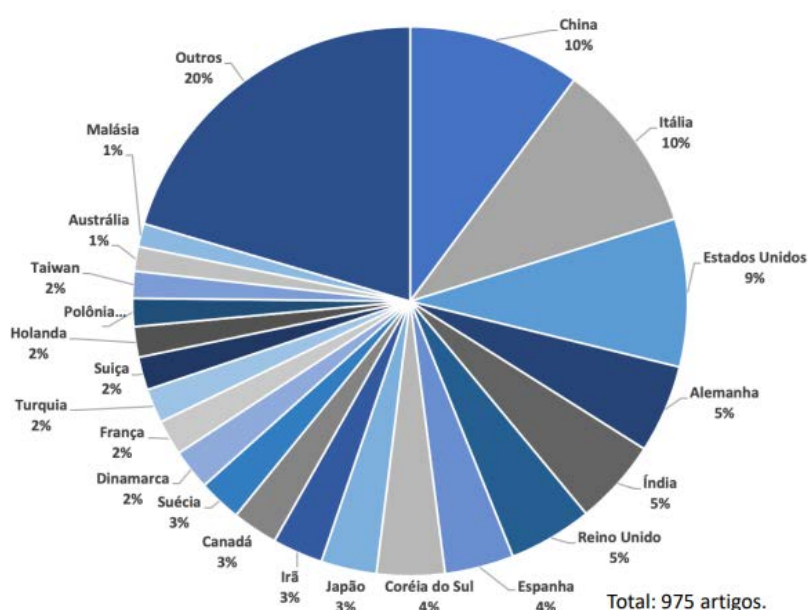
DISTRIBUIÇÃO DAS PUBLICAÇÕES POR ANO - SÉRIE HISTÓRICA



Os dados do gráfico foram coletados na metade do primeiro semestre de 2022.

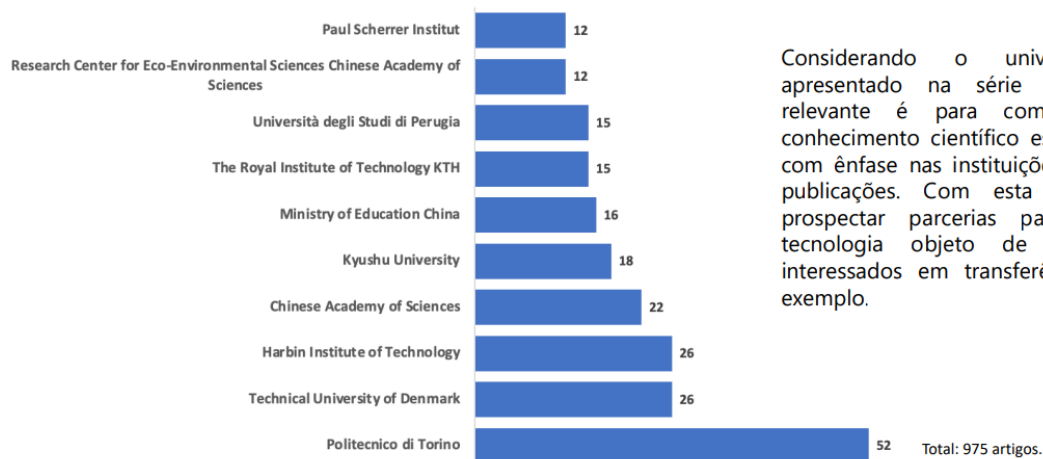
Além disso, verifica-se também a distribuição das publicações por país. Com esta informação é possível prospectar parcerias para desenvolvimento de políticas públicas de cooperação entre países para estudar determinado assunto ou entender potenciais mercados (consumidores ou fornecedores) para a tecnologia que se pretende desenvolver, por exemplo.

DISTRIBUIÇÃO DAS PUBLICAÇÕES POR PAÍS - ORIGEM DA INOVAÇÃO



Observa-se, então, que os principais países pesquisando a tecnologia de Célula Combustível são China, Itália e Estados Unidos, seguidos por Alemanha, Índia e Reino Unido.

DISTRIBUIÇÃO DAS PUBLICAÇÕES POR INSTITUIÇÃO - TOP 10



Considerando o universo de publicações apresentado na série histórica, outra análise relevante é para compreensão de onde o conhecimento científico está sendo gerado, porém com ênfase nas instituições com maior volume de publicações. Com esta informação é possível prospectar parcerias para desenvolvimento da tecnologia objeto de estudo ou potenciais interessados em transferência de tecnologia, por exemplo.

Para aprofundar a compreensão dos temas trazidos nas publicações, deve-se haver maior atenção aos artigos e anos mais atuais, analisando-os a fim de extrair apenas aqueles 100% pertinentes ao objetivo específico do estudo, ou seja, a utilização de células combustíveis.

Para a elaboração de um Roadmap, deve-se haver atenção a todos os estágios de desenvolvimento tecnológico: atual, curto prazo, médio prazo e longo prazo.

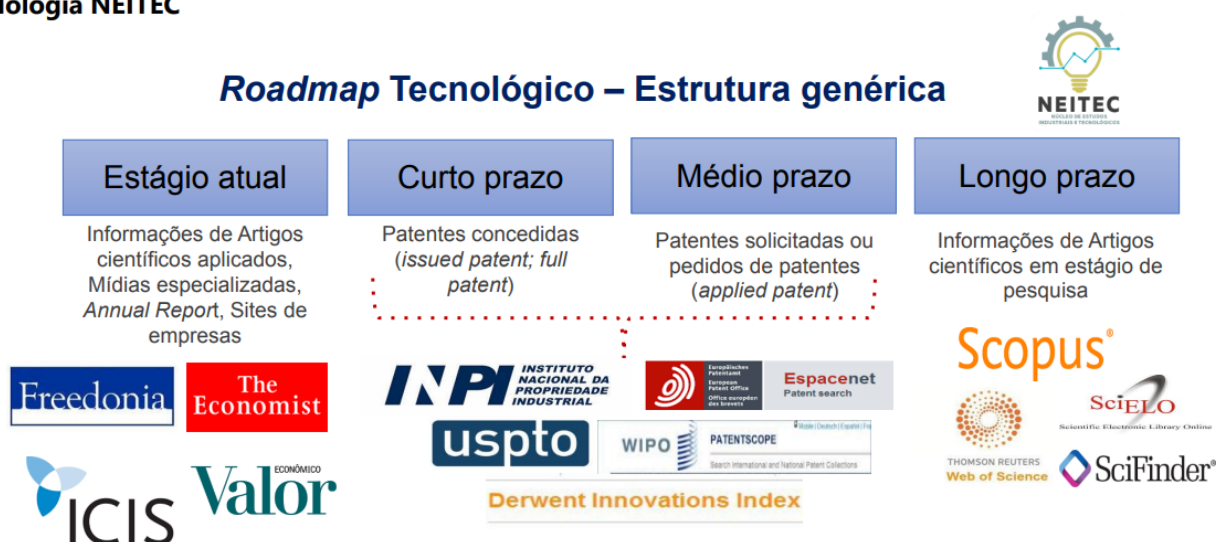
Para pesquisar informações importantes a termo de longo prazo, investigam-se artigos científicos, uma vez que o conteúdo destes está ainda em estágio de pesquisa, indicando que sua implementação prática no mercado não é imediata.

Para a obtenção de informações sobre agentes e conteúdo para médio prazo, observam-se as patentes solicitadas sobre os temas relacionados à tecnologia, e sobre curto prazo, verificam-se as patentes concedidas. Isto porque elas são indicativos de que os agentes em questão já estão se movimentando para a implementação de suas inovações.

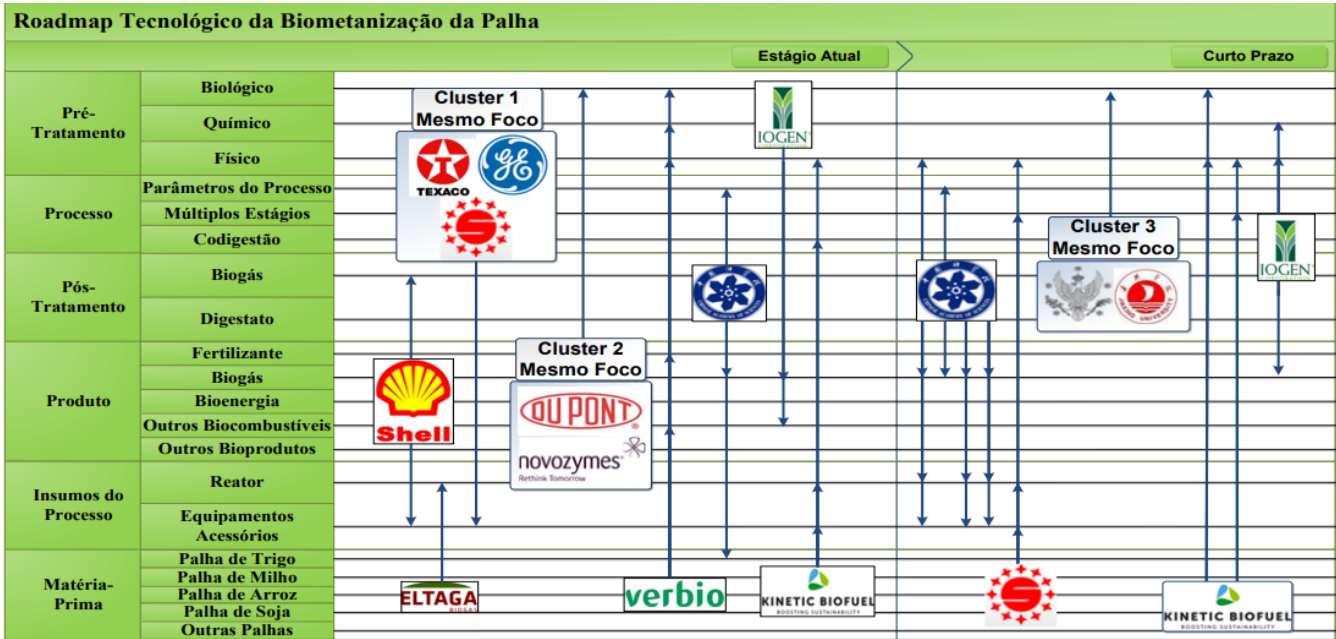
Para informar-se sobre o estágio atual, deve-se atentar-se a artigos científicos aplicados, mídias especializadas, Annual Report, sites de empresas, entre outros. O que for publicado nesses veículos já deve estar em circulação no mercado, ou próximo disso.

Abaixo uma figura sobre a estrutura genérica de um Roadmap, e alguns veículos de busca para a obtenção de conteúdo.

#### Metodologia NEITEC



Para melhor compreensão da leitura de um Roadmap, um exemplo será dado.



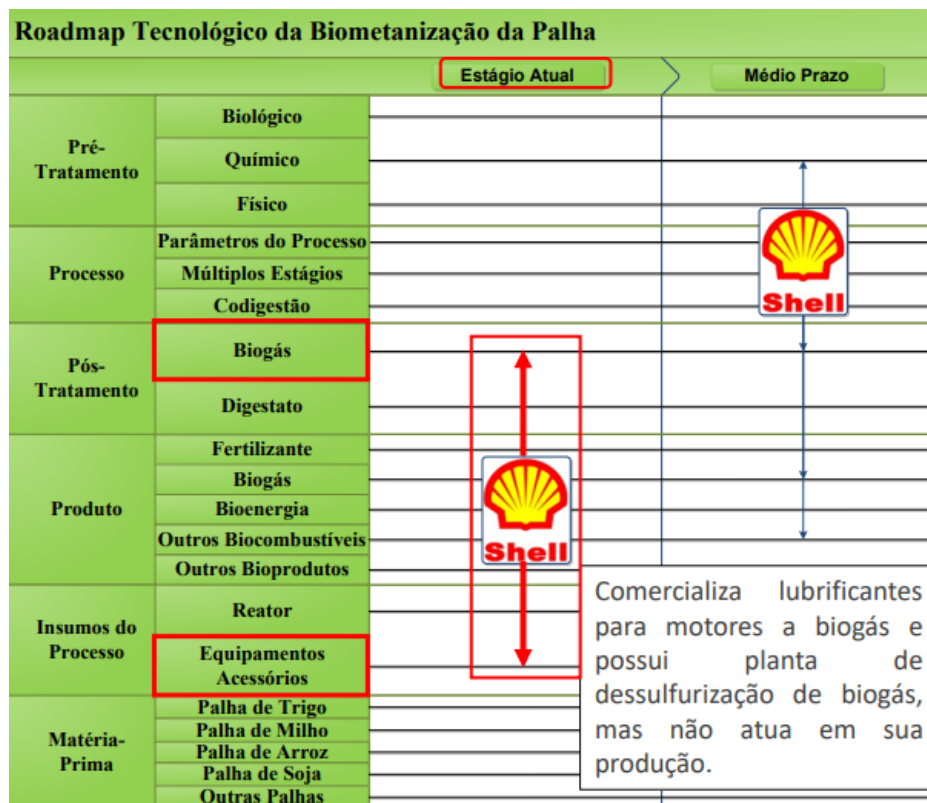
Acima está um recorte de um Roadmap tecnológico acerca da biometanização da palha. Os temas de estudo foram divididos nas linhas do gráfico: Pré-Tratamento; Processo; Pós-Tratamento; Produto; Insumos do Processo; Matéria-prima. Todos esses tópicos foram subdivididos em suas respectivas especificidades.

O recorte mostra os quadros de estágio atual e curto prazo (indicados na parte superior), embora também existam os quadros de médio e longo prazo, os quais estariam mais à direita no gráfico.

Dentro de cada quadro, agentes são indicados apontando com flechas para os temas pesquisados por eles. É possível que mais de um agente tenha pesquisas com o mesmo foco. Isso permite que eles sejam agrupados em Clusters, facilitando a leitura do gráfico.

Neste Roadmap, verifica-se, por exemplo, que a Shell age no estágio atual acerca dos temas de Pós-Tratamento (Biogás), e Insumos do Processo (Equipamentos Acessórios).





Também verifica-se que os agentes do Cluster 2 agem, no estágio atual, sobre Pré-Tratamento (Biológico).

Também nota-se que, no curto prazo, o agente Kinetic Biofuel atua no Pré-Tratamento biológico e no físico, tendo duas frentes de ação no tema físico, destacado por duas flechas apontando para esta linha. Além disso, este agente também atua no Processo, na subcategoria múltiplos estágios.

---

## **CAPÍTULO VIII – CONCLUSÃO**

Os elementos destacados por este relatório permitem que se obtenha um panorama geral da situação atual e das perspectivas do futuro acerca da célula combustível e seu uso no Brasil.

Nota-se o potencial desta tecnologia como alternativa aos veículos movidos a bateria, especialmente entre países produtores de etanol, como o Brasil, na busca pela mobilidade sustentável ao ambiente. No entanto, para que isso se torne efetivamente realidade, são necessários avanços significativos a nível tecnológico, indicados no Capítulo VI deste texto, uma vez que os dispositivos ainda enfrentam barreiras em sua implementação em escala nacional.

A fim de auxiliar no planejamento estratégico de desenvolvimento de mercado, produto e tecnologia de maneira integrada ao longo do tempo, sugere-se também elaboração de um Roadmap Tecnológico da Célula Combustível seguindo as instruções do Capítulo VII deste relatório.

Deve-se também considerar que existe um parque industrial no país que de certo modo pode ser ameaçado com a importação dos veículos elétricos convencionais. Setores da indústria nacional, como o de auto-peças e mesmo o de etanol, podem sofrer retrações, com grande perda de empregos e impacto severo na economia de diversas regiões do país, se tecnologias de veículos elétricos forem simplesmente importadas e introduzidas no contexto nacional. Por outro lado, existem possibilidades diversas, combinando etanol e células a combustível, que podem representar avanços importantes ambientais e tecnológicos para o país. Existe uma curva de aprendizado e de evolução tecnológica que deve contemplar a formação de pessoal e de desenvolvimento de tecnologias. Esta curva está acelerada no mundo evidenciando uma competição acirrada. O Brasil, para se manter na liderança no setor de biocombustíveis e renováveis, deverá traçar rapidamente estratégias efetivas para seus objetivos futuros.

No entanto, cabe destacar a importância da maior adoção a nível global dessa tecnologia a fim de garantir segurança energética ao Brasil, tendo em vista que não é viável ilhar-se tecnologicamente no âmbito da mobilidade urbana do país em relação ao mundo. Esse tipo de fenômeno dificultaria os avanços do setor e colocaria em risco todo o sistema nacional de transporte. Dito isso, o Brasil tem capacidade de se tornar exportador de inteligência acerca deste tema internacionalmente, ampliando sua penetração mundial e colocando o país em posição de protagonismo.

---

É recomendado, portanto, acompanhamento atento e incentivo ao desenvolvimento de célula combustível no Brasil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANP. (2022). Painéis Dinâmicos sobre Combustíveis. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-dinamicos-sobre-combustiveis>. Acesso em 16.01.2022.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2022). Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-de-produtores-e-importadores-de-derivados-de-petroleo>
- BAIN & COMPANY; GAS ENERGY. Potencial de diversificação da indústria química: Químicos com base em fontes renováveis. 2014. Disponível em <https://web.bndes.gov.br/bib/jsui/handle/1408/15322>. Acesso em 07.04.2022.
- BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (2009). *O etanol de segunda geração: limites e oportunidades*. Autores: Sergio Eduardo Silveira da Rosa & Jorge Luiz Faria Garcia. Rio de Janeiro, dezembro 2009. Disponível em: [www.bndes.gov.br](http://www.bndes.gov.br); acesso em 16.11.2021.
- BRASIL – Diário Oficial da União (2021). *RESOLUÇÃO CONTRAN Nº 847, DE 8 DE ABRIL DE 2021*. Altera a Resolução CONTRAN nº 292, de 29 de agosto de 2008, que dispõe sobre as modificações de veículos previstas nos artigos 98 e 106 da Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997, que institui o Código de Trânsito Brasileiro e dá outras providências, para permitir a alteração do diâmetro externo do conjunto pneu/roda para veículos classificados na espécie misto, tipo utilitário, carroçaria jipe. Disponível: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-contran-n-847-de-8-de-abril-de-2021-313197700>. Acesso em 17.11.2021.
- CGEE - Relatório prospecção etanol de segunda geração - E2G 2030. Brasília, DF, 2018. Disponível em: [www.cgee.org.br](http://www.cgee.org.br), acesso em 17.11.2021.
- EIA – U. S. Energy Information Administration (2022). Disponível em: <https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=RBTE&f=M>
- European Commission (2018) Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. Disponível em: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ.L:2018:328:TOC](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ.L:2018:328:TOC)
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2011). Produção de Etanol: Primeira ou Segunda Geração? Brasília, abril 2011. Disponível em: [www.infoteca.cnptia.embrapa.br](http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br) > CITE04; acesso em 16.11.2021.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2021b). *Fact Sheet: Etanol lignocelulósico ou de segunda geração – E2G*. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-628/FS-EPE-DPG-SDB-2021-01-E2G\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-628/FS-EPE-DPG-SDB-2021-01-E2G_PT.pdf).
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2022a). Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2031. Disponível em: [www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br)., acesso em 24.01.2022.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2022b). Sistema de Informação para Energia – SI Energia. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/sienergia>.
- Fonseca, L. M., Parreiras, L. S., & Murakami, M. T. (2020). Rational engineering of the *Trichoderma reesei* RUT-C30 strain into an industrially relevant platform for cellulase production. *Biotechnology for biofuels*, 13, 1-15.
- GRADIN, E. (2021). Apresentação durante Reunião do CT-CF-E2G, em 07.10.2021.
- GRANBIO. (2022). Granbio, Alagoas. Acesso em 12 de Janeiro de 2022, disponível em <http://www.granbio.com.br/>
- Hernandes, T.A.D., Duft, D.G., dos S. Luciano, A.C., Leal, M.R.L.V., Cavalett, O. (2021). Identifying suitable areas for expanding sugarcane ethanol production in Brazil under conservation of environmentally relevant habitats. *J. Clean. Prod.* 292, 125318
- IEA – International Energy Agency (2021). *World Energy Outlook 2021*. Disponível em: [www.iea.org/weo](http://www.iea.org/weo).
- IEA Bioenergy (2019). Task 39: Technical Report - Comparison of Biofuel Life Cycle Analysis Tools Phase 2, Part 2: biochemical 2G ethanol production and distribution. Disponível em: <https://task39.sites.olt.ubc.ca/files/2020/02/Task-39-Phase-2.2-Ethanol-2G-Comparison-of-Biofuel-Life-Cycle-Analysis-Tools.pdf>
- IEA Bioenergy (2020). Task 41: Advanced Biofuels –Potential for Cost Reduction. Disponível em: [https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/02/T41\\_CostReductionBiofuels\\_11\\_02\\_19-final.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/02/T41_CostReductionBiofuels_11_02_19-final.pdf)
- ITAÚ BBA (2020). Diálogos do setor sucroenergético\_ItaúBBA\_Nov20. Comunicação pessoal.

JORNAL DA UNICAMP (2019). Enzima modificada pode aumentar a produção de etanol de segunda geração. Disponível em: <https://www.unicamp.br/unicamp/ju/noticias/2019/04/09/enzima-modificada-pode-aumentar-producao-de-etanol-de-segunda-geracao>. Acesso em 03 Feb 2022.

LALLEMAND, 2021. Apresentação realizada para o Grupo de trabalho sobre E2G, no âmbito do subcomitê do ciclo Otto do Comitê Técnico – Combustível do Futuro.

LORENZI, B. R., ANDRADE, T. H. N. (2019). O Etanol de Segunda Geração no Brasil: Políticas e Redes Sociotécnicas. Ver. Bras. Ci. Soc. 34 (100), 2019, <https://doi.org/10.1590/3410014/2019>.

MACHADO, L. G. L., COSTA, F. C. (2020). *Estudo do Mercado do Etanol de 2ª Geração no Brasil*. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). USP – Engenharia Química.

MELO, N. R. (2020). Etanol 2G: Processo Produtivo e seu Contexto Atual no Brasil. Monografia de graduação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Química.

MORAIS, P. P; PASCOAL, P. V; ROCHA, E. DE SÁ; MARTINS, E. C. A. (2017). Etanol de 2 geração: atual produção e perspectivas. Bioenergia em Revista: Diálogos, ano 7, n. 1, p. 45-57, jan./jun. 2017. Disponível em: <http://fatecpiracicaba.edu.br/revista/index.php/bioenergiaemrevista/article/viewFile/229/141> Acesso em 16.11.2021.

Milanez, A. Y. et al. (2015). De promessa a realidade: como o etanol celulósico pode revolucionar a indústria da cana-de-açúcar: uma avaliação do potencial competitivo e sugestões de política pública. BNDES Setorial, 41, 237–94.

MITSUHARA, A. T. (2021). Revisão sobre o potencial de produção de etanol de segunda geração a partir da palha de cana de açúcar. Trabalho de conclusão de curso, UNESP, Araraquara, 13 agosto 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/214122>. Acesso em 16.11.2021.

NDC Registry (2021). Brazil's Nationally Determined Contribution. Disponível em: [www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/Party.aspx?party=BRA](http://www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/Party.aspx?party=BRA).

OECD/IEA (2017). Technology Roadmap Delivering Sustainable Bioenergy. Disponível em: [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Technology\\_Roadmap\\_Delivering\\_Sustainable\\_Bioenergy.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Technology_Roadmap_Delivering_Sustainable_Bioenergy.pdf)

PROJETO SUCRE (2019). Guia de Boas Práticas de Remoção da Palha da Cana-de-Açúcar. Outubro de 2019.

PROJETO SUCRE (2020). Relatório Final 2020 <https://lnbr.cnpem.br/wp-content/uploads/2020/07/SUCRE-Project-Final-Report.pdf> e Guia de Boas Práticas de Remoção da Palha da Cana-de-Açúcar. Outubro de 2019. <https://lnbr.cnpem.br/wp-content/uploads/2020/07/Tutorial-Mapas-de-Palha-Projeto-SUCRE.pdf>

RAÍZEN. (2018). *Tecnologia em Energia Renovável. Etanol de Segunda Geração*. Raízen, São Paulo. Fonte: [https://www.google.com/search?q=sede+da+raizen&rlz=1C1GCEA\\_en&oq=sede+da+raizen&aqs=chrome..69i57.2976j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8&safe=active&ssui=on](https://www.google.com/search?q=sede+da+raizen&rlz=1C1GCEA_en&oq=sede+da+raizen&aqs=chrome..69i57.2976j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8&safe=active&ssui=on)

RAÍZEN. (2021). *Raízen passa a fornecer EcoÁlcool à toda linha de perfumaria do Grupo Boticário*. Raízen, São Paulo. Fonte: <https://www.raizen.com.br/sala-de-imprensa/raizen-passa-a-fornecer-ecoalcohol-a-toda-linha-de-perfumaria-do-grupo-boticario>.

UNICA. A Energia da Cana-de-Açúcar. 2a edição ed. São Paulo-SP: [s. n.], 2007. E-book. Disponível em: [https://unica.com.br/wp-content/uploads/2019/08/cana\\_livro\\_unica.pdf](https://unica.com.br/wp-content/uploads/2019/08/cana_livro_unica.pdf). Acesso em: 17.11.2021.

Walter, A. et al. (2014). Brazilian sugarcane ethanol: developments so far and challenges for the future. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, 3(1), 70-92.

Balanco Energético Nacional, 2021.

Wang, M; Han, J; Dunn, JB; Cai, H; Elgowainy, A. (2012). Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use. ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS 7:1-13. doi:10.1088/1748-9326/7/4/045905

W.G. Hettinga, H.M. Junginger, S.C. Dekker, M. Hoogwijk, A.J. McAloon, K.B. Hicks (2009). Understanding the reductions in US corn ethanol production costs: An experience curve approach, Energy Policy, Volume 37, Issue 1, 2009, Pages 190-203.

Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) System, Bosch Global, disponível em: <https://www.bosch.com/stories/sofc-system/>. acesso em: 9 nov. 2021.

Mekhilef, S., Comparative study of different fuel cell technologies, 2012. Encontrado em <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032111004709>

---

EMSA. (2017). MARITIME STUDY ON THE USE OF FUEL CELLS IN SHIPPING. Retrieved from <http://www.emsa.europa.eu/news-a-press-centre/externalnews/download/4545/2921/23.html>

Holmgren, E., Sjölin, K., A Proton Exchange Membrane & Solid Oxide Fuel Cell comparison Possible fuel cells and fuel costs, 2019. Encontrado em <https://odr.chalmers.se/bitstream/20.500.12380/301883/1/A%20Proton%20Exchange%20Membrane%20%20Solid%20Oxide%20Fuel%20Cell%20comparison.pdf>

Barbir, F. (2005). Pem Fuel Cells: Elsevier Academic Press.

YERGIN, D. The New Map (2021 p.327)

Singh, M., Solid oxide fuel cell: Decade of progress, future perspectives and challenges, 2021. Encontrado em <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319921021704>