

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA-UFBA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL-PEI

Linha de pesquisa: Desenvolvimento sustentável de produtos

Doutorando: Álvaro Jose de Araújo Filgueira

Mail: alvarofilgueira@hotmail.com

Contato: (83) 996853196

Orientadora 01 : Karen Valverde Pontes Vater

Orientador 02: Felipe Andrade Torres

**VIABILIDADE TECNOLÓGICA, ECONÔMICA, AMBIENTAL E SOCIAL
DOS VEÍCULOS MOVIDOS A CELÚLAS DE COMBUSTIVEL DE OXIDO
DE SÓDIO**

Salvador-BA
Setembro/2025

I.1 Introdução

O setor de transporte é um dos setores mais importantes em que as emissões de gases com efeito estufa (GEE) são as mais elevadas, contribuindo significativamente para o agravamento do aquecimento global. Apesar de esforços tecnológicos, como o desenvolvimento de tecnologias verdes, o transporte continua sendo uma das principais fontes de emissões climáticas (Seçilmiş & Akar, 2024).

Segundo o International Council on Clean Transportation (2025) e a International Energy Agency (2025), o setor de transportes responde por cerca de 25% das emissões globais de gases de efeito estufa e, caso não sejam adotadas estratégias ambiciosas de eficiência energética, eletrificação, e combustíveis de baixo carbono para mitigar essas emissões crescentes, o consumo energético nos sistemas de transporte poderá dobrar até 2050, ampliando ainda mais as emissões.

Segundo Li (2024) As células de combustível de óxido sólido (SOFC, do inglês *Solid Oxide Fuel Cells*) se destacam entre as tecnologias de conversão de energia por oferecerem alta eficiência elétrica, flexibilidade na escolha de combustíveis e menor impacto ambiental em comparação com outras alternativas.

Vários estudos internacionais têm investigado perspectivas tecnológicas e econômicas de sistemas baseados em SOFC. Athanasiou et al. (2022) apresentam as SOFCs como uma alternativa tecnologicamente viável e economicamente promissora (a longo prazo) para aplicações específicas de cogeração já existentes, enquanto Nam et al. (2018) posicionam as SOFCs em um cenário de ponta, onde sua viabilidade depende do sucesso de tecnologias emergentes e da capacidade de integrar-se a complexos sistemas energéticos do futuro.

No contexto brasileiro, a pesquisa sobre sistemas baseados em SOFC aplicados a veículos leves, com foco técnico-econômico, é um campo em desenvolvimento, mas com alguns trabalhos e iniciativas notáveis. Um dos focos mais atuais e relevantes vem de um grupo de pesquisadores brasileiros do Centro de Inovação em Novas Energias (CINE), que inclui a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Eles têm investigado as células a combustível de óxidos sólidos suportadas em metais (MS-SOFCs).

Segundo Antunes, et al. (2025) do ponto de vista tecnológico, as MS-SOFCs são apontadas por sua robustez, flexibilidade de combustível (especialmente com biocombustíveis como etanol, biogás e biometano, abundantes no Brasil), alta eficiência e capacidade de superar limitações das baterias convencionais. Enquanto do ponto de vista econômico o estudo ressalta o custo significativamente menor das MS-SOFCs em comparação com as SOFCs tradicionais, o que as torna uma alternativa atraente para a descarbonização da mobilidade no Brasil, sem os altos custos associados ao hidrogênio ou às limitações de recarga das baterias.

Apesar dos avanços, lacunas importantes ainda precisam ser superadas para viabilizar a implementação ampla dessa tecnologia no Brasil.

Segundo Athanasiou et al., (2022), dentre os principais desafios identificados na literatura estão o custo de fabricação dos sistemas, a durabilidade dos componentes sob condições reais de operação e a necessidade de modelos mais robustos de análise econômica e ambiental para o contexto nacional. Nesse sentido, esta pesquisa se propõe a investigar de forma integrada e sistêmica a viabilidade tecnológica, econômica, ambiental e social da utilização do etanol como combustível em veículos elétricos movidos a células de combustível de óxido sólido no Brasil, contribuindo para a compreensão das barreiras potenciais e limitações dessa aplicação inovadora no cenário nacional.

I.2 Justificativas

O estudo Gonçalves *et al.* (2021) identificou uma significativa contribuição dos veículos leves para as emissões globais de GEE e que os impactos das mudanças climáticas na

população são significativos. Como alternativa para reduzir as emissões de CO₂, foi apresentada a tecnologia dos Veículos Elétricos de Célula de Combustível (FCEV), especificamente a Célula de Combustível de Óxido Sólido (SOFC).

É neste cenário que os veículos SOFCs movidos a etanol no Brasil são justificados. No Brasil, existe forte e significativa contribuição dos transportes com emissões de CO₂, em especial veículos leves, devido a um crescente aumento dos gases do efeito estufa (GEE). As dimensões continentais do Brasil dificultam os investimentos com infraestruturas para novas tecnologia como o hidrogênio verde e veículos 100% elétrico, aliado a um potencial regional já consolidado do etanol, com infraestrutura de abastecimento consolidada e em pleno funcionamento, aliado as descobertas de novas lacunas, somado a comprovação científica desse estudo com a viabilidade dos SOFCs, teremos assim, um estudo plenamente justificado.

Segue respectivamente os aspectos variados das contribuições e lacunas exploradas nesse estudo:

- ✓ Evidenciar a possibilidade da redução dos gases do efeito estufa (GEE) gerados pelo setor dos transportes;
- ✓ Evidenciar a possibilidade da redução de investimentos na estrutura para implantação devido a substituição de outras fontes alternativas por SOFCs, como por exemplo carros elétricos e/ou hidrogênio verde;
- ✓ Evidenciar a abundância de potenciais regionais da fonte primária natural como o biocombustível etanol;
- ✓ Identificação e exploração das lacunas na literatura.

Segundo Li et al. (2024), apesar do potencial promissor das SOFCs, vários desafios precisam ser enfrentados para garantir uma adoção generalizada, incluindo o alto custo dos materiais e fabricação, a confiabilidade e a durabilidade devido às altas temperaturas operacionais ainda são um assunto de pesquisa ativa, e mais trabalho é necessário para melhorar a eficiência e o desempenho desta tecnologia.

Como diferencial, para mitigação desses desafios este estudo vai realizar um estudo prospectivo no capítulo IV com especialistas para identificar soluções e melhorias futuras nos sistemas de operação de veículos SOFCs.

A lacuna da pesquisa identificada no estudo de Vargas et al. (2021) é a ausência e/ou escassez de dados atualizados e confiáveis sobre veículos movidos a células de combustível de óxido sólido (SOFC), em relação a modelagem ambiental precisa e a avaliação dos impactos do ciclo de vida (ACV) para tecnologia SOFC.

Como diferencial, esse estudo vai estudar no capítulo V, a análise de ciclo de vida (ACV) do veículo SOFC em um estudo caso do aspecto ambiental com análise da incerteza da informação.

Conforme estudo de Qin et al (2022), apesar de amplas perspectivas de aplicação dos veículos SOFCs, vários desafios técnicos existentes, incluindo o longo tempo de inicialização e problemas de gerenciamento de energia, também são discutidos. Diante desses desafios, futuras direções de pesquisa são propostas para melhorar a maturidade técnica do sistema SOFC para automóveis.

Como diferencial e diante desses desafios, este estudo vai estudar no capítulo VII (Pilares tecnológicos dos veículos SOFCs: um estudo de caso sobre a viabilidade do etanol no Brasil).

Em síntese, o estudo é justificado, tanto pela contribuição ambiental e identificação da viabilidade dos veículos SOFCs no Brasil com viés tecnológico, econômico, ambiental e social de forma sistêmica e integrada, possibilitando o aumento da adoção dessa tecnologia e melhor direcionamento de políticas públicas; quanto por abranger diversas lacunas identificadas na revisão da literatura.

I.3 Objetivos

Questão problema

A utilização do etanol em veículos elétricos movidos a célula de combustível de oxido solido (SOFC) é viável no Brasil?

Objetivo geral

Identificar e analisar a viabilidade tecnológica, econômica, ambiental e social da utilização etanol em veículos elétricos movido a célula a combustível de óxido sólido (SOFC) no Brasil.

Objetivos específicos

- ✓ Identificar os benefícios e barreiras impactantes na adoção dos veículos SOFCs;
- ✓ Medir o nível de maturidade tecnológica dos veículos SOFCs no Brasil;
- ✓ Analisar o ciclo de vida dos veículos SOFCs movidos com Etanol no Brasil; no aspecto ambiental;
- ✓ Medir a percepção dos fatores/indicadores do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS), na adoção dos veículos SOFCs no Brasil;
- ✓ Comparar o sistema de operação das células de combustíveis de veículos SOFCs movido a Etanol no Brasil, em referência as tecnologias aplicadas em outros países com veículos SOFC.

I.4 Hipóteses da pesquisa

Com o propósito de atender e confirmar aos objetivos da pesquisa, o estudo pauta-se em sete hipóteses a seguir:

- ✓ Hipótese (H1): A utilização do etanol em veículos elétricos movidos a célula de combustível de oxido de sódio (SOFC) tem viabilidade tecnológica no cenário brasileiro;
- ✓ Hipótese (H2): A utilização do etanol em veículos elétricos movidos a célula de combustível de oxido de sódio (SOFC) tem viabilidade econômica no cenário brasileiro;
- ✓ Hipótese (H3): A utilização do etanol em veículos elétricos movidos a célula de combustível de oxido de sódio (SOFC) tem viabilidade ambiental no cenário brasileiro;
- ✓ Hipótese (H4): A utilização do etanol em veículos elétricos movidos a células de combustível de oxido de sódio (SOFC) tem viabilidade social, referente aos ODS no cenário brasileiro;
- ✓ Hipótese (H5): O sistema de operação das células de combustíveis de veículos SOFC com etanol é sustentável e pode melhorar significativamente, em referência as tecnologias aplicadas em outros países com veículos SOFC.

I.5 Estrutura e organização

Este trabalho é composto de sete capítulos, além da introdução (Capítulo I). Também conta com uma seção dedicada às conclusões.

O Capítulo II tem como objetivo fazer uma revisão de literatura sobre os temas estudados nesse trabalho. Inicialmente é apresentada uma revisão sobre veículos elétricos, na qual são abordados uma evolução até os dias atuais, as alternativas existentes para 100% elétrico e híbridos até os veículos SOFCs atuais. Também está apresentada nesse capítulo uma revisão sobre as células de combustíveis, veículos SOFCs, viabilidade, benefícios e desafios tecnológicos, econômicos, ambiental e social, adoção de veículos SOFCs com biocombustíveis, Ciclo de vida dos veículos SOFCs no Brasil e Lacunas e direções futuras.

O Capítulo III organiza e resume a metodologia de cada etapa da pesquisa

Os quatro capítulos seguintes vão apresentar os resultados da pesquisa desenvolvida nesse trabalho, aos quais serão organizados em forma de artigos a serem submetido /publicados em veículos de comunicação nacionais e internacionais.

O Capítulo IV será dedicado à apresentação dos resultados obtidos na pesquisa de campo que vai identificar as Barreiras, soluções e melhorias futuras no Sistema de Operação dos veículos SOFC com utilização do etanol, um estudo prospectivo na percepção dos especialistas.

O Capítulo V será dedicado à apresentação dos resultados obtidos na pesquisa de campo que vai analisar o Ciclo de Vida - ACV do veículo SOFC, um estudo de caso do aspecto ambiental.

O Capítulo VI será dedicado à apresentação dos resultados obtidos na pesquisa de campo que vai analisar os fatores ODS e sociais impactantes na viabilidade da adoção dos veículos SOFCs movido a etanol no Brasil.

O Capítulo VII será dedicado à apresentação dos resultados obtidos do estudo de caso sobre a viabilidade tecnológica e econômica dos veículos SOFCs com etanol no Brasil. Será investigado o nível de maturidade e rota tecnológica, qual o balanço de massa e energia.

O pilar econômico será realizado uma análise técnica do sistema de operação dos veículos SOFCs com etanol, tem como objetivo avaliar se é financeiramente sustentável e rentável a longo prazo. Assim, será considerado o CAPEX (investimentos), OPEX (custos) e receitas, na avaliação financeira.

E no final será realizado um fechamento com as conclusões e demais consideração finais da tese.

CAPÍTULO II – Revisão da literatura e estado da arte

II.1 Introdução

Nessa secção será trabalhado os principais pontos para desenvolvimento do estudo, será tratado os veículos elétricos, células de combustíveis, SOFCs, viabilidade, benefícios e desafios tecnológicos, econômicos, ambientais e sociais.

II.2 Veículos Elétricos

Conforme Batista et al. (2020), os veículos elétricos são veículos automotores que utilizam pelo menos um motor elétrico para a sua propulsão, diferenciam-se dos veículos convencionais por utilizarem um sistema de propulsão elétrica e não um sistema com motor a combustão interna (MCI). São caracterizados pela alta eficiência energética e baixo nível de emissão de poluentes.

Conforme Delgado et al. (2017), o combustível dos veículos elétricos é a eletricidade, que pode ser obtida de diferentes maneiras: conectando diretamente à fonte externa de eletricidade, por meio de plugs ou utilizando cabos aéreos; recorrendo ao sistema de indução eletromagnética; a partir da reação do hidrogênio e oxigênio com água em uma célula de combustível; ou por meio da energia mecânica de frenagem (frenagem regenerativa, ao se frear o veículo). Essa eletricidade, em seguida, é armazenada em baterias químicas recarregáveis, e posteriormente converte a mesma energia armazenada para energia elétrica, o motor elétrico por sua vez, o transforma em energia mecânica, possibilitando a locomoção do veículo (Batista et al. 2020).

Conforme Delgado et al. (2017), os veículos elétricos se dividem em cinco tipos tecnologias diferentes a seguir:

- Elétricos puros (BEVs/EVs): funcionam exclusivamente com energia elétrica armazenada em baterias;

- Híbridos puros (HEVs): priorizam o motor a combustão interna, com apoio de um motor elétrico em baixa potência, sendo considerados híbridos paralelos;
- Híbridos plug-in (PHEVs): semelhantes aos HEVs, mas permitem recarga externa e apresentam maior autonomia que os BEVs, devido ao uso combinado de combustíveis fósseis ou biocombustíveis;
- Híbridos de longo alcance (E-REVs): priorizam o motor elétrico, mas contam com motor a combustão para alimentar um gerador que mantém a carga mínima da bateria;
- Veículos a célula de combustível (FCEVs): utilizam hidrogênio (PEM) ou etanol em células de combustível (SOFCs) para gerar eletricidade, apresentando autonomia de média a alta.

II.3 Células de combustíveis

As células de combustível têm suas origens no século XIX, com os experimentos de William Grove em 1839. Apesar de pioneira, a tecnologia só passou a ser considerada viável no século XX, impulsionada pelas demandas aeroespaciais e militares (Guaitolini & Fardin, 2017). Desde então, os avanços permitiram o surgimento de diferentes tipos de células, classificadas conforme o tipo de eletrólito e temperatura de operação (Yatoo et al., 2023).

As células de combustível são dispositivos eletroquímicos que convertem energia química diretamente em energia elétrica e calor. Essa conversão ocorre sem combustão direta, utilizando uma reação redox entre o combustível (hidrogênio ou compostos como o etanol) e o oxigênio atmosférico. O combustível é oxidado no ânodo, liberando elétrons, enquanto o oxigênio é reduzido no cátodo. Os íons gerados atravessam o eletrólito, completando o circuito e gerando eletricidade (Qasem & Gubran, 2024).

As células a combustível podem ser classificadas em diferentes tipos, de acordo com o eletrólito utilizado, a faixa de temperatura de operação e suas aplicações, Figura 1:

Figura 1

Tabela Comparativa dos Tipos de Células a Combustível

Tipo de Célula	Eletrólito	Temp. de Operação	Vantagens	Desvantagens	Aplicações Típicas
PEMFC (Proton Exchange Membrane)	Membrana polimérica	70–90 °C	Alta eficiência em baixa potência; Ideal para mobilidade	Custo elevado (platina); Necessita H ₂ puro	Veículos, eletrônicos portáteis
SOFC (Solid Oxide)	Óxido cerâmico (Zircônia dopada)	650–1000 °C	Alta eficiência; Reformador interno; Cogeração	Inicialização lenta; Degradação térmica	Geração estacionária, cogeração
MCFC (Molten Carbonate)	Carbonatos fundidos (Li/K/Na)	~650 °C	Alta flexibilidade de combustível; Alta eficiência	Corrosão; Instabilidade química	Usinas de energia, hospitais
DMFC (Direct Methanol)	Membrana polimérica	50–120 °C	Uso direto de metanol; Simples operação	Baixa eficiência; Permeação de metanol	Eletrônicos portáteis, sensores
AFC (Alkaline)	KOH (hidróxido de potássio)	65–220 °C	Alta eficiência; Histórico espacial (NASA)	Sensível ao CO ₂ ; Requer O ₂ puro	Espaço, submarinos
PAFC (Phosphoric Acid)	Ácido fosfórico	150–205 °C	Boa tolerância a impurezas; Tecnologia madura	Baixa eficiência; Tempo de aquecimento	Prédios comerciais, energia estacionária

Nota: Elaborado pelo autor, baseado nos autores citados acima.

A tabela apresenta uma comparação entre seis tipos principais de células a combustível com base em seus materiais, faixas de temperatura de operação, vantagens, limitações e aplicações típicas. Essa análise é essencial para entender quais tecnologias são mais adequadas a diferentes usos, desde dispositivos portáteis até usinas estacionárias.

Segundo Hariharan et al. (2024) as SOFCs oferecem uma alternativa atraente entre às tecnologias de energia, destacam pela alta eficiência, flexibilidade e baixa emissões quanto ao combustível, tolerando gases reformados como o etanol.

Vários estudos (Qasem & Gubran, 2024) destacam que o uso de SOFCs em veículos é promissor, sobretudo em aplicações de longa distância e veículos pesados. A possibilidade de utilizar etanol como combustível renovável, especialmente o de 2ª geração (a partir de resíduos), reforça sua viabilidade em países como o Brasil.

Entretanto, desafios como tempo de partida, durabilidade dos materiais, custo e controle térmico ainda limitam a adoção massiva dessa tecnologia nos veículos comerciais (Wang et al., 2024).

II.4 Veículos SOFCs

Para Shcheklein et al. (2021), existe um interesse crescente em células de combustível de óxido sólido (SOFC) para propulsão de veículos, tendo em vista que as SOFCs possibilitam a operação com uma variedade de combustíveis, como metano, monóxido de carbono, hidrogênio, metanol, etanol.

Segundo Elsevier (2016), a montadora japonesa Nissan apresentou no Brasil o primeiro protótipo de veículos movido a célula de combustível de oxido de solido do mundo (SOFC de 5 KW), utiliza o bioetanol já existente no Brasil, o protótipo baseado na minivan elétrica a bateria e-NV200 (Íons de lítio de 24 kWh) apresenta uma autonomia de 600Km.

Um módulo SOFC de 12 kW acoplado a um reformador de combustível de oxidação parcial foi integrado a um veículo elétrico Nissan Leaf modificado. O veículo atingiu alcances de 264 km para GNC, 705 km para GNL e 823 km para GLP, em comparação com o alcance de 170 km alcançado pelo veículo original BEV (Bessekou et al., 2019).

A tecnologia SOFC converte bioetanol em H₂, gerando eletricidade em uma pilha. Armazenada em uma bateria, essa eletricidade alimenta um motor, impulsionando o veículo. O calor produzido é reutilizado no processo. Com alta eficiência, a SOFC permite alcance semelhante a veículos a gasolina, destacando sua sinergia entre produção elétrica e geração de H₂ (Nissan, 2016).

Segundo Bessekou *et al.* (2019), os veículos SOFCs têm apresentados alta eficiência elétrica e compatibilidade com a infraestrutura de combustíveis atuais, como GNC, GNL e GLP, que podem ser usados como combustíveis para os veículos SOFCs. Assim, viabilizam sua aplicação no setor de transportes.

II.4.1 Viabilidade, benefícios e desafios tecnológicos

Conforme Ma et al. (2021), os benefícios dos veículos com células a combustível de óxido sólido (SOFCs) movidos a etanol são alta eficiência energética, flexibilidade de combustível, menor emissão de poluentes, ruído e vibrações reduzidos, utilização do calor residual, reabastecimento rápido, entretanto no viés tecnológico, apresentam os desafios deposição do carbono (coking), alta complexidade térmica e risco de danos estruturais, tempo de aquecimento inicial (startup lento), custo de produção elevado, durabilidade e ciclagem térmica, complexidade do sistema de reforma e operação, mostrados na Figura 2.

Figura 2*Desafios Tecnológicos e Soluções dos SOFCs movidos a Etanol*

Desafios Tecnológicos	Solução Propostas pelos autores
Deposição de carbono no ânodo (coking)	Utilizar reformador externo para evitar pirolise e reduzir gradientes de temperatura. Além disso, operar com alta razão de vapor/etanol (>3) ou alta razão de recirculação (>60%) para diluir o carbono e evitar depósitos.
Alta complexidade térmica e risco de danos estruturais	A adoção de reformadores externos isotérmicos e gestão de calor integrada com aproveitamento do calor residual da própria célula.
Tempo de aquecimento inicial (startup lento)	Uso de reforma autotérmica do etanol, que é parcialmente exotérmica, reduzindo a necessidade de fontes de calor externas e permitindo a partida mais rápida, ideal para aplicações móveis.
Custo de produção elevado	Sem solução técnica direta no estudo, os autores reconhecem como desafios e sugerem que o avanço tecnológico e aumento da escala de produção podem reduzir os custos no futuro.
Durabilidade e ciclagem térmica	Uso de SOFC com suporte metálico, que oferece maior robustez mecânica e tolerância térmica para aplicações móveis.
Complexidade do sistema de reforma e operação	Projeto de um sistema SOFC-APU compacto e integrado, com recirculação de gases do anodo e reformador autossuficiente em calor, garantindo operação estável e com menor consumo de combustível

Nota. Dados extraídos de Ma et al. (2021). O estudo analisa um novo sistema de unidade auxiliar de potência (APU) SOFC com reforma de etanol a bordo visando aplicação em veículos. Essas soluções foram discutidas com base em simulações e análises termodinâmicas do sistema completo de célula a combustível com etanol reformado a bordo.

As pesquisas mais recentes (2018–2024) apontam que avanços em materiais, como dopagem de perovskitas, nanoestruturação e novas técnicas de sinterização, estão sendo explorados para reduzir a temperatura de operação, melhorar a durabilidade e viabilizar a comercialização em larga escala, mostrado na Figura 3.

Figura 3*Linha do Tempo – Evolução dos Veículos SOFCs: Benefícios, Desafios e Soluções*

Ano	Estudo/Autor	Benefícios identificados	Desafios Tecnológicos	Soluções/Avanços Tecnológicos
2018	Ni et al. Raduwan et al.	Visão futura promissora para transporte, eficiência e flexibilidade de combustível	Necessidade de redução de custo, maior escala, durabilidade com combustíveis sólidos, materiais adequados	Desenvolvimento de eletrólitos finos e condutores de prótons; foco em reduzir temperatura operacional
2020	Yang et al.	Alta eficiência devido à alta temperatura operacional	Instabilidade termomecânica, vedação difícil, vida útil limitada	Desenvolvimento de novos materiais catódicos para ILT-SOFCs (temperatura intermediária)
2021	Ma et al.	Alta eficiência (até 55%), menor emissão, operação silenciosa, calor residual aproveitável, reabastecimento rápido	Coking, complexidade térmica, startup lento, custo alto, durabilidade, reforma complexa	Uso de reforma autotérmica, recirculação de gases, suporte metálico, gestão térmica integrada

2022	Qin Li Delibas	Potencial para transporte de longa distância com flexibilidade de combustível	Longo tempo de inicialização, estresse térmico, durabilidade	Uso de perovskitas dopadas para reduzir temperatura e melhorar eficiência eletrocatalítica
2023	Luo Mehdi Chen	Eficiência elevada, baixa emissão, aplicações sustentáveis e versáteis	Falta de durabilidade, materiais caros, necessidade de novos métodos produtivos	Sinterização em baixa temperatura, modificação de superfície para melhorar catodos
2024	Marcantonio Helal	Geração de eletricidade limpa, alta eficiência, potencial sustentável	Materiais caros, projeto de plantas complexas, estabilidade dos eletrodos e eletrólitos	Uso de materiais nano estruturados para melhorar transporte iônico e eletrônico

Nota. Até 2018, os desafios eram mais estruturais e de viabilidade (custo, materiais e escalabilidade); a partir de 2020, o foco mudou para estabilidade térmica, vida útil e operação em baixas temperaturas; desde 2021, há uma ênfase clara em soluções práticas, como recirculação de gases, suporte metálico, e reformadores eficientes; em 2023 e 2024, os avanços se concentram em materiais nano estruturados, técnicas de fabricação avançadas e melhorias na durabilidade e custo-benefício.

Nesse contexto, essas evoluções mostram uma trajetória positiva rumo à maturidade técnica dos veículos SOFCs, embora ainda haja barreiras a superar, especialmente no que se refere a comercialização em larga escala. Para mitigação dos desafios, aumento da eficiência, redução dos custos e comercialização dos veículos SOFCs, se faz necessário investigação adicional e pesquisas aprofundadas e prospectivas com especialistas na área para aplicações portáteis. Assim para esse fim, este estudo pretende utilizar a metodologia prospectiva Delphi no capítulo IV, pois permitirá antecipar barreiras, possíveis soluções inovadoras e melhoria futura com base na percepção e consenso dos especialistas, alinhando a revisão teórica à aplicação prática e à prospecção tecnológica.

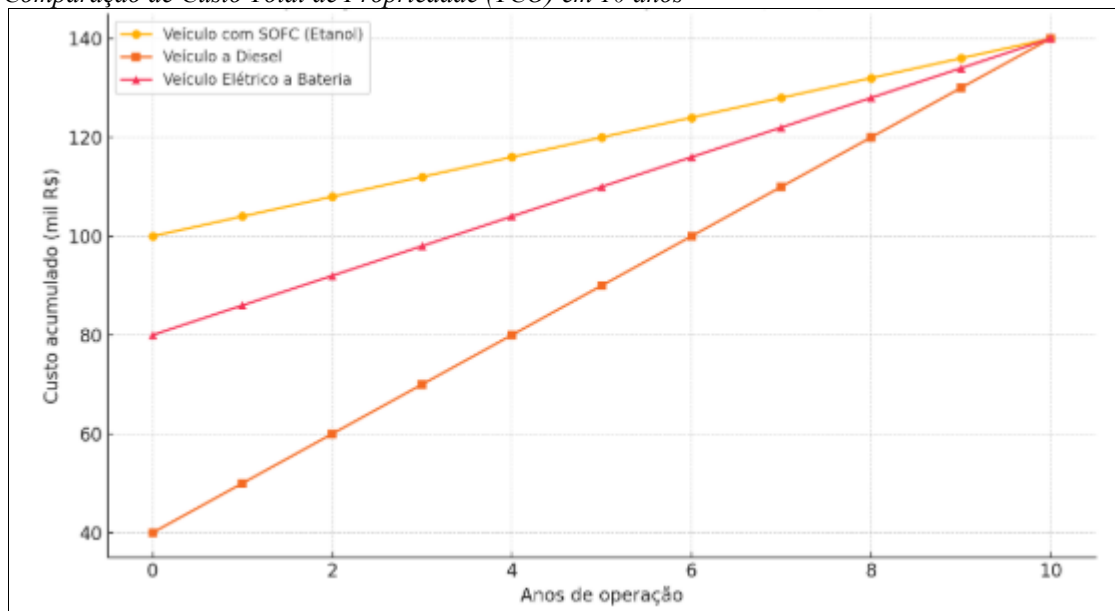
II.4.2 Viabilidade, benefícios e desafios econômicos

Conforme Antunes et al. (2025) a viabilidade econômica de veículos SOFCs a bordo, movidos a biocombustíveis, é uma área crítica de pesquisa, devido à crescente demanda por soluções de transporte sustentáveis e eficientes. Embora existam avanços e vantagens técnicas promissoras (eficiência energética, versatilidade no uso combustíveis como o etanol, biogás e biometano), ainda persistem desafios relevantes, especialmente quanto à competitividade econômica e à maturidade tecnológica desses sistemas.

Segundo Nam et al. (2018) os custos iniciais dos SOFCs são mais altos do que os sistemas a diesel, mostrado na Figura 4, indicando que mesmo assim podem se tornar economicamente viáveis em regimes de operação contínuo. Relevante no contexto de veículos leves em operação urbana, onde a regularidade do uso pode compensar o maior investimento inicial por meio de maior taxa interna de retorno (TIR) ao longo do ciclo de vida do sistema.

Figura 4

Comparação de Custo Total de Propriedade (TCO) em 10 anos



Nota: adaptado de Nam et al. (2018)

1. SOFC movido a etanol evidencia um investimento inicial mais alto (~ R\$100 mil), mas com operação mais eficiente, com custo anuais menores.
2. Veículos a diesel evidenciam menor custo inicial, porém com maiores custos operacionais ao longo do tempo
3. Veículos elétrico a bateria evidencia custos inicial intermediário, com custos operacionais moderados.

Observa-se que a partir do 7º ano, o veículo com SOFC apresenta custo total mais baixo que o diesel. Quando comparado ao veículo elétrico, o SOFC se aproxima em competitividade entre o 8º e o 10º ano. O *payback* indireto (ponto de equilíbrio em custo acumulado frente a alternativas) é alcançado entre o 6º e o 8º ano, dependendo do cenário de comparação.

Segundo Fiuza et al. (2012) o etanol de cana-de-açúcar no Brasil apresenta alto retorno energético (EROEI ~ 8 a 10), a estrutura logística consolidada, com custos de transporte de aproximadamente 0,44 GJ por m³ e centrais que atendem culturas regionais bem distribuídas, contribuem com a redução dos custos logístico e otimiza sua aplicação em SOFCs móveis e corporativos.

O estudo de Gonçalves et al. (2021) comparou o uso de etanol e gasolina em veículos SOFCEV no Brasil, indicando que o etanol tem mais vantagens econômicas, ambientais e sociais do que a gasolina.

O fator econômico, fortemente associado ao preço do combustível, é relevante. Geralmente, a população tende a escolher o combustível mais barato e, consequentemente, um combustível com menor variação de preço é mais interessante. Isso ocorre porque o governo deve oferecer benefícios para um combustível com menor variação de preço, evitando incentivos para um combustível que frequentemente é mais caro para a população. De acordo com as informações apresentadas neste estudo, o etanol apresenta menos fatores que podem causar flutuações de preço. Consequentemente, o biocombustível é a melhor alternativa nesse aspecto (Gonçalves et al., 2021).

Em resumo, evidencia-se que todos os autores, de uma forma geral, convergem na ideia de que, apesar do avanço da tecnológica dos SOFCs movidos a biocombustíveis, a viabilidade econômica ainda depende de otimizações técnicas, redução dos custos de produção, modularidade, escalabilidade e maior maturidade da cadeia de suprimento desses sistemas.

Nesse contexto, essas evoluções tecnológicas mostram uma trajetória positiva rumo a viabilidade econômica, embora ainda haja desafios a superar, especialmente no que se refere a comercialização em larga escala. Assim, se faz necessário uma investigação e pesquisas aprofundadas como propõe este estudo.

Desta forma, pretende-se aprofundar estudo da viabilidade dos veículos SOFCs movido a biocombustíveis no capítulo VII (Pilares tecnológicos e econômico dos veículos SOFCs: um estudo de caso sobre a viabilidade do etanol no Brasil), pois, permitirá uma avaliação técnica-econômica do Sistema Operacional dos veículos SOFC movido à etanol, com o objetivo de fazer um paralelo com a literatura estudada e evidenciar a viabilidade econômica, confirmando se é financeiramente sustentável e rentável a médio e longo prazo.

II.4.3 Viabilidade, benefícios, desafios ambientais e avaliação do ciclo de vida.

Segundo Salim et al. (2022), para avaliar a viabilidade ambiental, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta essencial e viabiliza quantificar os impactos ambientais de sistemas baseados em células a combustível de óxido sólido, analisando desde a extração de recursos até o descarte.

Demonstrações práticas como o projeto Nissan e-Bio Fuel-Cell já mostraram autonomia superior a 600 km (Nissan, 2016). Esse cenário é reforçado pela robusta produção nacional de etanol, que ultrapassa 30 bilhões de litros ao ano, consolidando o biocombustível como solução estratégica para reduzir emissões e apoiar a mobilidade sustentável (USDA/FAS, 2024).

Observa-se que a importância da Análise da Viabilidade Ambiental do Ciclo de Vida (ACV) de sistemas baseados em SOFCs e etanol é enfatizada pela literatura técnica. Essa metodologia permite quantificar emissões e uso eficiente de recursos ao longo de todas as etapas do ciclo de vida dos combustíveis e do sistema, sendo fundamental para comparar alternativas tecnológicas e orientar políticas públicas e investimentos em transporte sustentáveis. As seções a seguir descrevem os principais aspectos desse tópico.

O estudo de Spreafico et al. (2023) fez uma análise prospectiva da ACV aplicado aos SOFCs, que indicou uma redução de mais de 50% no potencial de aquecimento global (GWP) em comparação às SOFCs atuais, principalmente pela melhoria na potência específica e redução de massa dos componentes (Spreafico, 2023). O maior impacto ambiental é atribuído ao ânodo ($\approx 80\%$), sendo o NiO o material mais relevante no GWP total.

II.4.3.1 Integração com Etanol no Contexto Brasileiro

De acordo com a UNICA- União da Indústria de Cana-de-Açúcar (2021), o Brasil possui ampla disponibilidade de etanol, sustentada por uma infraestrutura consolidada de produção e distribuição, o que o torna uma alternativa viável para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e acelerar a descarbonização do setor de transportes.

Conforme Aarão et al. (2024), a tecnologia de células de combustível de óxido sólido (SOFCs) oferece uma solução estratégica e promissora para a microgeração distribuída no Brasil, especialmente quando combinada com etanol, uma fonte de energia limpa e abundante no país. A alta eficiência e a flexibilidade de combustível das SOFCs representam um avanço crucial na transição para um ecossistema energético sustentável e neutro em CO₂.

II.4.3.2 Lacunas e Desafios

Muitos estudos não avaliam de forma completa todas as categorias de impacto ambiental, entre outros. Como exemplo, identifiquei que o estudo de Salim et al. (2022) revelou várias lacunas na literatura; vários estudos avaliaram a LCA usando indicadores específicos ou muito poucos, e os poucos indicadores podem não avaliar suficientemente o impacto ambiental das SOFCs.

Tanto Gonçalves et al. (2021) quanto Vargas et al. (2021) reforçam a mesma ideia central: O etanol em SOFCs é uma alternativa promissora no setor automotivo brasileiro, mas os estudos ainda carecem de dados primários robustos e validação experimental. A Figura 6 mostra as principais contribuições e limitações do uso do etanol em SOFCs, no setor automotivo brasileiro.

Figura 6

Contribuições e limitações do uso do etanol em SOFCs, no setor automotivo brasileiro.

AUTOR/ANO	ESCOPO/ESTUDO	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES	LIMITAÇÕES
Gonçalves et al. 2021	Análise de viabilidade de etanol e gasolina em veículos SOFC no Brasil	<ul style="list-style-type: none"> - Etanol apresenta melhor desempenho econômico e ambiental que a gasolina. - Considera emissões de GEE, custo do combustível e disponibilidade no Brasil. - Reforça o papel estratégico do bioetanol na matriz energética brasileira. 	<ul style="list-style-type: none"> - Escassez de dados experimentais locais. - Simulações baseadas em parâmetros internacionais, não necessariamente refletindo a realidade do setor automotivo nacional.
Vargas et al. 2021	Avaliação de ciclo de vida comparando PEMFC vs. SOFC em veículos leves no Brasil	<ul style="list-style-type: none"> - Mostra que SOFCs movidos a bioetanol podem ser competitivos ambientalmente. - Identifica o potencial de redução de impactos climáticos frente a veículos convencionais. - Enfatiza a vantagem do bioetanol brasileiro por ser renovável e amplamente disponível. 	<ul style="list-style-type: none"> - Incertezas nos inventários de ciclo de vida. - Necessidade de mais estudos quantitativos com dados primários. - Não aborda detalhadamente desafios técnicos de operação contínua com etanol.

Nota: Elaborado pelo autor baseado na revisão de literatura.

II.4.3.3 Perspectivas futuras

A análise das 58 patentes selecionadas revela que as futuras SOFCs podem ter (em média) +53% de potência específica, o que pode levar a uma redução de massa de 56% em comparação com as atuais SOFCs. A ACV prospectiva mostra uma redução média do potencial de aquecimento global (PAG) de 50%. O futuro layout tubular é mais sustentável do que o planar em cerca de 15%. O PAG diminui com o aumento da potência específica e em células com tamanhos e espessuras menores. Finalmente, as futuras SOFCs dúcteis, dedicadas a aplicações móveis e cargas dinâmicas, têm um PAG maior do que as futuras SOFCs estacionárias, mas ainda igual à metade das SOFCs atuais. Todos esses resultados, portanto, confirmam o potencial dos desenvolvimentos patenteados das SOFCs na sustentabilidade ambiental, argumentando em favor de seu desenvolvimento industrial e uma aplicação mais massiva no futuro (Spreafico, 2024).

Segundo Mehmeti et al. (2016) futuros estudos de ACV, deveriam incorporar análises de impacto ambiental que utilizem múltiplos critérios e sejam dinâmicas e detalhadas, incluindo também uma avaliação econômica, para permitir comparações mais precisas dos resultados. Assim fica evidente, que para alcançar metas ambientais e socioeconômicas ambiciosas, uma nova estrutura metodológica será necessária, que considere todas as etapas e os impactos do ciclo de vida de forma abrangente.

Conclui-se que a literatura analisada mostra que veículos movidos a SOFCs abastecidos com etanol possuem forte potencial ambiental, sobretudo quando projetados com layout tubular, materiais otimizados e integração com energia renovável. A ACV prospectiva demonstra que essas tecnologias podem ser competitivas e alinhadas com os compromissos

ambientais do Brasil, embora ainda sejam necessárias avaliações mais abrangentes e localizadas para confirmar sua viabilidade total.

Desta forma, pretende-se aprofundar estudo da viabilidade ambiental dos veículos SOFCs movido a biocombustíveis no capítulo V (Análise do Ciclo de Vida - ACV do veículo SOFC: um estudo de caso do aspecto ambiental dos SOFCs), pois, permitirá uma avaliação ambiental em especial o Ciclo de Vida dos SOFCs movidos à etanol, com o objetivo de comparar com a literatura estudada, evidenciar a redução de emissões e uso eficiente de recursos, confirmando se tem viabilidade ambiental.

II.4.4 Viabilidade, benefícios e desafios sociais

Essa seção revisa a viabilidade socio ambiental, benefícios e desafios sociais dos veículos SOFCs movidos a etanol forma integrada, considera o setor de transporte e seus impactos na cadeia produtiva e utilização final, assim como também os fatores de aceitação social relacionados com suas contribuições com as metas diversas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Ainda apresenta lacunas e direções futuras específicas

.II.4.4.1 Benefícios Sociais dos Biocombustíveis no Setor de Transporte

Segundo Prasad et al. (2023) os biocombustíveis ajudam a "economia e os meios de subsistência rurais". Afirma que os biomateriais, quando sintetizados a partir de resíduos, são uma indústria emergente que fornece "excelentes oportunidades de emprego" para muitos negócios, impulsionando o desenvolvimento socioeconômico. Complementa que a produção de biocombustíveis deve contribuir para o "desenvolvimento social e econômico" de comunidades.

Martinelli e Biber-Freudenreich (2022) observam que políticas como o RenovaBio possuem impacto positivo sobre as cadeias de produção e distribuição do etanol no Brasil, promovendo inclusão regional e incentivo à economia circular. Entretanto, alertam para a necessidade de salvaguardas sociais eficazes.

II.4.4.2 Fatores que Influenciam a Aceitação Social

Gupta et al. (2025) utilizaram a Teoria do Comportamento Planejado (TPB) para investigar a percepção pública sobre combustíveis com mistura de etanol. Ficou evidenciado que práticas sustentáveis e percepção de benefício ambiental são fatores-chave para aceitação da tecnologia. A confiança do consumidor está diretamente ligada à presença de políticas públicas e incentivos governamentais.

Kunskaja e Budzyński (2024), por sua vez, destaca que o transporte sustentável abrange mais do que tecnologia e economia. Ele aborda a inclusão social, a conservação ambiental e a viabilidade a longo prazo. A igualdade social garante o acesso equitativo ao transporte, as considerações econômicas destacam os custos de curto prazo e os benefícios de longo prazo, e a saúde e o bem-estar são afetados por padrões de transporte sustentáveis.

II.4.4.3 Impactos Sociais Diretos e Indiretos

Para Sureau et al. (2018), as estruturas e ferramentas para avaliação social do ciclo de vida dos *Stakeholders*, por exemplo: *Frameworks* de S-LCA e a avaliação Social do Ciclo de Vida (S-LCA), é um tópico fundamental para a análise de reflexos socioeconômicos e de emprego.

Springer et al. (2024) argumentam que as implicações sociais na cadeia de valor de veículos elétricos a célula de combustível (FCEV) são tão importantes quanto seus benefícios técnicos e ambientais. Eles sugerem que uma avaliação completa do ciclo de vida deve incluir esses impactos para identificar os pontos críticos sociais na produção e uso desses veículos.

Para Gnansounou e alves (2019), os principais benefícios sociais dos biocombustíveis estão relacionados ao emprego, treinamento e educação da força de trabalho,

geração de renda e desenvolvimento rural. Por outro lado, em caso de falta de gestão social ao longo das cadeias de biocombustíveis, os resultados negativos são o desrespeito aos direitos dos pequenos produtores e da comunidade rural, as más condições de trabalho ao longo das cadeias de suprimentos de biocombustíveis, a existência de trabalhadores migrantes com condições de vida precárias e, finalmente, as questões relacionadas ao uso e direitos da terra.

No contexto brasileiro, segundo a tese de Petraglia et al. (2013) estudos sobre a logística e a cadeia produtiva do etanol mostram que a introdução de novas tecnologias gera demanda por competências profissionais diferenciadas, além de ampliar os postos de trabalho diretos e indiretos em regiões produtoras. Assim, a integração do etanol como insumo para SOFCs reforça a plausibilidade de impactos positivos tanto em inovação quanto em geração de empregos, mesmo que a literatura ainda careça de estudos empíricos que quantifiquem diretamente esse efeito.

No entanto, segundo Ribeiro et al. (2022) um estudo de caso em uma usina de etanol em Mato Grosso revela que os impactos frequentemente considerados positivos, como a geração de emprego, não se traduziram em melhorias sociais e econômicas permanentes para os trabalhadores e para a população local.

Outro alinhamento com os Objetivos de desenvolvimento Sustentável(ODS) com viés socioambiental, segundo Gupta et al., (2025), é reduzir as emissões locais melhora a saúde nas áreas urbanas (ODS 3), contribuindo com a melhoria da qualidade do ar, especialmente em cidades com grande quantidade de veículos.

II.4.4.4 Lacunas e Direções Futuras

Apesar dos benefícios destacados, os estudos apontam lacunas importantes:

- ✓ Pouca atenção foi dada à viabilidade social específica de veículos movidos a SOFCs com etanol.
- ✓ A maioria das análises se concentra em políticas de biocombustíveis ou aspectos tecnológicos, negligenciando a percepção pública e os impactos sociais concretos.

Sugestões futuras incluem a coleta de dados regionais sobre aceitação social, avaliação de impacto em comunidades produtoras de etanol e modelagem de cenários de adoção ampla de SOFCs no Brasil.

II.4.4.5 Conclusão parcial

A literatura indica que os veículos SOFCs movidos a etanol têm forte potencial para atender não apenas aos critérios ambientais e energéticos, mas também contribuir de forma expressiva com os ODS sociais. No entanto, a viabilidade social plena depende de políticas públicas eficazes, planejamento urbano inclusivo e envolvimento das comunidades locais. Integrar tecnologias como SOFCs com estruturas bioenergéticas já existentes representa uma oportunidade estratégica para o Brasil alinhar inovação com justiça social e sustentabilidade.

Desta forma, esse estudo, pretende-se aprofundar estudo da viabilidade social dos veículos SOFCs movido a biocombustíveis no capítulo VI (Fatores ODS e sociais impactantes na viabilidade na adoção dos veículos SOFCs movido a Etanol no Brasil): Uma pesquisa quantitativa sobre ODS no Brasil, pois, permitirá uma avaliação dos ODS em especial o alinhamento socioambiental dos SOFCs movidos à etanol, com o objetivo de comparar com a literatura estudada, assim, evidenciar quais fatores e metas ODS são confirmados nos aspectos socioambiental e econômico.

CAPÍTULO III – Metodologia

Segundo Creswell (2010), uma pesquisa pode ter enfoque quantitativo, qualitativo ou misto. Nesta pesquisa será utilizado uma abordagem mista.

O estudo será desenvolvido em cinco etapas e na sequência será apresentado a descrição das etapas.

III.1 Metodologia de aplicação 1ª etapa

Será realizado uma pesquisa da revisão da literatura integrativa e narrativa do estado de arte, teórica e qualitativa. Nesta etapa será investigada a literatura sobre os veículos SOFCs, através dos estudos de pesquisas empíricas já realizadas e modelo similares adotados afim de fundamentar as demais etapas do estudo. Na sequência será realizado um estudo prospectivo.

III.2 Metodologia de aplicação 2ª etapa

Baseado em uma visão prospectiva identificar sobre as possíveis barreiras, soluções, melhorias e inovações no Sistema de Operação dos veículos SOFCs no Brasil, para esse fim será trabalhada a metodologia Delphi.

O método Delphi consiste em uma técnica qualitativa de previsão de cenários futuros, a partir da busca de um consenso entre especialistas de uma determinada área ou setor. Por exemplo, barreiras, soluções e melhorias futuras no Sistema de Operação dos veículos SOFC com utilização do etanol.

De acordo com Bethlem (2004), a técnica resume-se na criação de um questionário que será aplicado a um grupo de especialistas, cujas respostas vão sendo agrupadas e servem para a elaboração de novas perguntas, com vistas a encontrar as convergências e divergências entre as opiniões dos entrevistados. O resultado será uma média das opiniões dos especialistas sobre a probabilidade de ocorrência de certos eventos. Na sequência, será realizado um estudo do ciclo de vida e impactos ambientais dos veículos SOFC.

III.3 Metodologia de aplicação 3ª etapa

Será realizada um estudo de caso sobre o ciclo de vida do veículo SOFC no aspecto ambiental com análise da incerteza da informação com o método Monte Carlos, será utilizado de forma integrada com o *software OpenLCA*, como por exemplo as análises das emissões de CO₂ emitidos em uma planta dos veículos SOFC com etanol no Brasil. Será comparado as emissões teóricas esperadas com as emissões reais calculada. Dois cenários serão confrontados, o veículo SOFC com o veículo flex. movido a Etanol ou gasolina. As contribuições dessa etapa vão influenciar nas análises realizadas da viabilidade ambiental dos veículos SOFC, apresentadas na 5ª etapa.

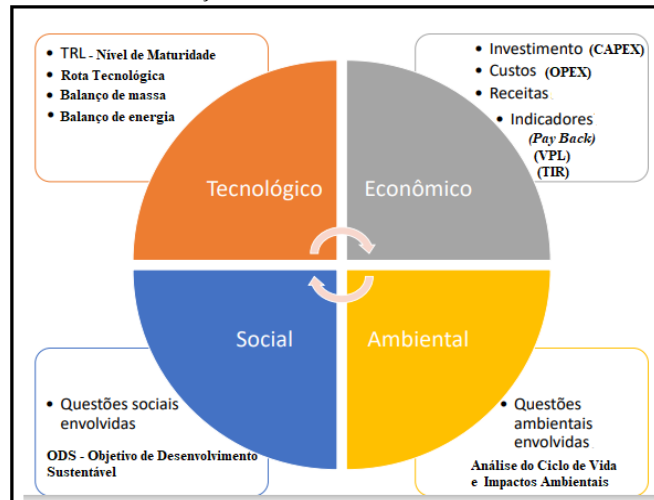
III.4 Metodologia de aplicação 4ª etapa

Etapa quantitativa (Modelagem de Equações Estruturais-MEE), descritiva, causal, delimitada e de campo, será realizado uma pesquisa online no *google form*, através de um questionário estruturado e validado nas etapas anteriores realizadas desta pesquisa, cujo dados serão tratados por meio do *software smartPls 4*. Assim, será analisada as percepções de potenciais consumidores (*stakeholders*), referente às metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), quanto à adoção dos veículos SOFC. Será identificado e caracterizado os fatores/indicadores do ODS favoráveis na consolidação dos veículos SOFC com etanol no Brasil

III.5 Metodologia de aplicação 5ª etapa

Será analisado a viabilidade do etanol em veículos SOFC no Brasil, através dos pilares de avaliação tecnológica, econômica, ambiental e social. Mostrado na figura 7.

Figura 7
Pilares de Avaliação



Nota. Adaptado pelo autor, conforme notas de aula disciplina Engenharia Econômica (PEI-UFBA) de Santana (2023).

O pilar tecnológico estar relacionado com que queremos fazer no projeto, será tratado as tecnologias existentes para os veículos SOFCs com etanol no Brasil. Será investigado a viabilidade tecnológica, se ela estar preparada para o Brasil, se o etanol será viável no Brasil, qual o nível de maturidade da tecnologia, rota tecnológica, qual o balanço de massa e energia envolvido. Por exemplo, será utilizado o *Technology Readiness Levels* (TRL), para localizar o nível de maturidade e qual o seu papel no desenvolvimento dos veículos SOFCs.

O pilar econômico estar relacionado com o estudo de viabilidade econômica, será realizado uma análise técnica do Sistema de Operação do Veículo SOFC com etanol, tem como objetivo avaliar se é financeiramente sustentável e rentável a longo prazo. Assim, será considerado o CAPEX (investimentos), OPEX (custos) e receitas, na avaliação financeira. E assim, avaliar o fluxo de caixa se é viável economicamente, através do *pay back*, VPL e TIR.

O pilar ambiental estar relacionado com as questões ambientais, e vai analisar os impactos das emissões de CO₂ dos veículos SOFCs com o etanol. A análise da viabilidade ambiental, será complementada com os resultados obtidos na etapa 3 deste estudo. O quantitativo de emissões de CO₂ emitidas ao longo do ciclo de vida dos veículos SOFC, indicará a viabilidade ambiental.

O pilar social estar relacionado com as questões sociais, a viabilidade social será analisada através dos dados obtidos da pesquisa de percepção na etapa 4 deste estudo. Os fatores/objetivos ODS predominantes na pesquisa, indicara a viabilidade social, referente aos Veículos SOFCs com etanol no Brasil. Fatores/objetivos do ODS mostrados na Figura 8.

Figura 8
Objetivo de Desenvolvimento Sustentável



Nota. Conforme notas de aula disciplina Engenharia Econômica(PEI-UFBA) Santana(2023).

Referências

- Aarão, A., Pelliciar, B., Coelho, E., Godoi, L., & Bigliardi, V. (2024). Solid Oxide Fuel Cell Powered by Ethanol - Distributed Microgeneration. *Anais do XXXI Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva (SIMEA 2024)*. Blucher Proceedings. <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/clula-de-combustvel-de-xido-slido-movida-a-etanol-microgerao-distribuda-39681>
- Antunes, F. C., de Oliveira, J. P. J., de Abreu, R. S., Dias, T., Brandão, B. B. N. S., Gonçalves, J. M., Ribeiro, J., Hunt, J., Zanin, H., & Doubek, G. (2025). Reviewing metal supported solid oxide fuel cells for efficient electricity generation with biofuels for mobility. *Journal of Energy Chemistry*, 92, 106-153. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2024.10.056>
- Athanasidou, C., Drosakis, C., Kabongo Booto, G., & Elmasides, C. (2022). Economic feasibility of power/heat cogeneration by biogas–solid oxide fuel cell (SOFC) integrated systems. *Energies*, 16(1), 404. <https://doi.org/10.3390/en16010404>
- Batista, D. S., Moraes, V. C. L., Faesarella, A. S., & Sablón, V. I. B. V. (2020). Veículos elétricos e híbridos: Estudo da eficiência energética- perspectiva no cenário nacional. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. Ano 05, Ed. 10, Vol. 10, pp. 91-120.
- Bessekon, Y., Nika, M. C., & Agbossou, K. (2019). Simulation of a SOFC/Battery powered vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(3), 1905–1918. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319918337285>
- Chen, S., Zhang, H., Yao, C., Lou, H., Chen, M., Lang, X., & Cai, K. (2023). Review of SOFC cathode performance enhancement by surface modifications: Recent advances and future directions. *Energy & Fuels*, 37(5), 3470–3487. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.2c03934>
- Delgado, F., Febraro, J., & Bruce da Silva, T. (2017). Carros Elétricos. FGV Energia. https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_carros_eletricos-fgv-book.pdf
- Elsevier. (2016). Nissan revela o primeiro FCEV do mundo com SOFC funcionando com bioetanol. *Fuel Cells Bulletin*, 2016(8), 3. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464285916302310>
- Fiuza, R. P., Silva, M. A., Pontes, L. A. M., Teixeira, L. S. G., & Boaventura, J. S. (2012). A utilização de etanol em célula a combustível de óxido sólido. *Química Nova*, 35(8), 1635–1643. <https://www.scielo.br/j/qn/a/C8nWyn3pm7fxLvHVwdTQ7Kr/?lang=pt>
- Gnansounou, E., & Alves, CM (2019). *Avaliação Social de Biocombustíveis* (pp. 123–139). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816856-1.00005-1>
- Gonçalves, F. O., Lopes, E. S., Lopes, M. S., & Rubens, M. F. (2021). Evaluation of the feasibility of ethanol and gasoline in solid oxide fuel cell vehicles in Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(73), 36381-36397. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921034108>
- Gupta, S., Yadav, S. S., Kar, S. K., & Harichandan, S. (2024). Factors influencing the purchase intention of ethanol blended fuel in India: a sustainable cities perspective. *Journal of Advances in Management Research*, 21(6), 1–25. <https://doi.org/10.1108/JAMR-03-2024-0082>
- Guaitolini, S. V. M., & Fardin, J. F. (2017). Modelagem de uma célula a combustível a óxido sólido no software Aspen Plus®. In *VIII Encontro Científico de Física Aplicada* (Vol. 4, pp. 91–95). Blucher Physics Proceedings. <https://doi.org/10.5151/phypro-viii-efa-22>

- Gupta, J., et al. (2025). Avoiding Fossil Fuel Addresses Human and Planetary Health. United Nations Department of Economic and Social Affairs (UNDESA). Recuperado de <https://sdgs.un.org/documents/gupta-j-et-al-2025-avoiding-fossil-fuel-addresses-human-and-planetary-health-58397>.
- Hariharan, D., Sarkar, B., & Gundlapally, S. (2024). Modeling and analysis of direct internal reforming in ethanol-fueled SOFC. *Emergency Management Science and Technology*, 2(4), 17–28. <https://www.maxapress.com/article/doi/10.48130/emst-0024-0017>
- Springer, S. K., Wulf, C., & Zapp, P. (2024). Potential Social Impacts regarding working conditions of Fuel Cell Electric Vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 618–632. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.034>
- International Energy Agency (2020). Global EV Outlook. OECD, IEA. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity>
- International Energy Agency. (2025). Transport, energy and CO₂: Moving toward sustainability. IEA. <https://www.iea.org/news/transport-energy-and-co2-moving-toward-sustainability>
- International Council on Clean Transportation. (2025). A strategy to decarbonize the global transport sector by 2050: Explained. ICCT. <https://theicct.org/a-strategy-to-decarbonize-the-global-transport-sector-by-2050-explained/>
- Kunskaja, S., & Budzyński, A. (2024). Sustainable societal transformation: Shaping renewable energy technologies in transport. *MATEC Web of Conferences*, 390, 01006.
- Li, Jingjing & Cheng, Junhan & Zhang, Yubing & Chen, Zhonghao & Nasr, Mahmoud & Farghali, Mohamed & Rooney, David & Yap, Pow Seng & Osman, Ahmed. (2024). Advancements in Solid Oxide Fuel Cell Technology: Bridging Performance Gaps for Enhanced Environmental Sustainability. *Advanced Energy and Sustainability Research*. 5. 10.1002/aesr.202400132
- Li, H., Garcia, T. J., & Lee, M. H. (2023). Solid oxide fuel cells for vehicles. In P. K. Das, K. Jiao, Y. Wang, B. Frano, & X. Li (Eds.), *Fuel cells for transportation* (pp. 547–573). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99485-9.00008-3>
- Li, R. (2024). Advancing fuel cell technologies: Innovations in proton exchange membrane and solid oxide systems for sustainable transportation solutions in North America [Preprint]. SSRN. <https://ssrn.com/abstract=5041066>
- Luo, S., Yang, R., Meng, Y., Maliutina, K., Singh, M. , Chiu, TW , & Fan, L. (2023). Desempenho eletroquímico promovido de células a combustível de óxido sólido sinterizadas de temperatura intermediária em uma etapa usando eletrodos em nanoescala . *Materials Research Bulletin* , 168 , Artigo 112452. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2023.112452>
- Marcantonio, V., & Scopel, L. (2024). Thermodynamic Models of Solid Oxide Fuel Cell (SOFC): A Review. *Preprints.org*. <https://doi.org/10.20944/preprints202410.0999.v1>
- Ma, Z., Ma, C., Yu, H., Monticone, G., Ma, S., Van herle, J., & Wang, L. (2024). Techno-economic evaluation of biogas-fed SOFC systems with novel biogas purification and carbon capture technologies. *Renewable Energy*, 235, 121302. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121302>
- Martinelli, F. S., Biber-Freudenberger, L., Stein, G., & Börner, J. (2022). Will Brazil's push for low-carbon biofuels contribute to achieving the SDGs? A systematic expert-based assessment. *Cleaner Environmental Systems*, 5, 100075. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2022.100075>

- Ma, S., Hu, X., Zhao, Y., Wang, X., & Dong, C. (2021). Design and evaluation of a metal-supported solid oxide fuel cell vehicle power system with bioethanol onboard reforming. *ACS Omega*, 6(43), 29201–29214. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04698>
- Mehdi, Ali & Hussain, Amjad & Song, Rak-Hyun & Lim, Tak-hyoung & Kazmi, Wajahat & Ishfaq, Hafiz & Khan, Muhammad Zubair & Qamar, Sanaullah & Syed, Muhammad Wasi & Mehran, Taqi. (2023). Improving the durability of cobaltite cathode of solid oxide fuel cells -a review. *RSC Advances*. 25029. https://www.researchgate.net/publication/373272520_Improving_the_durability_of_cobaltite_cathode_of_solid_oxide_fuel_cells_-a_review
- Mehmeti, A., McPhail, S. J., Pumiglia, D., & Carlini, M. (2016). Life cycle sustainability of solid oxide fuel cells: From methodological aspects to system implications. *Journal of Power Sources*, 325, 772–785. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.06.078>
- Nam, H., Kasada, R., & Konishi, S. (2018). Economic analysis between diesel and SOFC electricity via fusion-biomass hybrid model. *Journal of Fusion Energy*, 37(6), 333–345. <https://doi.org/10.1007/s10894-018-0192-z>
- Ni, M., Leung, D. Y. C., & Leung, M. K. H. (2018). Challenges of proton-conducting solid oxide fuel cells for vehicles and other mobile applications. *International Journal of Energy Research*, 42(6), 2059–2072. <https://doi.org/10.1002/er.4213>
- Nissan. (2016, June 17). *Nissan unveils development of the world's first SOFC-powered vehicle system that runs on bio-ethanol electric power*. Nissan Motor Co., Ltd. https://www.nissan-global.com/EN/INNOVATION/TECHNOLOGY/ARCHIVE/E_BIO_FUEL_CELL/
- Nissan Motor Co., Ltd. (2016, August 4). Nissan unveils world's first Solid-Oxide Fuel Cell vehicle. Nissan News. <https://usa.nissannews.com/en-US/releases/nissan-unveils-world-s-first-solid-oxide-fuel-cell-vehicle>
- Prasad, S., Yadav, K. K., Kumar, S., Panditad, P., Bhutto, J. K., Alreshidi, M. A., Ravindran, B., Yaseen, Z. M., Osman, S. M., & Cabral-Pinto, M. M. S. (2024). Review on biofuel production: Sustainable development scenario, environment, and climate change perspectives A sustainable approach. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12, 111996. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.111996>
- Qasem, N. A. A., & Abdulrahman, G. A. Q. (2024). A Recent Comprehensive Review of Fuel Cells: History, Types, and Applications. *International Journal of Energy Research*, 2024, Article ID 7271748. <https://doi.org/10.1155/2024/7271748>
- Qin, X., Cao, J., Geng, G., Li, Y., Zheng, Y., Zhang, W., & Yu, B. (2022). Sistema de célula de combustível de óxido sólido para automóveis. *International Journal of Green Energy*, 22, 901-910. <https://doi.org/10.1080/15435075.2022.2065454>
- Raduwan, N. F., Muchtar, A., Somalu, M. R., & Baharuddin, N. A. (2018). Challenges in Fabricating Solid Oxide Fuel Cell Stacks for Portable Applications: A Short Review. *International Journal of Integrated Engineering*, 10(5). <https://doi.org/10.30880/ijie.2018.10.05.013>
- Ribeiro, H., Pereira, R. A., Ferreira, M. A., & Cardoso, T. A. O. (2022). Impactos da cadeia do etanol: subsídios para uma proposta integrada de vigilância ambiental e de saúde do trabalhador. *Revista Brasileira de Saúde Ocupacional*, 47, e33. <https://doi.org/10.1590/2317-6369000005920>

- Salim, K. M. A., Maelah, R., Hishamuddin, H., Amir, A. M., & Rahman, M. N. A. (2022). Two Decades of Life Cycle Sustainability Assessment of Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs): A Review. *Energies*, 14(10), 2821. <https://doi.org/10.3390/su141912380>
- Seçilmiş, N., & Akar, P. G. (2024). Technology oriented struggle against climate change in transportation sector: An empirical investigation. *Ekonomi, Politika & Finans Araştırmaları Dergisi*, 9(2). <https://doi.org/10.30784/epfad.1364140>
- Spreafico, C. (2023). Avaliação Prospectiva do Ciclo de Vida (ACV) de Futuras Células a Combustível de Óxido Sólido (CSO). *Social Science Research Network*. <https://ssrn.com/abstract=4574065>
- Spreafico, C. (2024). Prospective life cycle assessment to support eco-design of solid oxide fuel cells. *International Journal of Sustainable Engineering*, 17(5), 481–496. <https://doi.org/10.1080/19397038.2024.2355899>
- Shcheklein, S., & Dubinin, A. (2021). Hydrogen-methanol SOFCs for transport. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(51), 25871–25877. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.126>
- Sureau, S., Mazijn, B., Garrido, S. R., & Achten, W. M. J. (2018). Social life-cycle assessment frameworks: A review of criteria and indicators proposed to assess social and socioeconomic impacts. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 23, 904–920. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1336-5>
- UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. (2021). Bioethanol: Fast track to mobility decarbonization. São Paulo: UNICA. Recuperado de <https://www.unica.com.br/publicacoes/bioethanol-fast-track-to-mobility-decarbonization>
- Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). (2024). *Da Unicamp vem a célula a combustível brasileira a etanol* [Notícia]. Brasil Energia. <https://brasilenergia.com.br/brasilenergia/acoes-em-transicao-energetica/da-unicamp-vem-a-celula-a-combustivel-brasileira-a-etanol>
- Vargas, J. E. V., & Seabra, J. E. A. (2021). Fuel-cell technologies for private vehicles in Brazil: Environmental mirage or prospective romance? A comparative life cycle assessment of PEMFC and SOFC light-duty vehicles. *Science of The Total Environment*, 798. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721043382>
- Wang, Y., Xu, X., Dong, G., Zhang, M., Leung, D. Y. C., & Jiao, K. (2024). Flexible fuel cells: A prospective review. *Energy Reviews*, 3, 100099. <https://doi.org/10.1016/j.enrev.2024.100099>
- Wang, M., Cai, H., Ou, L., Elgowainy, A., Alam, M. R., Benavides, T., et al. (2025). *Life Cycle Analysis of Greenhouse Gas Emissions of Clean Fuels with the R&D GREET 2024 Model*. Argonne, IL: Argonne National Laboratory. ANL/ESD-25/1. Link: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2025/02/193611.pdf>
- Yang, G., Su, C., Shi, H., Zhu, Y., Song, Y., Zhou, W., & Shao, Z. (2020). Toward reducing the operation temperature of solid oxide fuel cells: Our past 15 years of efforts in cathode development. *Energy & Fuels*, 34(12), 15169–15194. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c01887>
- Yatoo, M. A., Habib, F., Malik, A. H., Qazi, M. J., Ahmad, S., Ganayee, M. A., & Ahmad, Z. (2023). Solid-oxide fuel cells: A critical review of materials for cell components. *MRS Communications*, 13(3), 378–384. <https://doi.org/10.1557/s43579-023-00371-0>