

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA POLITÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

MARINA VON KRÜGER PIMENTEL

Análise do potencial de redução de emissões dos gases do efeito estufa da matriz de geração de energia elétrica a diesel no sistema isolado do Brasil usando tecnologia de injeção de hidrogênio sob demanda em motores a combustão interna

SÃO PAULO
2024

MARINA VON KRÜGER PIMENTEL

Análise do potencial de redução de emissões dos gases do efeito estufa da matriz de geração de energia elétrica a diesel no sistema isolado do Brasil usando tecnologia de injeção de hidrogênio sob demanda em motores a combustão interna.

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - PECE, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Energia Renovável, Geração Distribuída e em Eficiência Energética.

Área de Atuação: Energias Renováveis

Orientador: Gerhard Ett

SÃO PAULO

2024

EU AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

FICHA CATALOGRÁFICA

Pimentel, Marina von Krüger

Análise do potencial de redução de emissões dos gases do efeito estufa da matriz de geração de energia elétrica a diesel no sistema isolado do Brasil usando tecnologia de injeção de hidrogênio sob demanda em motores a combustão interna. / Marina von Krüger Pimentel; Orientador: Gerhard Ett – São Paulo, 2024.45f: il., tabs., fotos

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1. Transição Energética. 2. Hidrogênio. 3. Geração de Hidrogênio sob demanda 4. Emissões de gases de efeito estufa 5. Sistemas Isolados. I. Título

DEDICATÓRIA

Aos meus filhos, Diego e Eva que foram o motor para conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, que mesmo em meio a um turbilhão topou esse desafio. Ao Aurélio, meu chefe e amigo que pode contribuir imensamente para melhoria do conteúdo com sua experiência técnica e anos de vivência nas regiões mais remotas da Amazônia. Ao Gabriel, meu estagiário e agora companheiro de trabalho que trouxe sua experiência acadêmica e prática com hidrogênio que tinha total sinergia com meu estudo e com quem também pude aprender muito. Ao meu pai que sempre foi um entusiasta do meu desenvolvimento pessoal e profissional e me proporcionou a possibilidade de estar neste curso. À minha mãe que igualmente me incentivou a me empenhar e ser uma pessoa melhor ajudando na logística, organização e planejamento de tantas atividades sempre de forma acolhedora e amorosa. Em especial devo agradecer a Silvana, Beatriz, Jaqueline e Agnes que foram meu maior suporte durante o curso estando com meus filhos para que eu pudesse me dedicar as aulas e estudos. Muito obrigada!

RESUMO

O novo relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), alerta que as emissões excessivas de carbono entre 2010 e 2019 foram as mais altas da história da humanidade e enfatiza que estamos no caminho que pode tornar o planeta inabitável, se o aquecimento global for de mais de 1,5 grau Celsius acima dos níveis pré-industriais. Diante disso foram estabelecidos pela ONU metas globais de redução dos gases de efeito estufa para limitar o aumento da temperatura global abaixo de 2°C, acima dos níveis pré-industriais e o Brasil assumiu em reduzir as emissões em 37% abaixo dos níveis de 2005 até 2025 e 43% até 2030. O Brasil é um país de dimensões continentais e a distribuição de renda é desigual, assim como a qualidade de vida. Alguns municípios da Amazônia ainda não têm acesso à eletricidade de forma contínua. A energia é fundamental para o desenvolvimento, e garantir o acesso a ela é essencial para melhorar a qualidade de vida das comunidades amazônicas. O objetivo deste estudo é avaliar o potencial de descarbonização da matriz brasileira de geração de energia elétrica a diesel em operação no sistema isolado, localizado principalmente na região norte, a partir da aplicação de tecnologia de injeção de hidrogênio em geradores a diesel, sob demanda e demonstrar o potencial de redução das emissões atrelada a esta solução. Foram estabelecidos 3 cenários de melhoria: superior - alcançando 17,5% de redução no consumo de diesel na operação dos geradores; médio - com a redução de 12,5% e inferior -chegando a 7,5% de redução, com a adoção da tecnologia e estabelecido um fluxo de informações a partir dos dados bibliográficos. A partir deste fluxo obteve-se a estimativa do potencial de redução atrelado a cada cenário e sua equivalência de sustentabilidade. As estimativas calculadas foram de 0,16 MtCO_{2eq} por ano para o cenário inferior, 0,26 MtCO_{2eq} para o médio e 0,37 MtCO_{2eq} para o cenário superior, sendo equivalentes ao plantio de mais de 30 milhões de árvores no cenário superior pelo período de 20 anos de projeto. Desta forma, conclui-se que a adoção da tecnologia de injeção de hidrogênio sob demanda em motores a combustão a diesel implantados nos sistemas isolados da Amazônia representa uma oportunidade significativa para promover a sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento econômico na região reduzindo significativamente as emissões atreladas a operação desta matriz.

Palavras-chave: Motores a combustão, hidrogênio sob demanda, eletrolise da água, emissão de gases do efeito estufa, sistemas isolados, Amazônia, diesel.

ABSTRACT

The new report from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) warns that excessive carbon emissions between 2010 and 2019 were the highest in human history and emphasizes that we are on the path that could make the planet uninhabitable if global warming is more than 1.5 degrees Celsius above pre-industrial levels. Considering this, global greenhouse gas reduction targets were established by the United Nations to limit the increase in global temperature to below 2°C, above pre-industrial levels, and Brazil undertook to reduce emissions by 37% below 2005 levels by 2025 and 43% by 2030. Brazil is a country of continental dimensions, and the income distribution is unequal, as well as the quality of life. Some municipalities in the Amazon still do not have access to electricity continuously. Energy is fundamental for development, and ensuring access to it is essential to improve the quality of life of Amazonian communities. The objective of this study is to evaluate the decarbonization potential of the Brazilian diesel electricity generation matrix in operation in the isolated system, located mainly in the northern region, with the application of on demand hydrogen injection technology for diesel generators and to demonstrate the potential for reducing emissions linked to this solution. 3 improvement scenarios were established: superior - achieving a 17.5% reduction in diesel consumption in the operation of the generators; medium - with a reduction of 12.5% and lower - reaching a 7.5% reduction, with the adoption of technology and the establishment of a flow of information from bibliographic data. From this flow, an reduction estimation of the potential linked to each scenario and its sustainability equivalence was obtained. The estimated calculation were 0.16 MtCO₂eq per year for the lower scenario, 0.26 MtCO₂eq for the medium scenario and 0.37 MtCO₂eq for the superior scenario, being equivalent to planting more than 30 million trees in the superior scenario for the 20-year period of the project. Thus, it is concluded that the adoption of on-demand hydrogen injection technology in diesel combustion engines deployed in isolated systems in the Amazon represents a significant opportunity to promote environmental sustainability and economic development in the region, significantly reducing emissions linked to the operation of this matrix.

Keywords: Combustion engines, hydrogen on demand, water electrolysis, greenhouse gas emissions, isolated systems, Amazon, diesel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Proporção das emissões mundiais por setor e subsetor de energia - Referência a dados de 2020	12
Figura 2 - Total de Emissões SIN x SISOL	13
Figura 3 - Matriz Elétrica Brasileira 2022 – Geração de energia	16
Figura 4 - Usinas Termoelétricas em operação nos sistemas interligado e isolado ..	18
Figura 5 - Matriz Elétrica Brasileira - Potência Outorgada ANEEL 202419	
Figura 6 - Potência Outorgada de Origem Fóssil na Matriz Brasileira.....	20
Figura 7- Mapa do SISOL.....	23
Figura 8 - Esquemático do princípio de funcionamento da eletrólise alcalina.	27
Figura 9 - Funcionamento da injeção de HHO no motor a combustãoFonte: Adaptado de Dynacert.....	29
Figura 10 - Diagrama Temperatura de Chama x Tempo para combustão normal de Diesel e Com H ₂ /O ₂ adicionado	30
Figura 11 -- Imagens do equipamento Hydragen selecionado	31
Figura 12 -Reduções baseadas em testes realizados pelo fabricante e motores de caminhão.....	33
Figura 13 - Emissões dos Gases de Efeito Estufa no Sistemas Isolados	35
Figura 14 - Fluxo de informações para determinação das reduções das emissões para cada cenário estabelecido e suas equivalências de sustentabilidade.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz Elétrica Brasileira 2024 em Operação (Geração Centralizada).....	17
Tabela 2 - Geração da Matriz Brasileira 2024	17
Tabela 3 - Usinas Termoelétricas a Diesel outorgadas pela ANEEL	20
Tabela 4 - Comparação Geração 2021 e 2022 (TWh)	21
Tabela 5 - - Geração Sistemas Isolados por empresa (MWh).....	24
Tabela 6 - Geração estimada para o SISOL 2023* - EPE.....	25
Tabela 7 - Propriedades de diversos combustíveis.....	28
Tabela 8 -Cenários de ganhos de eficiência nas unidades de geração de energia elétrica.....	34
Tabela 9 - Consumo Específico Médio Global	36
Tabela 10 - Redução das emissões nos 3 cenários determinados: inferior, médio e superior	38
Tabela 11 - Número de árvores equivalente por ano a redução de emissões em cada cenário pré-determinado	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	11
1.2. OBJETIVOS	14
2. CAPÍTULO 2	15
2.1. Matriz Elétrica Brasileira.....	15
2.2. Sistemas Isolados	22
3. CAPÍTULO 3	26
3.1. FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO.....	26
4. CAPÍTULO 4	31
4.1. Eletrolisador	31
4.2. CÁLCULO DAS EMISSÕES EVITADAS.....	31
5. CONCLUSÃO	39
5.1. Sugestões para trabalhos futuros.....	40
6. BIBLIOGRAFIA.....	41

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Estamos vivendo um momento histórico onde as preocupações ambientais tomam destaque nas discussões para políticas públicas. O mais recente relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), alerta que as emissões excessivas de carbono entre 2010 e 2019 foram as mais altas da história da humanidade e enfatiza que estamos no caminho que pode tornar o planeta inabitável, se o aquecimento global for de mais de 1,5 grau Celsius acima dos níveis pré-industriais. Diante disso foram estabelecidos pela ONU metas globais de redução dos gases de efeito estufa para limitar o aumento da temperatura global abaixo de 2°C, acima dos níveis pré-industriais e o Brasil assumiu em reduzir as emissões em 37% abaixo dos níveis de 2005 até 2025 e 43% até 2030. Países e instituições privadas estão se engajando na crescente corrida de para a redução dos gases do efeito estufa formalizadas pelo marco das metas firmadas no Acordo de Paris em 2015.

Nos últimos anos, a demanda por práticas de ESG (Ambiental, Social e de Governança Corporativa, na sigla em inglês) tem crescido significativamente. Empresas listadas na bolsa estão cada vez mais sendo pressionadas por uma ampla gama de stakeholders, incluindo investidores, reguladores, consumidores, parceiros comerciais e órgãos de governança a relatar suas práticas e desempenhos em ESG. Muitos países estão implementando legislações que exigem que as empresas reportem suas ações. Por exemplo, a União Europeia tem a Diretiva de Relato de Sustentabilidade Corporativa (CSRD, na sigla em inglês), que obriga empresas a divulgarem informações detalhadas sobre seus impactos ambientais e sociais. No Brasil, a bolsa de valores, B3, criou uma iniciativa que visa fomentar o investimento sustentável através de um índice de sustentabilidade empresarial (ISE).

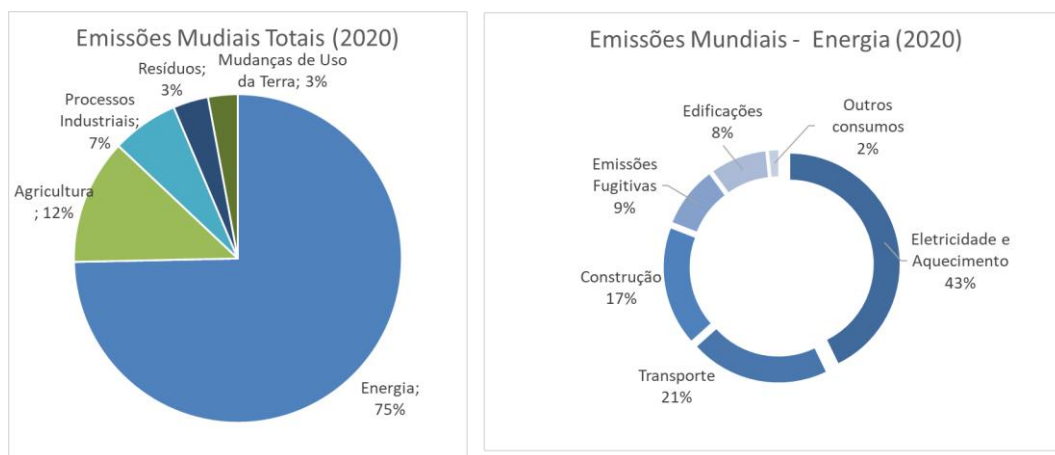
Consumidores estão mais atentos dando preferência a serviços e produtos com menor impacto ambiental e maior responsabilidade social. Também fundos de investimentos importantes como BlackRock, anunciaram sustentabilidade como novo padrão para seus investimentos.

Dados do Climate Watch de 2020 confirmam que o setor de energia foi o líder de emissões de gases do efeito estufa, responsável por 77% das emissões mundiais neste período.

“O setor de energia inclui transporte, eletricidade e geração de calor, usos finais em edifícios, fabricação e construção, emissões fugitivas e outras queimas de combustível.

No setor de energia global, a geração de calor e eletricidade é responsável pela maior parte das emissões representando 43% do total de emissões de gases de efeito estufa, seguida por transporte (21% do total de emissões) e fabricação e construção (18% do total de emissões)” (Climate Watch) Figura 1

Figura 1 Proporção das emissões mundiais por setor e subsetor de energia - Referência a dados de 2020



Fonte: Adaptado de Climate Watch

Apesar de proporcionalmente menor que no resto do mundo, no Brasil, a geração de energia a partir de combustíveis fósseis, em especial a diesel também tem uma importante participação nas emissões do país. Considerando que a maior parte desta geração está concentrada na área com maior sensibilidade ambiental, é um importante ponto de atenção.

Na região da Amazônia Legal, que abrange 59% do território brasileiro, incluindo 9 estados (Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Maranhão, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantis) a maior parte da geração de energia, 69%, é feita por termoelétricas a diesel (EPE,2023). Se considerarmos os dois principais estados, Amazonas e Roraima, a matriz não renovável representa quase 90% da geração de energia elétrica (dados do climate police initiative). Outro dado preocupante é que, apesar dos sistemas isolados representarem apenas 0,54% do consumo total do Brasil, são responsáveis por cerca de 10% das emissões dos gases de efeito estufa

em referência às emissões do Sistema Interligado Nacional – SIN (Figura 2). Essa pequena fatia do mercado de fornecimento de energia está localizada na parte de maior atenção ambiental do país.

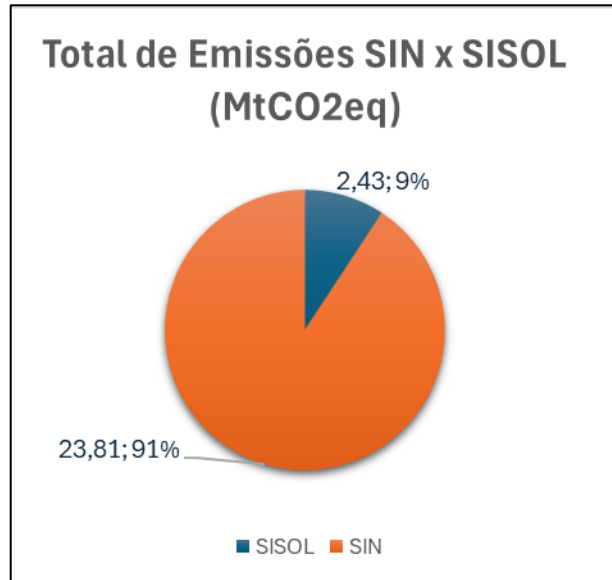


Figura 2 - Total de Emissões SIN x SISOL

Fonte: Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados – Ciclo 2023 - EPE, ONS, CCEE e MCTI

Existem políticas e iniciativas implementadas, como por exemplo o Programa Luz para Todos do governo federal e a regulamentação da micro e minigeração distribuída que dão subsídios e incentivos para a descarbonização da matriz elétrica desta região através da substituição da energia oriunda de combustíveis fósseis por fontes renováveis ou até mesmo menos poluentes como o gás natural. Existe também o planejamento de interligação de grande parte destas áreas ao Sistema Interligado Nacional, cuja consequência é de diminuir as emissões devido ao balanço de todas as plantas conectadas serem majoritariamente renováveis, além de dar maior estabilidade e confiabilidade ao fornecimento de energia.

No caminho da transição energética entendemos que estão sendo priorizadas as rotas de energias renováveis, porém, a substituição das usinas já em operação não será facilmente implantada. A falta de alternativas econômica e/ou tecnologicamente viáveis deixa grandes regiões reféns do suprimento de diesel. Grande parte das regiões atendidas tem logística de alta complexidade, aumentando a incerteza e imprevisibilidade de abastecimento, dificultando assim, o desenvolvimento econômico destas regiões.

É fato que a geração termoelétrica é uma solução que garante grande segurança energética devido a robustez da sua cadeia de suprimento construída por décadas, porém traz uma grande preocupação ambiental e econômica para as regiões dela dependentes.

Devemos considerar também as desvantagens ambientais dessa operação, pois, além da poluição inerente da queima do diesel, existem também grandes riscos de vazamentos durante o transporte, que por sua vez podem comprometer o solo e águas da localidade afetada.

Empresas do setor elétrico, estão focadas em buscar soluções energeticamente sustentáveis e abrir o leque de possibilidades para que a tão discutida transição energética se dê de maneira eficaz. Existem estudos de tecnologias de substituição ao Diesel muito comentadas como o hidrogênio verde, por exemplo. Este desenvolvimento ainda se encontra pouco competitivo e se mostra inviável no curto prazo, principalmente para popularização da tecnologia, devido ao alto custo de fabricação e complexidade de distribuição.

No entanto temos conhecimento de outras tecnologias como a injeção de hidrogênio sob demanda em motores a combustão que são certificadas e comprovadamente trazem reduções das emissões da operação, economia de combustível e melhoria no desempenho geral das máquinas.

Baseado nestes dados, este trabalho foca na avaliação do potencial de redução dos gases de efeito estufa do Sistema Isolado para descarbonização do parque gerador de usinas termoelétricas que utilizam o diesel como combustível principal atualmente em operação através da inserção da tecnologia de injeção de hidrogênio sob demanda.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é avaliar o potencial de descarbonização da matriz brasileira de geração de energia elétrica a diesel em operação no sistema isolado, localizado principalmente na região norte, a partir da aplicação desta tecnologia de injeção de hidrogênio sob demanda e demonstrar o potencial de redução das emissões atrelada a esta solução no âmbito de favorecer o cumprimento das metas globais de redução estabelecidas pela ONU assumidas pelo Brasil.

A matriz elétrica brasileira, apesar de majoritariamente renovável tem um grande potencial de redução das emissões dos gases do efeito estufa em áreas

ambientalmente sensíveis onde a realidade é diferente do cenário geral, em que termoelétricas que geram energia a partir da queima de óleo diesel chegam a representar a totalidade da geração em algumas localidades remotas.

Existem no mercado tecnologias já maduras e avaliadas por entidades sérias que estão em fase comercial e realizam a injeção de hidrogênio sob demanda em motores a combustão. Esta tecnologia reduz significativamente as emissões além de fornecer outras vantagens, se aplicadas de forma correta, nas proporções recomendadas, como economia de combustível e aumento da vida útil do motor, por exemplo. Por este motivo foi escolhida para realizar este estudo e verificar os impactos positivos de sua aplicação de forma teórica a partir de dados bibliográficos.

2. CAPÍTULO 2

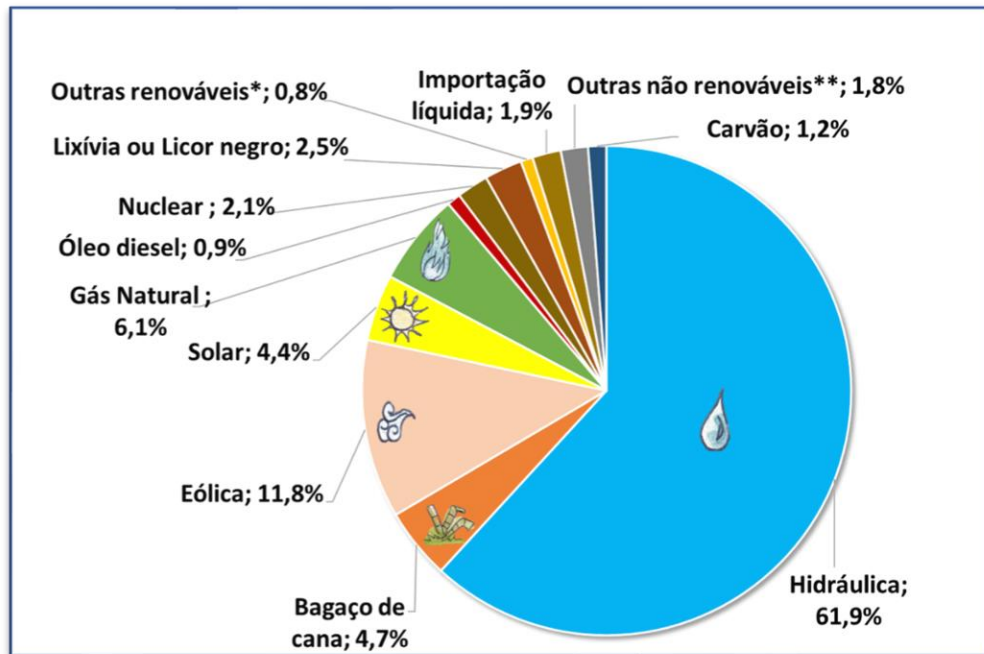
2.1. Matriz Elétrica Brasileira

O termo matriz elétrica refere-se à composição das diferentes fontes de geração de energia elétrica em um determinado sistema ou região. Ela representa a distribuição percentual da capacidade instalada ou energia gerada de cada tipo de fonte de geração.

A **matriz elétrica brasileira** é predominantemente renovável com grande participação das usinas hidrelétricas que assumem mais de 60% de sua composição, considerando a energia produzida em TWh (Tera-Watt hora – Figura 2).

As energias eólica e solar tem tido um crescimento representativo nos últimos anos, contribuindo para que a matriz elétrica continue sendo, em sua maior parte, renovável, porém agora, mais diversificada.

Figura 3 - Matriz Elétrica Brasileira 2022 – Geração de energia



Fonte: BEN, 2023; total em 2022: 677 TWh - terawatt-hora

(*incluindo lenha, biodiesel e outras renováveis; **incluindo óleo combustível, gás de coqueria, outras secundárias e outras não renováveis)

As usinas termoelétricas têm grande participação na matriz, garantindo a estabilidade e confiabilidade do sistema. Com 23,15% do total da potência instalada no sistema interligado e chega a 38% da capacidade de geração total da matriz (ONS).

Estas termoelétricas atualmente possuem importante papel no Sistema Interligado Nacional (SIN). Sua flexibilidade operacional ajuda a garantir fornecimento de energia para o sistema em momentos críticos como ocorridos em 2021 quando os baixos níveis de chuva impactaram diretamente nos reservatórios das hidroelétricas e conseqüentemente a capacidade de fornecimento de energia para suprir a demanda do País através desta fonte.

Desde o início dos anos 2000, a matriz elétrica brasileira passa por uma transição na qual a expansão da capacidade instalada e da geração hidrelétricas dá lugar a uma crescente diversificação das fontes de geração. Se, por um lado, observa-se uma ampliação marcante das fontes biomassa, eólica e solar, por outro, verifica-se a expansão do uso de combustíveis fósseis para geração de eletricidade. Ainda que, em 2022, essa geração tenha caído cerca de 49% em relação ao ano de 2021, devido principalmente à recuperação dos reservatórios das hidrelétricas. A produção de energia elétrica por termelétricas fósseis saiu de 35 TWh em 2002 para quase 69 TWh em 2022, praticamente dobrando. (IEMA 2023)

Tabela 1 - Matriz Elétrica Brasileira 2024 em Operação (Geração Centralizada)

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	% (Pot. Fiscalizada)
UHE	215,00	103.175.523,00	103.197.797,00	51,67
UTE	3.035,00	47.715.820,91	46.239.047,31	23,15
EOL	1.027,00	29.815.323,86	29.363.023,86	14,70
UFV	18.239,00	12.254.258,50	12.254.258,94	6,14
PCH	428,00	5.804.762,57	5.802.906,57	2,91
UTN	2,00	1.990.000,00	1.990.000,00	1,00
CGH	689,00	853.918,26	863.732,26	0,43
Total	23.635,00	201.619.607,10	199.710.765,94	100,00

Fonte: Adaptado de SIGA ANEEL

Segundo os dados de operação do ONS, em 2023 a geração térmica foi pela primeira vez menos representativa que a eólica, ficando responsável por aproximadamente 10% da geração entregue ao sistema interligado nacional. A maior parte dessa energia foi gerada pelas hidroelétricas seguidas da fonte eólica representaram 70% e 15% respectivamente da energia total fornecida ao sistema. Podemos observar esses dados na TABELA 2.

Tabela 2 - Geração da Matriz Brasileira 2024

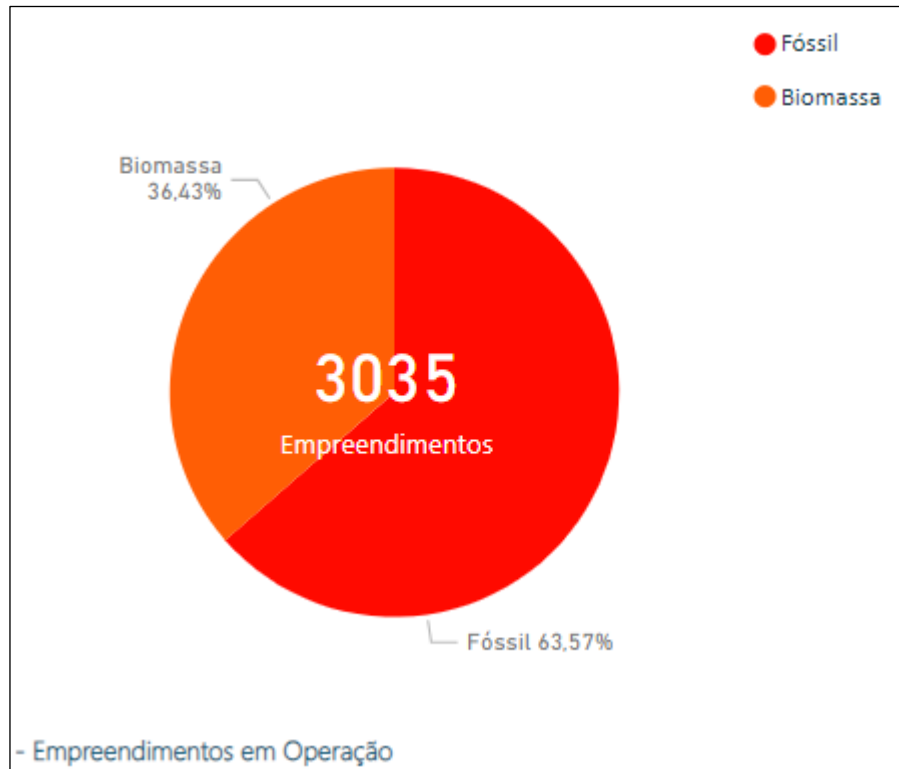
2023	Eólica	Hidrelétrica	Nuclear	Solar	Térmica	TOTAL
Geração SIN MWh	95.690	444.948	14.517	18.572	61.451	635.177
% da participação de cada fonte	15%	70%	2%	3%	10%	100%

Fonte: ONS

Trazendo a análise para o mercado de geração a partir de combustíveis fósseis, segundo os dados da ANEEL consultados em 27/02/2024, este tipo de geração representa mais de 60% das usinas termoeletricas em operação na matriz elétrica

brasileira, incluindo ambos os sistemas, interligado e isolados contabilizados pela Agência Reguladora, conforme demonstrado pela figura 4.

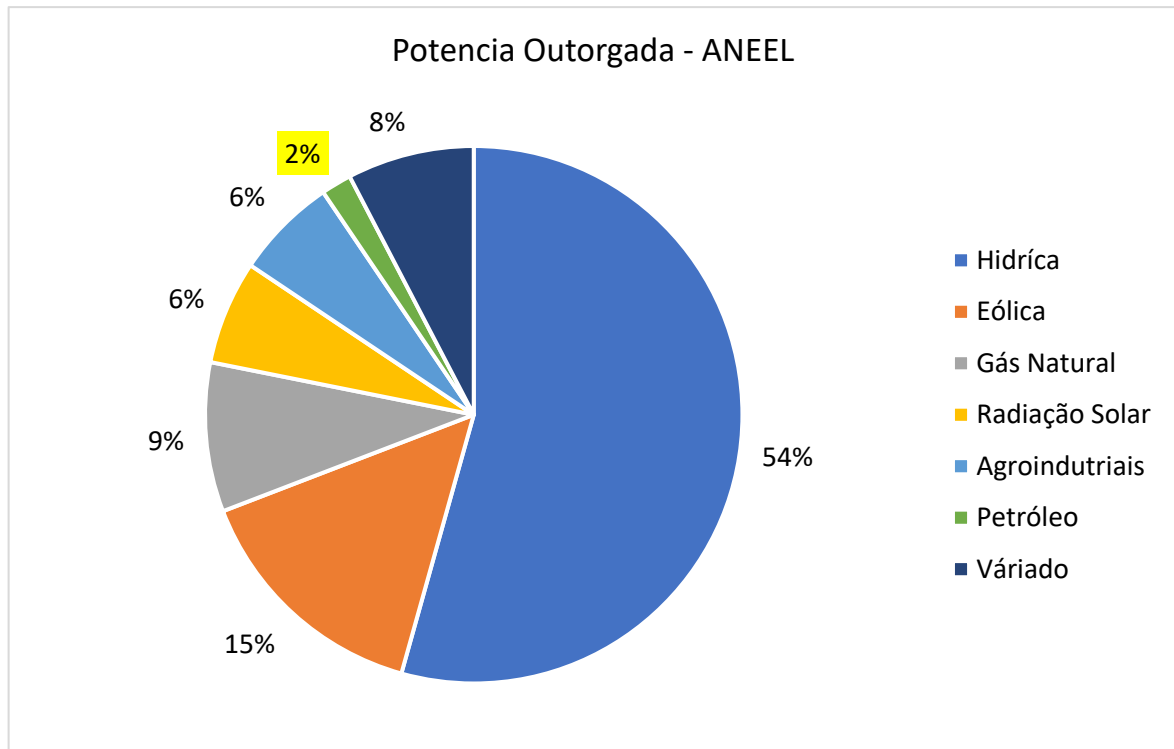
Figura 4 - Usinas Termoelétricas em operação nos sistemas interligado e isolado



Fonte: SIGA ANEEL

As termoelétricas a partir de combustíveis fósseis somam aproximadamente 48GW de capacidade instalada dos quais quase 4GW são obtidas através da queima de óleo diesel, representando em torno de 2% da capacidade instalada e 0,9% da geração entregue à matriz elétrica brasileira (figura 5).

Figura 5 - Matriz Elétrica Brasileira - Potência Outorgada ANEEL 2024

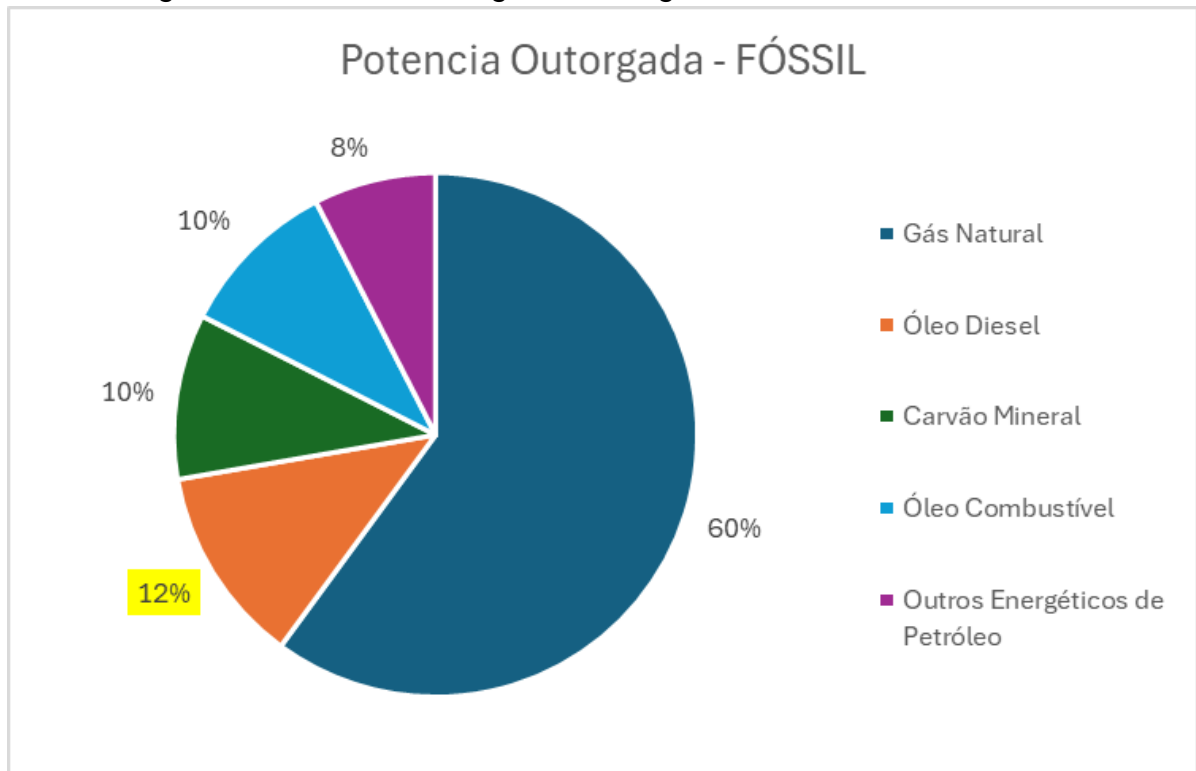


Fonte: Adaptado de ANEEL

Apesar de valores de capacidade instalada e geração menores que as fontes mais representativas (hídrica e eólica), os níveis de emissão ligados a essa tecnologia são muito mais importantes, mesmo quando comparados aos impactos dos grandes reservatórios de usinas hidroelétricas. Por este motivo as emissões atreladas a geração termoelétrica são as mais importantes de toda a matriz elétrica. Como demonstrado na figura 2, onde a predominância da geração é representada por usinas térmicas representa grande parte das emissões associadas, cerca de 10% da emissão referente ao total das emissões do sistema interligado, com apenas a geração no sistema isolado.

Dentre o parque de geração térmica temos usinas que geram a partir de variados combustíveis, sendo os 4 com maior potência outorgada e sua participação na matriz térmica nomeados e apresentados na figura 6 abaixo:

Figura 6 - Potência Outorgada de Origem Fóssil na Matriz Brasileira



Fonte: Adaptado de ANEEL

A Tabela 3 mostra a distribuição das usinas outorgadas pela ANEEL por estado.

Tabela 3 - Usinas Termoelétricas a Diesel outorgadas pela ANEEL

Usinas a Diesel Outorgadas pela ANEEL			
UF	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Média (kW)
SP	635	674.389,74	1.062,03
AM	103	545.578,00	5.296,87
RR	128	381.638,42	2.981,55
GO	61	345.087,59	5.657,17
RO	42	216.367,00	5.151,60
MG	344	215.244,68	625,71
PE	40	191.439,00	4.785,98
PA	60	172.486,75	2.874,78
RJ	108	142.885,40	1.323,01
AC	28	140.670,00	5.023,93
RN	28	135.891,80	4.853,28
BA	80	90.091,90	1.126,15
RS	97	83.140,60	857,12
SC	88	69.538,96	790,22
PR	48	61.614,75	1.283,64

MT	49	44.229,00	902,63
SE	33	32.427,40	982,65
AP	5	26.016,00	5.203,20
ES	21	22.566,40	1.074,59
CE	19	21.789,10	1.146,79
PI	16	17.006,00	1.062,88
DF	21	16.358,40	778,97
TO	24	10.509,00	437,88
AL	14	10.263,60	733,11
MA	11	8.066,60	733,33
MS	14	7.926,00	566,14
PB	6	6.074,80	1.012,47
TOTAL/Média	2.123,00	3.689.296,89	2.160,28

Fonte: Adaptado de Sistemas de Informações de Geração da ANEEL (SIGA)

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2023 (BEN 2023), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE, a energia elétrica no Brasil apresentou aumento de consumo e por conseguinte aumento de sua oferta interna disponibilizada a população de 2,3% e 1,6% respectivamente, isto é, a demanda de energia necessária para suprir a necessidade de energia do país aumentou mais que a geração nova instalada (Tabela 4).

Tabela 4 - Comparação Geração 2021 e 2022 (TWh)

Valores em TWh		2021	2022	Δ 22/21
Energia Elétrica Disponibilizada ¹	⬆	679,2	690,1	1,6%
Centrais elétricas SP ²	⬆	542,1	551,6	1,7%
Centrais elétricas APE ³	⬆	114,0	125,6	10,2%
Importação de eletricidade ⁴	⬇	23,1	12,9	-44,1%
Consumo Final ⁵	⬆	572,8	586,1	2,3%
Perdas (comerciais + técnicas)	⬇	106,4	104,0	-2,2%

⬆ **Aumento de 1,6%** da Energia Elétrica Disponibilizada

⬆ **Aumento de 2,3%** no Consumo Final de Eletricidade

¹ OIEE; ² Serviço Público; ³ Autoprodutoras de eletricidade; ⁴ Importação (-) exportação;

⁵ Consumo final de energia elétrica refere-se ao total: Sistema Interligado Nacional + Isolados + Autoprodução

Fonte: BEN 2023 | Relatório Síntese | Ano Base 2022

A diversificação da matriz elétrica é uma estratégia para garantir a segurança energética com modicidade tarifária. O Brasil tem buscado aumentar a participação de fontes renováveis em sua matriz, trazendo uma geração de energia de qualidade e sendo protagonistas na transição energética mundial.

Estudos da evolução da capacidade instalada do Operador Nacional do Sistema Nacional, ONS, para o SIN no horizonte de 2028 apontam uma menor participação proporcional das térmicas a óleo e Diesel na matriz, de 1,6% em 2024 para 1,5% em 2028. Porém esse número cresce em valores absolutos, de 3.429MW para 3.760MW. Este dado confirma que o Brasil continua focando na diversificação, e sustentabilidade da matriz, porém a geração a diesel permanece recebendo investimentos e tendo papel importante para a segurança energética do País.

Por esse motivo este estudo aborda uma tecnologia que podemos considerar aliada à transição energética. Ela atua na diminuição das emissões dos gases do efeito estufa nos motores de geração de energia elétrica que já operam no sistema, e em futuros que venham a ser instalados, sem perder as características fundamentais da geração a diesel de previsibilidade e segurança de abastecimento.

Segundo dados da EPE, Empresa de Pesquisa Energética, responsável pelos estudos e pesquisas destinados a subsidiar o planejamento do setor energético realizado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) em 2022, o sistema interligado apresentou uma redução significativa de 60% nas emissões totais em relação a 2021, motivado principalmente pelo regime hidrológico favorável que teve como consequência, menor despacho de termelétricas a combustíveis fósseis, e pelo aumento em 79,8% da participação da geração a partir da energia solar na operação do SIN, além do avanço orgânico das outras fontes renováveis.

Estes dados trazem reflexões importantes sobre a vulnerabilidade do sistema perante as mudanças climáticas, quando longos períodos de seca ainda impactam profundamente a sua estabilidade.

2.2. Sistemas Isolados

Denomina-se Sistema Isolado (SISOL) o sistema elétrico, que em sua configuração normal, não esteja conectado ao Sistema Interligado Nacional - SIN. Atualmente, existem cerca de 200 localidades isoladas no Brasil, a maior parte na região Norte (EPE).

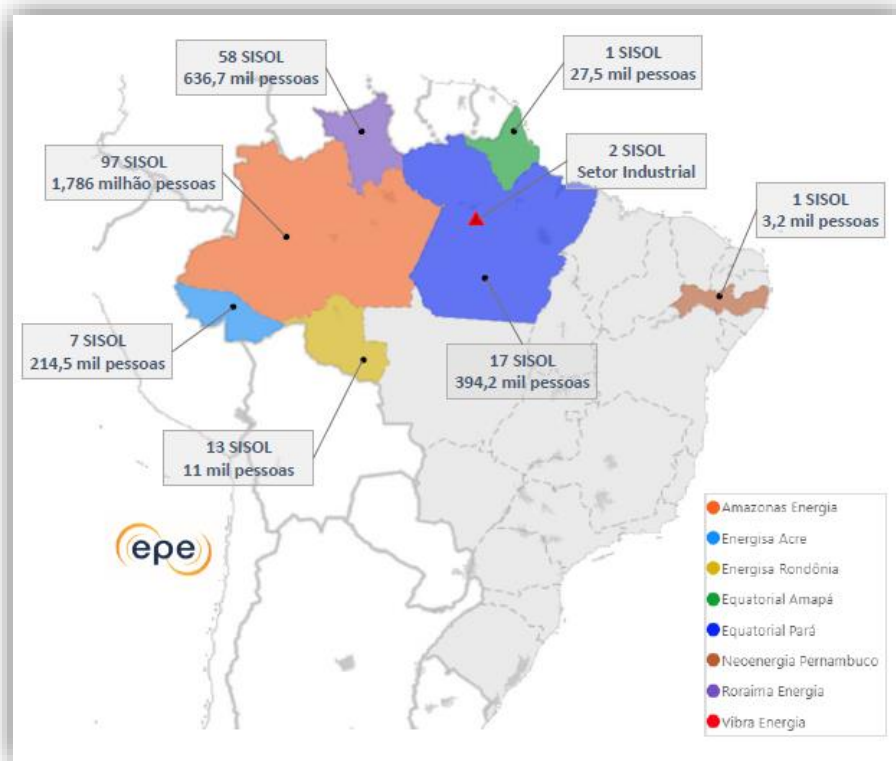
Os Sistemas Isolados brasileiros têm por característica predominante usinas térmicas de pequeno porte que usam o óleo diesel como combustível. Em geral

abastecem áreas com grande dificuldade de logística, tornando a operação mais onerosa e com grandes incertezas referente a previsibilidade de suprimento dos insumos necessários para sua boa operação.

Analisando SISOL de forma abrangente percebemos que a dimensão e a composição dos sistemas são bastante variadas, existindo sistemas de pequeno porte, com capacidade instalada de 5 kW, como é o caso de comunidades indígenas em Roraima, e sistemas de grande porte, como a capital do estado de Roraima, Boa Vista, que tem, atualmente, um parque gerador térmico da ordem de 500.000 kW (EPE).

Segundo dados sistematizados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS, 2021) o consumo de energia elétrica do SISOL é inferior a 1% (0,54% em 2023) da carga total do país, onde está concentrada somente 1,4% do total da população brasileira. Por outro lado, o SISOL atende mais de 40% do total da área do Brasil (figura 7).

Figura 7- Mapa do SISOL



Fonte: Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados – Ciclo 2023

Em 29/02/2024, a EPE lançou a primeira fase do PASI - Portal de Acompanhamento e Informações dos Sistemas Isolados trazendo, dentre outras, informações da geração atual e perspectivas para os próximos anos de interligações de regiões ao sistema interligado e substituição de parques a diesel por unidades geradoras a partir de fonte renovável.

Segundo o PASI, a geração a partir da queima de óleo Diesel deve chegar a mais de 2.000 GWh em 2024 conforme demonstrado na TABELA 5 classificando por empresa e tipo de geração (própria ou Produtor Independente de Energia)

Tabela 5 - - Geração Sistemas Isolados por empresa (MWh)

Síntese Balanço de energia por empresa (MWh)	PIE	Geração Própria	TOTAL
Empresa	Petróleo		
Vibra Energia	55.842,00	-	55.842,00
Energisa Rondonia	-	10.134,00	10.134,00
Equatorial Para	-	230.108,00	230.108,00
Neoenergia Pernambuco	32.480,00	-	32.480,00
Energisa ACRE	-	214.577,00	214.577,00
CEA	-	52.387,00	52.387,00
Roraima Energia (Interior)	3.042,00	26.801,00	29.843,00
Roraima Energia (capital)*	31.467,00	-	31.467,00
Amazonas Energia	24.587,00	1.445.970,00	1.470.557,00
TOTAL	147.418,00	1.979.977,00	2.127.395,00

Fonte: PASI 2024

Outro dado de Geração utilizado neste estudo foi o Planejamento dos Sistemas Isolados - Ciclo 2023, elaborado pela EPE, onde os números foram estimados e desta forma um pouco diferentes do que realmente foi realizado demonstrado pelo PASI. Conforme demonstrado pela Tabela 6.

Tabela 6 - Geração estimada para o SISOL 2023* - EPE

Fonte	Geração (MWh)
Óleo Diesel	2.602.256
Gás Natural	818.391
Biomassa/Biodiesel	301.711
Hidrelétrica	43.439
Fotovoltaica	7.543
TOTAL	3.773.340

*Valores realizados até setembro de 2023 e projetados de outubro a dezembro de 2023

Fonte: EPE

Apesar dos esforços e políticas para interligação dos sistemas isolados com a finalidade de reduzir as emissões e trazer maior confiabilidade ao sistema de abastecimento de energia elétrica na região da Amazônia Legal, estudos de expansão do Sistema Elétrico Brasileiro - SEB elaborados pela EPE no ciclo 2023 não contemplam cerca de 150 destas localidades até 2028, o que dá destaque a necessidade e importância econômica e ambiental de soluções para uma transição energética efetiva, viável e imediata para tais localidades.

A tecnologia de geração de hidrogênio sob demanda traz a característica necessária para auxiliar as reduções dentro deste cenário onde as termelétricas a diesel ainda não têm perspectiva de substituição por outra fonte de energia sustentável. Não sendo necessária a substituição dos ativos existentes, apenas a adaptação do motor ao equipamento, trazendo rapidamente redução das emissões e economia de combustível.

Um benefício paralelo atrelado a redução do consumo de óleo diesel trazido pela utilização da tecnologia de injeção de hidrogênio sob demanda é a redução na conta de consumo de combustível, a CCC. A CCC é um encargo que subsidia os custos de combustível usados na geração de energia em sistemas isolados. Este valor é cobrado nas contas de energia de todos os consumidores ligados às distribuidoras de energia do sistema interligado nacional. É determinado pela ANEEL e repassado via tarifas de energia elétrica. Com a redução do consumo de diesel, os valores repassados para cobrir esses custos diminuem. Isso pode aliviar a necessidade de subsídios, resultando em menor pressão sobre a CCC e, potencialmente, na redução desse encargo nas tarifas de energia.

3. CAPÍTULO 3

3.1. FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO

O conceito de utilizar hidrogênio como suplemento de combustível para melhorar a eficiência dos motores de combustão interna tem sido explorado há algumas décadas, mas seu uso prático e comercialização ganharam mais atenção nos últimos anos.

A adição de hidrogênio, em quantidades controladas, na injeção de ar da admissão do motor aumenta a eficiência do processo de combustão e traz alguns benefícios além da simples redução do consumo de combustível, principalmente no que tange as emissões de gases do efeito estufa atrelado a operação do equipamento.

Eletrolisador é um dispositivo que utiliza a eletrólise para decompor substâncias através da passagem de uma corrente elétrica. Na eletrólise, a corrente elétrica é usada para induzir uma reação química que não ocorreria espontaneamente. Neste caso separar a água em hidrogênio e oxigênio.

Os principais componentes do eletrolisador são:

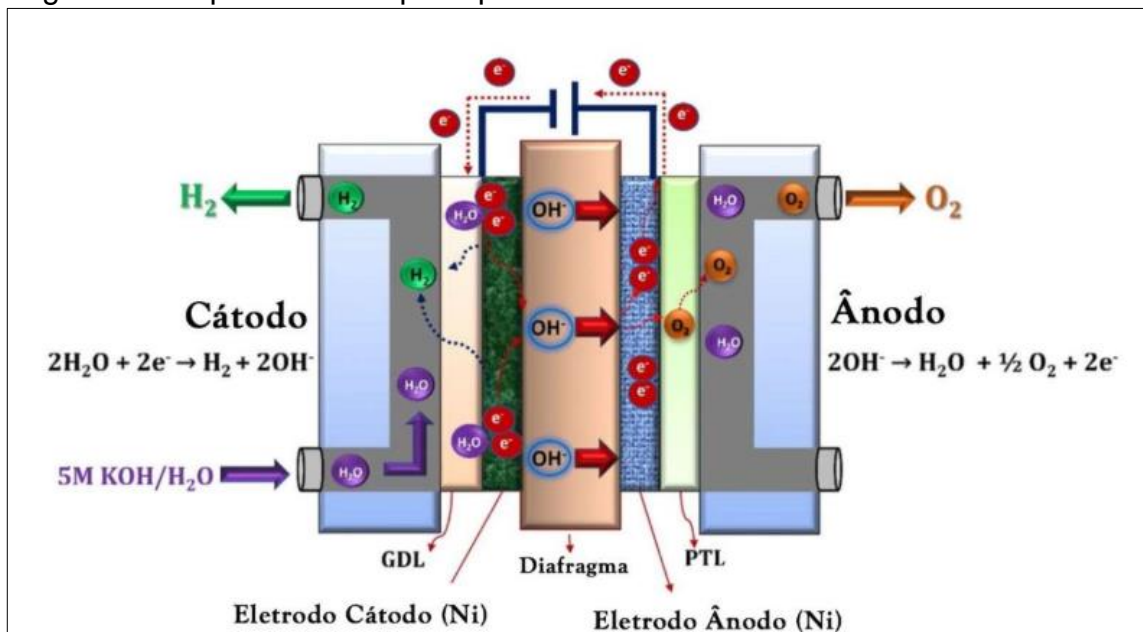
- Anodo: Onde ocorre a oxidação (perda de elétrons). No caso da água, o oxigênio é formado no anodo.
- Catodo: Onde ocorre a redução (ganho de elétrons). No caso da água, o hidrogênio é formado no catodo.
- Eletrólito: Um meio que conduz íons entre o anodo e o catodo para manter a neutralidade elétrica no sistema. – No caso da tecnologia escolhida é utilizado o KOH (Hidróxido de potássio)
- Fonte de energia elétrica: Fornece a energia necessária para a reação. – Nos grupos moto geradores é utilizado como fonte a energia provinda do alternador e da bateria. Desta forma não sobrecarregam os componentes que se considerados individualmente não teriam capacidade suficiente de prover a potência necessária para o bom funcionamento do equipamento (em torno de 200W).

Existem vários tipos de eletrolisadores, dos quais três tecnologias são as mais desenvolvidas e utilizadas: os eletrolisadores alcalinos que atuam a temperatura em

torno de 80 °C e utilizam uma solução aquosa de hidróxido de potássio (KOH) ou de hidróxido de sódio (NaOH) como eletrólito; eletrolisadores de membrana de troca de prótons (PEM) onde é utilizado um eletrólito polimérico sólido e também tem temperatura de atuação na mesma faixa de 80 °C e, finalmente, eletrolisadores de óxidos sólidos (SOEC). que são constituídos por materiais cerâmicos, onde o oxigênio atravessa esse material para o lado do ânodo e o hidrogênio permanece na primeira metade, decorrendo o processo a 500 °C (EDP)

O equipamento selecionado para este estudo produz hidrogênio e oxigênio de forma controlada através de um eletrolisador alcalino que realiza o processo de eletrólise em um reator vedado e não pressurizado, utilizando KOH na concentração 45% (Dynacert) misturado à água destilada como eletrólito.

Figura 8 - Esquemático do princípio de funcionamento da eletrólise alcalina.



Fonte: Adaptado de Puga e Asencios, 2023.

No processo da eletrólise da água as moléculas são divididas em íons de hidrogênio (H^+) e hidroxila (OH^-). O excesso de elétrons no cátodo forma pares de íons de hidrogênio em gás hidrogênio (H_2) que borbulha para fora da água. Os íons OH^- atravessam a membrana/diafragma entre os eletrodos para alcançar o ânodo e formar oxigênio (O_2).

A velocidade da chama do hidrogênio é aproximadamente 9 a 10 vezes maior que a do diesel (Tabela 7). Esta é a principal razão pela qual, quando adicionado à entrada

de ar de um motor diesel, o hidrogênio desencadeia a combustão do diesel mais rapidamente do que o diesel apenas com o ar pode queimar. Observe que a temperatura da chama do gás hidrogênio também é mais quente que a do diesel. Essas propriedades resultam em uma chama do motor que queima mais quente, mas por menos tempo. Resultando em menor temperatura operacional e melhor eficiência

Tabela 7 - Propriedades de diversos combustíveis

Propriedades	Medida	Diesel	Gasolina sem chumbo	Hydrogen
Velocidade de Chama	cm/s	30	37-43	265 - 325
Temperatura de Autoignição	°C	355	250-280	585
Temperatura de Chama	°C	2054	2138	2254
Energia Mínima de Ignição	mJ	5	0.24	0,02
Limites de Inflamabilidade	% volume no ar	0,7 - 5	1,4 - 7,6	119,93
Razão Stequiométrica do ar-combustível em base mássica		14,5	14,6	34,3
Valor de Aquecimento Líquido	MJ/kg	42,5	43,9	119,93

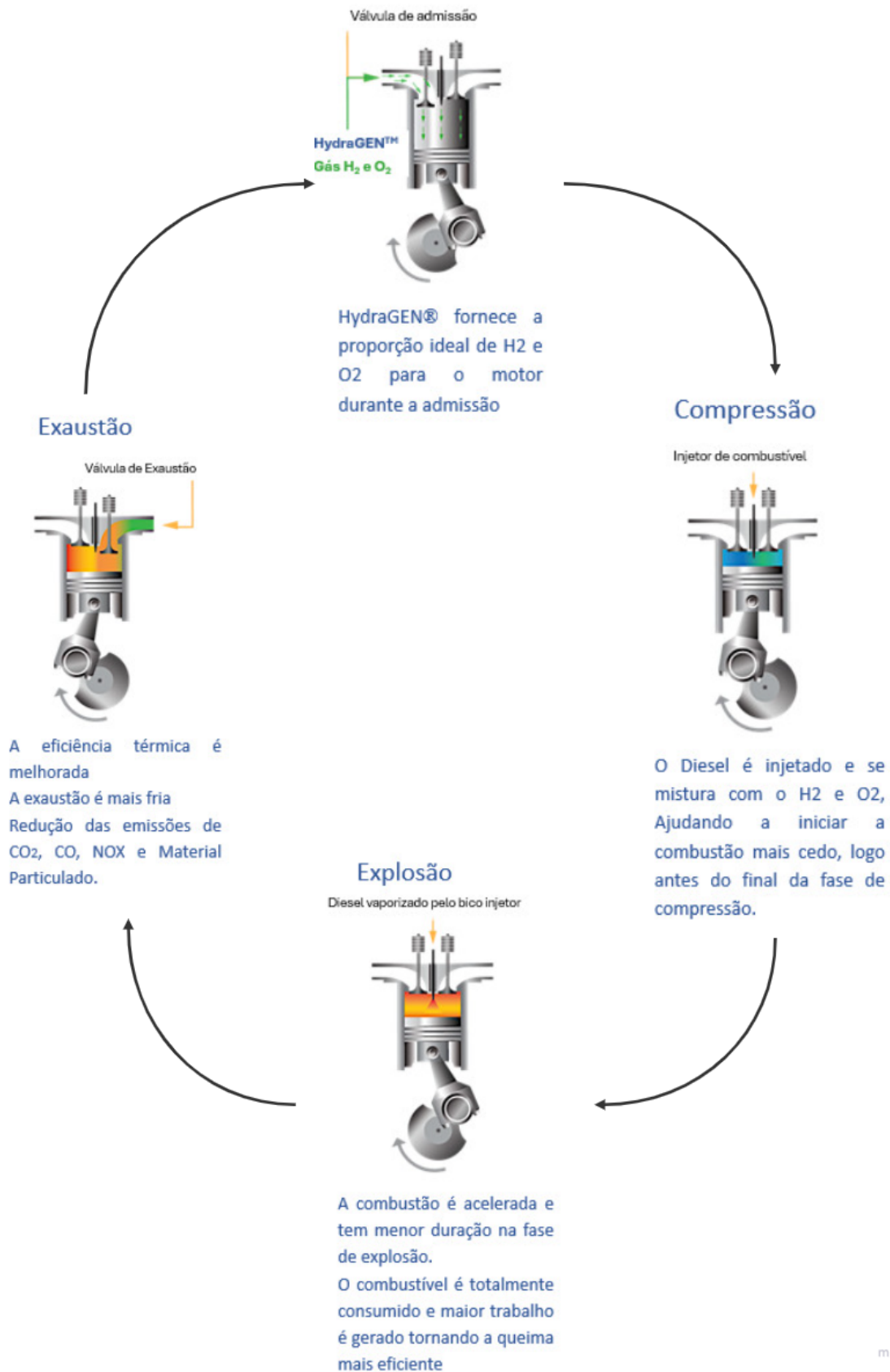
Fonte: Adaptado de Dynacert

No motor, a chama aprimorada com hidrogênio antecede a ignição no final do curso de compressão, produzindo mais calor e pressão. Mais calor gerado em um tempo mais curto resulta em mais pressão e queima mais completa para formar dióxido de carbono, em vez de formar subprodutos desta queima como monóxido de carbono, metano e outros hidrocarbonetos parcialmente queimados.

O monóxido de carbono é um bom indicador do desempenho do motor, uma vez que as emissões de CO no escape significam perda de energia química devido à combustão incompleta. Quanto menos CO melhor a queima.

Na figura 9 apresenta-se um esquema ilustrativo do funcionamento do motor a combustão com a tecnologia de injeção de hidrogênio.

Figura 9 - Funcionamento da injeção de HHO no motor a combustão

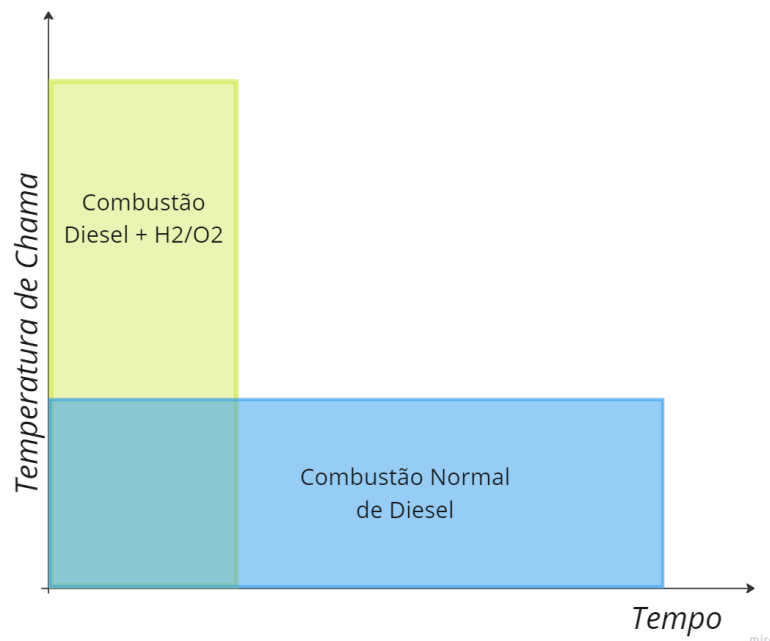


Fonte: Adaptado de Dynacert

Ao mesmo tempo, devemos ressaltar que existe um limite para injeção de hidrogênio no processo de combustão. A quantidade ideal a ser adicionada deve ser alinhada à queima do combustível injetado. Caso seja injetado mais hidrogênio que o necessário para a queima completa do combustível, o efeito é reverso, tornando o motor menos eficiente, pois, acelerando a combustão dentro do ciclo do motor, o hidrogênio tende a fornecer o trabalho de forma contrária ao movimento do pistão.

Outra vantagem atrelada a tecnologia é que o tempo de queima mais curto também limita os óxidos de nitrogênio (NO_x) formados quando o nitrogênio é exposto a altas temperaturas. Uma chama que queima até dez vezes mais rápido significa uma redução na janela de exposição para formar NO_x que é até dez vezes mais curta. Este conceito (queima mais curta e mais quente) é ilustrado no diagrama da figura 10. Observe que este diagrama tem apenas fins explicativos e não está em escala (DYNACERT).

Figura 10 - Diagrama Temperatura de Chama x Tempo para combustão normal de Diesel e Com H_2/O_2 adicionado



Fonte: Adaptado de Dynacert

Por sua vez a injeção de hidrogênio juntamente com o diesel diminui a quantidade de diesel consumida e aumenta a eficiência do motor, logo as emissões de CO_2 referentes a essa queima também diminuem.

4. CAPÍTULO 4

4.1. Eletrolisador

- Eletrolisador Dynacert

O equipamento escolhido para este projeto é composto de uma caixa contendo dois reservatórios de eletrólito/água destilada, um reator de célula inundada formado por placas de aço inoxidável positivas e negativas, componentes eletrônicos e uma mangueira reforçada para o transporte do hidrogênio do eletrolisador à entrada de ar do motor (DYNACERT).

Figura 11 -- Imagens do equipamento Hydragen selecionado



Fonte – Adaptado de Dynacert

Segundo dados do fabricante DYNACERT, o eletrolisador do HydraGEN® separa fisicamente o ânodo do cátodo em cada célula de eletrólise individual usando uma membrana permeável à água. Esta tecnologia permite que a água conduza eletricidade entre os eletrodos enquanto garante que todo o hidrogênio e o oxigênio produzidos permaneçam separados e inibe a produção de vapor de água.

4.2. CÁLCULO DAS EMISSÕES EVITADAS

Para o cálculo das emissões de CO₂ equivalentes evitadas deste estudo foram utilizados como premissa os dados das publicações oficiais da EPE, Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados, Ciclo 2023, Plano anual da operação energética

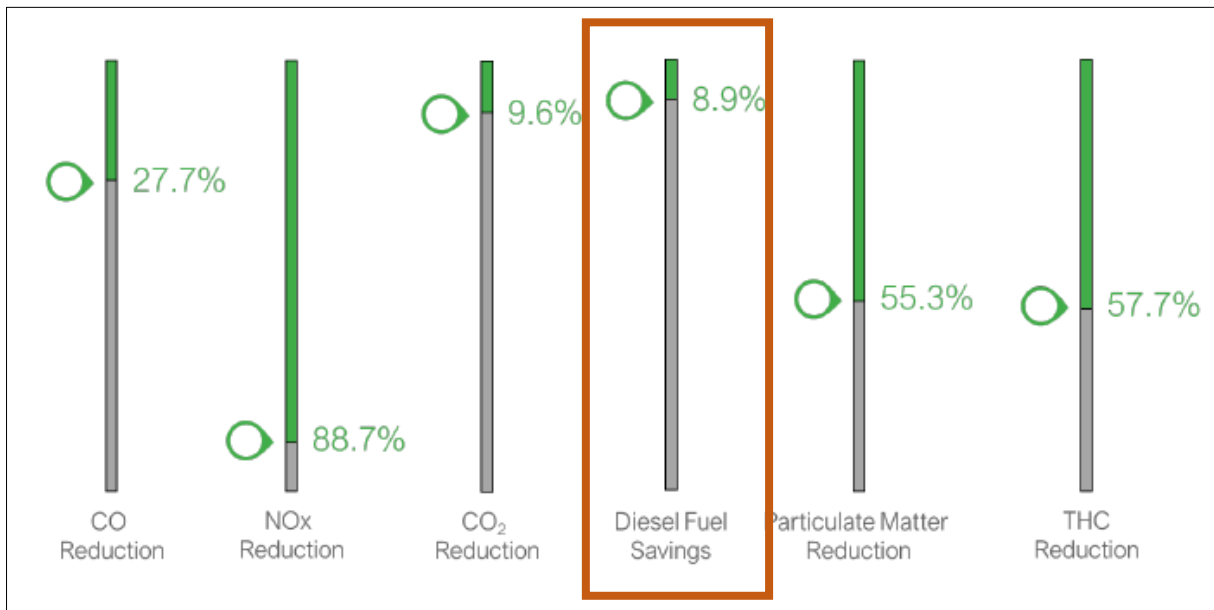
dos sistemas para 2023 do Operador Nacional do Sistema (ONS), Instrução Técnica da São Paulo Transporte S/A (SPTrans), Sociedade de Economia Mista controlada pelo município de São Paulo que tem por finalidade a gestão do sistema de transporte público por ônibus na cidade de São Paulo e documentos oficiais do fornecedor da tecnologia, Dynacert®,. A partir dessas informações pode-se estimar tamanho do mercado e o potencial de reduções dos gases de efeito estufa atrelados a matriz estudada.

Na operação de geradores de energia elétrica, é importante saber que cada grupo moto gerador tem um fator de emissão específico que deve variar com parâmetros como o carregamento do equipamento e condições de operação, tais como ventilação do local e temperatura ambiente. Porém, para fins desta avaliação apresentaram-se cálculos sobre valores médios obtidos através das informações da bibliografia citada. Desta forma tem-se a visão macro da possibilidade dos benefícios trazidos pela implantação da solução proposta.

Para esse estudo, apesar dos diversos benefícios enumerados da injeção do hidrogênio no processo de combustão, foi escolhida uma metodologia de relação direta entre redução do consumo de combustível e redução das emissões para quantificação deste ganho. Foram obtidos números macro indicativos e conservadores para reflexão sobre a adoção deste tipo de equipamento como alternativa a descarbonização da matriz elétrica amazônica a diesel. Para números mais precisos será necessário aprofundar sobre metodologias mais complexas que relacionem as emissões à implantação da tecnologia. Também poderá ser avaliada a inclusão de diferentes utilizações dos motores, onde a tecnologia pode atuar, como por exemplo, embarcações, muito comuns na região amazônica. Fica como sugestão para um estudo complementar, a partir de dados de campo e bibliográficos.

Tendo como base os dados e exemplo do fabricante obtidos a partir de testes realizados e certificados, encontrados no documento “HydraGEN™ Emissions Savings Example” (Figura 13), foram escolhidos 3 cenários de redução de consumo, sendo eles, inferior, médio e superior, no que tange a eficiência atingida pela tecnologia na operação do grupo moto gerador.

Figura 12 -Reduções baseadas em testes realizados pelo fabricante e motores de caminhão



Fonte: dynaCERT

Cabe a informação adicional que a redução em motores de caminhão, objeto dos testes de emissões realizados pelo fabricante com resultados apresentados na figura 11, tendem a ser menores que os aplicados a grupo moto geradores que trabalham de forma contínua, como é característico dos equipamentos do SISOL.

Quando há variação de rotação do motor, o equipamento precisa regular a quantidade de hidrogênio a ser enviada ao processo de combustão a fim de chegar mais próximo ao ponto ótimo de queima. Porém, operações em caminhões sofrem variações constantes de velocidade devido a vários fatores como curvas, obstáculos entre outros. Estas variações são lidas pela **ECU** (*Electronic Unit Control* – Unidade de controle Eletrônica do motor), mas a resposta depende de uma reação química do eletrolisador e, portanto, tem um tempo de resposta que não é instantâneo verificando-se assim resultados pouco menores quando comparado a motores que trabalham em regime estacionário. No segundo caso, o grupo moto-gerador que trabalha com uma carga pouco variável, tem velocidade praticamente constante otimizando a eletrônica do equipamento que determina a quantidade de hidrogênio a ser injetada, desta forma os resultados tendem a ser melhores que os obtidos no exemplo da figura 11.

Postas estas considerações, os cenários de eficiência atrelados ao consumo evitado na geração da matriz elétrica foram determinados conforme a tabela 8:

Tabela 8 -Cenários de ganhos de eficiência nas unidades de geração de energia elétrica

Cenários	
Superior	17,5%
Médio	12,5%
Inferior	7,5%

Fonte: Elaborado pela própria autora

A “instrução técnica – Metodologia para cálculo das emissões de poluentes” emitido pela prefeitura de São Paulo (SP-Trans – Junho de 2023) determina que a emissão de CO₂ está diretamente associada ao consumo de combustível. Com esta premissa, foi considerado neste estudo apenas a redução das emissões proporcionais ao consumo do diesel não alterando a emissão específica da matriz após a implantação da tecnologia proposta. De toda forma entendemos que o ganho da aplicação da tecnologia vai muito além desta simples relação *consumo x emissões*, pela melhoria da eficiência geral da combustão devido a injeção de hidrogênio no combustível. Porém foi escolhido permanecer com dados conservadores pela complexidade dos cálculos envolvidos para determinação de uma nova emissão específica bem como a falta de dados de medição para realizar tais elaborações.

O Planejamento dos Sistemas Isolados – Ciclo 2023, estudo elaborado pela **EPE**, estabelece estimativas de consumo de energia elétrica e de emissões atreladas a cada uma das fontes de geração (Figura 12).

Figura 13 - Emissões dos Gases de Efeito Estufa no Sistemas Isolados

Emissões estimadas na geração de energia nos Sistemas Isolados em 2023*

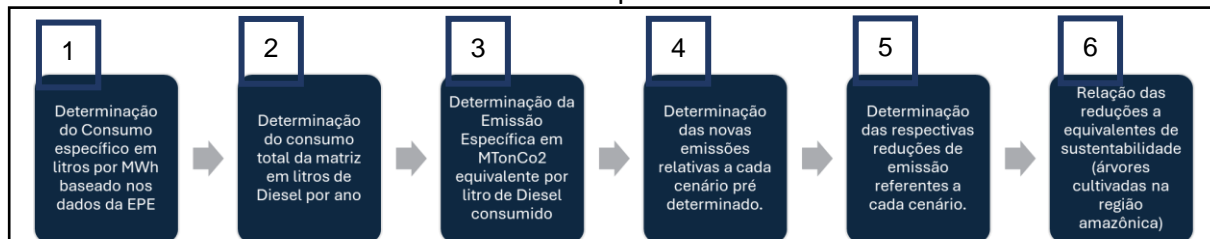
Fonte	Geração (MWh)	Emissões (MtCO ₂ eq/ano)	Emissões (%)
Óleo Diesel	2.602.256	2,103	86%
Gás Natural	818.391	0,331	14%
Biomassa/Biodiesel	301.711	-	0%
Hidrelétrica	43.439	-	0%
Fotovoltaica	7.543	-	0%
TOTAL	3.773.340	2,434	100%

* Valores realizados até set/23 e projetados de out/23 a dez/23 (Fonte: CCEE, ONS e EPE)

Fonte: CCEE, ONS e EPE

A partir desses dados foi estabelecido o seguinte fluxo de informações, detalhado em seguida (conforme enumerados) na figura 14, para a determinação do potencial de redução atrelado a cada cenário e sua equivalência de sustentabilidade:

Figura 14 - Fluxo de informações para determinação das reduções das emissões para cada cenário estabelecido e suas equivalências de sustentabilidade



Fonte: Elaborado pela própria autora

1 - Consumo Específico (litros por ano)

A partir dos dados de geração e consumo informados no plano anual a operação energética dos sistemas isolados para 2023 realizado pelo ONS para cada distribuidora do sistema isolado foi calculado o consumo específico de cada uma em que foram apresentados os dados de geração e consumo separadamente. Com todos os consumos foi calculada a média conforme demonstrado na tabela 9 – Consumo Específico Médio Global.

Tabela 9 - Consumo Específico Médio Global

Distribuidora	Geração	Consumo de Diesel		Consumo específico Calculado
	MWh	m ³	l	l/MWh
Amazonas Energia	1.993	695	695.000	348,72
Amazonas Energia	2.714	893	893.000	329,03
Amazonas Energia	1.105	446	446.000	403,62
Amazonas Energia	301	99	99.000	328,90
Amazonas Energia	5.084	1.469	1.469.000	288,95
Amazonas Energia	23.725	6.714	6.714.000	282,99
Amazonas Energia	17.987	5.090	5.090.000	282,98
Amazonas Energia	2.850	824	824.000	289,12
Amazonas Energia	1.306	456	456.000	349,16
Amazonas Energia	18.420	5.213	5.213.000	283,01
Amazonas Energia	148.601	31.206	31.206.000	210,00
Vibra energia	47.586	13.467	13.467.000	283,00
Vibra energia	8.506	2.407	2.407.000	282,98
Roraima energia*	3.612	1.022	1.022.000	282,95
Roraima energia*	220.789	62.483	62.483.000	283,00
Roraima Energia (Interior)	8.440	2.605	2.605.000	308,65
MÉDIA GLOBAL				302,32

Fonte: Adaptado de ANEEL

Cemg – Consumo Específico Médio Global

$$\text{Cemg} = 302,32 \text{ l/MWh} \quad (1)$$

2- Consumo total de Diesel da matriz elétrica do SISOL (litros de Diesel por ano)

O consumo de diesel referente a geração anual da matriz estudada foi estimado a partir do consumo médio específico global calculado acima (Cemg) e a geração anual publicada pela **EPE** no Planejamento dos Sistemas Isolados – Ciclo 2023, sendo:

Gsisol – Geração de energia elétrica da matriz do SISOL em MWh

Cemg – Consumo Específico Médio Global em l/MWh

Cte – Consumo Total Estimado da matriz elétrica do SISOL em litros de Diesel por ano

$$\text{Cte} = \text{Gsisol} \times \text{Cemg}$$

$$\text{Cte} = 2.602.256 \times 302,32$$

$$\text{Cte} = 786.794.241,44 \text{ litros de Diesel por ano} \quad (2)$$

3 - Emissão Específica (MtCO₂equivalente por litro de Diesel consumido)

A emissão específica da matriz elétrica dos sistemas isolados foi calculada a partir da relação entre a emissão total da matriz publicada pela EPE no Planejamento dos Sistemas Isolados – Ciclo 2023 e o consumo anual calculado (**Cte**), sendo:

Eesp – Emissão específica da matriz elétrica do SISOL

Etot – Emissão total da matriz elétrica do SISOL em MtCO_{2eq}/ano

Cte - Consumo Total Estimado da matriz elétrica do SISOL em litros de Diesel por ano

$$Eesp = Etot / Cte$$

$$Eesp = 2,103 / 786.704.241,44$$

$$\mathbf{Eesp = 2,67 \times 10^{-9} \text{ MtCO}_{2eq}/l} \quad \mathbf{(3)}$$

4 - Redução das Emissões

A fim de analisar o impacto dos diferentes cenários sobre o volume de emissões, foram calculadas as emissões em CO₂ equivalente para cada um deles, aplicando diretamente a porcentagem de redução pré-determinada à Emissão Total estimada pela EPE.

Nova Emissão = Emissão EPE x (1 - % do cenário):

$$\text{Superior} \rightarrow 2,103 \times (1-0,175) = 1,73 \text{ MtCO}_{2eq}$$

$$\text{Médio} \rightarrow 302,56 \times (1-0,125) = 1,84 \text{ MtCO}_{2eq}$$

$$\text{Inferior} \rightarrow 302,56 \times (1-0,075) = 1,95 \text{ MtCO}_{2eq}$$

As reduções são dadas então pela subtração da emissão informada pela EPE e a nova calculada para cada cenário:

$$\text{Redução} = \text{Emissão EPE} - \text{Nova Emissão}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{Superior} \rightarrow 2,103 - 1,73 = 0,37 \text{ MtCO}_{2\text{eq}}/\text{ano} \\
 \text{Médio} \rightarrow 2,103 - 1,84 = 0,26 \text{ MtCO}_{2\text{eq}}/\text{ano} \\
 \text{Inferior} \rightarrow 2,103 - 1,95 = 0,16 \text{ MtCO}_{2\text{eq}}/\text{ano}
 \end{array}
 \quad (4)$$

Tabela 10 - Redução das emissões nos 3 cenários determinados: inferior, médio e superior

Redução das emissões em cada cenário				
Cenários		Nova Emissão (MtCO _{2eq})	Redução	
Inferior	7,5%	1,95	0,16	MtCO _{2eq}
Médio	12,5%	1,84	0,26	
Superior	17,5%	1,73	0,37	

Fonte: Elaborado pela própria autora

Cabe reforçar que as emissões foram estimadas de forma conservadora considerando apenas a relação direta do consumo de diesel evitado e a redução das emissões, desconsiderado as reduções referentes a melhor queima onde os gases serão reduzidos em outras proporções (figura 11) acarretando conseqüentemente uma nova relação de emissões por litro de diesel consumido.

Equivalentes de Sustentabilidade:

Os equivalentes de sustentabilidade são valores relacionados a quantidade evitada de CO_{2eq} para uma determinada atividade. A fim de ilustrar os ganhos da introdução da tecnologia no parque gerador do SISOL foi escolhido o equivalente ao número de árvores cultivadas na Amazônia.

O número de árvores cultivadas é calculado usando como base a quantidade de CO₂ equivalente removido por uma árvore plantada e cultivada por 20 anos. O fator de retenção de CO₂ equivalente depende da espécie da árvore.

Para um fim meramente ilustrativo foi retirado do site do laboratório de Silvicultura Tropical uma média de **221,6 Kg de CO₂ equivalente evitado para cada Árvore cultivada na Amazônia.**

Abaixo temos a tabela demonstrativa dos valores equivalentes ao número de árvores plantadas para cada um dos cenários:

Tabela 11 - Número de árvores equivalente por ano a redução de emissões em cada cenário pré-determinado

Cenários	Equivalente em Árvores por ano	Equivalente em árvores por 20 anos
Inferior	711.755,42	14.235.108,30
Médio	1.186.259,03	23.725.180,51
Superior	1.660.762,64	33.215.252,71

Fonte: Elaborado pela própria autora

Podemos observar que no cenário superior estaríamos evitando o equivalente ao plantio de mais de **um milhão e seiscentas mil arvores por ano na região da floresta Amazônica.** Sabendo que esses valores são cumulativos, ao longo de 20 ano pode-se alcançar a redução superior a **trinta e três milhões de árvores.** Um valor expressivo diante de uma solução de simples implementação.

5. CONCLUSÃO

A aplicação da tecnologia de redução de emissões baseada no uso de hidrogênio sob demanda em motores a combustão apresenta um potencial significativo para trazer benefícios ambientais e econômicos ao sistema isolado de energia na Amazônia.

A forte presença de termoelétricas a diesel nesta região devido a inviabilidade de outras formas de geração renovável, reforça que esta pode ser considerada uma tecnologia que não apenas contribui para a mitigação das mudanças climáticas, mas também promove o desenvolvimento sustentável na região, trazendo alternativas de redução das emissões onde outras formas de geração de energia não se

demonstraram viáveis ou não é possível a interligação ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

Os principais pontos discutidos neste trabalho incluem a visão geral do setor elétrico brasileiro, a dependência do diesel na matriz elétrica do sistema isolado, concentrado principalmente na região da floresta amazônica e a contribuição do uso de hidrogênio como combustível alternativo em motores a combustão para a redução dos gases do efeito estufa.

A implementação desta tecnologia pode levar a uma maior independência energética, redução de custos operacionais a longo prazo e melhoria na qualidade de vida dos habitantes da região.

Portanto, conclui-se que a adoção da tecnologia de injeção de hidrogênio sob demanda em motores a combustão em motores à diesel implantados nos sistemas isolados da Amazônia representa uma oportunidade significativa para promover a sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento econômico na região, reduzindo significativamente as emissões atreladas a operação desta matriz. Recomenda-se a continuidade de pesquisas e projetos pilotos para validar e aperfeiçoar esta tecnologia, assim como a criação de parcerias entre governos, instituições de pesquisa e setor privado para viabilizar sua implementação em larga escala.

Por fim, espera-se que este estudo contribua para o avanço do conhecimento sobre tecnologias sustentáveis e inspire futuras iniciativas voltadas para a preservação da Amazônia e a melhoria da qualidade de vida de suas populações.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

- Estudo de viabilidade técnico-econômica da implantação da tecnologia de hidrogênio sob demanda na região do SISOL.
- Estudo de laboratório que caracterize as emissões da implantação da tecnologia de injeção de hidrogênio sob demanda em geradores estacionários.

6. BIBLIOGRAFIA

Asencios, Mariana dos Santos Puga e Yvan Jesus Olortiga. 2023. Avanços e limitações da produção, armazenamento e transporte de hidrogênio. *Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2023) v. 10, n. 2, pp. 74–93 . 2023.*

Barreto, Gustavo de Andrade. 2014. *Avaliação de metodologias de aplicação de oxí-hidrogênio em motores de combustão interna.* São Paulo : s.n., 2014. 49f.: il.; 30 cm..

Brasil, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. 2020. *Plano Nacional de Energia 2050.* Brasília : Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética, 2020. MME/EPE, 2020.

Cassidy, John F. 1977. *EMISSIONS AND TOTAL ENERGY CONSUMPTION OF A MULTICYLINDER PISTON ENGINE RUNNING ON GASOLINE AND A HYDROGEN-GASOLINE MIXTURE.* Washington, D. C : National Aeronautics and Space Administration, 1977. NASA TN D-8487.

CLAUDIO, José. 2009. <https://www.joseclaudio.eng.br/>. *Motores, geradores e dinamômetros.* [Online] 2009. [Citado em: 15 de 03 de 2023.]
http://www.joseclaudio.eng.br/geradores/Diesel_versus_gas.html.

Climate Watch. 2024. Historical GHG Emissions. *Climate Watch.* [Online] Climate Watch, 2024. [Citado em: 02 de 03 de 2024.] https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=sector&end_year=2020&start_year=1990.

Comitê Executivo Global da BlackRock. BlackRock - Carta aos clientes. *BlackRock.* [Online] BlackRock. [Citado em: 18 de 05 de 2024.]
<https://www.blackrock.com/br/blackrock-client-letter>.

COMPARAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO GERADOR A DIESEL E PAINÉIS FOTOVOLTAICOS PARA ÁREAS RURAIS ISOLADAS. **SCHNEIDER, FRANCIELLE PAREJA. 2019.** Cascavel : s.n., 2019.

—. **SCHNEIDER, FRANCIELLE PAREJA. 2019.** CASCABEL : s.n., 2019.

Cunha, Paula Cordeiro Rodrigues da. 2017. *Efeito da adição de hidrogênio produzido a partir de eletrólise alcalina no desempenho de um motor a combustão interna.* Uberlândia : s.n., 2017. C972e.

Direção-Geral de Energia e Geologia. 2018. *O Hidrogénio no Sistema Energético Português: Desafios de integração.* s.l. : Europrint, Lda., 2018.

EDP S.A. Histórias EDP. *Hidrogenio: O elemento transformador da economia e do planeta.* [Online] EDP S.A. [Citado em: 24 de 04 de 2024.] <https://www.edp.com/pt-pt/historias-edp/o-que-e-o-hidrogenio>.

EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA GERADA POR USINAS HIDROELÉTRICAS EÓLICAS E TERMOELÉTRICAS NO BRASIL. **LOURENÇO, THUANY MARRA DE FIGUEREDO. 2016.** BELO HORIZONTE : s.n., 2016. 89 f. il.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. 2023. *Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados, Ciclo 2023.* 2023. EPE/DEE081/2023/RO.

FATOR DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL; IMPLICAÇÕES DA APLICAÇÃO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA. **MIRANDA, MARIANA MAIA DE. 2012.** SÃO CARLOS : s.n., 2012. M672F.

Geitmann, Sven. 2022. THE END OF THE INTERNAL COMBUSTION or the the debut of stationary hydrogen engines? *H2 international Journal - The e-journal on hydrogen and fuel cells.* 1, 2022.

IEMA. 2022. INVENTÁRIO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS EM USINAS TERMELÉTRICAS. *INVENTÁRIO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS EM USINAS TERMELÉTRICAS.* SÃO PAULO, SÃO PAULO, BRASIL : s.n., JUNHO de 2022.

Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA). 2023. *3º Invetário de emissões atmosféricas em usinas termelétricas.* São Paulo : s.n., 2023.

Instituto E+ . 2022. *Transição Energética (2022). Descarbonização do Setor de Energia no Brasil.* RE DE JANEIRO : s.n., 2022.

IPCC. 2023. <https://www.gov.br/>. *Fator médio - Inventários corporativos*. [Online] 2023. [Citado em: 10 de 03 de 2023.] <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>.

John M. Simon, CSP, Booz Allen Hamilton Inc. Stephen Brady, Booz Allen Hamilton Inc. Dana Lowell, M. J. Bradley & Associates Michael Quant, Booz Allen Hamilton Inc. 2007. *Guidelines for Use of Hydrogen Fuel in Commercial Vehicles*. Washington, DC : U.S. Department of Transportation, 2007. FMCSA-RRT-07-020.

LASTROP - ESLAQ / USP- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Laboratório de Silvicultura Tropical - LASTROP. [Online] LASTROP - ESLAQ / USP- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. [Citado em: 25 de 02 de 2024.] https://esalqlastrop.com.br/capa.asp?pi=calculadora_emissoes.

Life cycle assessment of electricity generation in Mexico. **E. Santoyo-Castelazo, H. Gujba, A. Azapagic. 2011.** MANCHESTER : ELSEVIER LTD, 2011.

2018. Ministério de Minas e Energia (MME) e Empresa de Pesquisa Energética (EPE). *Potencial dos Recursos Energéticos*. Rio de Janeiro : s.n., 2018. NOTA TÉCNICA PR 04/18.

MME E EPE. 2023. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2023. *RELATÓRIO SÍNTESE*. 2023.

Observatório Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) rio do clima. 2023. *Análise das emissões de gases do efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2021*. Piracicaba : Observatório do Clima, 2023.

ONS - Operados Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro. 2024. O sistema em números. *ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico*. [Online] ONS, 2024. [Citado em: 04 de 03 de 2024.] <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>.

Procedimentos de Contas Setoriais - Modulo 2 - Conta de Consumo de Combustíveis. **CCEE - Camara de Comercialização de Energia Elétrica. 2022.** 2022, Vol. Revisão 10.0.

SP TRANS. 2023. INSTRUÇÃO TÉCNICA 11. *METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE EMISSÕES DE POLUENTES*. SÃO PAULO : s.n., 2023.

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (IFES), Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). 2022. *Plano de Descarbonização e Neutralização das Emissões de GEE do Espírito Santo*. Vitoria : s.n., 2022. XX p. il. color.

Veiga, Leandro Emiliano Tiago. 2022. *Hidrogênio Verde e sua Implementação no Sistema Elétrico Nacional*. Porto, PT : s.n., 2022.

Warwick Manfrinato, Edson Vidal, Pedro Brancalion. COMO COMPENSAR SUAS EMISSÕES NO TRANSPORTE DO DIA A DIA. <https://esalqlastrop.com.br>. [Online] [Citado em: 13 de 05 de 2024.]
https://esalqlastrop.com.br/capa.asp?pi=calculadora_emissoes.