

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Carolina Bühler Riccieri

**Geração de hidrogênio “on-board” para
aplicação em veículos: avaliação técnico
ambiental das tecnologias existentes**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Florian Alain Yannick Pradelle

Rio de Janeiro
Dezembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Florian Alain Yannick Pradelle por ter sido nada além de excepcional comigo.

Agradeço à Puc e às agências CNPq, CAPES e FAPERJ pelo apoio concedido no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Orlando e Claudia, minha irmã, Amanda, e toda minha família por todo o apoio durante a realização deste trabalho.

Agradeço meus amigos Ana Beatriz, William, Fernanda e Luis por todo o apoio ao longo do curso.

Agradeço especialmente meu grande amor Gabriel que não foi nada mais do que um grande apoiador neste tempo de realização de trabalho final.

RESUMO

Geração de hidrogênio “on-board” para aplicação em veículos: avaliação técnico ambiental das tecnologias existentes

O surgimento de novas tecnologias manifesta-se devido a necessidade de inovação das tecnologias já existentes que são dependentes dos recursos fósseis, e, logo, prejudiciais ao meio ambiente. A rota de bioeletrificação no setor automotivo é uma ótima exemplificação de como novas tecnologias surgem, desde os híbridos, células a combustível aos 100% elétricos, com o objetivo de seguir uma direção de inovação e melhoria. Foi realizado um levantamento da literatura usando o método de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) levando em consideração o potencial de emissão de CO₂ (g CO₂eq/MJ) e a razão energética (Output/Input) das soluções tecnológicas levando a eletrificação da frota, a saber as tecnologias fósseis (gasolina, diesel e gás natural), as tecnologias biocombustíveis (etanol, biodiesel e HVO), as tecnologias célula a combustível (SOFC e PEM), os híbridos (PHEV e HEV) e os elétricos (BEVs). Foram analisados 32 artigos nos quais foram identificados 159 cenários, com diversos tipos de perímetro coberto podendo ser Well to Gate (produção do combustível), Well to Tank (da produção ao posto) e Well to Wheel (do poço ao uso final). As tecnologias CaC (SOFC – reforma água) possuem o menor impacto de emissão de CO₂ (3,5 g CO₂/MJ), representando por volta de 8,5% da emissão do gás natural (41 g CO₂/MJ), e possuem razão energética de 2,4, por volta de 50% do valor do gás natural. No entanto, os biocombustíveis possuem a maior razão energética de 6,28 dentre as tecnologias citadas acima, apesar de sua emissão de CO₂ ser 22 g CO₂/MJ, o que apesar de não ser o melhor valor, os torna uma boa opção para substituir os combustíveis fósseis. Além disso, analisam-se alguns custos de produção e de distribuição (venda), onde os elétricos possuem o menor custo de produção que vai refletir no custo por quilômetros rodados, apesar do seu custo de distribuição não ser o menor. Os biocombustíveis apesar de terem um custo de produção maior que os fósseis, possuem o preço de distribuição menor. Já para os custos dos veículos, já era esperado que os veículos com novas tecnologias como CaC fossem mais caros porque são mais complexos e exigem um alto custo de investimento, o que acaba afetando o valor gasto de combustível por quilometragem percorrida. Observa-se que é importante que haja um investimento através de políticas públicas para o incentivo do desenvolvimento destas novas tecnologias, pois em muitos contextos elas são melhores do que as tecnologias fósseis das quais se depende e se gera um efeito GEE muito grande.

Palavras Chave:

Avaliação de Ciclo de Vida (ACV); Razão Energética; Análise econômica; Combustíveis; Bioeletrificação; Célula a Combustível (CaC).

ABSTRACT

On-Board Hydrogen Generation for Vehicle Application: Environmental Technical Assessment of Existing Application

The emergence of new technologies is due to the need for innovation of existing technologies that are dependent on environmentally harmful fossil resources. The bioelectrification route in the automotive sector is a great example of how new technologies emerge from hybrid, fuel cells to 100% electric, with the aim of following a direction of innovation and improvement. A literature survey was performed using the Life Cycle Assessment method (LCA) taking into consideration the CO₂ emission potential (g CO₂eq/MJ) and the energy ratio (Output/Input) of technological solutions leading to electrification of the fleet, such as fossil (gasoline, diesel and natural gas), biofuel(ethanol, biodiesel and HVO), fuel cells (SOFC and PEM), hybrids (PHEV and HEV) and electric technologies (BEVs). Thirty-two articles were analyzed in which 159 scenarios were identified, with different types of perimeter covered being Well to Gate (fuel production), Well to Tank (from production to gas station) and Well to Wheel (from well to end use). Fuel cell technologies (SOFC – water reforming) have the lowest impact of CO₂ (3,5 g CO₂/MJ), representing around 8,5% of natural gas emissions (41 g CO₂/MJ), and have an energy ratio of 2,4, around 50% of the value of natural gas. However, biofuels have the highest energy ratio of 6,28 among the technologies mentioned previously, although their CO₂ emissions are 22 g CO₂/MJ, which is not the best value, but still makes them a good option to replace the fossil fuels. In addition, some production and distribution costs (sale) are analyzed, where the electric technologies have the lowest value for production cost, which causes a reflection on their cost per kilometers driven, although its distribution cost is not the lowest Biofuels have a higher production cost than fossils, their distribution price is lower. As for vehicle costs, it was expected that vehicles with new technologies like fuel cell vehicles would be more expensive because they are more complex and require a high investment cost, which ends up affecting the fuel cost per kilometers driven. It is noted that it is important that there is investment through public policies to encourage the development of these new technologies, as in many contexts they are better than the fossil technologies on which there is a large dependence and a very large GHG effect is generated.

Keyword:

Life Cycle Assessment (LCA); Energetic Reason; Economic Analysis; Fuels; Bioelectrification; Fuel Cell (FC).

SUMÁRIO

Introdução	9
1 Revisão bibliográfica	14
1.1. Evolução dos combustíveis no mundo	14
1.1.1. Combustíveis fósseis	15
1.1.2. Biocombustíveis	18
1.1.3. Biohidrogênio e bioelétricos	19
1.2. Evolução das tecnologias no mundo	21
1.2.1. Veículos bioelétricos	21
1.2.2. Veículos elétricos	22
1.3. Foco nas células a combustível	24
1.3.1. Tecnologias de células a combustível	24
1.3.2. Eficiência	26
1.4. Políticas públicas	28
1.5. Avaliação do ciclo de vida	30
1.5.1. Definição geral	30
1.5.2. Estrutura da ACV	30
1.5.3. Limitações	34
2 Metodologia	35
2.1. Objetivos	35
2.2. Levantamento da literatura	35
2.3. Tratamento dos dados	37
2.4. Estudo financeiro	38
3 Resultados	39
3.1. Análise estatística da amostra da literatura	39
3.2. Parâmetro de emissão de CO ₂ equivalente	44
3.2.1. Motores térmicos	44
3.2.2. Células a combustível	48

3.2.3. Veículos híbridos e elétricos	50
3.2.4. Conclusão parcial	53
3.3. Razão Energética	55
3.3.1. Discussão dos resultados	55
3.3.2. Conclusão parcial	58
3.4. Análise do custo das tecnologias	59
3.4.1. Custo de produção	59
3.4.2. Custo de venda	60
3.4.3. Custo de aquisição dos veículos	61
3.4.4. Conclusão parcial	62
4 Conclusão	64
5 Referências Bibliográficas	67

Lista de Figuras

Figura 1: Transição dos sistemas de energia globais adaptado de [1].	9
Figura 2: Consumo de energia renovável e fóssil em prédios, indústrias e no transporte. Casos de Referência e de Remap. 2016 e 2050, adaptado de [3].	10
Figura 3: Tipos de combustíveis renováveis e não renováveis adaptado [6]. Fonte:[6]	11
Figura 4: Oferta interna de energia no Brasil – Ano base 2018, Fonte: BEN 2019	12
Figura 5: Matriz Elétrica Brasil ano base 2018, Fonte: BEN 2019	13
Figura 6: Análise da emissão de GEE no ciclo de vida, Fonte: Fórum Mckinsey 2018	14
Figura 7: Exemplo comparativo dos efeitos negligentes relativos quanto a temperatura ambiente e altitude na performance de uma CaC adaptado de [7].	15
Figura 8: Consumo Global de Combustível fóssil em TWh por fontes de combustíveis fosseis adaptado de [9]...	16
Figura 9: Emissão de gases efeito estufa, Mundo. Emissão de gases efeito estufa por fontes de gás, medido em toneladas equivalentes de dióxido de carbono (tCO ₂ e). Gases são convertidos para seus valores de CO ₂ e baseado no seu fator potencial de aquecimento global. HFC, PFC e SF ₆ são conhecidos como 'F-gases' adaptado de [9]. Fonte: Our World in Data	17
Figura 10: Projeção da produção de óleo de acordo com a ASPO 2009 alterado de [11].	17
Figura 11: Comparativo da energia específica e da densidade de energia de diferentes tipos de combustíveis adaptado de [17].	20
Figura 12: Visão geral de todas as cadeias do processo avaliadas adaptado de [19].	20
Figura 13: Análise de diferentes tecnologias na Suécia, Europa e EUA. Fonte: Adaptada de [65]	23
Figura 14: Geradores de CaC em desenvolvimento e os atuais mercados-alvo adaptado de [32].	24
Figura 15: Princípios operacional de uma PEM adaptado de [32].	25
Figura 16: Princípios operacional de uma SOFC adaptado de [32].	26
Figura 17: Eficiência de sistemas elétricos de CaC comparado com outras tecnologias adaptado de [33].	27
Figura 18: Exemplo comparativo de tipos de tecnologias adaptado de [33].	28
Figura 19: Estrutura da ACV (ISO 14040:2006; modificada de [36])	31
Figura 20: Exemplo de perímetro escolhido para o estudo LCA (1-WtG, 2-WtT, 3-WtW) adaptado de [37]	32
Figura 21: Exemplos de impactos potenciais ao ambiente adaptado de [16]	33
Figura 22: Distribuição dos artigos ao longo dos anos	39
Figura 23: Distribuição dos artigos por país	40
Figura 24: Distribuição dos cenários pelos anos	41
Figura 25: Distribuição dos indicadores por cenários	42
Figura 26: Distribuição dos artigos por perímetro	43
Figura 27: Tipos de métodos de alocação utilizados nos artigos	44
Figura 28: Parâmetro de Emissão de CO ₂ Equivalente dentre os combustíveis fósseis	45
Figura 29: Parâmetro de Emissão de CO ₂ Equivalente dentre os biocombustíveis	46
Figura 30: Parâmetro de Emissão de CO ₂ Equivalente dentre as misturas combustíveis	47

<i>Figura 31: Parâmetro de Emissão de CO₂ Equivalente das CaC dentre as fontes de matéria</i>	<i>48</i>
<i>Figura 32: Parâmetro de Emissão de CO₂ Equivalente dentre as tecnologias a hidrogênio.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 33: Parâmetro de Emissão de CO₂ Equivalente dentre os híbridos</i>	<i>51</i>
<i>Figura 34: Parâmetro de Emissão de CO₂ Equivalente dentre as tecnologias elétricas</i>	<i>53</i>
<i>Figura 35: Parâmetro de Emissão de CO₂ Equivalente dentre as tecnologias.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 36: Razão Energética para os combustíveis fósseis usados em motores térmicos.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 37: Razão Energética para os biocombustíveis usados em motores térmicos</i>	<i>56</i>
<i>Figura 38: Razão Energética dentre as tecnologias de hidrogênio.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 39: Razão Energética dentre as tecnologias.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 40: Custos dos combustíveis para o deslocamento de 100.000 km e 500.000 km</i>	<i>62</i>

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1: Modelo utilizado para o levantamento de dados.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 2: Custo de Produção de alguns combustíveis</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 3: Custo ao consumidor de alguns combustíveis</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 4: Levantamento de dados de custo e potência de veículos.</i>	<i>61</i>

Introdução

Atualmente, uma das questões mais problemáticas é a dependência mundial em tecnologias cujas fontes de energia são originadas de combustíveis fósseis (carvão, derivados de petróleo e gás natural) e os seus impactos ambientais, como a produção de gases poluentes e o aquecimento global. Em particular, um dos principais focos está presente na área automobilística. Historicamente, os combustíveis fósseis ultrapassaram fontes tradicionais como madeira e carvão mineral, pois, junto a popularização do automóvel, veio a necessidade de um combustível de alto desempenho com alta densidade energética e facilmente transportável e armazenável. Assim, os combustíveis fósseis líquido e gasoso supriram esta demanda. Sua fácil conversão em trabalho através de sua queima ajudou na sua fomentação, exploração, estudos e disseminação de forma que tornou toda a infraestrutura global de transporte, agricultura e eletricidade dependente da produção de petróleo, óleo e gás natural. Na Figura 1, segundo Dunn [1], pode ser observada a evolução dos tipos sólidos, líquidos e gasosos de combustível em função do tempo.

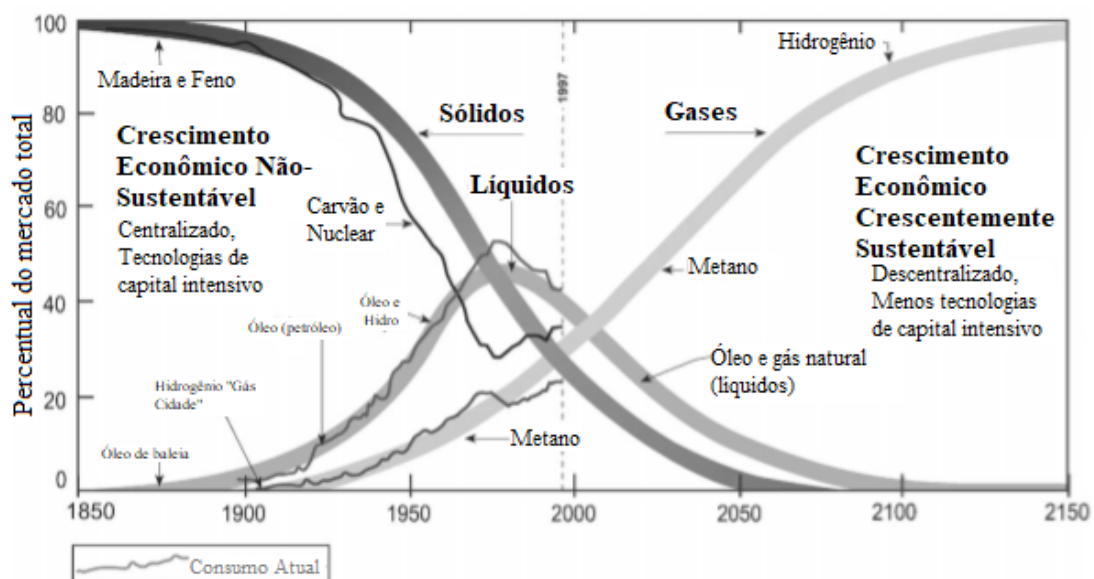


Figura 1: *Transição dos sistemas de energia globais* adaptado de [1].

A alta demanda pela produção de combustível fóssil, junto aos seus recursos limitados, gera efeitos econômicos de nível global. Durante seu percurso, seu histórico foi marcado por algumas crises geopolíticas, evidenciando a dependência humana a esse recurso. Isto se torna ainda mais claro no artigo de Hamilton [2] que evidencia como uma simples flutuação em seu preço pode refletir mundialmente e pode ser motivo de guerras, já que é um recurso finito de alta demanda.

Neste meio, onde o combustível fóssil é uma fonte não renovável de energia e consequentemente gera um alto impacto no meio ambiente como a emissão de gases efeito estufa e o aumento do aquecimento global, abre-se um espaço para estudos e pesquisas de novas tecnologias que sejam renováveis. Surgem, então, dentro da área automobilística, alguns tipos de uso de energia mais renováveis como a combustão de biocombustíveis, os veículos híbridos, a hidrogênio e elétricos. Inclusive, segundo a International Renewable Energy Agency (IRENA) [3], a previsão de consumo de energia neste setor é majoritariamente formada por essas novas tecnologias (27% em 2050 em vez de 3% em 2016), como pode ser observado na Figura 2.

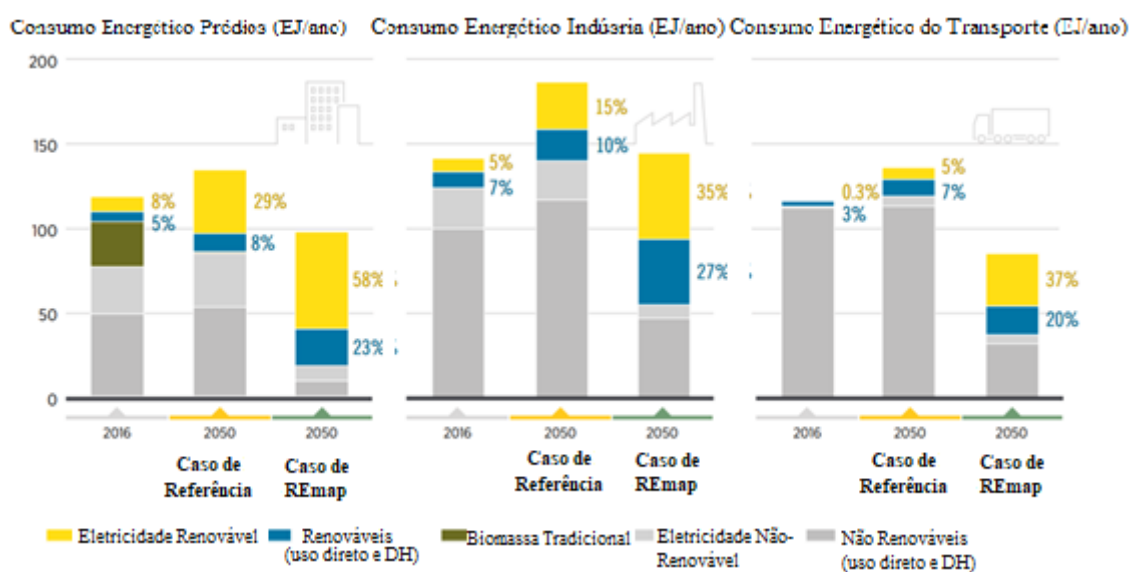


Figura 2: Consumo de energia renovável e fóssil em prédios, indústrias e no transporte. Casos de Referência e de REmap. 2016 e 2050, adaptado de [3].

A tendência do consumo ser cada vez mais renovável evidencia uma mudança da matriz energética como ela é conhecida atualmente e enaltece a necessidade de

tecnologias que consomem energias limpas renováveis e que possuem um impacto negativo no meio ambiente consideravelmente menor.



Figura 3: *Tipos de combustíveis renováveis e não renováveis* adaptado [6]. Fonte:[6]

Para o âmbito brasileiro, é importante entender quais são as fontes de energia disponíveis, ou seja, qual é a composição da sua matriz energética e destacar quais dessas fontes são utilizadas para energia elétrica, ou seja, sua matriz elétrica. Pois o cenário brasileiro se diferencia em muitas formas do cenário global, como podemos observar na Figura 4, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2019 fornecido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [4].

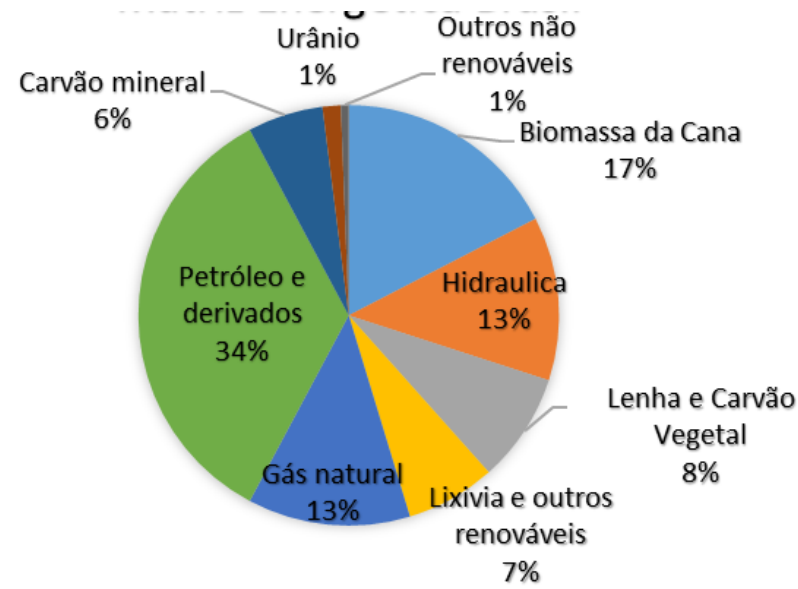


Figura 4: *Oferta interna de energia no Brasil* – Ano base 2018, Fonte: BEN 2019

Podemos observar que, apesar de ser majoritariamente composta por petróleo e derivados (34%), a matriz energética brasileira contém 45,3% de energia renovável e supera em 31,6% a proporção de energia renovável na matriz mundial. Além disso, já foi constatado no relatório do documento “Mercado de Energias Renováveis” da Agência Internacional de Energia (AIE), que o Brasil se classificou como o país com a maior parcela de fontes renováveis no consumo final de energia [5], e como pode ser observado na Figura 5 segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2019 fornecido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [4], estes fatos contribuem para destacar o diferencial brasileiro quanto a energia produzida que terá um efeito diretamente nas novas tecnologias renováveis.

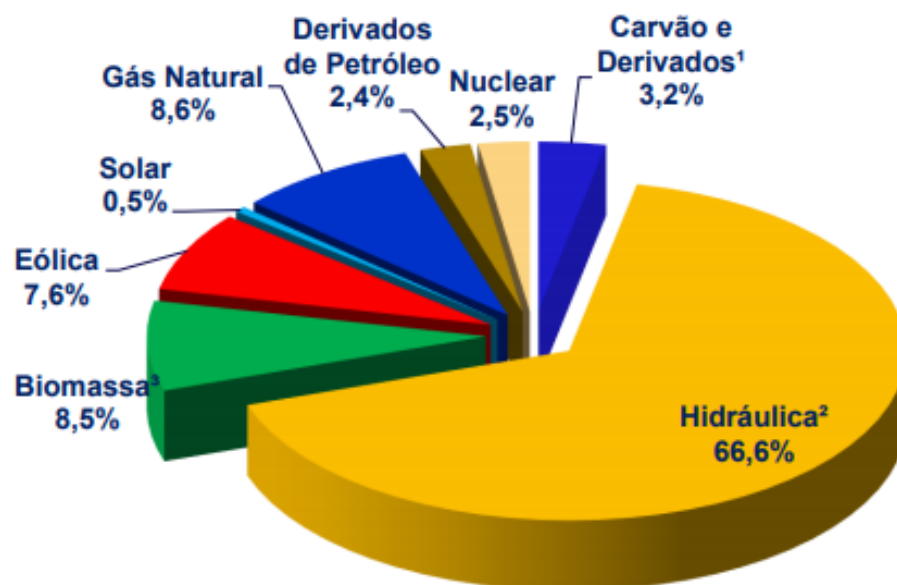


Figura 5: *Matriz Elétrica Brasil* ano base 2018, Fonte: BEN 2019

Comparando com a matriz elétrica mundial, com dados fornecidos também pela EPE [4], nota-se que a matriz elétrica renovável nacional superou no ano de 2018 em 6% a matriz elétrica mundial, evidenciando suas vantagens quanto a utilização de novos tipos de tecnologia cujo objetivo é diminuir o impacto ambiental. Em ambas as matrizes, é fácil observar que o Brasil é um país destaque quanto a energia renovável e que isto deve servir de incentivo para o surgimento e investimento de novas tecnologias, usando as mesmas. É necessário fazer uma análise desses diferentes combustíveis em função das tecnologias para compreender seu real impacto.

1 Revisão bibliográfica

1.1. Evolução dos combustíveis no mundo

A evolução dos combustíveis se deu em resposta a necessidade das novas tecnologias que foram surgindo. Além disso, visto a situação atual de condições ambientais e a escassez de recursos, há de se pensar em novas formas de energia que supra as necessidades e contribua para a diminuição de efeitos prejudiciais ao meio ambiente como a emissão de gases efeito estufa (GEE).

Como pode ser observado na Figura 6, retirada do fórum Mckinsey de 2018 apresentada por Marcelo Araujo da Ipiranga [6] no evento da ANP – Futuro da Matriz Veicular no Brasil, alguns combustíveis ou vetores de energia emitem em torno de 60% menos gases efeito estufa que os combustíveis fósseis líquidos.

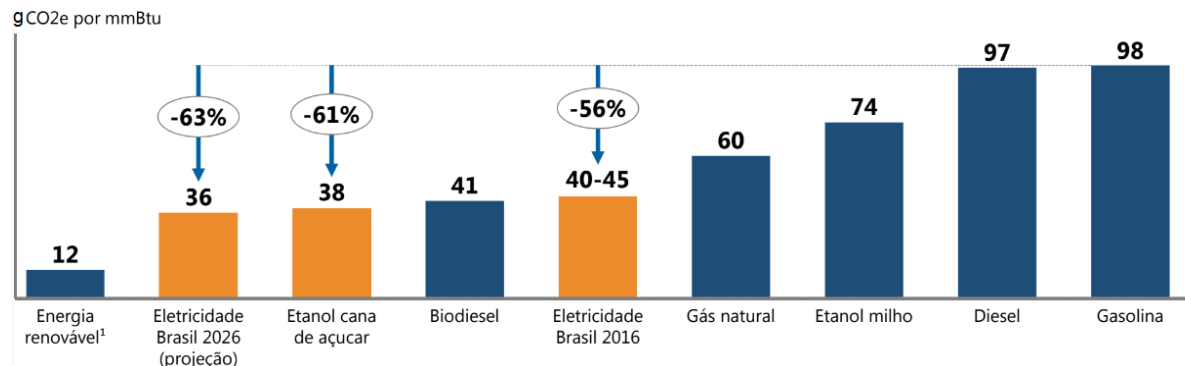


Figura 6: *Análise da emissão de GEE no ciclo de vida*, Fonte: Fórum Mckinsey 2018

Nesta seção então, serão destacados alguns tipos de combustível renováveis que são propostas de substituição dos combustíveis atuais e que possuem relevância neste estudo. Estes novos tipos de combustível podem substituir o atual por um de melhor qualidade ou por um sistema alternativo com maior eficiência, ou então reduzir a emissão dos próprios veículos. As eficiências podem ser observadas na Figura 7 [7].

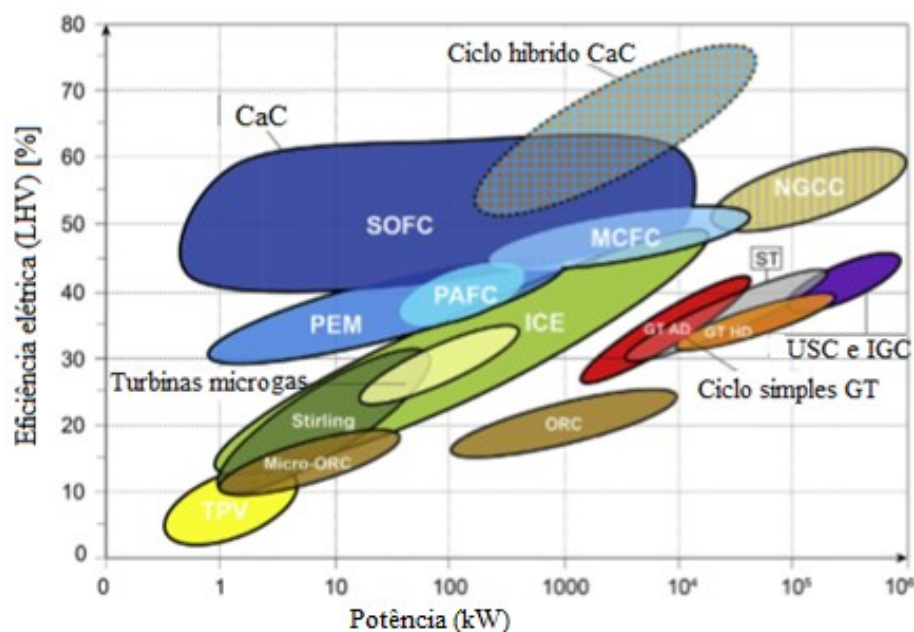


Figura 7: Exemplo comparativo dos efeitos negligentes relativos quanto a temperatura ambiente e altitude na performance de uma CaC adaptado de [7].

Observando a Figura 7 acima e comparando as tecnologias *Proton Exchange Membrane* (PEM) - Membrana de Troca de Prótons, *Solid-Oxide Fuel Cell* (SOFC) - Célula a Combustível a Óxido Sólido e *Internal Combustion Engine* (ICE) - Motor de Combustão Interna, notam-se diferenças importantes. O primeiro ponto é quanto a ordem de grandeza, nota-se que a tecnologia PEM possui eficiência elétrica menor que a SOFC, que possui maior potência capaz de atingir valores de alta eficiência, e maior que a tecnologia ICE, que possui eficiência média quando comparada com as outras.

1.1.1. Combustíveis fósseis

Segundo o site Our World in Data [8], o combustível fóssil é uma fonte de energia que representou um grande marco na revolução industrial, acompanhou o crescimento do setor automobilístico, além de ter sido um incitador do progresso tecnológico, social e econômico global.

A produção e consumo de combustível fóssil iniciou-se com o carvão, pois o mesmo foi a primeira fonte de energia reconhecida historicamente. Mas devido ao

aumento desse consumo, iniciou-se a busca por outros tipos de combustíveis resultando em novos tipos de consumo como o do gás natural, o do óleo e a continuação do carvão, como pode ser observado na Figura 8 [9].

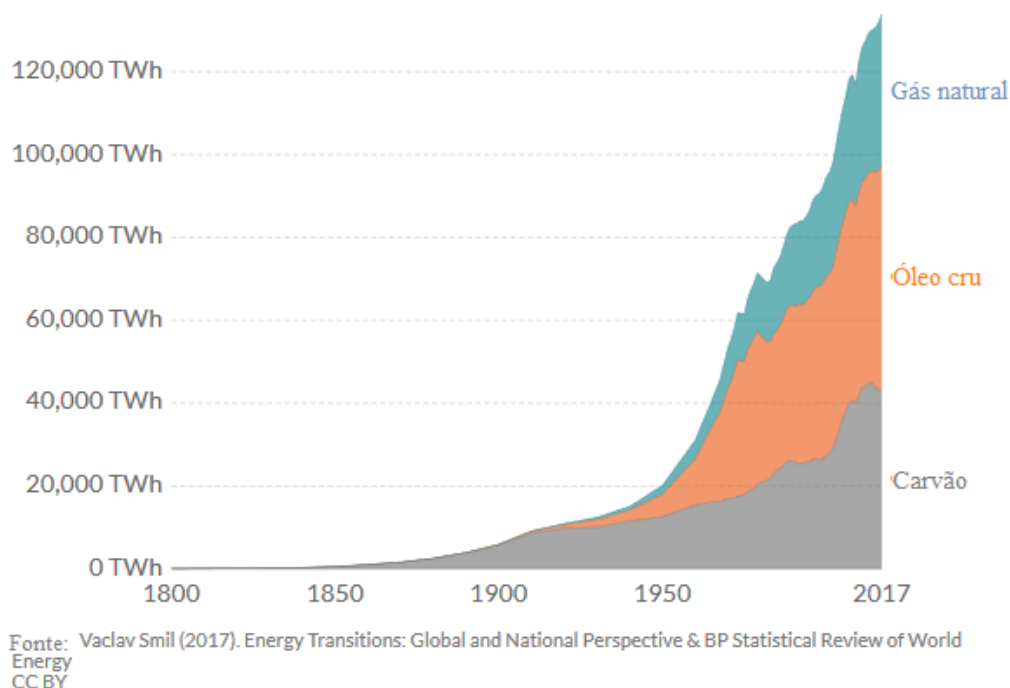


Figura 8: Consumo Global de Combustível fóssil em TWh por fontes de combustíveis fósseis adaptado de [9].

Apesar do aumento do consumo dos combustíveis fósseis ser associado ao desenvolvimento econômico e o aumento da qualidade de vida, o impacto gerado no ambiente é negativo. Por ser formado por altas quantidades de carbono, os resultados do seu consumo é a emissão de dióxido de carbono dentre outros gases efeito estufa (GEE) tornando-se a principal fonte da poluição do ar e de aquecimento global.

Ao se observar a Figura 9 junto a Figura 4, conclui-se que o aumento do consumo de combustíveis fósseis está diretamente relacionado a emissão de gases GEE. Nota-se também que a emissão de dióxido de carbono representa em torno de 75% da emissão de GEE [9].

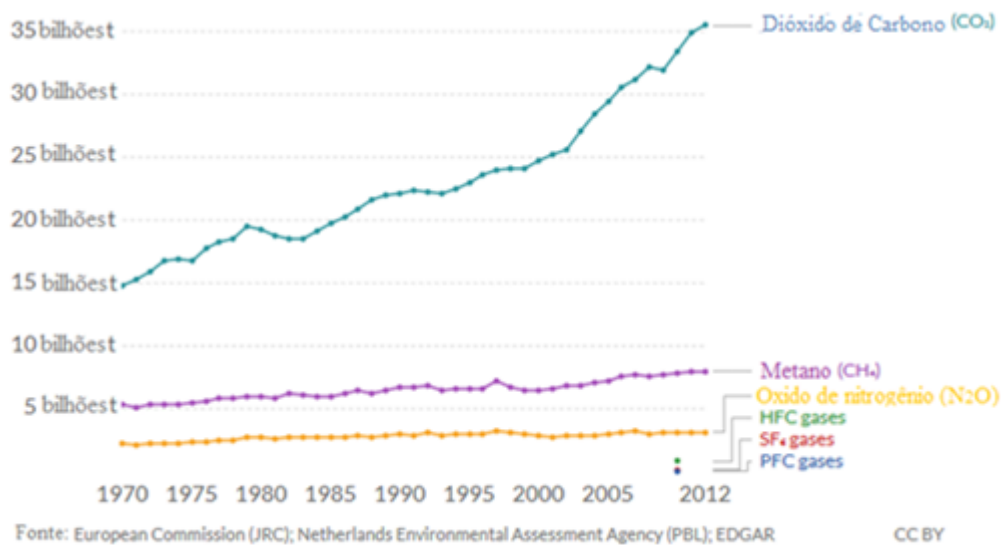


Figura 9: Emissão de gases efeito estufa, Mundo. Emissão de gases efeito estufa por fontes de gás, medido em toneladas equivalentes de dióxido de carbono (tCO₂e). Gases são convertidos para seus valores de CO₂ e baseado no seu fator potencial de aquecimento global. HFC, PFC e SF₆ são conhecidos como 'F-gases' adaptado de [9]. Fonte: Our World in Data

Por serem recursos não renováveis e finitos, já existem estudos que analisam sua previsão quanto a sua curva de consumo, uma dessas previsões baseia-se na curva da teoria de Hubbert [11], como pode ser observado na Figura 10 [11].

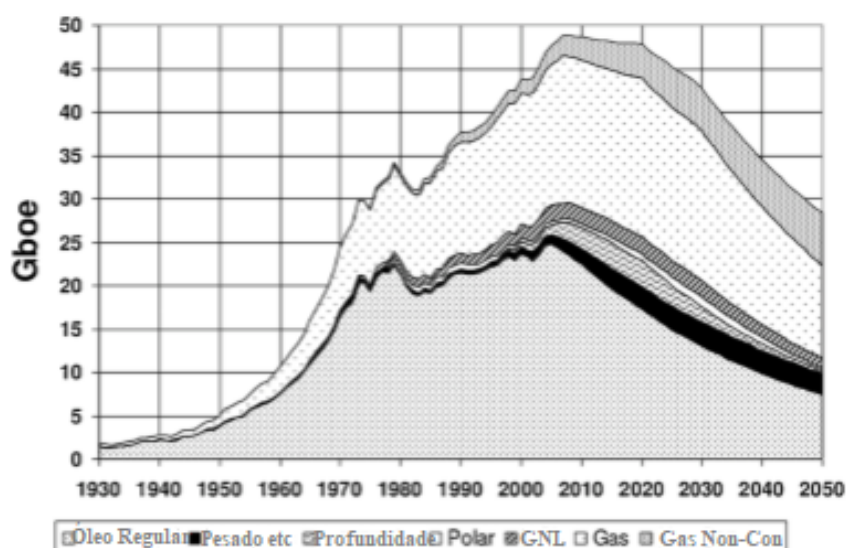


Figura 10: Projeção da produção de óleo de acordo com a ASPO 2009 alterado de [11].

Ainda assim, não há como prever a tendência da curva, pois seu pico, que representa o momento em que as tecnologias deverão ser substituídas, dependem da quantidade de reservas de petróleo que podem ser encontradas e isto se torna um limite para o consumo deste tipo de combustível. Como pode ser observado no artigo, baseado em dados de 2008, o pico do óleo e gás foi previsto para 2010, o que não reflete a realidade, isto devido a esta dependência da exploração destes.

Além disto, já existem outras limitações que foram sendo geradas pelos efeitos originados por esse consumo, como aumento de temperatura e poluição do ar, tanto na escala local quanto global. E ainda é observável a quantidade de dióxido de carbono acumulada que pode ser emitida enquanto a temperatura global permanece abaixo de um limite estipulado, continua em declínio. Então, por ser um recurso finito e seu consumo ser prejudicial ao meio ambiente, surgem novas tecnologias que podem vir a substituir as tecnologias fósseis.

1.1.2. Biocombustíveis

Os biocombustíveis, segundo a definição da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) [12], são fontes renováveis, desde que não afetem o ciclo de crescimento das plantações, derivadas de biomassa. Podem ser etanol proveniente da cana de açúcar que pode substituir a gasolina [13], biometano proveniente do processo do biogás que pode substituir o gás natural [14], biodiesel proveniente da reação do etanol ou metanol com óleos e gordura animal que pode substituir o diesel fóssil [15] ou Hydrated Vegetable Oil (HVO) – Óleo Vegetal Hidrogenado que é um diesel com base biológica de alta qualidade e pode ser feito a partir do óleo usado, óleo de colza, óleo de palma e gordura animal [87], porém este ainda não é permitido no Brasil, apenas na Europa e em outros países [88].

Este tipo de combustível se apresenta como uma solução viável para substituir, parcialmente ou totalmente, os combustíveis fósseis. Em sua própria evolução, segundo Carneiro [16], observa-se como é o efeito no impacto ambiental: partindo-se de uma primeira fase, onde a geração de biocombustíveis era derivada de recursos alimentícios diminuindo levemente a emissão de GEE, devido a sua interação com a cadeia alimentar; seguindo então para uma segunda e terceira gerações, onde os recursos alimentícios são substituídos por resíduos de biomassa e plantações não

consumidas, ou microalgas que ainda é assunto de muitos estudos, mas que já se mostra promissor por sequestrar uma grande quantidade de dióxido de carbono da atmosfera e muito eficiente em utilizar nutrientes de efluentes industriais.

Segundo Carneiro [16], os diferentes estudos que existem quanto ao impacto de biocombustíveis podem tomar diferentes diretrizes o que dificulta obter apenas uma conclusão sobre o assunto, e há uma discrepância notável quando se compara as análises da primeira geração com as da segunda e da terceira gerações. Por estes motivos, alguns estudos mostram que a produção e uso da terceira geração de biocombustíveis originadas de algas pode ser mais sustentáveis, pois produzem menos GEE além de outros aspectos ambientais; no entanto, alguns outros estudos divergem deste tipo de afirmativa.

1.1.3. Biohidrogênio e bioelétricos

A utilização de biomassa como fonte de energia engloba outros tipos de tecnologia, como por exemplo tecnologias cuja fonte de energia é o hidrogênio. O hidrogênio oferece grande potencial como um tipo de energia limpa e renovável, pois possui alta densidade de energia, como pode ser observado na Figura 11 [17], e é compatível com processos eletroquímicos e de combustão para conversão de energia sem produzir nenhuma emissão que contribua para a poluição ou as mudanças climáticas [18].

Ainda sobre a Figura 11, observa-se que quanto maior a densidade de energia, menor o volume e o peso do combustível em questão.

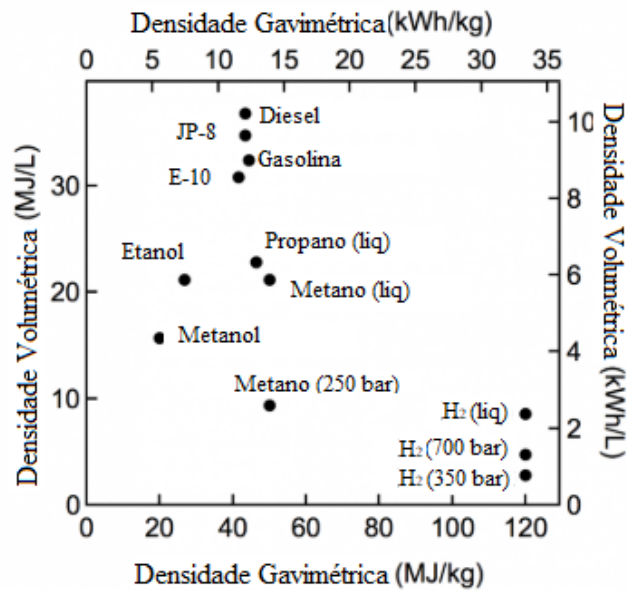


Figura 11: Comparativo da energia específica e da densidade de energia de diferentes tipos de combustíveis adaptado de [17].

Sistemas biológicos fornecem diferentes formas de gerar hidrogênio como, através de processos como biofotólise direta ou indireta, foto fermentação, fermentação escura, água ou gás natural, como pode ser observado na Figura 12 [19].

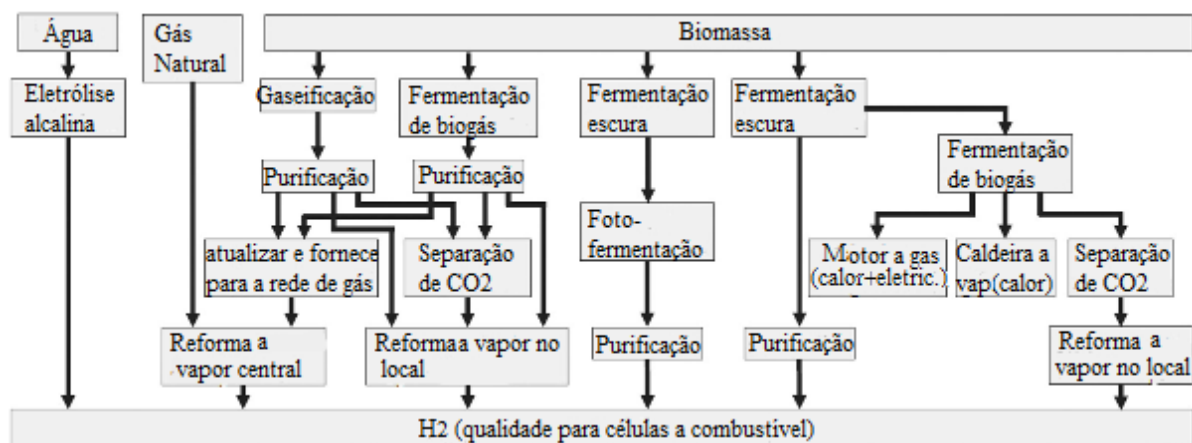


Figura 12: Visão geral de todas as cadeias do processo avaliadas adaptado de [19].

1.2. Evolução das tecnologias no mundo

1.2.1. Veículos bioelétricos

Seguindo ainda na evolução dos combustíveis e em tipos de fontes de energia derivadas de biomassa, tem-se os bioelétricos. Os bioelétricos possuem o mesmo fundamento dos outros tipos de tecnologias que utilizam biomassa, porém a sua finalidade é a conversão on-board da fonte de energia em hidrogênio e a produção de energia elétrica. Além disso, podem ser uma solução para a baixa durabilidade das baterias tendo como véis a tecnologia de célula a combustível (CaC) que será apresentada em uma próxima seção.

A comercialização deste tipo de tecnologia na área automobilística é muito desafiadora, principalmente devido à dificuldade de entrada em um mercado que já está estabelecido, consolidado e que possui confiabilidade tanto em performance, quanto em custo. Já consegue-se ver a entrada desses modelos no mercado, como o primeiro veículo da Nissan e-Bio Fuel Cell que utiliza bioetanol como fonte de combustível [34].

Quanto ao tipo de tecnologia, as CaC são complexas e de baixa durabilidade implicando um alto custo de investimento, no entanto podem ser aderidas por diversas áreas de aplicação inclusive, na área automobilística, já existem modelos como o Honda Clarity 2014 que possui como fonte de energia eletricidade derivada do uso de hidrogênio. Já sob o aspecto industrial espera-se um alto investimento para um retorno próximo a zero. O risco de investimento é alto o que dificulta o interesse e o financiamento por parte das indústrias [24].

Apesar de toda sua complexidade, seu alto custo, baixa durabilidade e sua dificuldade para entrar no mercado, a procura por novas tecnologias como as células a combustível é cada vez maior principalmente devido à preocupação com o meio ambiente e além disso, a possível necessidade de suprir o gap deixado pelos combustíveis fósseis, já que são finitos e há uma alta dependência [24].

Um estudo existente estima que a utilização de recursos de biomassa para geração de energia e utilização subsequente em carros elétricos é uma forma mais efetiva da utilização dos recursos limitados da terra para transporte, do que a conversão da comida e plantações para a primeira geração do etanol. Apesar do

estudo não considerar usos econômico e alternativo da biomassa no setor de energia [20]

1.2.2. Veículos elétricos

A tecnologia elétrica para veículos se tornou uma alternativa altamente atraente frente a situação atual do combustível fóssil. Inclusive alguns automóveis com este tipo de tecnologia já são comercializados atualmente no Brasil como o BMW i3, Renault Zoe, JAC iEV40 da Volkswagen, Chevrolet Bolt, Nissan Leaf e Jaguar I-Pace [21].

Apesar de existirem benefícios quanto ao impacto ao meio ambiente como emissão zero de gases poluentes, desde que a fonte utilizada para a geração deste tipo de energia seja renovável, ou seja, o impacto ambiental real depende da matriz elétrica nacional que terá um impacto no lugar da produção da energia elétrica como pode ser observado na Figura 13 na qual analisa-se o consumo de energia para cada tipo de tecnologia listada, de acordo com os países selecionados, e seu efeito na emissão de CO₂.

Além disso, são tecnologias mais silenciosas [22], porém, há atualmente uma preocupação quanto ao uso da bateria e seu descarte. Existe também uma questão relativa a dependência com a rede de postos de recarga, devido à baixa durabilidade da bateria e ao tempo de recarga, que costuma ser bem maior do que comparado ao abastecimento de um tanque de gasolina [23].

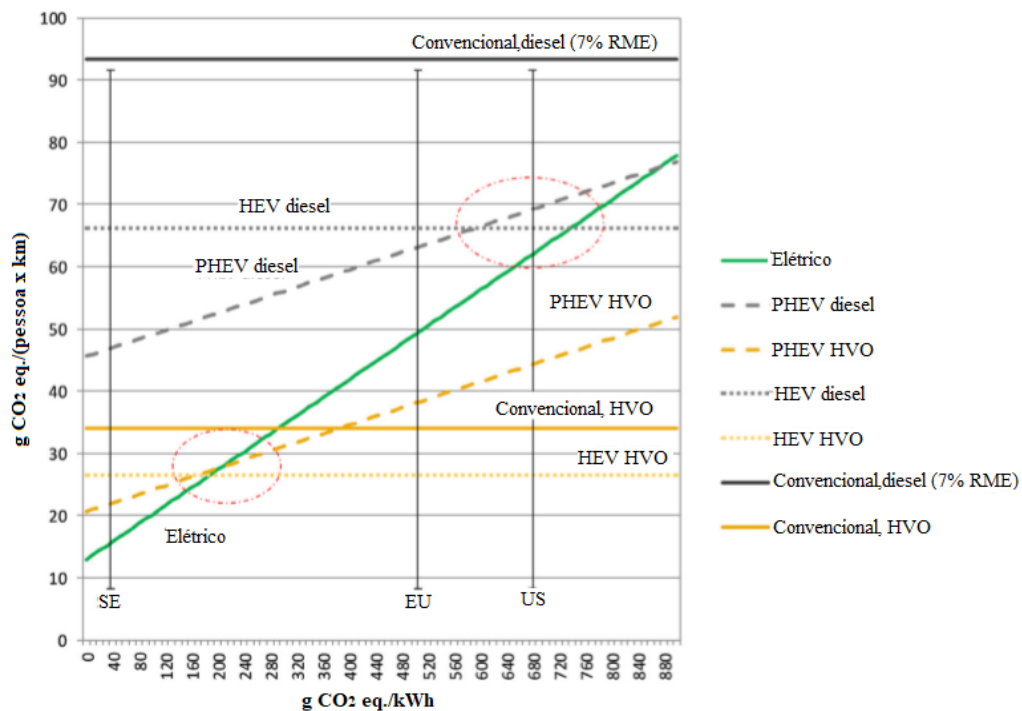


Figura 13: Análise de diferentes tecnologias na Suécia, Europa e EUA. Fonte: Adaptada de [65]

Comparando a Figura 13 com alguns dados retirados do Balanço Energético Nacional (BEM) de 2018 [4], observamos como o Brasil evolui em termos de energia renovável. O valor de consumo em 2013 era de 208 g CO₂ eq/kWh [68], enquanto em 2018 este valor já consta 88 g CO₂ eq/kWh, o que em termos de comparação com a Figura 13, faz o cenário brasileiro se aproximar do sueco. Isto devido a composição da sua matriz elétrica que, como já foi visto neste documento, é formada por 76% fontes renováveis como eólica, solar, hidráulica e nuclear. O que evidencia a importância de analisar novos tipos de tecnologia renováveis.

Além de serem tecnologias que podem substituir o que é utilizado atualmente, estima-se que a operação de veículos elétricos custa, nos Estados Unidos no ano de 2017, US\$ 0,077/km enquanto os veículos a combustível fóssil custam US\$ 0,088/km, apesar desta realidade financeira variar de um país para outro. E além disto, os veículos elétricos possuem uma maior eficiência quando comparados aos combustíveis fósseis, podendo utilizar até 75% da energia do combustível enquanto os fósseis aproveitam somente em torno 15%. [23]

No entanto, apesar de certas vantagens, os veículos elétricos ainda sofrem para entrar no mercado automobilístico devido a alguns motivos que serão apresentados

no próximo capítulo, dentre eles o alto custo de sua tecnologia mais complexa e a dificuldade de se inserir em um mercado já consolidado, e devido a dependência de postos de recarga, pois a maioria dos veículos elétricos utilizam baterias. [24].

1.3. Foco nas células a combustível

1.3.1.Tecnologias de células a combustível

Com as novas propostas de tecnologias, o incentivo a inovação e ao estudo de combustíveis promissores mais renováveis, surgem as células a combustível (CaC). As CaC são um tipo de tecnologia que permitem a conversão de diferentes tipos de combustíveis promovendo eletricidade sem combustão, podendo gerar zero emissão de gases poluentes, se sua fonte for hidrogênio, sendo seu único produto água, e sua conversão é altamente eficiente [32].

Alguns tipos de CaC podem ser identificados na Figura 14 [32], mas serão destacadas as tecnologias *Proton Exchange Membrane* (PEM) e a *Solid-Oxide Fuel Cell* (SOFC).

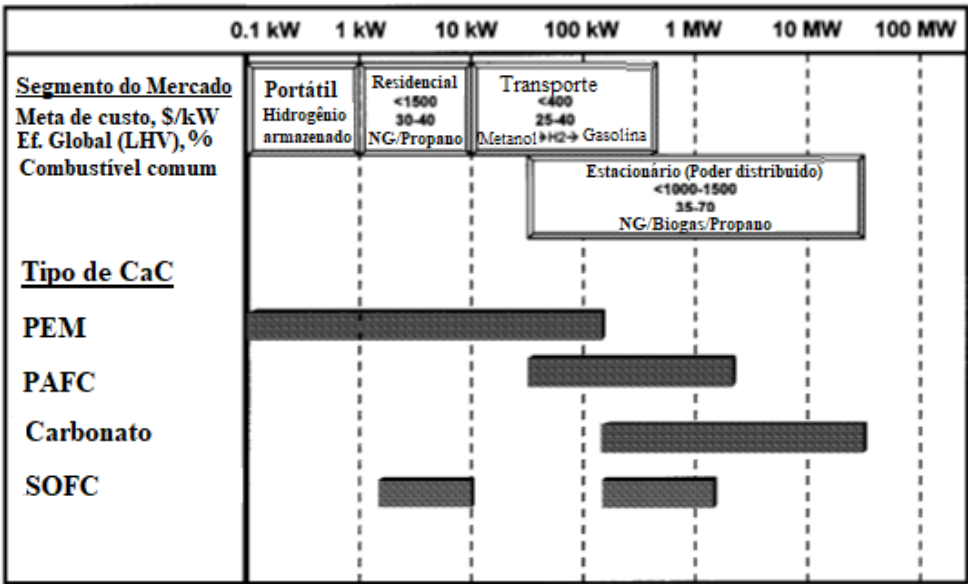


Figura 14:Geradores de CaC em desenvolvimento e os atuais mercados-alvo adaptado de [32].

O funcionamento de uma PEM pode ser observado na Figura 15. A PEM possui membrana eletrolisada polimérica e é uma CaC de baixa temperatura por volta de 60-

80 °C, é necessário um processador de combustível para gerar hidrogênio. Ogungbemi *et al.* [32] também pontua que a geração de eletricidade sem combustão, através das PEMFC, só é possível devido a sua composição. O gás hidrogênio, proveniente dos combustíveis já existentes, é transmitido para as CaC através do anodo e o combustível ao encontrar a camada catalisadora divide-se em dois íons: o próton se direciona para a membrana de associação de eletrólitos, e quando encontra com o ar é produzido água, e o elétron segue para o circuito conectado na célula externa para produzir eletricidade. [32].

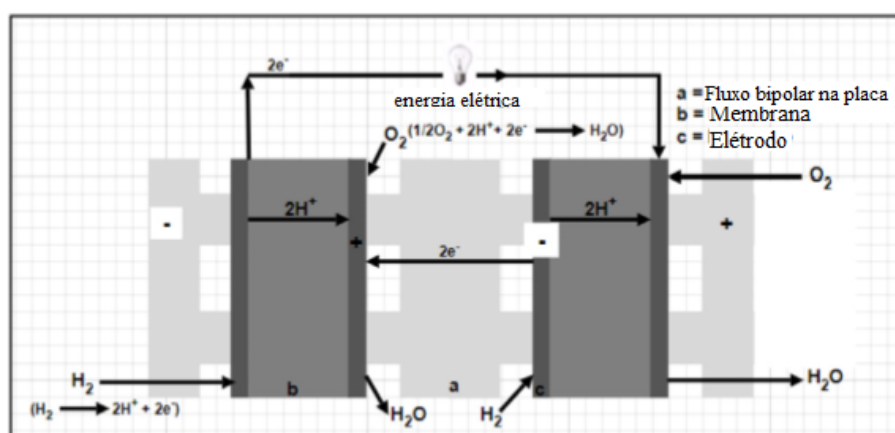


Figura 15: Princípios operacional de uma PEM adaptado de [32].

E já para a SOFC, onde seu funcionamento pode ser observado na Figura 16, que é uma CaC de oxido solido, a operação ocorre perto da temperatura por volta de 800 a 1000°C de processamento do combustível sendo capaz de transferir calor para reformar o combustível original. O processo consiste na conversão de algum hidrocarboneto em uma mistura de hidrogênio (H_2) e monóxido de carbônio (CO) através de reações e oxidação do combustível no anodo enquanto íons de oxigênio do lado do catodo são retirados e transportados para um eletrólito condutor de íons. Além disso, a composição do gás é perfeita para um processo de remoção de CO_2 .

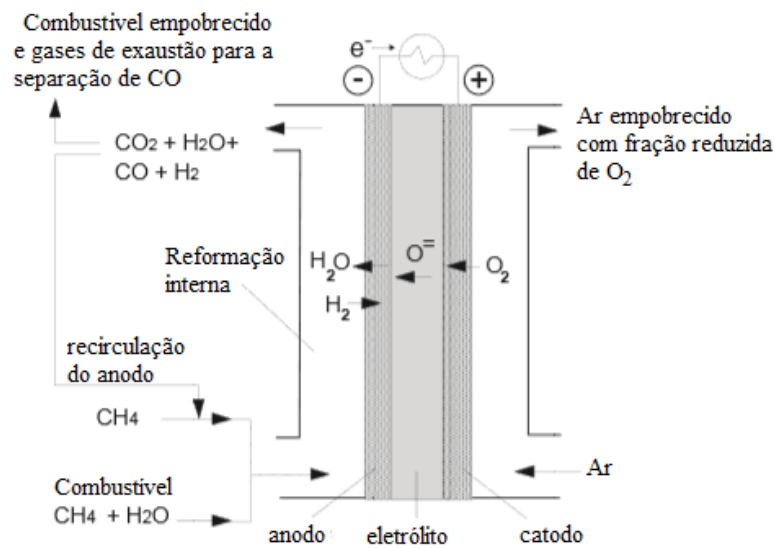


Figura 16: Princípios operacional de uma SOFC adaptado de [32].

1.3.2. Eficiência

As CaC possuem alta eficiência como pode ser observado na Figura 17 abaixo. Além disto, dependem apenas do valor químico do combustível, isto é, a quantidade de hidrogênio disponível no combustível após a reforma, e não do poder calorífico, por isso que a vantagem da eficiência das CaCs quando comparada com as máquinas de combustão é maior em combustíveis de poder calorífico médio e baixo como combustíveis derivados de biomassa. [33].

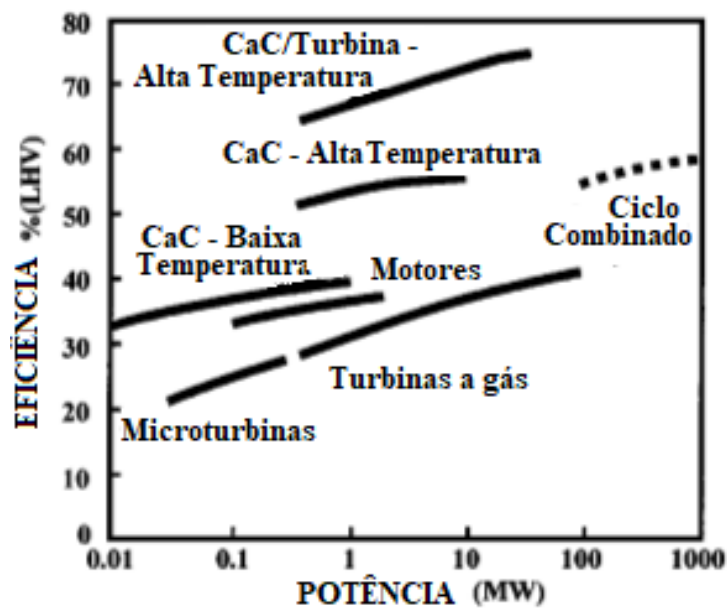


Figura 17: Eficiência de sistemas elétricos de CaC comparado com outras tecnologias adaptado de [33].

Isto junto a estudos já existentes [7], centralizados na tecnologia SOFC, afirmando que este tipo de tecnologia pode superar o desempenho das tecnologias de energia tradicional, pelo menos quando o combustível primário for um hidrocarboneto como o gás natural. Se for combinada a um ciclo termodinâmico de cogeração como uma turbina a gás de forma híbrida, espera-se superar 70% de eficiência.

Aliás, as CaC são vantajosas quanto sua eficiência, pois independem de fatores como temperatura e umidade como pode ser observado na Figura 18.

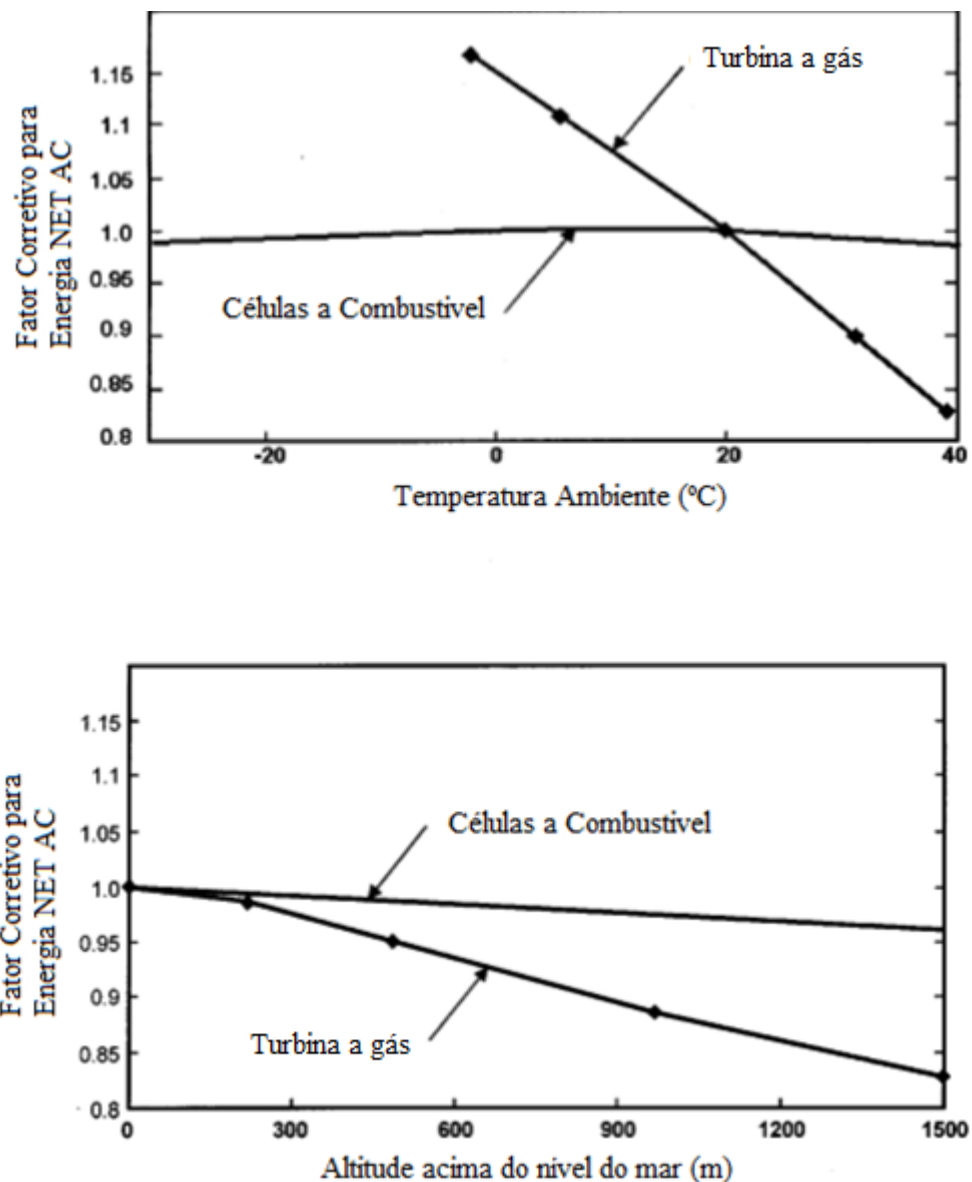


Figura 18: Exemplo comparativo de tipos de tecnologias adaptado de [33].

1.4. Políticas públicas

Existem políticas públicas para fomentar o mercado automobilístico e os estudos para o desenvolvimento destas novas tecnologias, pois apesar das dificuldades de entrada no mercado e do alto risco, entende-se a necessidade deste incentivo.

Algumas destas políticas são:

- *Renewable Fuels Standards Program*: é um programa americano instituído através da *US. Environmental Protection Agency* (USEPA) sob regulamentação

legal desde 2010, cujo objetivo é diminuir a emissão de GEE e a dependência dos Estados Unidos de combustíveis fósseis através do aumento da utilização de biocombustíveis. Além disso, a USEPA também é responsável por conduzir análises de ciclo de vida da produção e do uso destes combustíveis para determinar se o programa está atendendo ao seu objetivo [25].

- *Fuel Cells and Hydrogen*: é um programa incentivado na Europa pela própria União Europeia desde de 2014 que apoia pesquisas, desenvolvimentos tecnológicos de atividades que envolvam as tecnologias de energia a CaC e hidrogênio visando acelerar a sua introdução ao mercado [26].
- *Rota 2030*: é um programa proposto em 2017 por uma empresa especializada na obtenção de incentivos fiscais e que se tornou uma lei pelo governo brasileiro já em 2018. Possui o objetivo de fomentar projetos P&D em toda a cadeia do setor através da capacitação técnica, expansão de emprego e produção, aumento de investimentos, automatização do processo e incremento da eficiência energética [27].
- *Programa de Eletromobilidade*: é um programa incentivado no Brasil com data de implementação em novembro de 2018 e anunciado pelo ministro do desenvolvimento, comércio exterior e serviço. Tem como objetivo de incentivar as indústrias a investirem nesse novo mercado de tecnologias renováveis [28].
- *Future of Rural Energy in Europe (Free)*: é um programa que foi criado em 2010 pela empresa SHV Energy, incentivado na Europa para promover o uso de energia sustentável dentro de comunidades rurais, tendo em vista que 50% dos europeus vivem em áreas rurais e necessitam de escolhas de energia mais limpas já que possuem, geralmente, uma pegada de carbono maior do que um indivíduo na cidade devido ao uso de maquinário pesado [29].
- *Fuel Choices and Smart Mobility Initiative*: é um programa incentivado em Israel para alternativas de combustível e mobilidade inteligente com o objetivo de tornar Israel um centro de conhecimento e indústria de alternativas de combustível para servir como modelo para o resto do mundo [30].
- *RenovaBio*: é uma política existente no Brasil, instituída pela Lei 13.576/2017, voltada para produtores e importadores do biocombustível e que fornece uma contribuição para o cumprimento dos compromissos do país quanto ao Acordo de

Paris, promove a expansão dos biocombustíveis na matriz energética com ênfase na regularidade do abastecimento de combustíveis e assegura previsibilidade para o mercado de combustíveis induzindo eficiência energética e redução de GEE na produção, comercialização e uso de biocombustíveis através de metas anuais que são distribuídas em metas individuais para os distribuidores de combustíveis. [31]

1.5. Avaliação do ciclo de vida

1.5.1. Definição geral

Qualquer tipo de tecnologia gera um impacto ambiental em alguma parte de seu processo, por isso que é importante avalia-lo como um todo e, se possível, quantificar os efeitos que são gerados no meio ambiente. Logo, se torna imprescindível avaliar cada etapa do seu processo, dentre elas o meio pela qual a fonte de energia foi adquirida, qual o processo realizado para sua produção, qual a forma que está sendo utilizada e por fim, como será realizado seu descarte.

A partir desta necessidade de avaliação do processo e da crescente interdependência dos países, além da alta utilização dos recursos naturais, tem origem o conceito de avaliação do ciclo de vida (ACV) [35]. A ACV permite capturar os impactos ambientais consequentes de algum produto, processo ou atividade humana desde a aquisição do material cru, passando por sua produção e uso, até o descarte.

1.5.2. Estrutura da ACV

Pode-se definir como estrutura da ACV, segundo o *International Reference Life Cycle Data System* [36] que se baseia nas ISO 14040 e ISO 14044, conforme a Figura 19, onde podem-se destacar que os estágios da estrutura estão sempre sujeitos a interpretação e que há intercambialidade permitindo, por exemplo, que haja a redefinição da meta, mediante da interpretação, baseado no inventário que foi analisado.

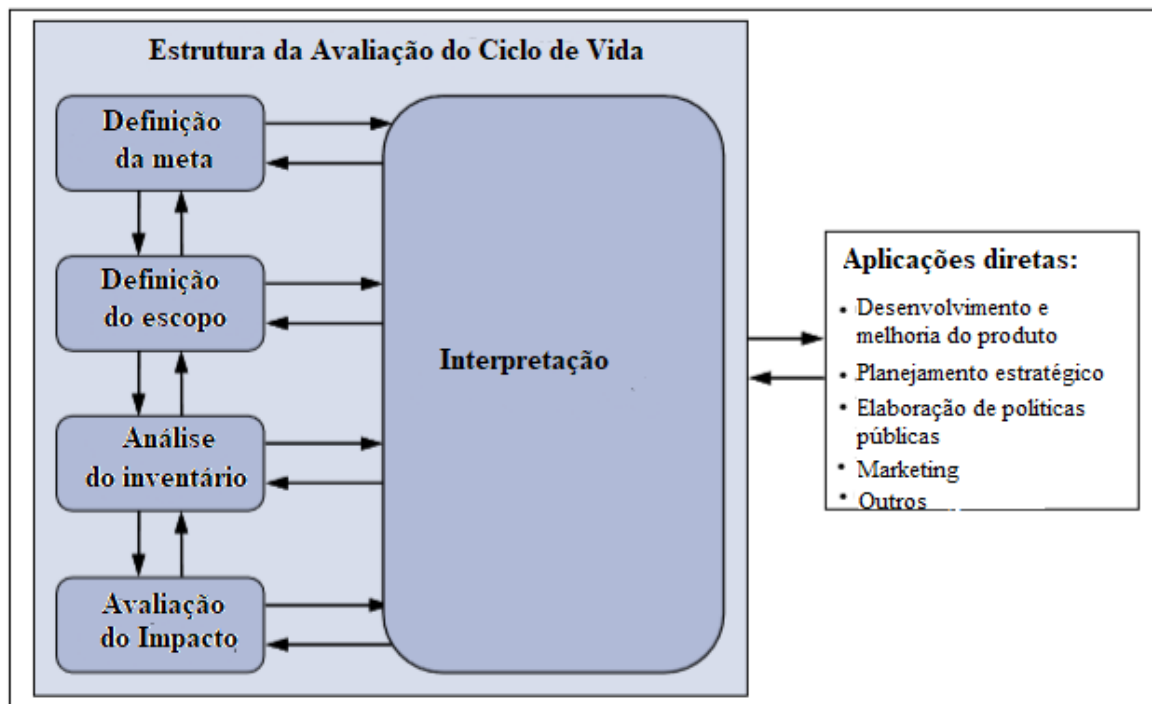


Figura 19: *Estrutura da ACV* (ISO 14040:2006; modificada de [36])

O tipo de estrutura do estudo da ACV possui quatro estágios. No primeiro e segundo estágios, é requerido que uma meta e um escopo sejam definidos para que sejam definidos o sistema, seu perímetro e qual sua unidade funcional. O perímetro determina quais partes do processo serão consideradas no estudo, como pode ser observado na Figura 20 [37].

Pode ser dividido, neste estudo, dentre três principais tipos, são eles:

- I. Well to Gate (WtG): neste tipo de perímetro é incluída a etapa da extração, produção e conversão do combustível em si.
- II. Well to Tank (WtT): este perímetro inclui, além da extração, plantação e conversão, o transporte do combustível ao posto de abastecimento.
- III. Well to Wheel (WtW): este perímetro inclui a produção, extração, conversão, transporte do combustível ao posto de abastecimento e sua utilização.

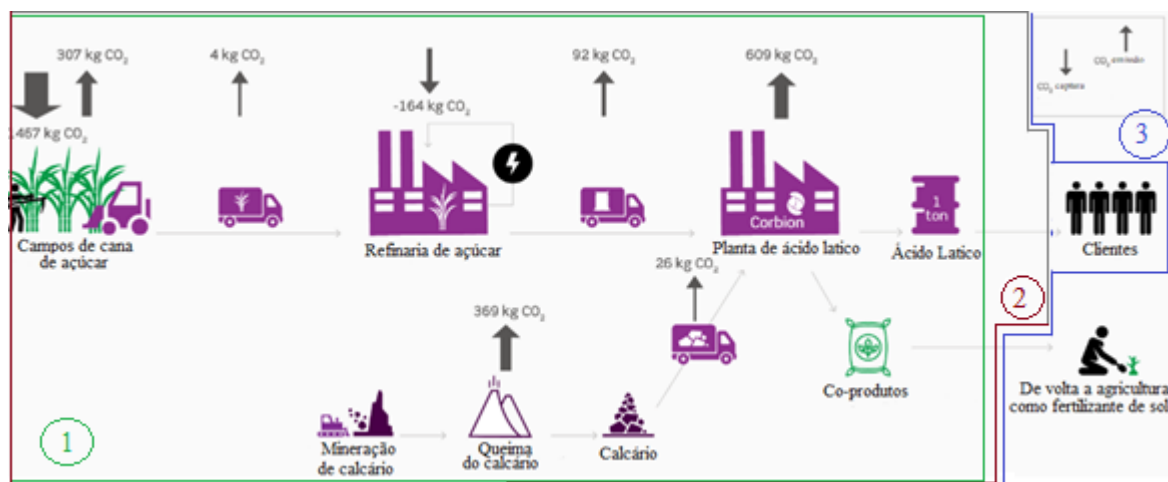


Figura 20: Exemplo de perímetro escolhido para o estudo LCA (1-WtG, 2-WtT, 3-WtW) adaptado de [37]

E a unidade funcional é uma referência para o sistema onde as entradas e saídas podem ser relacionadas, como por exemplo unidade relacionada a entrada ou a saída, unidade de terra agrícola ou ano [16].

Além disso, é importante nesta etapa, definir se a ACV terá uma abordagem de tipo atribuição ou do tipo consequente. O primeiro tipo, mais utilizado, avalia a performance do sistema utilizando uma abordagem estática, ou seja, onde as entradas e saídas do ambiente são avaliados com base no ciclo de vida. Enquanto o segundo tipo, mais utilizado quando o assunto é bioenergia, considera uma abordagem dinâmica para as mudanças do sistema, para compreender os fluxos ambientais diretos e indiretos do processo causado por estas mudanças [16].

Após estes dois estágios, é realizado o levantamento do inventário ou coleta dos dados relevantes ao estudo, e a realização dos cálculos que irão quantificar os impactos [16]. Inserido nesta etapa, encontra-se o método de alocação de coprodutos que, segundo Carneiro [16], determina qual será a abordagem quanto a alocação do impacto ambiental dos produtos que possuem origem do processo sendo estudado (coprodutos) que possui como objetivo a distribuição das consequências da perturbação ambiental. Existem algumas abordagens que podem ser definidas, são elas:

- a) Alocação nula: todos os impactos são atribuídos ao produto principal e os coprodutos possuem impactos nulos. Porém não é muito desejável, pois não representa a realidade dos produtos em estuda unidade funcional.
- b) Valor de mercado ou alocação econômica: os impactos são distribuídos em função do valor econômico de cada produto. Há uma vantagem quando são considerados sistemas de produção com um alto número de coprodutos que possuem um valor econômico baixo.
- c) Alocação mássica ou energética: os impactos são distribuídos em função de alguma propriedade física como massa ou poder calorífico. Há uma vantagem quando comparada ao método de alocação econômica, pois baseia-se em dados que são constantes durante o tempo diferenciando-se da econômica que é mais dinâmica.
- d) Método da expansão, substituição ou deslocamento do sistema: esse método trata dos coprodutos como um impacto substituído em um outro processo. Assim, a parte expandida pelo coproduto é subtraída do sistema global de modo que apenas o produto do foco seja considerado. Geralmente, este método é o mais utilizado, pois evita alocações e não há necessidade de dividir o processo. Porém, possui certa limitação devido à falta de um inventário confiável para os coprodutos ou se várias substituições são possíveis.

Seguindo a estrutura, há a própria avaliação do impacto do ciclo de vida onde são avaliadas a magnitude e significância do impacto ao ambiente do produto, e onde são associados os fluxos com as categorias de impactos potenciais ao meio ambiente que são escolhidos de acordo com o método e escopo do estudo, alguns exemplos podem ser observados na Figura 21 [16].

1. Carcinogênicos	6. Orgânicos respiratórios	11. Acidificação aquática
2. Não-carcinogênicos	7. Ecotoxicidade aquática	12. Eutroficação aquática
3. Inorgânicos ionizantes	8. Ecotoxicidade terrestre	13. Aquecimento global
4. Radiação Ionizante	9. Acidificação e nitrificação terrestre	14. Energia não-renovável
5. Depredação da camada de ozônio	10. Ocupação da terra	15. Extração Mineral

Figura 21: Exemplos de impactos potenciais ao ambiente adaptado de [16]

E por fim, há a avaliação do processo ou da atividade para verificar se há consistência dos resultados com a meta e o escopo, além de serem realizadas conclusões e possíveis recomendações [16].

1.5.3. Limitações

Apesar da estrutura da ACV ser padronizada em documentos oficiais, as possíveis vertentes que podem ser tomadas nos estudos são inúmeras. Assim, diferentes tipos de escopo, incluindo os perímetros do sistema e as unidades funcionais, e diferentes inventários com tipos de alocação de coprodutos determinam um contexto completamente diferente para um mesmo tipo de meta [16]. Isto tem como consequência de dificultar a comparação da dados entre diferentes estudos. Torna-se importante deixar explícitas as hipóteses adotadas que poderão garantir qualidade, transparência e reprodutibilidade [36].

2 Metodologia

2.1. Objetivos

O objetivo do estudo é realizar um levantamento de dados da literatura apresentando a avaliação do ciclo de vida de diversos tipos de combustíveis e tecnologias para que possa ser comparado diferentes categorias de impactos. Foram selecionados 32 artigos [38-69] entre os anos de 1995 e 2019 que fornecem os resultados necessários para a avaliação do ciclo de vida de cada uma das tecnologias.

2.2. Levantamento da literatura

O levantamento destes artigos foi realizado por meio de uma tabela padronizada, conforme pode ser observado na Tabela 1, na qual foram realizadas as conversões necessárias, de acordo com cada caso, para que respeitasse a unidade funcional de 1 MJ escolhida para este estudo.

Tabela 1: *Modelo utilizado para o levantamento de dados*

Primeiro Autor	Ano	Título da publicação	País	Continente	Combustível	Perímetro	Coprodutos armazenáveis	Coprodutos não armazenáveis
Método de alocação	Unidade Funcional	Parâmetro de Emissão de CO ₂ Equivalente (g CO ₂ eq/MJ)			Uso de terra (dm ² a / MJ)	Razão energética Output / Input (-)		Uso de Água (m ³ /MJ)

Em cada artigo, existem diferentes cenários conforme a localização, representado pela coluna “País”, o tipo de combustível, representado pela coluna “Combustível”, se existem coprodutos armazenáveis, ou seja, que é possível fisicamente armazenar como algum material, como por exemplo glicerina, açúcar e bagaço, ou não armazenáveis, ou seja, não é algo que se possa armazenar fisicamente, como por exemplo energia e vapor [16], representados pelas colunas

“Coproductos Armazenáveis” e “Coproductos Não-Armazenáveis”, qual o tipo de alocação, se existir alguma, representado pela coluna “Método de alocação” e os impactos ambientais, representados pelas colunas “Parâmetro de Emissão de CO₂ Equivalente (g CO₂/MJ)”, “Uso de terra (dm² a/MJ)”, “Razão Energética Output/Input (-)” e “Uso de Água (m³/MJ)”. Assim, tem-se um total de 159 cenários.

A razão energética pode ser definida como a quantidade de energia produzida (Output) sobre a consumida (Input), assim pode-se considerar que quanto maior o valor da razão energética melhor será a performance do combustível.

Determinados a unidade funcional e o perímetro como WtW, estes cenários podem ser diferenciados pelo tipo de combustíveis e tecnologias. Após ter sido feito o levantamento, pode-se classificar estas tecnologias como:

1. Tecnologia Fóssil

- Diesel
- Gás Natural (GN): combustão (alto e baixo impacto), microturbinas e looping químico.
- Gasolina
- Veículos de combustão interna (ICE): Diesel, GN.

2. Biocombustíveis

- Bioetanol: trigo, sucrose e sucrose com bagaça.
- Biodiesel: óleo de palma, soja e 1^a a 3^a geração.
- Hydrotreated Vegetable Oil (HVO):rape, óleo de palma, microalga e Jatropha.
- Etanol: hidratado, de 1 a 3^a geração e cana de açúcar.
- Biocombustível: soja e microalgas.

3. Mistura de combustíveis

- Gasolina + 25% Etanol
- Gasolina + MBTE
- Gasolina + 5% Bioetanol(trigo)
- Gasolina + 10% Bioetanol: sucrose e sucrose+bagaça.
- Gasolina + 85% Bioetanol: sucrose e sucrose+bagaça.
- B20 – 20% Biodiesel + 80% Diesel
- B10

- B5
- 10% HVO + 90% Diesel
- 10% Isomerização do HVO + 90% Diesel

4. Híbrido

- Hybrid Electric Vehicle (HEV): GN, Diesel e HVO.
- Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV): Fuel Cells, Diesel e HVO.

5. Célula a Combustível

- SOFC: GN, Biogás, Metanol, Bio-metanol, Craqueamento, Reforma, Eletrólise, Reforma de GN, Nuclear, Água e Vento, Vento, Vento com reforma de Biogás, Vento com Reforma de GN e Vento com Eletrólise.
- Hidrogênio: GN, Energia Eólica, Energia Solar, Energia Hidráulica, Metano fóssil, Metano biológico, Bioetanol – Reforma a vapor, Bioetanol – Reforma auto térmica, Bioetanol – Reforma a vapor, Biomassa.
- PEM (GN)

6. Elétrico

- Veículo a Bateria Elétrica (BEV): Carvão, óleo, CNG, Eólica, Mix, HVO e Diesel.
- Veículo a Bateria Elétrica (BEV) – Bateria com: NPM como solvente e Água como solvente

2.3. Tratamento dos dados

Uma vez feito o levantamento do indicador para cada cenário, considerando um perímetro WtW, foi necessário realizar conversões para que os valores pudessem ser comparados. Em alguns casos, quando a unidade funcional do estudo era 1 km, foram utilizados dados de energia para que pudesse ser obtido a unidade g CO₂/MJ. Em outros casos, quando a unidade funcional do estudo era kWh ou TWh, foram utilizados fatores de conversão, iguais a 0,2778, 2,77E-4, respectivamente, para obter a unidade desejada. Também foram utilizados valores médios para certos artigos cuja abrangência era muito grande.

Foi realizada a análise dentro de cada tipo de tecnologia, para compreender qual tipo de combustível seria a opção que possui um menor impacto. Mas também foram analisadas as tecnologias em si, de maneira global, para obter uma comparação com o objetivo de concluir qual seria a que possui um menor parâmetro de emissão de CO₂ equivalente. Também foi considerado o desvio padrão de cada caso dentro das tecnologias para aprimorar a análise, este é representado por uma linha centralizada em cada uma das barras para as quais o levantamento foi realizado.

2.4. Estudo financeiro

Além da análise dos índices de emissão de CO₂ e razão energética, é importante realizar um levantamento do custo de produção dos combustíveis, pois assim é possível analisar a viabilidade de cada uma das tecnologias, o que é relevante para as novas tecnologias que ainda não ingressaram no mercado.

Observam-se, então, os valores médios de custo de produção em R\$/MJ, segundo o Anuário Estatístico da ANP [70] e o Boletim Trimestral de Preço e Volumes de Combustível [71] de abril a junho de 2019, em base volumétrica ou mássica e em base energética considerando o poder calorífico inferior (PCI) de cada um dos combustíveis [72][73], para que possam ser comparados.

Também deve ser considerado o custo ao consumidor, de venda, que apesar de levar em consideração o custo de produção, também sofre influências da magnitude da procura pelo combustível, que dependerá dos tipos de veículos que mais são vendidos no mercado, e da questão tributária. Serão utilizados dados também fornecidos pelo Boletim Trimestral do primeiro semestre de 2019 da ANP [71] e Anuário Estatístico de 2019 da ANP [70], cujo ano de referência é 2018. Além disso, para o custo para a eletricidade será considerada uma base da quilometragem percorrida por um veículo com um tanque de 50 L de gasolina [75] e o preço da energia por kWh fornecido pela ANEEL [86]. No entanto, para que esses custos possam ser comparados, serão convertidos em uma base energética considerando o poder calorífico inferior (PCI) de cada um dos combustíveis [72] [73].

É importante, então, realizar também um levantamento para o custo de diferentes tipos de veículo para entender a relação entre os custos ao consumidor de cada um dos combustíveis e a disponibilidade presente no mercado de veículos.

3 Resultados

Com o objetivo de visualizar mais facilmente as informações levantadas para que possam ser comparadas quanto aos seus impactos ambientais, além de entender certas estatísticas levantadas, foram construídos diversos gráficos a partir da planilha Excel que foi construída (disponível sob demanda).

3.1. Análise estatística da amostra da literatura

Realiza-se, em primeiro lugar, uma análise estatística dos casos e cenários para que haja uma visão mais geral e ampla do levantamento de dados. Na Figura 22, é possível observar a distribuição dos artigos dentro do período de tempo analisado.

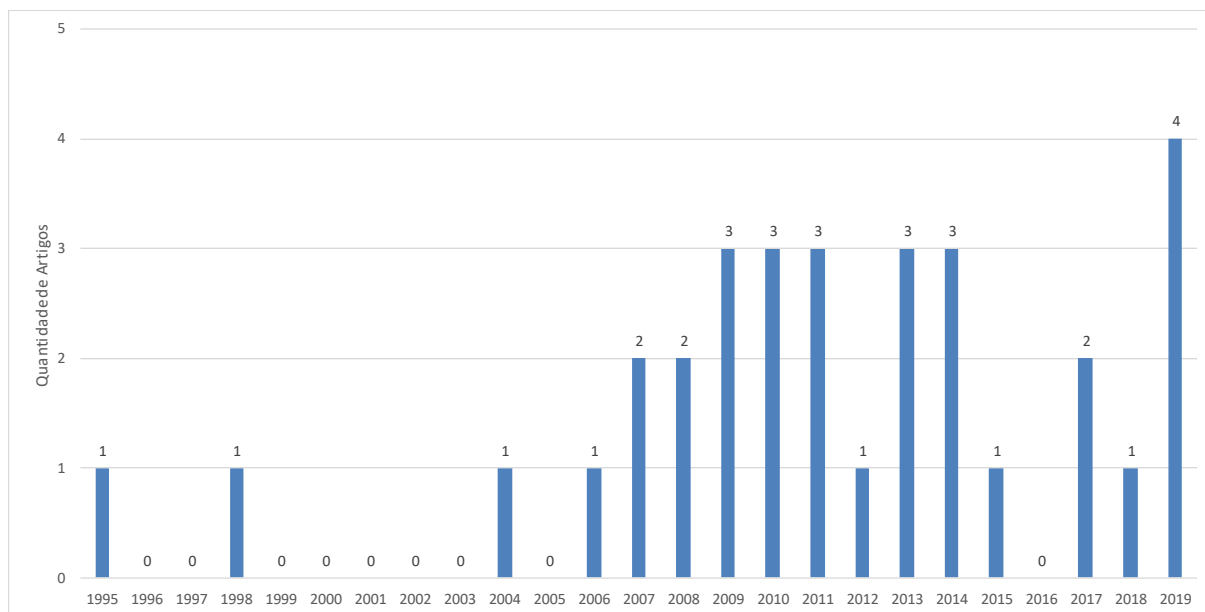


Figura 22: Distribuição dos artigos ao longo dos anos

Nota-se que a quantidade de artigos se concentra na faixa de 10 anos atrás até o ano atual, representando 75% dos artigos que foram levantados. Mas tem-se a

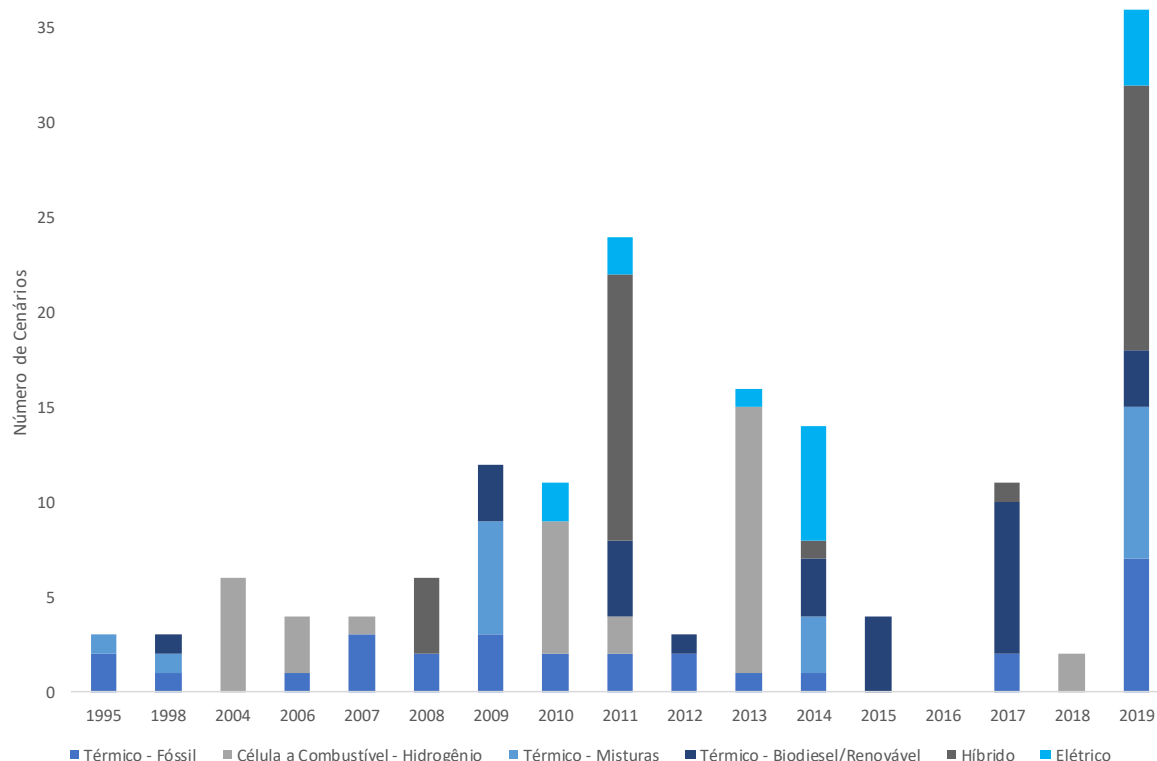


Figura 24: Distribuição dos cenários pelos anos

Como pode ser observado, os casos de tecnologia envolvendo veículos elétricos são mais recentes (desde 2010), assim como tecnologias híbridas que aparecem mais a medida que se aproximam de 2019. Tecnologias usando hidrogênio abrangem diferentes anos desde 2004: isto pode ser devido ao fato de que há um interesse antigo para este tipo de tecnologia para avaliar se esta pode ser uma opção viável.

Para este estudo, foram analisados quatro tipos de indicadores quanto ao impacto durante o ciclo de vida, porém nem todos os artigos forneciam dados sobre os quatro indicadores. Observa-se na Figura 25 a frequência que os indicadores aparecem para o levantamento realizado.

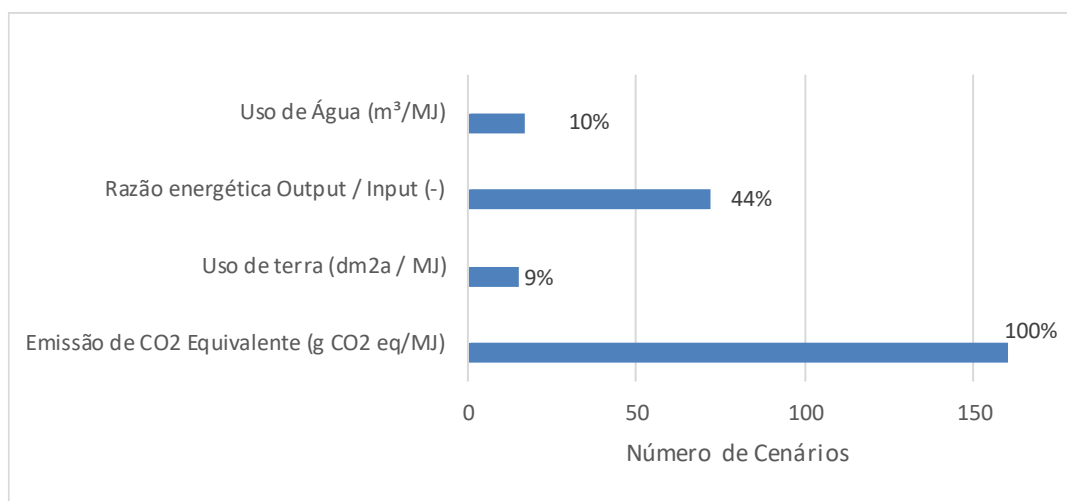


Figura 25: Distribuição dos indicadores por cenários

Todos os cenários possuem indicador de emissão de CO₂ equivalente. Porém, para os indicadores de uso de terra e água, esses dados são mais escassos dentre os artigos, representando 9% e 10%, respectivamente, dos cenários levantados. Isto torna difícil a comparação destes valores dentre as diferentes tecnologias, por este motivo estes dois indicadores serão desconsiderados para este estudo.

Apesar disso, o indicador de razão energética output/input representa 43% dos cenários dos estudos, o que torna viável a sua comparação. Portanto, há nem todos os cenários dentre as tecnologias analisadas entraram nesta análise como as misturas que foram retiradas deste tópico de comparação, mas também por exemplo para os combustíveis fósseis, 45% dos cenários não foram representados. Já para os biocombustíveis, o número de cenários não representados é 22%, sendo o biodiesel de segunda geração o único que não pode ser representado. No caso das tecnologias CaC, 51% dos cenários não foram representados, sendo possível observar apenas por tipo de tecnologia SOFC ou PEM. Para os híbridos não foi possível levantar nenhum dado de razão energética e por fim, para os veículos elétricos foi levantado este índice para um dos cenários e por este motivo este dado será considerado na comparação geral das tecnologias.

Ainda analisando alguns dados estatísticos, é importante observar quais perímetros aparecem dentre os artigos. Deseja-se que os artigos utilizem WtW, pois quanto mais etapas foram englobadas para o cálculo do indicativo, mais etapas serão

consideradas na avaliação do ciclo de vida do combustível. Na Figura 26, pode-se observar a distribuição do tipo de perímetro que cada estudo utilizou.

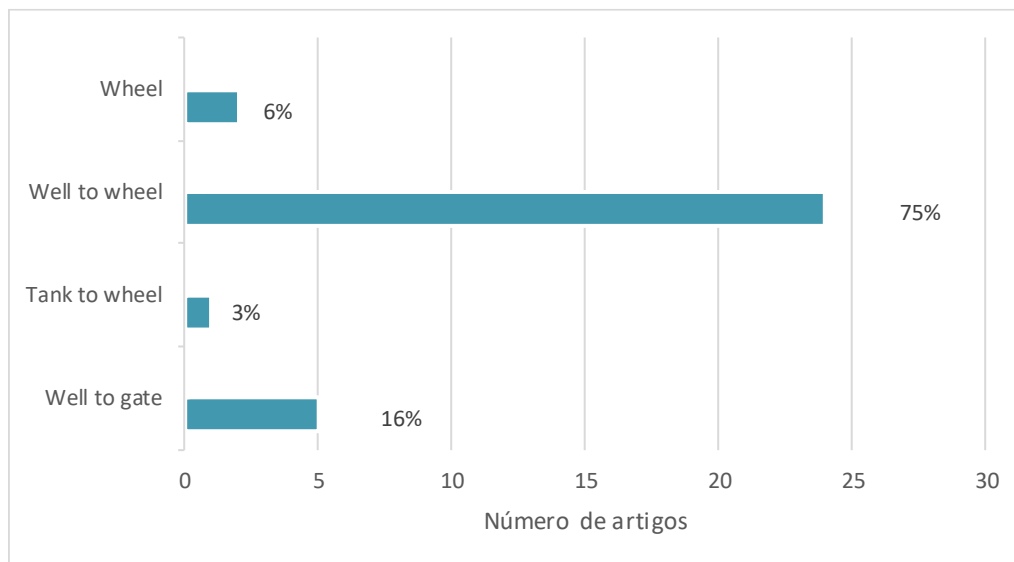


Figura 26: Distribuição dos artigos por perímetro

Observa-se que a maioria dos artigos (75%) consideram o perímetro mais abrangente WtW. O perímetro WtG é usado em 16%. Nenhum artigo, usa o perímetro WtT e alguns consideram somente a etapa do uso final (6%).

O mesmo tipo de levantamento é feito para o tipo de alocação utilizado, pois deseja-se entender se a realidade atende a expectativa da maioria dos artigos utilizarem métodos de alocação. Na Figura 27, os tipos de métodos de alocação são observados com a frequência que aparecem no levantamento dos cenários, então é possível que haja um artigo com diferentes cenários, mas com o mesmo tipo de alocação, o que contabiliza como um.

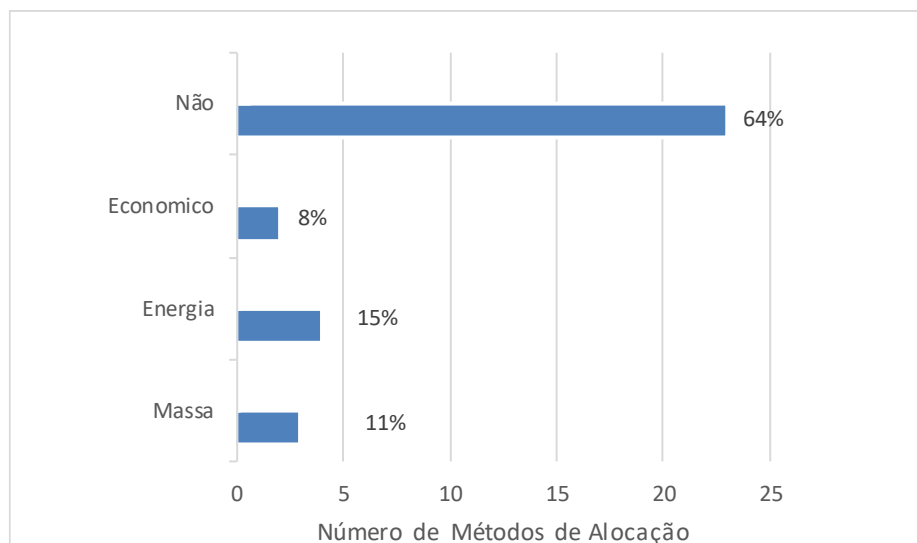


Figura 27: Tipos de métodos de alocação utilizados nos artigos

Como pode ser observado, infelizmente 64% dos artigos não utiliza nenhum tipo de método de alocação, o que pode prejudicar a análise de dados. As alocações de energia, 15%, e massa, 11%, são as mais utilizadas, seguidas da econômica, 8%, apesar de não ser possível realizar-se um estudo mais aprofundado de comparação dos métodos de alocação entre os artigos, uma vez que mais da metade é não identificada, ainda é possível realizar-se uma análise preliminar dos impactos ambientais, já que as amostras são diversas em sua natureza.

3.2. Parâmetro de emissão de CO₂ equivalente

3.2.1. Motores térmicos

A primeira análise realizada foi para os tipos de combustíveis fósseis, como pode ser observado na Figura 28.

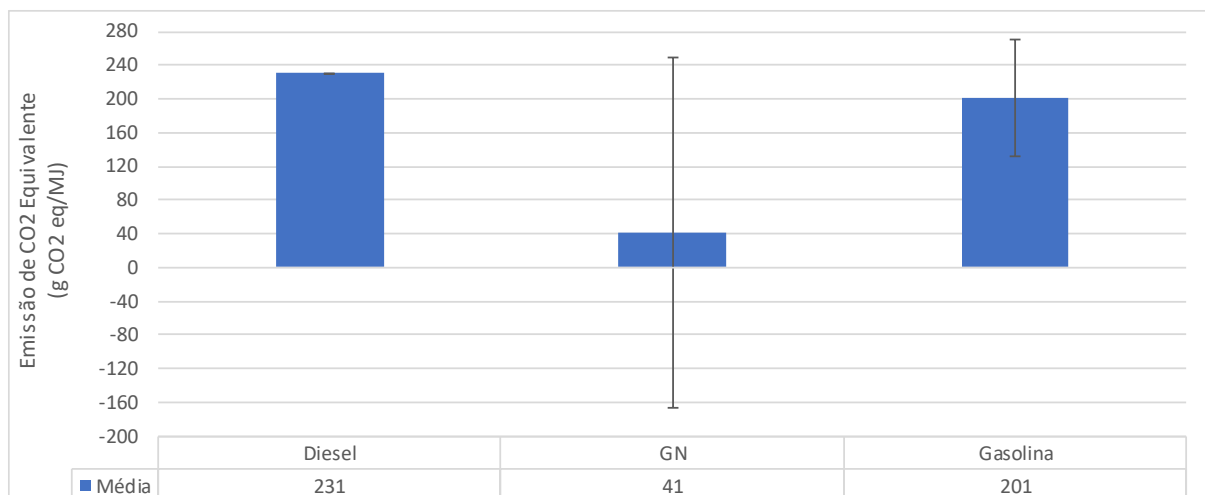


Figura 28: Parâmetro de Emissão de CO₂ Equivalente dentre os combustíveis fósseis

Analisando os valores de cada tipo de combustível fóssil, observa-se que a emissão de diesel e gasolina são as maiores ultrapassando 200 g CO₂/MJ e que não são as melhores soluções dentre os combustíveis fósseis visto que aqueles em forma líquida emitem mais CO₂ do que na forma gasosa (gás natural), devido à dificuldade da sua mistura com ar.

Para entender o impacto para cada biocombustível mais detalhadamente, estes foram divididos dentre suas gerações. Para o etanol foi considerado que sua segunda geração é derivada da sucrose e a sua terceira geração é derivada de microalgas. E para o biodiesel, foi considerado que sua primeira geração é derivada da soja e do óleo de palma. Além disso, estuda-se o impacto do óleo vegetal hidrogenado *Hydrotreated Vegetable Oil* (HVO). A análise para os biocombustíveis pode ser observada na Figura 29.

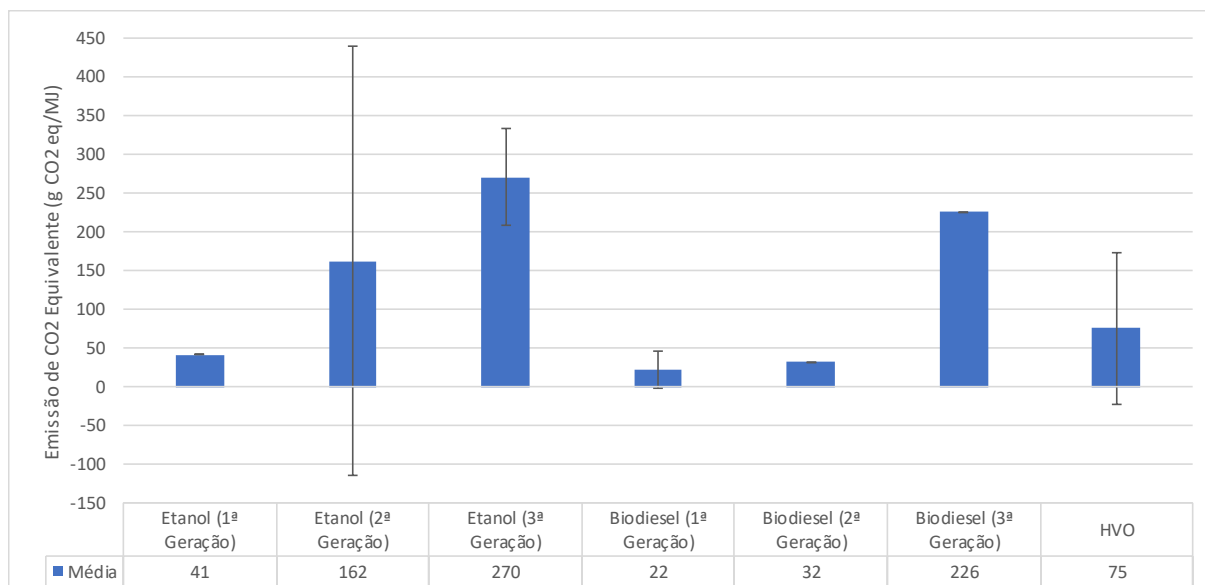


Figura 29: Parâmetro de Emissão de CO₂ Equivalente dentre os biocombustíveis

É possível observar que considerando a média do etanol (158 g CO₂ /MJ) e do biodiesel (93 g CO₂ /MJ), e considerando o valor da emissão do HVO (75 g CO₂ /MJ), que o HVO possui valores mais baixos para emissão de CO₂. Observa-se também para o etanol, que a segunda e terceira gerações possuem valores bem maiores do que a primeira, apesar do desvio padrão dessas duas ser bem maior quando comparada com a primeira, o que pode gerar uma pequena distorção da análise. E observa-se o mesmo para o biodiesel, sua segunda e terceira geração tem um valor de emissão maior do que a primeira. Comparando-se todos os biocombustíveis, observa-se que as primeiras gerações do etanol e do biodiesel possuem a menor emissão dentre os combustíveis, com valores de 41 g CO₂ /MJ e 22 g CO₂ /MJ, sendo este último a menor podendo ser considerada como a opção de menor impacto de emissão de CO₂.

Quando comparados com os combustíveis fósseis, observa-se que o gás natural (41 g CO₂/MJ) é melhor do que a média etanol (158 g CO₂ /MJ), e possui valor aproximado da sua primeira geração (41 g CO₂ /MJ) que é melhor do que a gasolina (201 g CO₂ /MJ) e o diesel (231 g CO₂ /MJ) . Além disso, o biodiesel é melhor (22 g CO₂ /MJ) do que o gás natural, a gasolina e o diesel. Isto pode ser consequência, quando se analisa o perímetro WtW, da forma que é realizada a etapa de produção e extração do combustível.

Também foi analisado qual seria o impacto de emissão de CO₂ para misturas de combustíveis, como biodiesel e diesel, gasolina e biodiesel, e HVO e diesel. Na Figura 30, observa-se esta análise para cada tipo dessas misturas citadas.

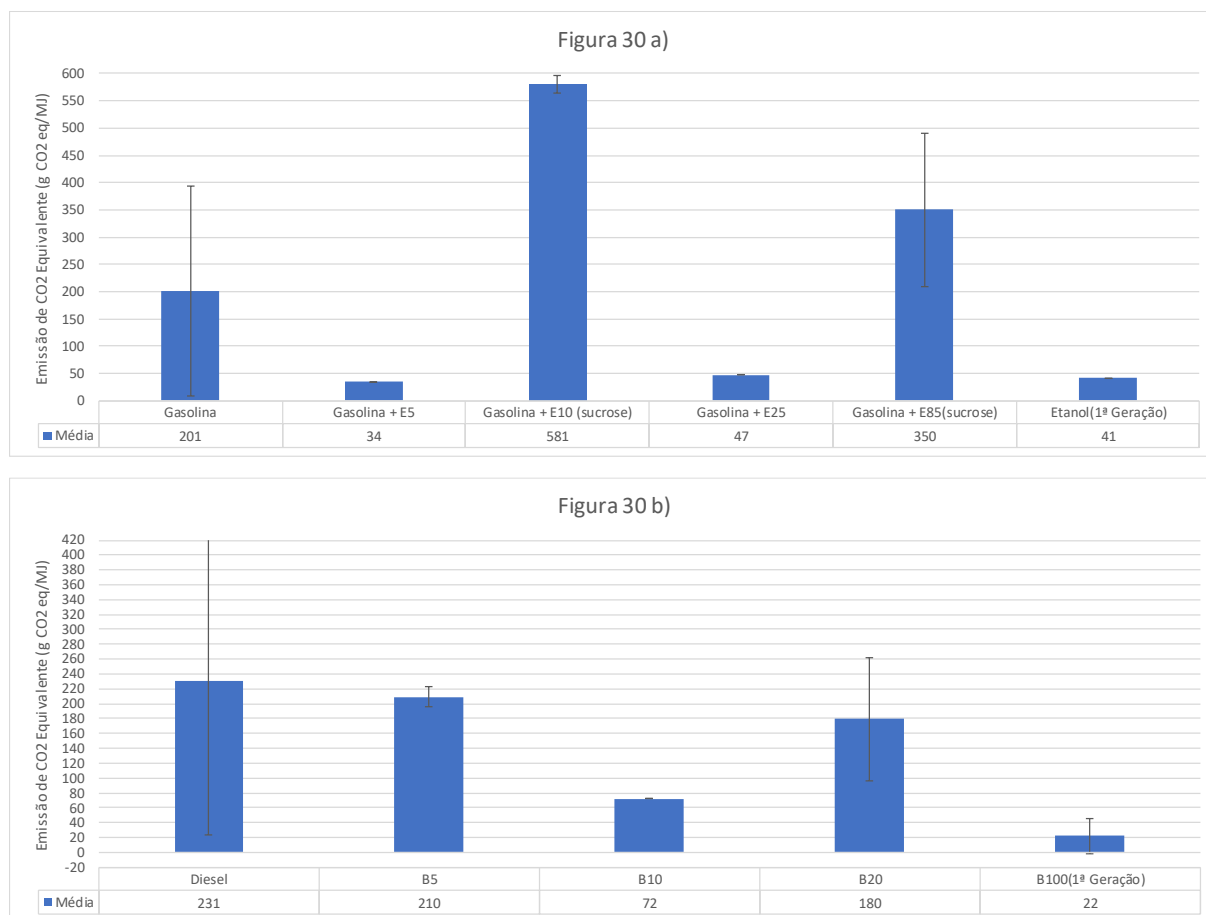


Figura 30: Parâmetro de Emissão de CO₂ Equivalente dentre as misturas combustíveis

Na Figura 30a), observa-se a emissão de CO₂ dentre as misturas de gasolina com etanol, com cada uma das misturas e sua respectiva quantidade dentre os dados levantados. Observa-se que a mistura de gasolina+ E10 (10% de etanol 2ª geração) possui a maior emissão de CO₂, devido ao fato do etanol de segunda geração possuir alta emissão (202 g CO₂/MJ) dentre as gerações do etanol, como foi observado na Figura 29. Se observarmos as misturas de gasolina + E5 ou E25, nota-se que a emissão de CO₂ é bem menor, e isto é porque trata-se do etanol da primeira geração (22 g CO₂/MJ), e ainda mais, a mistura com E5 é menos emissora do que 100% gasolina (201 g CO₂/MJ) e do que 100% etanol (41 g CO₂/MJ). Sendo assim,

observamos que a presença do etanol da primeira geração na mistura, diminui a emissão de CO₂, pois pode-se considerar grande parte do efeito atribuído a produção da biomassa para o etanol.

Já na Figura 30b), observa-se a mistura de biodiesel e diesel. Logo, pode-se afirmar que quanto mais biodiesel presente na mistura, menor será a emissão de CO₂, isto porque o diesel em si possui uma alta taxa de emissão de CO₂ (210 g CO₂/MJ). Assim como para as misturas de gasolina e etanol, com o objetivo de analisar o quadro geral, cabe retirar a análise do B10 (10% de biodiesel), que apesar de estar entre o máximo do diesel e o mínimo do biodiesel, está abaixo do esperado, pois como pode-se observar o combustível 100% biodiesel é a opção que possui o menor valor de emissão CO₂ (22 g CO₂/MJ).

Também foi analisada a emissão de CO₂ da mistura de gasolina + MBTE, com o valor de 61 g CO₂/MJ, que apesar de ser o único cenário levantado, o que torna difícil considerar como cenário de comparação, é um tipo de mistura de combustível que se torna uma opção melhor, no parâmetro de emissão de CO₂, do que a gasolina.

3.2.2. Células a combustível

Considerando o perímetro WtG, pode-se observar o gráfico abaixo a influência da fonte de matéria prima no impacto ambiental.

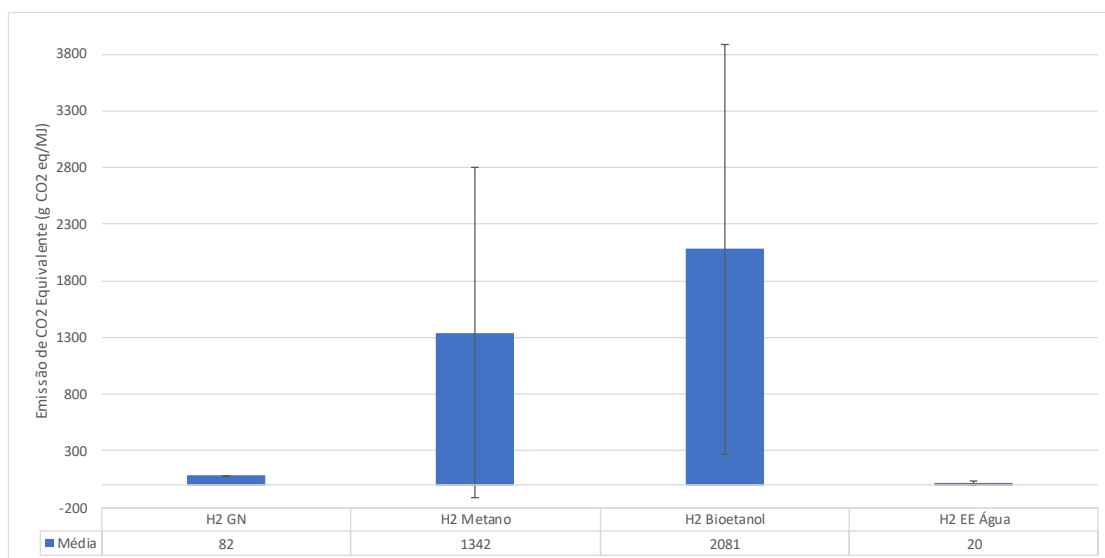


Figura 31: Parâmetro de Emissão de CO₂ Equivalente das CaC dentre as fontes de matéria

Observando o gráfico acima, pode ser considerado, então, que as tecnologias a hidrogênio que utilizam fontes energéticas mais renováveis, como eólicas ou solares, são as que menos emitem CO₂. E que as tecnologias que utilizam biocombustíveis são as que mais emitem CO₂, devido a necessidade de quebrar ligações químicas mais numerosas e mais fortes (ligações duplas ou triplas), e ainda pode-se concluir que as fontes de gás natural possuem um valor de emissão menor do que o metano devido a facilidade de retirada de hidrogênio do mesmo.

Na Figura 32, podem ser observados os parâmetros de emissão de CO₂ para as tecnologias de células a combustível usando hidrogênio de diferentes fontes para as tecnologias SOFC e PEM.

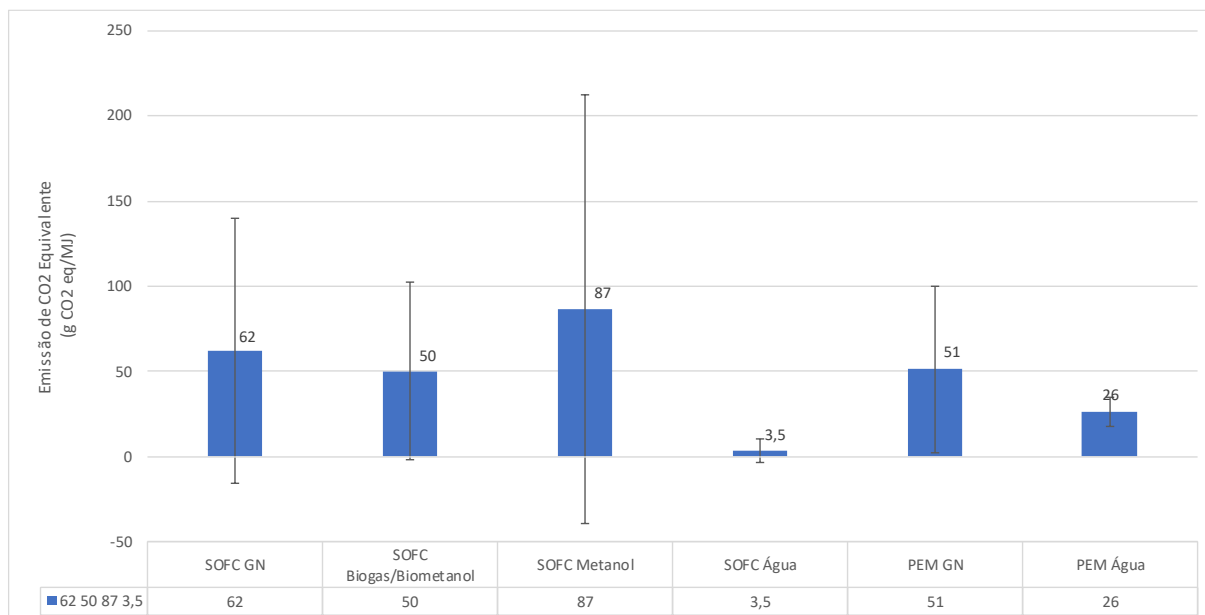


Figura 32: Parâmetro de Emissão de CO₂ Equivalente dentre as tecnologias a hidrogênio

Na Figura 32 acima, é possível observar que a tecnologia do tipo SOFC cujas fontes de energia, que podem ser água, biomassa, metano, gás natural, que são as mais renováveis, ou seja, retiram o hidrogênio da água, como as tecnologias nuclear e eólica, possuem os menores parâmetros de emissão de CO₂ com o valor de 3,5 g CO₂/MJ. Porém isto pode refletir na eficiência do combustível já que o tipo de tecnologia SOFC necessita de um hidrocarboneto em uma mistura de hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO) [32]. O que já não é verdade para a tecnologia do tipo

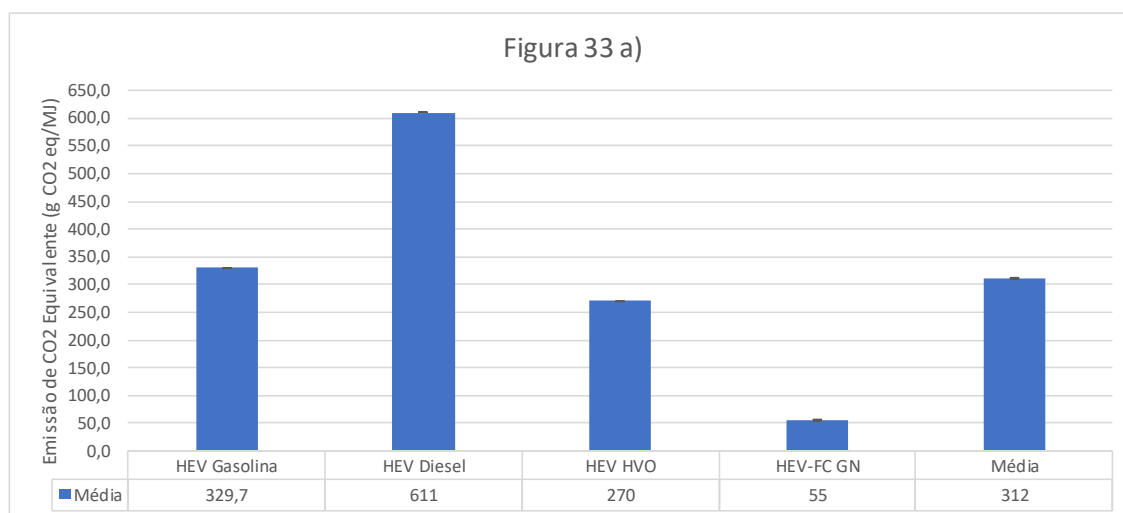
PEM e quando se observa os outros tipos de tecnologia, a PEM a partir de recursos renováveis que retiram o hidrogênio da água, como nuclear e eólica, é a que possui a menor emissão de CO₂ com o valor de 26 g CO₂/MJ.

A Figura 32 apenas confirma a leitura da Figura 31, onde se observa que as tecnologias cuja fonte é a água possui a menor emissão de CO₂ com o valor de 20 g CO₂/MJ e que as fontes derivadas do metanol (fóssil) e do bioetanol (biocombustível - etanol da segunda geração), possuem a maior emissão de CO₂ como já foi observado nas Figuras 28 e 29 anteriormente, sendo maiores do que o gás natural que apesar de alto valor da emissão de CO₂, dentre os combustíveis observados na Figura 28, ele é o que tem o menor impacto.

Comparando-se também, a média de emissão dos dois tipos de tecnologia, observa-se que a tecnologia do tipo PEM possui um efeito maior na emissão de CO₂ com o valor médio de 38,5 g CO₂/MJ quando comparada com a tecnologia SOFC com o valor médio de 32,7 g CO₂/MJ, considerando apenas gás natural e água, devido ao modo de operação deste tipo de tecnologia como já foi comentado [32].

3.2.3. Veículos híbridos e elétricos

Seguindo para a próxima tecnologia por combustível, observa-se a Figura 33 onde é possível analisar para os veículos elétricos os tipos de tecnologias do a *Plug In Hybrid Electric Vehicle* (PHEV), a *Hybrid Electric Vehicle* (HEV) e a *Battery Electric Vehicle* (BEV).



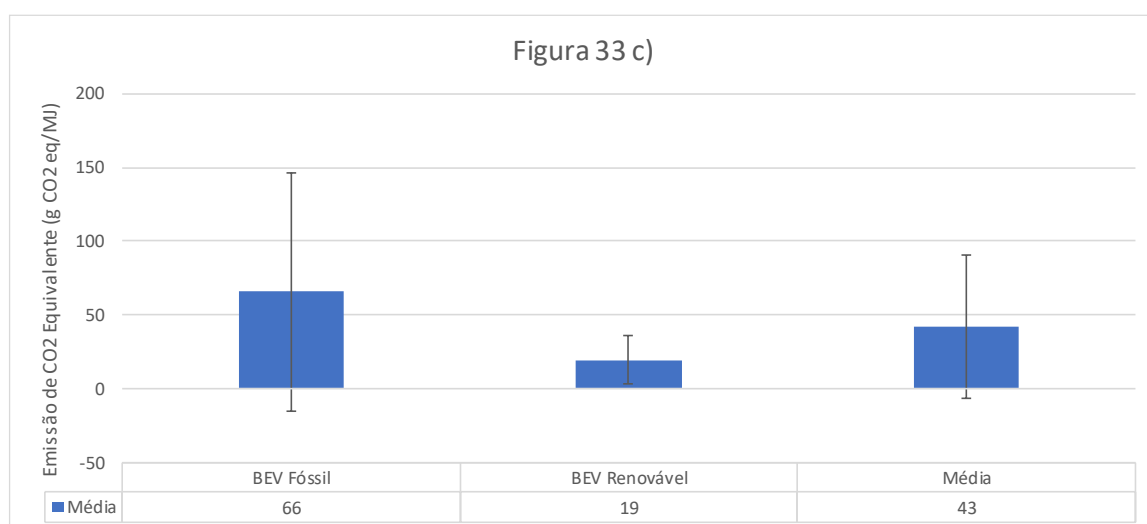
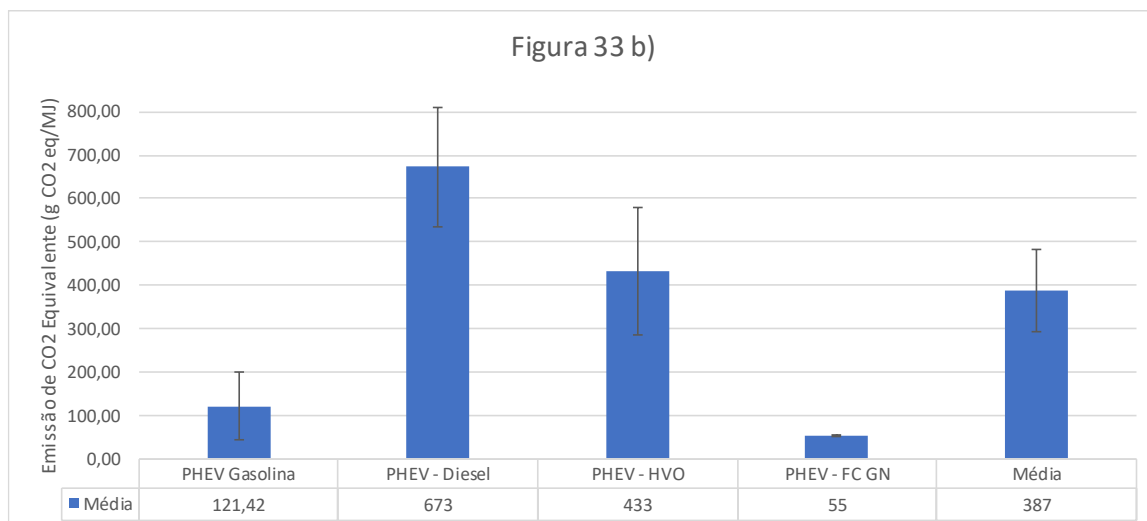


Figura 33: Parâmetro de Emissão de CO₂ Equivalente dentre os híbridos

Na Figura 33a), pode-se correlacionar o impacto dos tipos de combustíveis e de tecnologias previamente analisados. Então, diesel e gasolina sendo combustíveis fósseis usados em motores térmicos possuem maior emissão de CO₂, acima de 300 g CO₂ /MJ, seguidos do biocombustível HVO (ainda em motor térmico), com o valor de emissão de 270 g CO₂/MJ e a tecnologia CaC usando GN apresenta-se como a que possui a menor emissão no valor de 55 g CO₂/MJ, isto pode ser explicado devido ao fato deste tipo de tecnologia possuir água como produto e emitir de CO₂ apenas na reforma [32]. Além disso, os valores para os combustíveis diesel e HVO foram considerados segundo um estudo de ônibus, por isso destoam e por isso destoam dos outros artigos que utilizaram veículos leves no estudo.

Na Figura 33b), observa-se a emissão para os PHEVs que podem funcionar como um HEV, queimando combustível líquido, mas também são capazes de utilizar uma bateria on-board [62]. A emissão de CO₂ deste tipo de tecnologia é influenciada diretamente pelo tipo de energia que é utilizada [62], sendo assim observa-se que diesel e gasolina sendo combustíveis fósseis, e o HVO usados em motores térmicos possuem os maiores valores de emissão, acima de 100 g CO₂/MJ, e a tecnologia CaC usando GN possui a menor emissão no valor de 55 g CO₂/MJ do que para diesel (673 g CO₂/MJ). Para este caso também foram considerados os valores para os combustíveis diesel e HVO segundo um estudo de ônibus, e por isso destoam dos outros artigos que utilizaram veículos leves no estudo.

Por fim, na Figura 33c) observa-se a emissão para os BEVs, onde foram considerados valores para veículos leves, e como é de se esperar, para fontes fósseis a emissão de CO₂ de valor de 66 g CO₂/MJ é maior do que para fontes renováveis de valor de 19 g CO₂/MJ.

Comparando as fontes fósseis, onde são considerados veículos leves no estudo, dos três tipos de tecnologia, observa-se que, os BEVs possuem a menor emissão com o valor de 66 g CO₂/MJ, seguido dos PHEVs com o valor de 121 g CO₂/MJ e dos HEVs com o valor de 330 g CO₂/MJ, como é esperado pela literatura [51]. E comparando-se as fontes diesel e HVO, onde são considerados ônibus no estudo, entre os PHEVs e os HEVs, observa-se que em ambos os casos a emissão para o diesel e o HVO, é maior no caso dos PHEVs com o valor de 673 g CO₂/MJ e 433 g CO₂/MJ, respectivamente, quando comparado com os HEVs que possui os valores de 611 g CO₂/MJ para o diesel e 270 g CO₂/MJ para o HVO.

Na Figura 34, podem ser observados os parâmetros de emissão de CO₂ para os BEVs de grande porte, no caso, considerou-se valores para um ônibus.

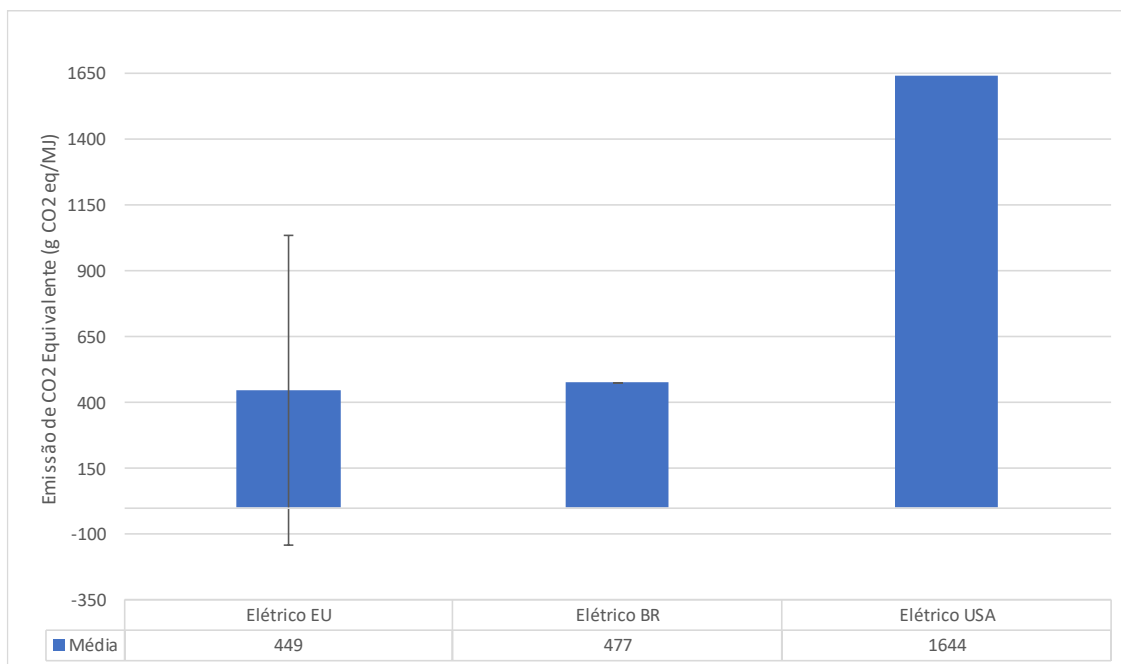


Figura 34: Parâmetro de Emissão de CO₂ Equivalente dentre as tecnologias elétricas

Para os ônibus elétricos, a tecnologia que possui a menor emissão de CO₂ é de origem europeia, o que já era esperado, pois observando a Figura 13, nota-se que a emissão de g CO₂ por unidade de energia (kWh), ou seja, a emissão de CO₂ equivalente é menor para a Europa com o valor de 449 g CO₂/MJ do que para os Estados Unidos com o valor de 1644 g CO₂/MJ, como é observado na Figura 34 acima. Além disso, como já foi mencionado anteriormente, o valor de emissão de CO₂ equivalente para o Brasil, no ano de 2018, recebe destaque, pois atinge um valor que é menor do que os Estados Unidos e apesar de ser maior que o europeu, possui um valor que se aproxima. E deve-se comentar que os valores de emissão de CO₂ para este levantamento é maior do que para o levantamento dos BEVs da Figura 33, pois são considerados veículos de diferentes portes, sendo o desta Figura 34 considerando ônibus ao invés de veículos leves.

3.2.4. Conclusão parcial

Finalmente, após terem sido feitas as análises para cada tipo de combustível ou tecnologia, é possível observar o quadro geral das emissões de CO₂. Na Figura 35, estão representados alguns levantamentos que devem ser comparados para este

estudo, em alguns desses estão representados o melhor caso, ou seja, aquele que possui menor emissão de CO₂ para cada tipo de tecnologia.

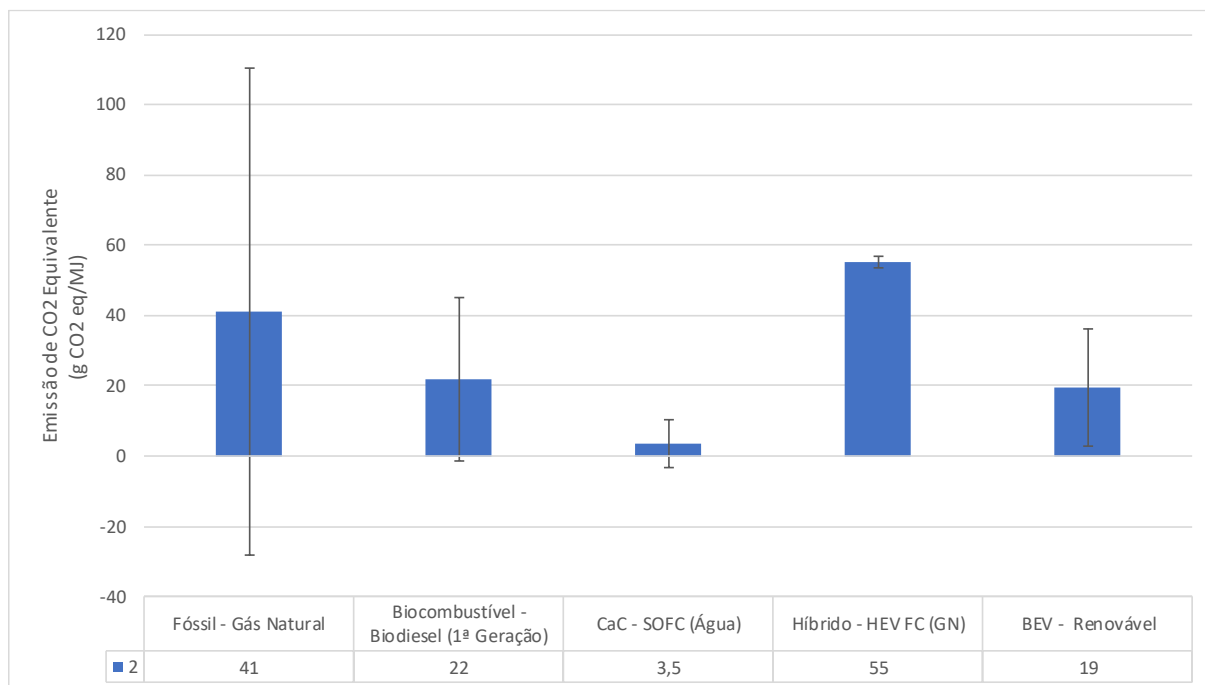


Figura 35: Parâmetro de Emissão de CO₂ Equivalente dentre as tecnologias

Observando as menores emissões para cada tipo de tecnologia, identificadas na própria Figura 35, conclui-se que mesmo a melhor opção dos combustíveis fósseis, no caso o gás natural, possui a maior emissão de CO₂ dentre as tecnologias térmicas. O biocombustível selecionado, a primeira geração do biodiesel, junto a melhor opção dos elétricos, cuja fonte é renovável (eólica ou hídrica), possuem valores próximos quanto a emissão de CO₂ com valores de 22 g CO₂/MJ e 19 g CO₂/MJ respectivamente, porém o destaque ainda é dos BEVs, pois considerando um perímetro WtW, isto pode ser justificado pelo tipo de fonte da energia elétrica. Os híbridos possuem o maior índice de emissão, possuindo o valor de emissão de CO₂ 2,3 vezes maior do que o da emissão do BEV, e 15,7 vezes maior do que a menor emissão de CO₂, com o valor de 3,5 g CO₂/MJ, dentre as tecnologias, que é atribuído a tecnologia do tipo CaC, a SOFC, cuja fonte de energia é renovável considerando a reforma da água, porém isto também é atribuído ao seu tipo de funcionamento, isto é, sabe-se que estes tipos de tecnologia produzem água como resultado do seu uso [32].

3.3. Razão Energética

3.3.1. Discussão dos resultados

Na Figura 36 estão representadas as tecnologias fósseis, separadas por tipos de combustíveis fósseis.

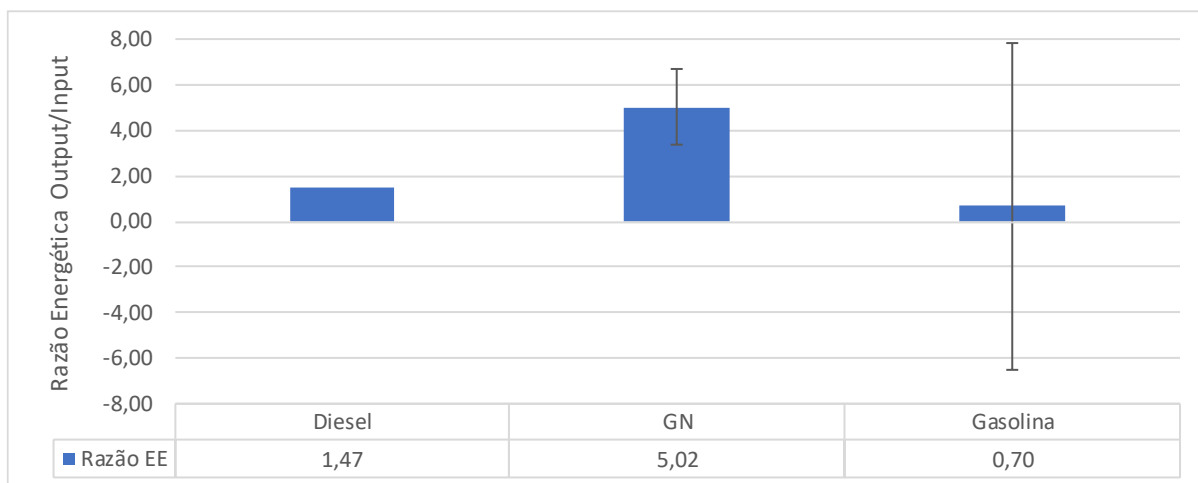


Figura 36: Razão Energética para os combustíveis fósseis usados em motores térmicos.

Observa-se que os combustíveis na forma de gás possuem melhor desempenho, isto devido a sua facilidade de transformação e dentre eles o gás natural possui melhor performance, além de emitir menos CO₂ como já foi analisado. Comparando o GN com as outras tecnologias fósseis, observa-se que o diesel possui 30% do seu desempenho e a gasolina possui 14% do desempenho do gás natural. Sendo assim, este se torna a melhor opção para as tecnologias fósseis quando se comparam esses dois índices. Na Figura 37, estão representadas as tecnologias biocombustíveis separadas por tipos de biocombustíveis.

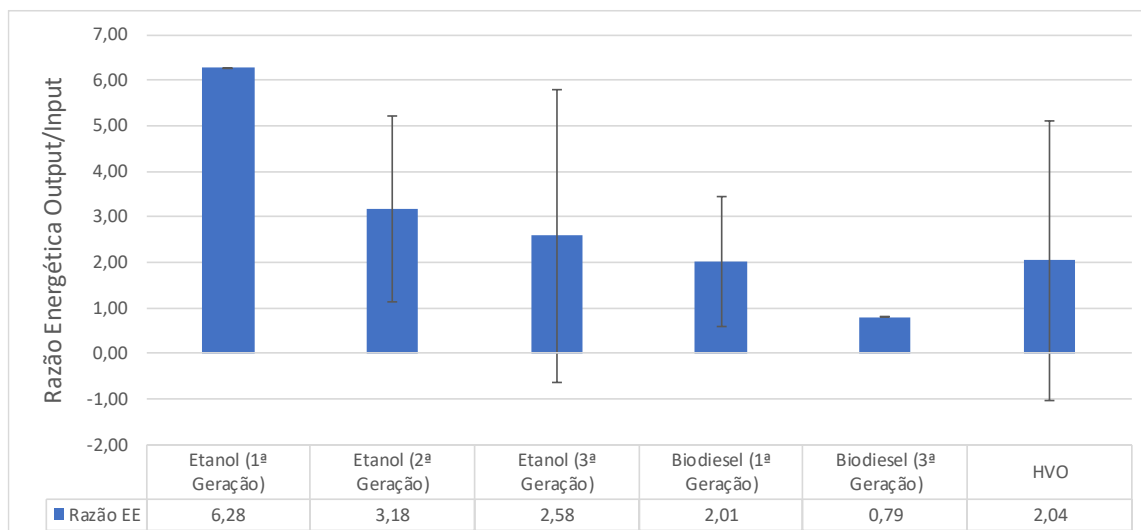


Figura 37: Razão Energética para os biocombustíveis usados em motores térmicos

Observa-se, para o etanol, que sua primeira geração possui melhor desempenho com uma razão energética de valor 6,28, seguida da segunda geração com 51% do seu desempenho e da terceira geração com 42% do seu desempenho. Além disso, como foi observado na Figura 29, a emissão da primeira geração do etanol é a menor dentre suas gerações, o que torna esta uma ótima opção de combustível dentre os etanois. E ainda pode-se observar, comparando com o desempenho dos combustíveis fósseis na Figura 36, que a segunda e terceira gerações do etanol supera o desempenho do diesel e da gasolina, porém não do GN, e a primeira geração supera o desempenho de todos os combustíveis fósseis levantados. Para o biodiesel observa-se o mesmo, ou seja, sua primeira geração possui o melhor desempenho com uma razão energética de valor 2,01, enquanto sua terceira geração possui 39% do seu desempenho. E além disso, como foi observado na Figura 29, a primeira geração do biodiesel possui a menor emissão dentre suas outras gerações, o que torna este combustível uma ótima escolha dentre os biodieseis. E ainda pode-se observar, também realizando-se uma comparação com o desempenho dos combustíveis fósseis na Figura 29, que a primeira geração do biodiesel possui desempenho menor do que o GN, porém maior do que diesel e gasolina, e que a segunda geração do biodiesel é menor do que GN e diesel, porém supera o desempenho da gasolina. Já o HVO possui desempenho menor do que os etanois (1ª, 2ª e 3ª geração), porém maior do que os biodieseis (1ª e 3ª geração), além disso,

observando a Figura 29, o HVO só não supera o desempenho do GN que é 2,5 vezes maior que seu desempenho.

Por fim, na Figura 38, estão representadas as tecnologias CaC separadas por SOFC e PEM.

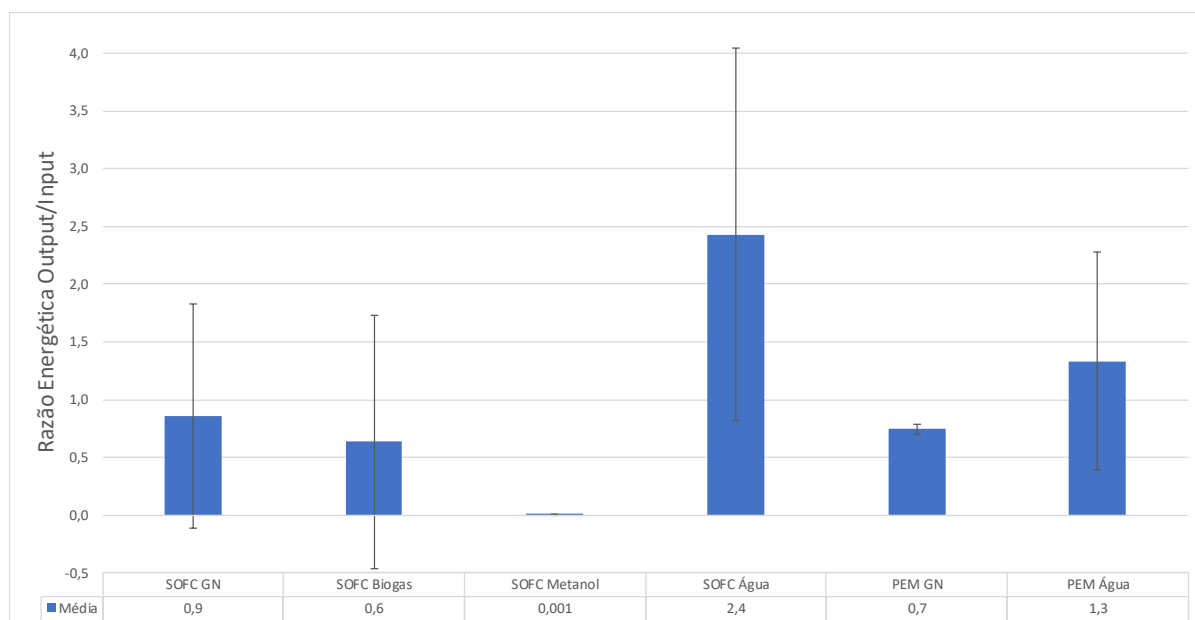


Figura 38: Razão Energética dentre as tecnologias de hidrogênio

Observa-se que, para ambos tipos de tecnologia, o melhor desempenho é para os casos cuja fonte de energia é renovável (hidrólise da água). Para tecnologia SOFC o valor da razão energética para hidrólise de água é de 2,4, a tecnologia cuja fonte é GN é 37,5% do seu desempenho, para a fonte biogás essa porcentagem é de 25%. Já para a tecnologia PEM, o valor da razão energética para hidrólise de água é de 1,3, que é 1,8 vezes maior do que a tecnologia cuja fonte é GN. Apesar do valor médio da razão energética do SOFC e PEM possuir para ambas o valor igual a 1, comparando os tipos de fontes de energia de cada tecnologia, observa-se que tanto para GN quanto para água como fonte, a tecnologia SOFC possui desempenho melhor do que a PEM. Para o GN, o desempenho da PEM representa 78% do desempenho da SOFC, e para a água, essa porcentagem é 54%. No entanto, comparando as duas tecnologias, SOFC e PEM, com o melhor desempenho, com valores de razão energética iguais a 2,4 e 1,3 respectivamente, com as tecnologias fóssil e biocombustível com melhor desempenho, as CaCs não superam nenhuma das duas

representando por volta de 40%, para as SOFCs, e 18%, para as PEMs dessas tecnologias.

Como já foi observado na Figura 25, a razão energética dentre os artigos correspondeu a 46% de cenários, portanto alguns cenários dentre as tecnologias não foram representados, por exemplo para os combustíveis fósseis, 45% dos cenários não foram representados, para os biocombustíveis, esta porcentagem é de 22% e para as CaCs, a não representação é de 51%. Algumas das tecnologias não conseguiram ser representadas como os híbridos ou então possuíam apenas um caso, o que impossibilitou a comparação, como no caso dos elétricos, que por isso foi apenas representado para comparação global das tecnologias.

3.3.2. Conclusão parcial

Após observar cada tipo de tecnologia, é possível comparar as melhores razões energéticas para cada tipo de tecnologia, como pode ser observado na Figura 39.

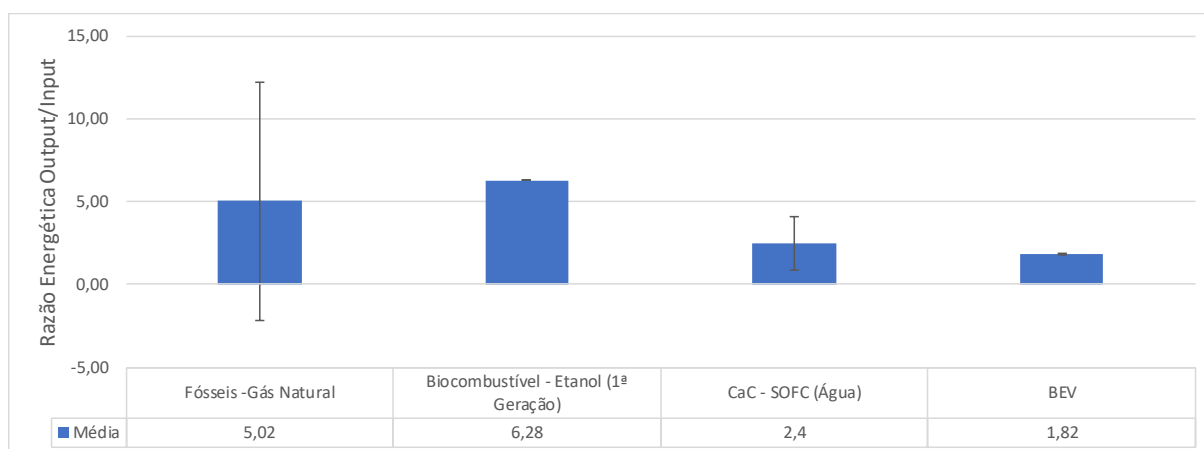


Figura 39: Razão Energética dentre as tecnologias

Observa-se que o biocombustível, sendo a razão energética atribuída da primeira geração do etanol, possui a melhor performance com o valor de 6,28. Em segundo lugar, estão os combustíveis fósseis, sendo o gás natural considerado como melhor performance com o valor de 5,02. No entanto, as outras tecnologias, CaC e BEV, não atingem nem 40% do desempenho do biocombustível, sendo a tecnologia CaC a única que se aproxima com o valor de 38% do seu desempenho e 48% do

desempenho dos combustíveis fósseis, isto pode ser justificado pelo fato de não serem tecnologias térmicas, que possuem uma quantidade de energia dentro do combustível maior do que a energia necessária para a produção do combustível.

3.4. Análise do custo das tecnologias

3.4.1. Custo de produção

Realizam-se, análises de custo de produção para alguns combustíveis fósseis, dentre eles a gasolina, o diesel e o gás natural, para alguns biocombustíveis, dentre eles a primeira geração do etanol e do biodiesel de primeira geração, e para a eletricidade segundo a metodologia descrita na seção 2.4. Além disso, serão levantados dados para comparação de custo entre a primeira e segunda geração do etanol, e o HVO.

Tabela 2: *Custo de Produção de alguns combustíveis*

Combustível	Custo de produção em base mássica ou volumétrica	PCI	Custo de produção em base energética
Gasolina	2,817 R\$/L	32,20 MJ/L	0,087
Diesel	2,550 R\$/L	35,64 MJ/L	0,071
Gás Natural	2,157 R\$/kg	47 MJ/kg	0,046
Etanol (1ª Geração)	1,837 R\$/L	21,27 MJ/L	0,086
Biodiesel (1ª Geração)	3,076 R\$/L	33,44 MJ/L	0,092
Eletricidade	0,116 R\$/kWh	-	0,032

Com base nos valores levantados acima, observa-se que o biodiesel possui o maior valor de custo por unidade de energia, seguido da gasolina. Comparando-se o valor de custo de produção por unidade de energia do etanol da primeira geração com o da segunda, considerando um fator multiplicativo em função do levantamento realizado previamente, tem-se que o etanol de segunda geração seria 4 vezes maior do que o de primeira geração, apesar da sua emissão de CO₂ ser menor. Comparando também o valor do custo de produção por unidade de energia do HVO com o diesel e o biodiesel, possui um valor 3 vezes menor do que o diesel e 4 vezes menor do que o

biodiesel, o que considerando seu baixo impacto de emissão de CO₂ e o fato de sua performance ser melhor do que a do biodiesel e do diesel, torna-se uma boa opção de combustível.

Também observa-se que os combustíveis fósseis, gasolina, diesel e gás natural, podem ser classificados como um custo médio dentre os levantamentos, sendo o gás natural o de menor custo, além de ser o que emite menos CO₂ e o que possui melhor razão energética, podendo então considerar que este é o melhor dentre os combustíveis fósseis.

É observado também que o custo por unidade de energia para a eletricidade é o menor de todos, considerando a tarifa de consumo para um valor médio de consumo mensal dentre 30 e 100 kWh fornecida pela ENEL [74].

3.4.2. Custo de venda

Na tabela abaixo, observa-se como o custo de venda se comporta para cada um dos combustíveis listados abaixo, segundo a metodologia descrita na seção 2.4. Desta forma, é possível estimar o valor da eletricidade por unidade de energia.

Tabela 3: *Custo ao consumidor de alguns combustíveis*

Combustível	Custo de venda em base mássica ou volumétrica	PCI	Custo de venda em base energética
Gasolina	4,043 R\$/L	32,20 MJ/L	0,125
Diesel	3,223 R\$/L	35,64 MJ/L	0,090
Gás Natural	2,727 R\$/kg	47 MJ/kg	0,058
Etanol (1ª Geração)	2,547 R\$/L	21,27 MJ/L	0,119
Biodiesel	3,100 R\$/L	33,44 MJ/L	0,093
Eletricidade	0,626 R\$/kWh	-	0,174

Com base nos valores levantados acima, observa-se que o gás natural possui o menor custo por unidade de energia, tanto para produção quanto para a venda, que o diesel e o biodiesel possuem valores de custo de venda próximos, mas diferem quanto ao seu custo de produção, sendo o do diesel menor do que o do biodiesel. E observa-se que o etanol (1ª geração), a gasolina e a eletricidade possuem os maiores valores

de distribuição, no entanto a eletricidade possui um valor de produção bem menor, enquanto o etanol e a gasolina possuem valores próximos de produção, apesar de que a primeira geração do etanol emite menos CO₂ e possui desempenho melhor que a gasolina.

O biodiesel por ter um alto valor de produção, reflete isto para o consumidor. Apesar de não estar na tabela, um levantamento do custo para o consumidor de energia elétrica em postos de abastecimento, mostra que o custo é de 0,08 R\$/km rodado que possui um preço tão baixo devido a matriz elétrica do Brasil.

3.4.3.Custo de aquisição dos veículos

Compara-se alguns tipos dos veículos mais vendidos no Brasil, dentre eles o veículo mais vendido de outubro de 2019, alguns veículos híbridos, alguns veículos com CaC e o veículo elétrico mais vendido em termos de valor e de potência, conforme os valores encontrados nas referências [77-84] mostrados na tabela abaixo.

Tabela 4: Levantamento de dados de custo e potência de veículos.

Tipo de Tecnologia	Nome do Veículo	Custo Veículo (R\$)	Horse Power (HP)	Custo/HP (R\$/HP)
Motor térmico - Etanol	Chevrolet Onix	R\$ 46.590	80	582,37
Motor térmico - Gasolina	Chevrolet Onix	R\$ 46.590	78	597,31
Híbrido – Gasolina	Toyota Prius	R\$ 126.600	98	1291,84
Híbrido – Gasolina	Volvo XC90 T8	R\$ 456.950	407	1122,73
Híbrido – Gasolina	Ford Fusion Hybrid	R\$ 182.990	190	963,10
CaC – Gás Hidrogênio	Hyundai ix35 FCEV	R\$ 99.990	134	746,19
CaC – Gás Hidrogênio	Toyota Mirai	R\$ 343.000	152	2256,58
CaC – Gasolina ou Diesel	Honda Clarity Fuel Cell	R\$ 325.433	174	1870,30
Elétrico	BMW i3	R\$ 199.950	170	1176,18

Observa-se que os veículos a etanol e gasolina possuem o melhor custo-benefício pela potência que oferecem, porém, observa-se que o modelo da marca Hyundai com CaC seria, dentre as opções de nova tecnologia, a melhor opção sendo que não se distancia tanto do veículo a etanol. No entanto, para o resto das novas

tecnologias, observa-se o alto preço por HP, como já era de se esperar. No entanto, existem uma compensação quanto a potência do veículo, pois é muito maior do que um veículo a gasolina ou a etanol comumente utilizado.

3.4.4. Conclusão parcial

Realiza-se um estudo para os veículos que possuem potência de 80 HP e 170 HP de acordo com o custo de distribuição para o consumidor de cada tecnologia, disponível na tabela 3, de qual seria o combustível que teria o melhor custo considerando 100.000 km e 500.000 km percorrido. Alguns dados de R\$/kWh foram retirados da Light [85] e ANEEL [86] para os cálculos de R\$/km dos veículos elétricos, observados na Figura 40 abaixo, junto com informações das Tabelas 3 e 4.

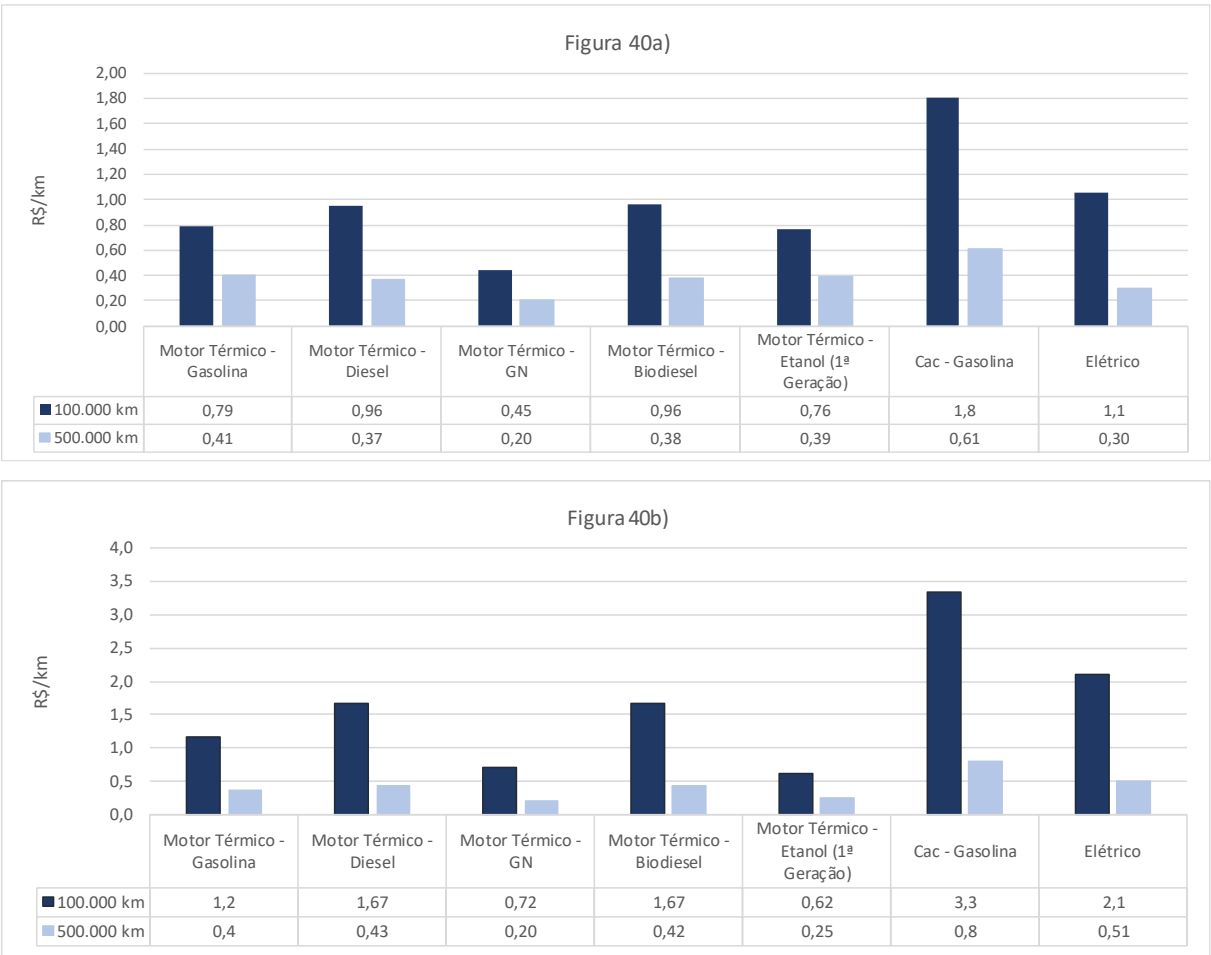


Figura 40: Custos dos combustíveis para o deslocamento de 100.000 km e 500.000 km

a) 80 HV b) 170 HV

Observando a Figura 40, conclui-se que o custo do veículo pode ser o fator responsável pelo seu alto custo por quilometragem, como pode ser observado quando comparam-se, o gás natural que possui um valor baixo de R\$/km igual a 0,20 considerando 500.000 km, devido ao custo de distribuição do combustível ser mais baixo e ao custo do veículo ser menor, e quando é relacionado com o elétrico, nota-se que apesar de possuir um baixo custo de energia, possui o valor de 0,30 R\$/km devido ao custo do veículo ser maior. E isto ocorre para as tecnologias novas, como elétricos e CaC, devido ao custo do veículo que é relativamente maior do que os veículos com as outras tecnologias que representa por volta de 15% do seu valor. Quando se observam os motores térmicos, nota-se que considerando o custo do veículo do etanol ou do biodiesel similares com o do gás natural, da gasolina ou do diesel, o valor de R\$/km é menor, isso ocorre porque o custo do combustível etanol ou biodiesel é menor do que gasolina ou diesel. Porém quando considera-se uma quilometragem maior, tem-se que o valor R\$/km do etanol é maior do que o do diesel e isto ocorre porque o seu poder calorífico inferior é menor do que da gasolina ou do gás natural, o que para efeitos do consumo do combustível, afeta diretamente, já que este deverá ser maior para percorrer a mesma quilometragem que um veículo a gasolina. Também se observa que para um veículo de potência maior, o valor do combustível por quilometragem aumenta, isto é justificado pelo fato do consumo ter que ser maior também para sustentar uma potência 2,5 vezes maior.

4 Conclusão

Apesar da grande dependência nas tecnologias fósseis, novos combustíveis e novas tecnologias estão sendo desenvolvidas e/ou em fase de apresentação no mercado. Após ter sido feito o levantamento dos 159 cenários em 32 artigos, que variam pelo tipo de combustível, de tecnologia de conversão, pelo perímetro considerado e hipóteses adotadas nos estudos publicados, é possível analisá-los de acordo com os impactos ambientais definidos segundo a metodologia da avaliação do ciclo de vida (ACV), a eficiência do ponto de vista energética e concluir que existem opções melhores que também são viáveis para a utilização em veículos.

Observando as emissões para cada tipo de tecnologia, conclui-se que a tecnologia SOFC do tipo CaC, cuja fonte é renovável (reforma da água), possui a menor emissão de CO₂ com o valor de 3,5 g CO₂/MJ. Comparando-a com a emissão de CO₂ do gás natural, a opção menos emissora dentre as tecnologias fósseis, nota-se que esta é 12 vezes maior com o valor de 41 g CO₂/MJ, que dentre os menores emissores das tecnologias térmicas levantadas possui a maior emissão de CO₂, já que para a primeira geração do biodiesel, menor emissor dentre os biocombustíveis, este valor é de 22 g CO₂/MJ, que é próximo ao valor do BEV, tecnologia não-térmica, que é 19 g CO₂/MJ.

No entanto, apesar da baixa emissão de CO₂ do SOFC(Água), observa-se que seu desempenho energético, apesar de ser o maior dentro da tecnologia CaC, representa 48% do desempenho do gás natural, que possui o maior valor de razão energética dentre as tecnologias fósseis com o valor de 5,02. A primeira geração do biodiesel acaba se destacando pelo valor da sua razão energética de 6,28, representando o maior desempenho dentre todas as tecnologias, isto porque a quantidade de energia consumida é menor do que a energia que é gerada. Apesar de possuir um valor de emissão um pouco maior que os BEVs, que estão em segundo lugar quanto a menor emissão de CO₂, seu desempenho é bem maior quando comparados, sendo o valor do desempenho dos BEVs 28% do desempenho da primeira geração do biodiesel, uma vez que possuem uma quantidade de energia

dentro do combustível maior do que a energia necessária para a produção do combustível.

No entanto, é importante, além de analisar os impactos de cada tecnologia, analisar o custo de produção, de distribuição e de aquisição do veículo, pois isto influencia diretamente na escolha do tipo de veículo e combustível. Estas análises são feitas através da comparação do custo por unidade de energia. Observa-se, então, que a eletricidade é possui o menor custo, isto porque a matriz elétrica brasileira é composta por 76% recursos renováveis derivadas de fontes eólicas e solares, por exemplo. Em seguida, os combustíveis fósseis tem um custo de produção menor do que os biocombustíveis, sendo o custo do gás natural o menor dentre os fósseis, isto deve-se ao modo de produção desses, já que os biocombustíveis exigem uma etapa de uso de terra que deve considerar a produção e a extração, diferentemente dos fósseis.

Em compensação, o custo de venda de alguns combustíveis fósseis como a gasolina é alto, uma vez que a procura e os impostos são maiores. O custo de venda do etanol também é alto, porém este possui maior vantagem devido a seu desempenho maior e emissão de CO₂ menor. Observa-se que o gás natural possui o menor custo por unidade de energia, tanto para produção quanto para a venda, que o diesel e o biodiesel possuem valores de custo de venda próximos, mas diferem quanto ao seu custo de produção, sendo o do diesel menor do que o do biodiesel. Apesar do preço da energia elétrica de distribuição ser maior, no a eletricidade possui um valor de produção bem menor, e quando for comparado o valor pela quantidade de quilômetros rodados será observado que os elétricos possuem mais vantagem.

Comparando o custo dos veículos, observamos o que já era de se esperar, isto é, que os veículos com novas tecnologias como CaC fossem mais caros porque são mais complexas e exigem um alto custo de investimento, o que dificulta o interesse e o financiamento por parte das indústrias [24]. No entanto ao analisar dois tipos de veículos, com potência de 80 HP e de 170 HP, percorrendo 100.000 km e 500.000 km, conclui-se que o custo do combustível por quilometro (R\$/km) é altamente influenciado pelo valor do veículo da tecnologia em questão, como o gás natural que possui um valor baixo de R\$/km igual a 0,20, considerando 500.000 km, e o custo do veículo menor do que o elétrico, que apesar de possuir um baixo custo de energia, possui um valor de 0,30 R\$/km devido ao custo do veículo ser quatro vezes maior que

o do gás natural. E conclui-se também que o poder calorífico inferior do tipo de combustível vai influenciar na quantidade de combustível consumido para uma mesma quilometragem que será percorrida pelo veículo, como por exemplo para o etanol e gasolina diesel, que possuem valores de custo de veículo similares, porém o valor de R\$/km do etanol é 0,2 maior que o da gasolina quando considerada uma quilometragem maior de 500.000, apesar do seu custo de distribuição do combustível ser menor. Também se observa que para um veículo de potência maior, o valor do combustível por quilometragem aumenta, isto é justificado pelo fato do consumo ter que ser maior também para sustentar uma potência 2,5 vezes maior.

No geral, pode ser concluído que as novas tecnologias CaC, biocombustível e BEVs são melhores do que as fósseis em diferentes aspectos, como a emissão de CO₂, desempenho, e até mesmo custo. Por isso, é importante que haja um investimento através de políticas públicas para o incentivo do desenvolvimento destas novas tecnologias, pois são tecnologias que possuem destaque quanto aos impactos citados acima, porém como foi visto o custo dos veículos são muito altos e afetam o valor gasto de combustível por quilômetros percorridos, além de apresentarem dificuldades de entrada no mercado e possuírem alto risco de investimento, entende-se esta necessidade de incentivo.

Então, fica a expectativa de que este trabalho possa ajudar no desenvolvimento de trabalhos futuros, onde possam ser exploradas de uma maneira mais aprofundada o impacto dos combustíveis com cada tipo de tecnologia, dando enfoque maior nos veículos 100% elétricos e a interação com a matriz energética local.

5 Referências Bibliográficas

- [1] Dunn, S. **Hydrogen futures: toward a sustainable energy system**. *International journal of hydrogen energy*, v. 27, n. 3, p. 235-264, 2002.
- [2] Hamilton, J. D. **Historical oil shocks** (No. w16790). *National Bureau of Economic Research*, 2011.
- [3] International Renewable Energy Agency (IRENA) (2019), **Global Energy Transformation: A roadmap to 2050**, Disponível em: www.irena.org/publications
Acesso em: maio 2019
- [4] Empresa de Pesquisa Energética. Publicações: **Balanço Energético Nacional 2019**. Disponível em: <http://epe.gov.br>. Acesso em: maio 2019.
- [5] Ministério das Relações Exteriores. Lançamento do relatório **Mercado de Energias Renováveis**, *Agência Internacional de Energia* (2018). Disponível em: <http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/notas-a-imprensa/19752-lancamento-do-relatorio-mercado-de-energias-renovaveis-da-agencia-internacional-de-energia>
Acesso em: maio 2019.
- [6] **Transformational trends in the automotive Industry**. *Fórum Mckinsey 2018: Transformar par vencer em um Mundo de mudanças aceleradas*. Mckinsey, 2018.
- [7] Campanari, S.; Mastropasqua, L.; Gazzani, M.; Chiesa, P.; Romano, M. C. **Predicting the ultimate potential of natural gas SOFC power cycles with CO2 capture—Part A: Methodology and reference cases**. *Journal of Power Sources*, v. 324, p. 598-614, 2016.
- [8] Our World in Data, Disponível em: <https://ourworldindata.org/fossil-fuels> Acesso em: junho 2019.
- [9] Our World in Data, Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions> Acesso em: junho 2019.
- [10] Our World in Data, Disponível em: <https://ourworldindata.org/how-long-before-we-run-out-of-fossil-fuels> Acesso em junho 2019.
- [11] Bardi, U. **Peak oil, 20 years later: Failed prediction or useful insight?**. *Energy research & social science*, v. 48, p. 257-261, 2019.

- [12] Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Produtos Regulados: Biocombustíveis. Disponível em: <www.anp.gov.br/biocombustiveis>. Acesso em: maio 2019.
- [13] Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Produtos Regulados: Biocombustíveis - Biodiesel. Disponível em: <www.anp.gov.br/biocombustiveis/biodiesel>. Acesso em: julho 2019.
- [14] Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Produtos Regulados: Biocombustíveis – Biometano. Disponível em: <www.anp.gov.br/biocombustiveis/biometano>. Acesso em: julho 2019.
- [15] Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Produtos Regulados: Biocombustíveis - Etanol. Disponível em: <www.anp.gov.br/biocombustiveis/etanol>. Acesso em: julho 2019.
- [16] Carneiro, M. L. N.; Pradelle, F.; Braga, S. L.; Gomes, M. S. P.; Martins, A. R. F.; Turkovics, F.; Pradelle, R. N. **Potential of biofuels from algae: Comparison with fossil fuels, ethanol and biodiesel in Europe and Brazil through life cycle assessment (LCA)**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 73, p. 632-653, 2017.
- [17] Energy Efficiency & Renewable Energy: Fuel cell Technologies Office - Hydrogen Storage, Disponível em: < <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage> >. Acesso em: agosto 2019.
- [18] Levin, D. B.; Pitt, L.; Love, M. **Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application**. *International journal of hydrogen energy*, v. 29, n. 2, p. 173-185, 2004.
- [19] Dutta, S. **A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource**. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 20, n. 4, p. 1148-1156, 2014.
- [20] Schmidt, J.; Gass, V.; Schmid, E. **Land use, greenhouse gas emissions and fossil fuel substitution of biofuels compared to bioelectricity production for electric cars in Austria**. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, n. 9, p. 4060-4074, 2011.
- [21] AutoPapo: Notícias – Carros elétricos no Brasil: veja todos os modelos e preços, Disponível em: <<https://autopapo.com.br/noticia/carros-eletricos-no-brasil-modelos-precos/>> Acesso em: julho 2019.

- [22] Larminie, J.; Lowry, J. **Electric vehicle technology explained**. *John Wiley & Sons*, 2012.
- [23] Wilberforce, T.; El-Hassan, Z.; Khatib, F. N.; Al Makky, A.; Baroutaji, A.; Carton, J. G.; Olabi, A. G. **Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, n. 40, p. 25695-25734, 2017.
- [24] Hellman, H. L.; van den Hoed, R. **Characterising fuel cell technology: challenges of the commercialisation process**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 32, n. 3, p. 305-315, 2007.
- [25] U.S. Embassy & Consulates in Indonesia Fuel Freedom Foundation. Embassy Fact Sheets. Disponível em: < <https://id.usembassy.gov/our-relationship/policy-history/embassy-fact-sheets/the-u-s-renewable-fuels-standards-program-and-palm-oil/>>. Acesso em: julho 2019.
- [26] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking. About us. Disponível em: <<https://www.fch.europa.eu/>>. Acesso em: maio 2019.
- [27] Rota 2030. Quem Somos. Disponível em: <<https://www.rota2030.com.br/>>. Acesso em: maio 2019.
- [28] Automotive Business. Notícias. Disponível em: <<http://www.automotivebusiness.com.br/noticia/27821/governo-desenha-plano-nacional-de-eletromobilidade>>.
- [29] Future of Rural Energy in Europe (Free). About Free. Disponível em: < <https://www.rural-energy.eu/about-free/>>. Acesso em: maio 2019.
- [30] Fuel Choices and Smart Mobility Initiative. About. Disponível em: < <http://www.fuelchoicesinitiative.com/our-mission/>>. Acesso em: julho 2019.
- [31] Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: Biocombustíveis - RenovaBio. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/renovabio>>. Acesso em: agosto 2019
- [32] Ogungbemi, E.; Ijaodola, O.; Khatib, F. N.; Wilberforce, T.; El Hassan, Z.; Thompson, J.; Olabi, A. G. **Fuel cell Membranes: Pros and cons**. *Energy*, v. 172, n. 1, p. 155-172, 2019.
- [33] Farooque, M.; Maru, H. C. **Fuel cells-the clean and efficient power generators**. *Proceedings of the IEEE*, v. 89, n. 12, p. 1819-1829, 2001

- [34] Nissan Global: Technology. Disponível em: <https://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/e_bio_fuel_cell.html>. Acesso em: julho 2019.
- [35] Ibicit. Avaliação do Ciclo de Vida. Disponível em: <<http://acv.ibict.br/>>. Acesso em: maio 2019.
- [36] EU-EUROPEAN COMMISSION et al. **International reference life cycle data system (ILCD) handbook—General guide for life cycle assessment—Detailed guidance**. *Institute for Environment and Sustainability*, 2010.
- [37] Corbion: About Corbion - Sustainability. Disponível em: <<https://www.corbion.com/about-corbion/sustainability/life-cycle-assessment>>. Acesso em: agosto 2019.
- [38] Dincă, C.; Badea, A.; Apostol, T. **Life cycle impact assessment of fossil fuels. Natural gas**, v. 9, n. 25.3, p. 9.5, 2010.
- [39] Rillo, E.; Gandiglio, M.; Lanzini, A.; Bobba, S.; Santarelli, M.; Blengini, G. **Life cycle assessment (LCA) of biogas-fed solid oxide fuel cell (SOFC) plant**. *Energy*, v. 126, p. 585-602, 2017.
- [40] Márcio de Almeida, D. A.; Ribeiro, S. K. **Assessing total and renewable energy in Brazilian automotive fuels. A life cycle inventory (LCI) approach**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 6-7, p. 1326-1337, 2009.
- [41] Nanaki, E. A.; Koroneos, C. J. **Comparative LCA of the use of biodiesel, diesel and gasoline for transportation**. *Journal of Cleaner Production*, v. 20, n. 1, p. 14-19, 2012.
- [42] Furuholt, E. **Life cycle assessment of gasoline and diesel**. *Resources, conservation and recycling*, v. 14, n. 3-4, p. 251-263, 1995.
- [43] Granovskii, M.; Dincer, I.; Rosen, M. A. **Life cycle assessment of hydrogen fuel cell and gasoline vehicles**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 31, n. 3, p. 337-352, 2006.
- [44] Gnansounou, E.; Dauriat, A.; Villegas, J.; Panichelli, L. **Life cycle assessment of biofuels: energy and greenhouse gas balances**. *Bioresource technology*, v. 100, n. 21, p. 4919-4930, 2009.
- [43] Luo, L.; Van Der Voet, E.; Huppes, G. **Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil**. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 13, n. 6-7, p. 1613-1619, 2009.

- [44] Rocha, M. H.; Capaz, R. S.; Lora, E. E. S.; Nogueira, L. A. H.; Leme, M. M. V.; Renó, M. L. G.; del Olmo, O. A. **Life cycle assessment (LCA) for biofuels in Brazilian conditions: a meta-analysis.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 37, p. 435-459, 2014.
- [45] Hajjaji, N.; Pons, M. N.; Renaudin, V.; Houas, A. **Comparative life cycle assessment of eight alternatives for hydrogen production from renewable and fossil feedstock.** *Journal of cleaner production*, v. 44, p. 177-189, 2013.
- [46] Arvidsson, R.; Persson, S.; Fröling, M.; Svanström, M. **Life cycle assessment of hydrotreated vegetable oil from rape, oil palm and Jatropha.** *Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 2-3, p. 129-137, 2011.
- [47] Gehrer, M.; Seyfried, H.; Staudacher, S. **Life cycle assessment of BtL as compared to HVO paths in alternative aviation fuel production.** Deutsche Gesellschaft für Luft-und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth Ev, 2015.
- [48] Hussain, M. M.; Dincer, I.; Li, X. **A preliminary life cycle assessment of PEM fuel cell powered automobiles.** *Applied Thermal Engineering*, v. 27, n. 13, p. 2294-2299, 2007.
- [49] Strazza, C.; Del Borghi, A.; Costamagna, P.; Traverso, A.; Santin, M. **Comparative LCA of methanol-fuelled SOFCs as auxiliary power systems on-board ships.** *Applied Energy*, v. 87, n. 5, p. 1670-1678, 2010.
- [50] Koroneos, C.; Dompros, A.; Roumbas, G.; Moussiopoulos, N. **Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes.** *International journal of hydrogen energy*, v. 29, n. 14, p. 1443-1450, 2004.
- [51] Wu, D.; Guo, F.; Field III, F. R.; De Kleine, R. D.; Kim, H. C.; Wallington, T. J.; Kirchain, R. E. **Regional Heterogeneity in the Emissions Benefits of Electrified and Lightweighted Light-Duty Vehicles.** *Environmental science & technology*, v. 53, n. 18, p. 10560-10570, 2019.
- [52] Heracleous, E. **Well-to-Wheels analysis of hydrogen production from bio-oil reforming for use in internal combustion engines.** *international journal of hydrogen energy*, v. 36, n. 18, p. 11501-11511, 2011.
- [53] Nordelöf, A.; Messagie, M.; Tillman, A. M.; Söderman, M. L.; Van Mierlo, J. **Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment?.** *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 19, n. 11, p. 1866-1890, 2014.

- [54] Sheehan, J.; Camobreco, V.; Duffield, J.; Graboski, M.; Graboski, M.; Shapouri, H. **Life cycle inventory of biodiesel and petroleum diesel for use in an urban bus** (No. NREL/SR-580-24089). *National Renewable Energy Lab.* (NREL), Golden, CO (United States), 1998.
- [55] Kim, D.; Kim, S.; Oh, S.; No, S. Y. **Engine performance and emission characteristics of hydrotreated vegetable oil in light duty diesel engines.** *Fuel*, v. 125, p. 36-43, 2014.
- [56] Patyk, A.; Bachmann, T. M.; Brisse, A. **Life cycle assessment of H₂ generation with high temperature electrolysis.** *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 38, n. 10, p. 3865-3880, 2013.
- [57] Bicer, Y.; Khalid, F. **Life cycle environmental impact comparison of solid oxide fuel cells fueled by natural gas, hydrogen, ammonia and methanol for combined heat and power generation.** *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018.
- [58] Brito, F. P.; Martins, J.; Pedrosa, D. D. R.; Monteiro, V. D. F.; Afonso, J. L. **Real-life comparison between diesel and electric car energy consumption.** *Grid electrified vehicles: performance, design and environmental impacts* (Editor: Carla Alexandra Monteiro da Silva), p. 209-232, 2013.
- [59] Canova, A.; Chicco, G.; Genon, G.; Mancarella, P. **Emission characterization and evaluation of natural gas-fueled cogeneration microturbines and internal combustion engines.** *Energy Conversion and Management*, v. 49, n. 10, p. 2900-2909, 2008.
- [60] Navajas, A.; Mendiara, T.; Goñi, V.; Jiménez, A.; Gandía, L. M.; Abad, A.; Luis, F. **Life cycle assessment of natural gas fuelled power plants based on chemical looping combustion technology.** *Energy Conversion and Management*, v. 198, p. 111856, 2019.
- [61] Eriksson, O.; Finnveden, G.; Ekvall, T.; Björklund, A. **Life cycle assessment of fuels for district heating: A comparison of waste incineration, biomass-and natural gas combustion.** *Energy policy*, v. 35, n. 2, p. 1346-1362, 2007.
- [62] Samaras, C.; Meisterling, K. **Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from plug-in hybrid vehicles: implications for policy**, 2008.
- [63] Zackrisson, M.; Avellán, L.; Orlenius, J. **Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles—Critical issues.** *Journal of Cleaner Production*, v. 18, n. 15, p. 1519-1529, 2010.

- [64] Baptista, P.; Ribau, J.; Bravo, J.; Silva, C.; Adcock, P.; Kells, A. **Fuel cell hybrid taxi life cycle analysis**. *Energy Policy*, v. 39, n. 9, p. 4683-4691, 2011.
- [65] Nordelöf, A.; Romare, M.; Tivander, J. **Life cycle assessment of city buses powered by electricity, hydrogenated vegetable oil or diesel**. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 75, p. 211-222, 2019.
- [66] Tabatabaei, M.; Aghbashlo, M.; Najafi, B.; Hosseinzadeh-Bandbafha, H.; Ardabili, S. F.; Akbarian, E.; Ghaziaskar, H. S. **Environmental impact assessment of the mechanical shaft work produced in a diesel engine running on diesel/biodiesel blends containing glycerol-derived triacetin**. *Journal of Cleaner Production*, v. 223, p. 466-486, 2019.
- [67] Dale, A.; Pereira de Lucena, A.; Marriott, J.; Borba, B.; Schaeffer, R.; Bilec, M. **Modeling future life-cycle greenhouse gas emissions and environmental impacts of electricity supplies in Brazil**. *Energies*, v. 6, n. 7, p. 3182-3208, 2013.
- [69] N. J. Mistry; S. V. N. I. T.; Surat, T. P. **Life cycle Impact Assessment of Production stages: LPG, Diesel and petrol**. 2017.
- [70] Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Anuário Estatístico 2019. Disponível em:< <http://www.anp.gov.br/publicacoes/anuario-estatistico/5237-anuario-estatistico-2019>>. Acesso em: novembro 2019.
- [71] Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Boletim Trimestral de Preços e Volumes de Combustíveis. Disponível em:< <http://www.anp.gov.br/publicacoes/boletins-anp/5326-boletim-trimestral-preco-volumes-combustiveis>>. Acesso em: novembro 2019.
- [72] Antônio Lima. Geração Térmica: Poder Calorífico. Disponível em:< <http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>>. Acesso em: novembro 2019.
- [73] Clean Leap. Energy and Conversion Factors. Disponível em:< <https://cleanleap.com/where-are-we-renewable-energy/energy-units-and-conversion-factors>>. Acesso em: novembro 2019
- [74] ENEL. Tarifa de Energia Elétrica. Disponível em:< <https://www.eneldistribuicao.sp.com.br/para-sua-casa/tarifa-de-energia-eletrica>>. Acesso em: novembro 2019

- [75] Guia Bolso. Glossário. Cálculo de gastos de gasolina. Disponível em:<<https://www.guiabolso.com.br/glossario/c/calculo-de-gastos-de-gasolina/>>. Acesso em: novembro 2019.
- [76] Comitê Brasileiro da Comissão de Integração Energética Regional (CIER) - BRACIER. Notícias. Brasil. Disponível em:<<http://www.bracier.org.br/noticias/brasil/3572-abastecer-carro-eletrico-custara-r-10.html>>. Acesso em: novembro 2019.
- [77] G1-Auto Esporte. Carros. Notícias. Disponível em:<<https://g1.globo.com/carros/noticia/2019/11/01/veja-os-50-carros-novos-mais-vendidos-em-outubro-de-2019-no-brasil.ghtml>>. Acesso em: novembro 2019.
- [78] WebMotors. Chevrolet. Onix. Disponível em:<<https://www.webmotors.com.br/chevrolet/onix/2019>>. Acesso em: novembro 2019.
- [79] Noticias Automotivas. Elétricos. Mercado. Disponível em:<<https://www.noticiasautomotivas.com.br/carros-eletricos-modelos-vendidos-brasil/>>. Acesso em: novembro 2019.
- [80] Noticias Automotivas. Híbridos. Hatches. Linha 2020. Toyota. Disponível em: <<https://www.noticiasautomotivas.com.br/toyota-prius/>>. Acesso em: novembro 2019.
- [81] G1-Auto Esporte. Carros. Notícias. Disponível em: <<https://g1.globo.com/carros/noticia/volvo-xc90-t8-hibrido-chega-ao-brasil-partindo-de-r-456950.ghtml>>. Acesso em: novembro 2019.
- [82] Ford. Carros. Fusion. Disponível em:<<https://www.ford.com.br/carros/fusion/compare-as-versoes/titanium-hybrid/>>. Acesso em: novembro 2019.
- [83] Volvo Cars. Modelos Volvo. Novos Modelos. Disponível em:<<https://www.volvocars.com/br/modelos-volvo/novos-modelos/xc90/t8-hibrido>>. Acesso em: novembro 2019.
- [84] Hyundai Media Center. Releases. Disponível em:<<https://www.hyundainews.com/en-us/releases/1624>>. Acesso em: novembro 2019.
- [85] Light. Para sua Residência. Sua Conta. Composição da Tarifa. Disponível em:<<http://www.light.com.br/para-residencias/Sua-Conta/composicao-da-tarifa.aspx>>. Acesso em: novembro 2019.

[86] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Tarifas. Tarifas de Consumidores. Ranking de Tarifas. Disponível em:<<https://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>>. Acesso em: novembro 2019.

[87] Scania. Produtos e Serviços. Combustíveis Alternos. Disponível em:<<https://www.scania.com/pt/pt/home/products-and-services/articles/alternative-fuels.html>>. Acesso em novembro 2019.

[88] Automotive Bussiness. Notícias. Disponível em:<<http://www.automotivebusiness.com.br/noticia/30057/anp-inicia-conversas-para-regular-hvo-no-mercado-brasileiro>> Acesso em: novembro 2019.