

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

PROGRAMA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO - COPPE/UFRJ

**PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DE ENERGIA
EUROPEAN ENERGY MANAGER – EUREM**

Estudo de viabilidade para a troca de uma frota de veículos urbanos de carga movida a diesel de petróleo por uma frota movida por células a combustível de hidrogênio verde

AMANDA RANGEL DA COSTA LOUREIRO

**RIO DE JANEIRO
2021**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO - COPPE/UFRJ

AMANDA RANGEL DA COSTA LOUREIRO

Monografia apresentada ao curso de Gestão em Energias Renováveis do Programa de Planejamento Energético - COPPE/UFRJ (em parceria com a Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha RJ), como requisito parcial para obtenção do certificado.

Orientador(a): Marcio de Almeida D'Agosto, D.Sc.

Estudo de viabilidade para a troca de uma frota de veículos urbanos de carga movida a diesel de petróleo por uma frota movida por células a combustível de hidrogênio verde

RIO DE JANEIRO
2021



Deutsch-Brasilianische
Industrie- und Handelskammer
Câmara de Comércio e Indústria
Brasil-Alemanha

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO - COPPE/UFRJ
PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DE ENERGIA**

AMANDA RANGEL DA COSTA LOUREIRO

**Estudo de viabilidade para a troca de uma frota de veículos
urbanos de carga movida a diesel de petróleo por uma frota
movida por células a combustível de hidrogênio verde**

Monografia apresentada como requisito parcial à
conclusão do curso de Pós-Graduação em Gestão de
Energia.

APROVADA EM:

CONCEITO: _____

BANCA EXAMINADORA:

PROF. Marcio de Almeida D'Agosto, D.Sc.

PROF. Amaro Olimpio Pereira Junior, D.Sc.

PROF. José Eduardo Nunes da Rocha, D.Sc.

Coordenação do Curso EUREM

Rio de Janeiro

Dedico este trabalho ao futuro da energia.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à minha família, que sempre me apoiou em todas as minhas conquistas e esteve me motivando a estar sempre em busca de mais conhecimento e desenvolvimento pessoal.

Agradeço também à minha empresa AES BRASIL, que investiu no meu potencial de acelerar o futuro da energia com o financiamento desta pós-graduação e está sempre me incentivando ao desenvolvimento profissional teórico e prático na gestão de projetos de energias renováveis.

E por fim, agradeço ao meu orientador Márcio D'Agosto que esteve esses meses me direcionando em como conduzir este trabalho, que considero extremamente relevante e consistente para o setor de energia e de transporte no Brasil.

RESUMO

Este projeto visa analisar a viabilidade ambiental, social e financeira da utilização de veículos movidos a células a combustível de hidrogênio verde, substituindo uma frota movida a combustível fóssil (diesel de petróleo) na operação de distribuição de bebidas de um centro de distribuição em Campo Grande no Rio de Janeiro. Mesmo que o projeto possua grande benefícios sociais e ambientais, atualmente ainda não se mostrou viável financeiramente devido ao atual cenário político-econômico brasileiro e os estágios de desenvolvimento das tecnologias de produção, transporte e utilização do hidrogênio verde para o setor de transporte.

Palavras-Chave: Hidrogênio Verde, Setor de Transporte, Distribuição de bebidas, Custo anual equivalente, Viabilidade

ABSTRACT

This project aims to analyze the environmental, social and financial feasibility of using vehicles powered by green hydrogen fuel cells, replacing a fossil fuel (oil diesel) fleet in the beverage distribution operation of a distribution center in Campo Grande in Rio de Janeiro. Even though the project has great social and environmental benefits, it is currently not financially feasible due to the current Brazilian political-economic scenario and the gaps in the development of technologies for production, transport and use of green hydrogen for the transport sector.

Keywords: Green Hydrogen, Transport sector, beverage distribution, Equivalent annual cost, Feasibility

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Milhões de toneladas (MT) de (CO ₂) emitidas. | 14 |
| Figura 2 - Emissões na atividade de transportes em 2019..... | 15 |
| Figura 3 - Sistema de propulsão típico movido ao diesel de petróleo..... | 18 |
| Figura 4 - Esquema técnico das células a combustível no Renault Master Z.E. Hydrogen | 19 |
| Figura 5 - Modelos e tamanhos do Renault MASTER FURGÃO VITRÉ | 22 |
| Figura 6 - Unidades necessárias para a produção descentralizada do hidrogênio verde | 34 |
| Figura 7 - Renault MASTER Z.E. Hydrogen..... | 35 |
| Figura 8 - Esquema de um eletrolisador PEM..... | 39 |
| Figura 9 - Custo unitário de capital da planta de eletrólise em função da capacidade de produção | 41 |
| Figura 10 - Matriz Elétrica Brasileira 2019..... | 43 |
| Figura 11 - Componentes para a redução do custo do hidrogênio verde | 44 |
| Figura 12 - Custo nivelado dos tipos de hidrogênio (USD/kg) | 44 |
| Figura 13 - Custos anuais em Milhões de reais para o cenário estudado no trabalho | 51 |
| Figura 14 - Custos anuais em Milhões de reais para o cenário 1 | 52 |
| Figura 15 - Custos anuais em Milhões de reais para o cenário 2 | 53 |
| Figura 16 - Custos anuais em Milhões de reais para o cenário 3 | 54 |
| Figura 17 - Custos anuais em Milhões de reais para o cenário 4 | 55 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Cálculo da carga total transportada diariamente | 23 |
| Tabela 2 - Cálculo da distância percorrida | 23 |
| Tabela 3 - Cálculo do consumo de energia..... | 24 |
| Tabela 4 - Classificação dos custos fixos e variáveis | 25 |
| Tabela 5 - Componentes para o cálculo do custo de lubrificantes | 29 |
| Tabela 6 - Componentes para o cálculo do custo de pneus | 29 |
| Tabela 7 - Componentes para o cálculo do custo de peças e acessórios | 30 |
| Tabela 8 - Componentes para o cálculo do custo de lavagem e lubrificação de chassi | 30 |
| Tabela 9 - Custos anuais totais da frota à diesel em operação | 32 |
| Tabela 10 - Cálculo do consumo de energia..... | 37 |
| Tabela 11 - Custo unitário de capital da planta de eletrólise em função da capacidade de produção | 40 |
| Tabela 12 - Componentes para o cálculo do custo de peças e acessórios do VUC movido a células a combustível de hidrogênio..... | 46 |
| Tabela 13 - Componentes para o cálculo do custo com a energia renovável para a produção descentralizada do hidrogênio verde | 47 |
| Tabela 14 - Alternativa 1 - Avaliação de custos para a produção de hidrogênio verde de forma centralizada..... | 48 |
| Tabela 15 - Alternativa 2 - Avaliação de custos para a produção de hidrogênio verde de forma descentralizada..... | 49 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

FMI – Fundo Monetário Internacional

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

CAPEX – Capital Expenditure

OPEX – Operational Expenditure

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

WLTP - Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure

IRENA – International Renewable Energy Agency

IBTS - Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável

SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa

GEE - gases de efeito estufa

PNPB - Programa de Produção e Uso de Biodiesel

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

CDD – Centro de distribuição

VUC – Veículo Urbano de Carga

SIN - Sistema Interligado Nacional

MCTIC - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações

IRENA – International Renewable Energy Agency

IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente

BEN – Balanço Energético Nacional

IBTS - Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável

IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente

NTC – Associação Nacional do Transporte de Cargas

H2V – Hidrogênio Verde

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 | SETOR DE TRANSPORTE E SEU IMPACTO | 14 |
| 3 | CARACTERÍSTICAS DOS COMBUSTÍVEIS..... | 16 |
| 3.1 | DIESEL DE PETRÓLEO | 16 |
| 3.2 | HIDROGÊNIO VERDE | 18 |
| 4 | PANORAMA ATUAL DO TRANSPORTE DE CARGA DA EMPRESA EM ESTUDO..... | 21 |
| 4.1 | DADOS OPERACIONAIS DA FROTA | 21 |
| 4.1.1 | <i>Quantidade e especificações dos veículos da frota</i> | <i>21</i> |
| 4.1.2 | <i>Velocidade média dos veículos.....</i> | <i>22</i> |
| 4.1.3 | <i>Massa de carga transportada.....</i> | <i>22</i> |
| 4.1.4 | <i>Distância percorrida</i> | <i>23</i> |
| 4.1.1 | <i>Consumo de energia.....</i> | <i>23</i> |
| 4.1.2 | <i>Consumo de combustível</i> | <i>24</i> |
| 4.1.3 | <i>Poluente emitidos</i> | <i>24</i> |
| 4.2 | CUSTOS DA FROTA | 25 |
| 4.2.1 | <i>Custos fixos da frota (Cf).....</i> | <i>26</i> |
| 4.2.2 | <i>Custos variáveis da frota (Cv)</i> | <i>28</i> |
| 4.3 | SUMÁRIOS DOS CUSTOS ANUAIS DA FROTA DE CAMPO GRANDE..... | 32 |
| 5 | INSTALAÇÃO E OPERAÇÃO DA FROTA DE VUC A HIDROGÊNIO VERDE | 34 |
| 5.1 | DADOS OPERACIONAIS DA FROTA MOVIDA A HIDROGÊNIO VERDE | 35 |
| 5.1.1 | <i>Quantidade e especificações dos veículos (QVH2V).....</i> | <i>35</i> |
| 5.1.2 | <i>Distância percorrida</i> | <i>36</i> |
| 5.1.3 | <i>Consumo de energia.....</i> | <i>36</i> |
| 5.1.4 | <i>Consumo de combustível</i> | <i>37</i> |
| 5.2 | CUSTOS DA FROTA MOVIDA À HIDROGÊNIO VERDE | 37 |
| 5.2.1 | <i>Custos fixos da frota (CfH2V).....</i> | <i>37</i> |
| 5.2.2 | <i>Custos variáveis da frota.....</i> | <i>42</i> |
| 5.3 | SUMÁRIO DOS CUSTOS DA FROTA MOVIDA A CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DE HIDROGÊNIO | 48 |
| 6 | ANÁLISES DOS RESULTADOS | 51 |
| 6.1 | CENÁRIO 1: CUSTO DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE | 52 |
| 6.2 | CENÁRIO 2: AUMENTO DA CARGA ÚTIL DO VEÍCULO MOVIDO À HIDROGÊNIO | 53 |
| 6.3 | CENÁRIO 3: MUDANÇAS NO CENÁRIO POLÍTICO-ECONÔMICO BRASILEIRO | 53 |
| 6.4 | CENÁRIO 4: DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E MUDANÇAS POLÍTICO-ECONÔMICAS | 54 |
| 7 | CONCLUSÃO..... | 56 |
| 7.1 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 57 |
| 8 | REFERÊNCIAS..... | 58 |

1 INTRODUÇÃO

Como parte do compromisso global de impulsionar a transição energética, o desenvolvimento do hidrogênio verde deve responder às necessidades de descarbonização em setores como a indústria e o transporte. Diferente de outros setores da economia, o transporte ainda é muito dependente de petróleo como fonte de energia, consumindo 93% deste recurso natural esgotável, cuja queima representa uma significativa contribuição nas emissões de dióxido de carbono (CO_2), principal gás de efeito estufa, associado às mudanças climáticas e um dos principais desafios da humanidade para o século XXI. (IBTS, 2018)

Já o hidrogênio verde é considerado uma fonte limpa de energia, pois é obtido por eletrólise da água a partir de energia elétrica renovável, portanto, um processo livre de emissões de gases do efeito estufa.

Segundo IRENA (2020), a eletrificação do setor de transporte está mostrando os primeiros sinais de aceleração disruptiva. Esse progresso é devido à rápida redução dos custos da energia solar e eólica (incluindo offshore), como tecnologias facilitadoras essenciais para a operação de baterias, veículos elétricos sustentáveis e movidos por células a combustível de hidrogênio verde.

O trabalho a ser realizado estudará a viabilidade de otimizar a eficiência energética da operação veicular no transporte de carga a partir da substituição de uma frota movida a diesel de petróleo por uma frota movida a células a combustível de hidrogênio verde. Com uma tecnologia ainda em desenvolvimento, os veículos movidos a hidrogênio verde não possuem autonomia para longas distâncias e infraestrutura adequada de abastecimento, portanto, o estudo de caso terá foco em transporte de carga urbano. O foco do trabalho será nos ganhos de sustentabilidade sobre os aspectos dos impactos ambientais e sociais adquiridos por meio desta troca, quantificando a economia de energia necessária para a operação da frota e a redução nas emissões de dióxido de carbono.

No Capítulo 2 serão apresentados dados que evidenciarão a necessidade de transformação das práticas e tecnologias utilizadas no setor de transporte no Brasil. Em seguida, o Capítulo 3 descreverá a comparação entre os combustíveis que serão estudados durante esse trabalho, analisando as tecnologias de propulsão para o transporte de carga, trazendo as peculiaridades e vantagens da substituição do motor movido a diesel de petróleo pelas células a combustível movida a hidrogênio verde.

Já o Capítulo 4 apresentará os dados operacionais e todos os custos associados ao panorama atual do transporte de carga da empresa estudada. O capítulo 5 irá expor as

modificações e custos necessários para que a frota seja substituída por veículos de carga movidos por células a combustível de hidrogênio verde.

No Capítulo 6 serão analisados os resultados, os quais simulam diferentes cenários para essa substituição de tecnologias na frota em estudo. E por fim, no Capítulo 7, são apresentadas as conclusões deste trabalho, levando em consideração não apenas a viabilidade financeira do projeto, mas também uma análise econômica da substituição de tecnologias, dado as necessidades atuais de práticas ambientais, sociais e de governança que as empresas estão sendo impulsionadas pela sociedade do século XXI.

2 SETOR DE TRANSPORTE E SEU IMPACTO

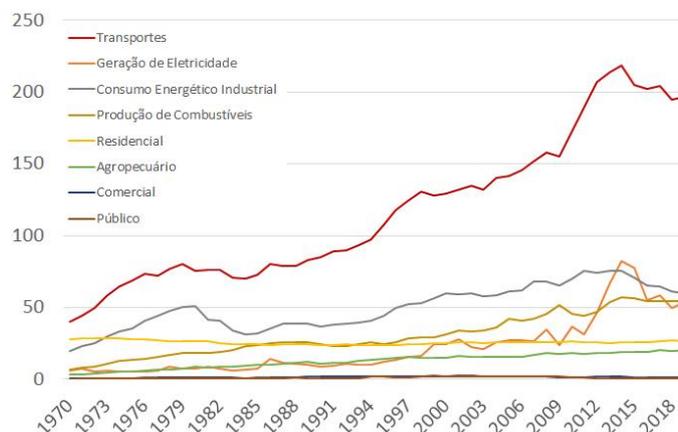
O transporte de pessoas e cargas sempre esteve associado à geração de alguma forma de poluição, seja ela atmosférica, sonora ou pela intrusão visual (Carvalho, 2011). O transporte motorizado à combustão assumiu o papel predominante nos deslocamentos cotidianos da população e das cargas, respondendo por grande parte das emissões de poluentes dos grandes centros urbanos, principalmente os originários da queima dos combustíveis fósseis.

Os poluentes atmosféricos globais são gases que são expelidos para a atmosfera e acabam impactando todo o planeta por meio do aquecimento global, no caso da emissão de gases de efeito estufa (GEE). O principal poluente nessa categoria é o dióxido de carbono (CO_2), que serve também como unidade de equivalência para os demais GEE.

De acordo com dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), o Brasil emitiu 2,2 bilhões de toneladas de gases de efeito estufa (GEE) em 2019. O setor de Energia, para o qual são quantificadas todas as emissões dos gases de efeito estufa provenientes do uso ou da produção de combustíveis, foi responsável por 19% dessas emissões.

Especificamente em Energia, conforme a Tabela 1, a atividade de transporte sempre foi a maior emissora, afastando-se cada vez mais das curvas referentes a outras atividades emissoras com seu significativo crescimento nas emissões de gases do efeito estufa (CO_2e) desde 1970.

Figura 1 - Milhões de toneladas (MT) de (CO_2) emitidas.
Fonte: INEMA (2020)

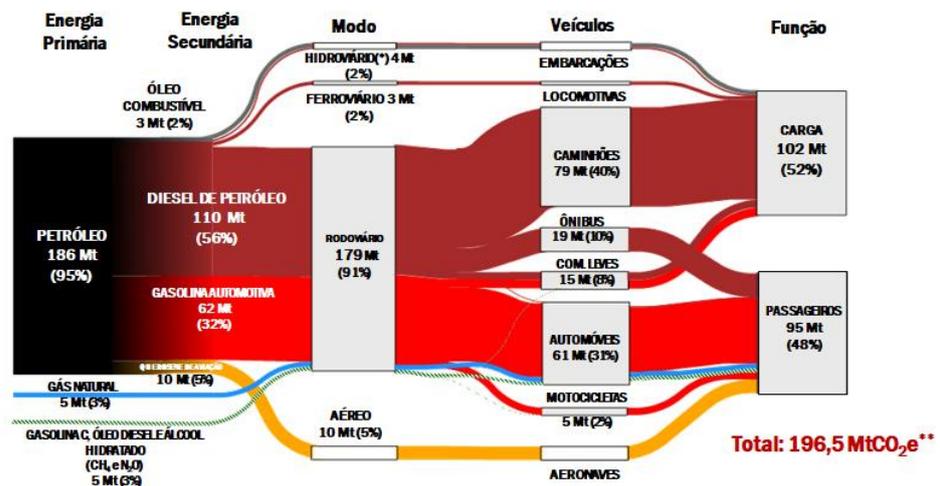


Sendo a atividade de transporte a mais emissora do grupo do setor de energia, conhecer seu comportamento é essencial para planejar políticas e ações em direção à redução da

intensidade de carbono da economia brasileira. Os modos de transporte emitiram 196,5 milhões de toneladas de CO_2e em 2019, o que representa aproximadamente 47% de toda a emissão pelo setor de energia.

A figura 2 ilustra, da esquerda para a direita, a participação das emissões de gases de efeito estufa nos transportes segundo fontes energéticas, modos, veículos e funções. Observa-se que a queima dos derivados de petróleo, diesel e gasolina, são, de longe, a maior fonte de emissão dessa atividade, sobretudo no transporte rodoviário por meio de caminhões, que têm como função o deslocamento de cargas, e de automóveis, utilizados no transporte de passageiros.

Figura 2 - Emissões na atividade de transportes em 2019
Fonte: IEMA (2020)



Fonte de dados: Balanço Energético Nacional (MME) e Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (MMA)
 (*) Uma parcela do uso de combustíveis em embarcações decorre do transporte de passageiros. Devido a ausência de informações fundamentadas e a sua pouca importância no conjunto das emissões, optou-se por alocar as emissões desta categoria no transporte de cargas.
 (***) Incluídos as emissões do consumo de gasolina de aviação no transporte aéreo que correspondem a 0,1 Mt.

A economia brasileira é altamente dependente do transporte rodoviário. Cerca de 65% da atividade de deslocamento de cargas do Brasil passa por rodovias, segundo o Relatório Executivo do Plano Nacional de Logística 2025. Portanto, revolucionar o transporte de carga urbano, garantindo a sustentabilidade para a mobilidade de cargas nas cidades é um desafio para as próximas décadas tanto para aspectos ambientais como sociais.

3 CARACTERÍSTICAS DOS COMBUSTÍVEIS

Os combustíveis são todas as substâncias químicas que, ao reagirem com o oxigênio (O_2), sofrem um fenômeno químico denominado de combustão, liberando certa quantidade de energia na forma de calor. Toda queima de um combustível é uma reação química do tipo exotérmica (libera calor), mas os produtos originados sempre variam de acordo com o combustível utilizado. Esse calor produzido pode ser utilizado para mover uma turbina nas usinas termelétricas, ou para acionar motores de veículos, tais combustíveis podem ser obtidos de fontes não renováveis ou renováveis.

As fontes de energia não renováveis são finitas ou esgotáveis. Para a maioria delas, a reposição na natureza é muito lenta, pois resulta de um processo de milhões de anos sob condições específicas de temperatura e pressão. Algumas fontes não renováveis de energia, como o petróleo e o carvão mineral, são responsáveis por grande parte da emissão (liberação) de gases de efeito estufa na atmosfera, visto que estas fontes são combustíveis (precisam ser queimadas para gerar energia) e liberam gases poluentes, que impactam a saúde e o meio ambiente.

As fontes de energia renováveis são consideradas inesgotáveis, pois suas quantidades se renovam constantemente ao serem usadas e esta capacidade de renovação atende a um horizonte de tempo geológico. São exemplos de fontes renováveis: hídrica (energia da água dos rios), solar (energia do sol), eólica (energia do vento), biomassa (energia de matéria orgânica), geotérmica (energia do interior da Terra), oceânica (energia das marés e das ondas) e hidrogênio (energia química da molécula de hidrogênio).

Nesse Capítulo são descritos os processos de produção e utilização dos combustíveis que serão analisados pelo estudo de caso. O óleo diesel de petróleo, com tecnologias consolidadas e largamente utilizadas para o transporte de cargas, e o hidrogênio verde, obtido a partir de tecnologias em constante desenvolvimento, é uma alternativa que vem se tornando extremamente promissora para a descarbonização global, com expectativa de ser protagonista na transição energética dos processos industriais e no setor de transporte.

3.1 DIESEL DE PETRÓLEO

O óleo diesel é um combustível líquido derivado de petróleo, fonte de energia não renovável e pertencente ao grupo das fontes fósseis, junto com o carvão mineral e o gás natural. Esses recursos foram formados há milhões de anos, a partir do depósito de matéria orgânica (plantas e animais mortos) submetida a condições especiais de temperatura e pressão.

O diesel é produzido a partir do refino de petróleo e composto majoritariamente por hidrocarbonetos, podendo conter, em menor proporção, nitrogênio, enxofre e oxigênio. Sua principal aplicação é como combustível de motores de combustão interna e ignição por compressão (motores de Ciclo Diesel) em automóveis pesados, tais como caminhões, ônibus, tratores, furgões, locomotivas, máquinas de grande porte, embarcações e automóveis de passeio. Embora no Brasil seja proibido o uso de óleo diesel como combustível para automóveis de passeio, isto pode ocorrer em vários lugares no mundo.

A combustão do óleo Diesel libera para o meio ambiente gases poluidores e causadores do efeito estufa. Além disso, as suas impurezas, como o enxofre, formam óxidos de enxofre que são lançados na atmosfera e reagem com a água, formando a chamada chuva ácida.

A fim de diminuir esses impactos ambientais causados pela utilização do óleo Diesel como combustível, no ano de 2004, o governo brasileiro instituiu o Programa de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), que tornou obrigatória a adição de 2% de biodiesel, o chamado B2, ao diesel de petróleo a partir de 2008. Esse percentual aumentou para 5% (B5), e há metas para aumentá-lo gradativamente até atingir 20%.

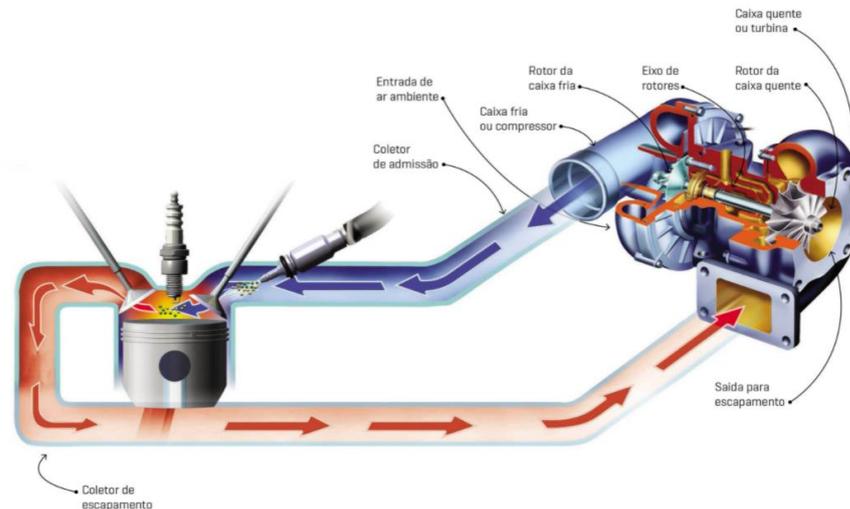
Segundo a resolução ANP Nº 50, de 23/12/2013, a classificação do Óleo Diesel pode ser feita em A e B. O tipo A é aquele produzido nas refinarias, nas centrais de matérias-primas petroquímicas e nos formuladores, sendo destinado a veículos dotados de motores do Ciclo Diesel, de uso rodoviário, que não possuem a adição de biodiesel. Já o óleo Diesel B possui biodiesel adicionado no teor estabelecido pela legislação vigente.

Além disso, o óleo diesel passou a ser produzido com um baixo teor de enxofre. O que possui um teor de enxofre máximo de 10 mg/kg (10 partículas por milhão – ppm) é chamado de S10. Ele possibilita uma redução de até 80% das emissões de material particulado e de até 98% de óxidos de nitrogênio.

Já o óleo diesel que possui teor de enxofre máximo igual a 500 mg/kg é denominado S500 e a ele é adicionado um corante vermelho. Desde janeiro de 2014, somente esses dois tipos de óleo diesel (S10 e S500) podem ser comercializados, sendo proibida a venda do diesel S50 e S1800 no Brasil.

Usado no Brasil em veículos de transporte ou de carga, o motor Diesel é um dos inventos mais importantes quando ao falar em mobilidade sobre rodas. Criado pelo engenheiro alemão Rudolf Diesel (1858-1913) em 1893, o motor Diesel tem no processo de queima de combustível apenas a compressão mecânica do ar e em seguida a injeção do Diesel para que esta mistura se inflame e produza a combustão, conforme esquema da Figura 3.

Figura 3 - Sistema de propulsão típico movido ao diesel de petróleo
 Fonte: SILVA (2017)



3.2 HIDROGÊNIO VERDE

No processo de transição energética em curso no mundo, buscam-se fontes energéticas que garantam, simultaneamente, a descarbonização e a segurança energética nacional. O hidrogênio (H_2) é uma fonte renovável que se insere neste contexto como um vetor energético limpo, capaz de garantir ambos os objetivos estratégicos. Como resultante destas qualidades, o hidrogênio vem sendo considerado e sujeito a políticas públicas e projetos privados em diversos países, notadamente nos setores de energia e transporte.

O hidrogênio é o elemento químico largamente encontrado na água, no ar, nos seres vivos e matérias orgânicas. Já o gás hidrogênio não existe no nosso planeta ou na nossa atmosfera em quantidades significativas, pois reage rapidamente com outros elementos para formar compostos químicos mais estáveis. Porém, para que seja utilizado como fonte de energia eficiente, é necessário estar em sua forma pura (gasosa ou líquida).

Embora o hidrogênio não seja uma fonte de energia primária, pode ser produzido a partir de diversos métodos. Os métodos mais comuns para a produção de hidrogênio em escala industrial são por meio de processos térmicos a partir de combustíveis fósseis, normalmente envolvem a reforma a vapor, um processo de alta temperatura no qual o vapor reage com um hidrocarboneto para produzir hidrogênio, emitindo assim, dióxido de carbono e sendo denominado hidrogênio cinza. Com a crescente preocupação global com os impactos da poluição atmosférica, intensificando a necessidade de descarbonização, as empresas

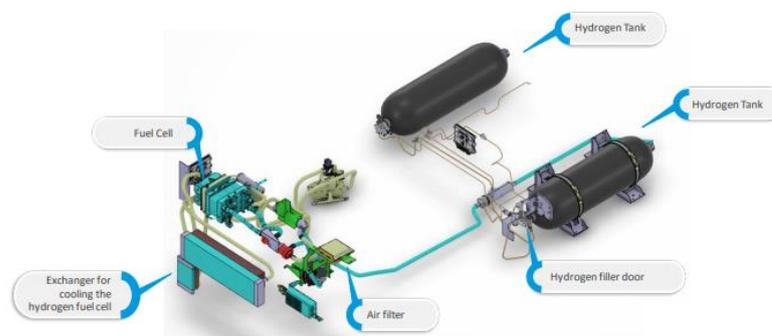
acrescentaram a prática de captura e armazenamento do dióxido de carbono emitido pela produção do hidrogênio cinza e surgiu o hidrogênio azul. Porém, segundo IRENA, as eficiências desses processos de captura e armazenamento são de 85% a 95% nos melhores dos casos.

Já o hidrogênio verde é obtido a partir da eletrólise da água, utilizando corrente energia elétrica renovável no processo de decomposição de moléculas de água (H_2O), com o objetivo de produzir oxigênio (O_2) e hidrogênio (H_2). Sendo assim um processo livre de emissões de CO_2 e ideal para tornar o hidrogênio um vetor energético chave da descarbonização global.

Tecnicamente o hidrogênio é uma fonte com alto poder calorífico (145 MJ/kg), que pode ser transformado em eletricidade através das células a combustível. As células a combustível são dispositivos eletroquímico que converte a energia química contida no hidrogênio em energia elétrica e água. Para que essa utilização seja livre da emissão de dióxido de carbono, o hidrogênio consumido pelas células a combustível deve ser o anteriormente descrito, hidrogênio verde.

As células a combustível movidas a hidrogênio verde possuem um grande potencial de aplicação no setor de transportes, sendo especialmente adequadas na substituição do diesel dos veículos de carga. Mesmo frente aos veículos elétricos, sua vantagem é verificada na redução do peso das células a combustível em comparação às pesadas baterias de lítio. Na figura 3, observa-se o esquema técnico das células a combustível de hidrogênio do Renault MASTER Z.E. Hydrogen.

Figura 4 - Esquema técnico das células a combustível no Renault Master Z.E. Hydrogen
Fonte: Renault (2019)



O hidrogênio pressurizado é armazenado em tanques especiais. O gás (H_2), junto com

o oxigênio (O_2) do ar circundante, são fornecidos as células a combustível. Esses dois gases passam então por uma reação eletroquímica dentro das células, por sua vez, produzindo eletricidade, calor e vapor d'água (H_2O), que é liberado na forma de gás por meio de um pequeno tubo localizado embaixo do veículo.

A energia resultante produzida, bem como a energia da bateria, alimenta o motor elétrico do carro, que é então capaz de funcionar silenciosamente e com emissão zero de poluentes ou CO_2 . Quando se trata de reabastecer o hidrogênio, o abastecimento ocorre em estações dedicadas por meio de bombas que injetam hidrogênio, de forma extremamente rápida, no tanque do veículo na forma de gás pressurizado.

Muito se tem discutido sobre a rastreabilidade dessa energia elétrica utilizada no processo de eletrólise para a obtenção do hidrogênio verde. Algumas empresas investem em uma usina própria para gerar energia renovável. Outras, por meio de políticas de compras sustentáveis, dão preferência às fontes renováveis em compras de energia no mercado livre. Contudo, mesmo que essas empresas produzam ou comprem energia limpa, normalmente utilizam da rede do Sistema Interligado Nacional (SIN) para a sua transmissão. O fator de emissão de gases de efeito estufa (GEE) da rede básica é publicado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTIC) com todas as fontes conectadas a rede. Por isso, mesmo que a empresa produza ou compre energia limpa, apenas essa ação não pode ser utilizada para garantir a redução ou isenção de emissões de gases do efeito estufa, já que, até então, todos tinham que utilizar o fator de emissão da rede. Alternativas para garantir a rastreabilidade da energia renovável são:

- Contratação de energia incentivada no mercado livre: A energia incentivada foi criada para estimular o uso de recursos renováveis, mais limpos e com menor impacto ambiental. As fontes mais comuns são usinas eólicas, solares, de biomassa e até mesmo as chamadas PCHs, que são centrais hidrelétricas com potência inferior ou igual a 30.000 kW.
- As chamadas plantas *behind the meter*: Implantação de usinas solares e/ou eólicas no mesmo local que a planta de eletrólise, ou seja, a energia elétrica gerada não vai para a rede e sim diretamente para o processo de eletrólise.
- Certificação de energia renovável: O *International REC Standard (I-REC)* é um sistema global que possibilita o comércio de certificados de energia renovável. Por meio da sua plataforma, empresas podem garantir que a energia que consomem seja proveniente de fontes renováveis e, portanto, limpa.

4 PANORAMA ATUAL DO TRANSPORTE DE CARGA DA EMPRESA EM ESTUDO

O estudo de caso será baseado nos dados de uma empresa brasileira dedicada à produção de bebidas, entre as quais cervejas, refrigerantes, energéticos, sucos, chás e água. Os produtos desta empresa passam por uma operação logística de grande escala antes de chegar ao consumidor final. A área de logística da companhia trabalha em toda a cadeia desde a gestão aos armazéns e transporte de insumos até a distribuição final do produto. Trata-se de uma estrutura de mais de 100 centros de distribuição para atender toda a demanda nacional.

O centro de distribuição (CDD) analisado foi o de Campo Grande no estado do Rio de Janeiro. Esses CDDs são compostos basicamente, por um armazém, um pátio de veículos de carga e o escritório que engloba toda a área administrativa responsável pelos trâmites gerenciais e legais na operação de entrega.

A distribuição urbana de carga compreende um ciclo que se inicia e termina no mesmo dia, no qual o motorista possui uma rota com diversas paradas e quantidades específicas por parada, totalizando um expediente diário de 9 horas de trabalho.

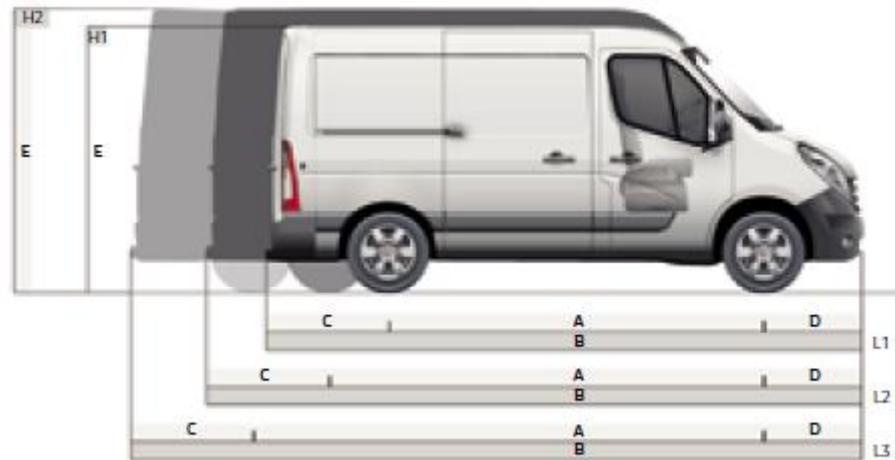
4.1 Dados operacionais da frota

Nesta seção são apresentados os dados sobre a frota de veículos urbanos de carga movidos a diesel de petróleo da empresa, que serão considerados neste trabalho. Esses dados são: número de veículos, velocidade média dos veículos, volume de carga transportada, distância total percorrida e quantidade de diesel consumido pela frota.

4.1.1 Quantidade e especificações dos veículos da frota

A frota contratada pela empresa, ou seja, os veículos autorizados a circular prestando serviço de transporte de carga na cidade, é composta por 130 veículos do modelo Renault MASTER FURGÃO VITRÉ L1H1. Com três opções de comprimento e duas de alturas, conforme a figura 5, a versão L1H1 possui a maior carga útil (1593 kg) por mais que suas dimensões sejam menores, portanto, este foi o modelo escolhido pela empresa.

Figura 5 - Modelos e tamanhos do Renault MASTER FURGÃO VITRÉ
 Fonte: Renault (2020)



4.1.2 Velocidade média dos veículos

Todos os veículos da empresa estão equipados com localizadores via satélite o que possibilita aos usuários acompanhar em tempo real a posição, o tempo de viagem e a velocidade média dos veículos nos principais corredores e vias da cidade por meio da internet. Essa iniciativa foi tomada pela empresa para assegurar a segurança dos funcionários e garantir melhores condições para a distribuição dos produtos. A velocidade média dos veículos desta frota é de aproximadamente 50 km/h.

4.1.3 Massa de carga transportada

Como produto principal da empresa analisada, esta rota é destinada a entrega de embalagens com 12 latas de cerveja e o peso médio para esse tipo de produto é de aproximadamente 4,5 kg. Durante a etapa de levantamento de dados foi informado que cada VUC desta rota de Campo Grande atende em média 12 clientes e cada cliente adquire em média 24 packs de cerveja. Portanto, considera-se que são carregadas aproximadamente 288 embalagens de cerveja, que corresponde 1296 kg de bebida por VUC da rota analisada. Considerando os 130 veículos da rota, diariamente são transportadas aproximadamente 168,5 toneladas de cerveja.

Como parâmetro de segurança para ser utilizado também nos veículos movidos a células a combustível de hidrogênio verde, a massa de carga a ser transportada deve ser menor que a carga útil do veículo, pois para a lotação desta carga útil deve-se considerar o peso do motorista, ajudante e mais uma folga para eventuais necessidades. Nesta rota, considerando um veículo

com carga útil de 1593 kg, a porcentagem de massa de produto transportada é de aproximadamente 81% da carga útil total do VUC.

Tabela 1 - Cálculo da carga total transportada diariamente

Fonte: AUTOR

| Modelo do veículo | Renault MASTER FURGÃO VITRÉ L1H1 |
|---|--|
| Carga útil (kg) | 1593 |
| Quantidade de veículos da frota (unid) | 130 |
| Massa da caixa com 12 cervejas (kg) | 4,5 |
| Quantidade média de clientes por carro (unid) | 12 |
| Quantidade média de caixas por cliente (unid) | 24 |
| Massa média por VUC (kg/dia) | 1.296 |
| Massa média por dia (kg/dia) | 168.480 |
| Massa média/ Carga útil (%) | 81% |

4.1.4 Distância percorrida

Conforme informado no início deste capítulo, a distribuição urbana de carga compreende um ciclo que se inicia e termina no mesmo dia. Portanto, não deve ultrapassar uma jornada de trabalho de 9 horas do motorista e seu ajudante. Os dados levantados indicam uma média de 15 minutos para cada entrega e como são aproximadamente 24 entregas, é considerado um tempo médio total do veículo parado de aproximadamente 4,5 horas, contando com 1,5 horas de almoço. Logo, restam 4,5 horas do VUC rodando a uma velocidade média de 50 km/h. Ou seja, cada veículo roda aproximadamente 225 km diariamente.

Tabela 2 - Cálculo da distância percorrida

Fonte: AUTOR

| | |
|---|-------------|
| Tempo/Rota (h) | 9 |
| Tempo médio em cada cliente (min) | 15 |
| Tempo médio parado (h) | 4,5 |
| Tempo média em translado (h) | 4,5 |
| Distância média diária por veículo (km) | 225,0 |
| Distância média diária da frota (km) | 29.250,0 |
| Quilômetros rodados por ano (km) | 9.126.000,0 |

4.1.1 Consumo de energia

A densidade (ou massa específica) é a relação entre a massa (m) e o volume (v) de

determinado material (sólido, líquido ou gasoso). O diesel S10 comercial possui uma densidade de aproximadamente 0,847 kg/l.

Um dos produtos da queima de qualquer combustível é a água. Dependendo da fase desta água, a quantidade de calor liberada muda. Nos casos extremos, a água pode estar totalmente no estado líquido ou no estado gasoso. Em função disso, a literatura fornece dois valores de Poder Calorífico; o superior e o inferior. O Poder Calorífico Superior – PCS – representa o calor liberado pela combustão tendo toda a água resultante na fase líquida e o Poder Calorífico Inferior – PCI representa o calor liberado pela combustão estando toda a água resultante no estado gasoso. (Prof. Antônio Guilherme Garcia Lima da Faculdade de Engenharia da UERJ). Nos veículos a diesel não são expelidos apenas gases poluentes dos canos de escapamento e também água na forma gasosa, portanto foi utilizado para calcular a energia consumida, o valor do poder calorífico inferior do combustível, resultando em uma energia consumida por quilômetro rodado da rota de aproximadamente 4,7 MJ.

Tabela 3 - Cálculo do consumo de energia

Fonte: AUTOR

| | |
|-----------------------------------|----------|
| Densidade do combustível (kg/l) | 0,847 |
| Poder calorífico inferior (kJ/kg) | 43.000,0 |
| Densidade energética (kJ/l) | 36.421,0 |
| Energia consumida (kJ/km) | 4.669,4 |

4.1.2 Consumo de combustível

A rota de Campo Grande roda aproximadamente 29.250 km/dia. Dada a média de autonomia do veículo no ciclo urbano aferida pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem – INMETRO do VUC de 7,8 km/l, o consumo de Diesel S10 diário desta rota específica é de aproximadamente 3.750 litros.

4.1.3 Poluente emitidos

O Renault MASTER Furgão 2.3 16V, equipado com transmissão Manual, possui nota C no Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) – INMETRO. De forma geral, o PBE funciona da seguinte forma: os produtos são ensaiados em laboratórios e recebem etiquetas com faixas coloridas que os diferenciam. No caso da eficiência energética, a classificação vai da mais eficiente (A) à menos eficiente (de C até G, dependendo do produto), onde se entende que os mais eficientes utilizam melhor a energia, têm menor impacto ambiental e custam menos para

funcionar, pesando menos no bolso. Uma medida de consumo importante aferida pelo PBE é que o Renault MASTER Furgão 2.3 16V emite aproximadamente 252 gramas de CO₂ fóssil não renovável por quilômetro rodado. Portanto, é possível concluir que a rota em questão emite aproximadamente 7,37 toneladas de dióxido de carbono equivalente por dia.

4.2 Custos da frota

Os custos dos veículos da frota são os gastos apropriados à aquisição dos veículos e também os gastos associados a operação deles na distribuição de bebidas, ou seja, o CAPEX e OPEX desta logística de distribuição de bebidas.

A sigla CAPEX vem do inglês *CAPital EXpenditure* e significa despesas de capitais ou investimentos em bens de capitais. Portanto, o CAPEX envolve todos os custos relacionados à aquisição de equipamentos e instalações que visam a melhoria de um produto, serviço ou da empresa em si.

Já a sigla OPEX vem do inglês *OPerational EXpenditure*. Ao contrário do CAPEX, nesta modalidade o foco está nas despesas e dispêndios operacionais e no investimento em manutenção de equipamentos. Explicando em outras palavras: são os gastos cotidianos, como por exemplo despesas com funcionários, combustível, comercial, tributárias, manutenção de equipamentos e com serviços terceirizados.

A Tabela 4 classifica os custos em fixos e variáveis para esse serviço de distribuição de bebidas.

Tabela 4 - Classificação dos custos fixos e variáveis

Fonte: AUTOR

| CUSTOS FIXOS (C_f) | |
|--|--|
| Custos de capital (C_C) | Custo de capital anual do veículo (C_{CVD}) |
| Custos operacionais | Salário, encargos e benefícios com motorista, ajudante e mecânico ($C_{salários}$) |
| | Licenciamento (IPVA + Vistoria) - 4% do Investimento inicial ($C_{licenciamento}$) |
| | Seguro do Casco do Veículo (C_{sv}) |
| CUSTOS VARIÁVEIS (C_v) | |
| Custo ambiental dos poluentes emitidos | Emissões veiculares (C_{ev}) |
| Custos operacionais | Combustível (C_{comb}) |
| | Lubrificantes (C_{lub}) |

| | |
|--|--|
| | Pneus (câmeras e protetores) (C_{pneus}) |
| | Peças e acessórios ($C_{peças}$) |
| | Lavagem e lubrificação de chassi (C_{lav}) |

4.2.1 Custos fixos da frota (C_f)

Os custos fixos são os gastos na fabricação de um produto ou na prestação de um serviço que não variam em função da quantidade de produzida (produtos ou serviços prestados).

4.2.1.1 Custo de capital da frota (CAPEX)

O custo de capital anual é a representação anual do custo de aquisição dos veículos da frota. Para calcular os custos de capital anual (C_{CVD}) utiliza-se a Equação 1.

$$C_{CVD} = (I - V_R) * FRC + V_R * j \quad 1$$

Onde I é o investimento inicial em reais, V_R é o valor residual do veículo após uma vida útil econômica de 10 anos, j é a taxa de oportunidade anual e FRC é calculado pela Equação 2:

$$FRC = \frac{j*(1+j)^n}{(1+j)^n - 1} \quad 2$$

- Investimento inicial (I)

Conforme mostra o configurador online da Renault, o Renault Master Furgão Vitre L1H1 2022 pode ser encontrado com preços que começam em R\$ 226.790 mil no Brasil. Será considerado este valor, pois considerando que a empresa adquira os 130 veículos é de se esperar que pague o valor mais baixo de sua tabela para o modelo. Portanto, o investimento inicial da compra da rota de Campo Grande foi calculado no valor de R\$ 29.482.700,00.

- Valor residual do VUC (V_R)

A Tabela Fipe expressa preços médios de veículos anunciados pelos vendedores, no mercado nacional, servindo apenas como um parâmetro para negociações ou avaliações. Os preços efetivamente praticados variam em função da região, conservação, cor, acessórios ou qualquer outro fator que possa influenciar as condições de oferta e procura por um veículo específico.

Para estimar o valor residual do veículo após 10 anos de uso, foi feita uma pesquisa no site iCarros de veículos similares do modelo de 2011 e o valor encontrado foi de R\$ 70.000,00.

- Taxa de oportunidade anual (j)

A taxa de oportunidade interna é a taxa de retorno do investimento aplicada ao cálculo do valor presente. Em outras palavras, seria a taxa de retorno mínima esperada se um investidor optar por aceitar uma quantia no futuro, quando comparada à mesma quantia hoje.

Como a distribuição de bebidas é uma atividade inerente à venda dos produtos, a taxa de oportunidade deve ser a taxa mínima de juros exercida no momento da compra dos veículos. Portanto, foi considerada no trabalho uma taxa de oportunidade de 5,25%.

O custo de capital anual (C_{CVD}) da compra dos veículos urbanos de carga da frota é de R\$ 3.149.545,28

4.2.1.2 Custos operacionais fixos da frota (OPEX)

Os custos operacionais fixos englobam os salários dos motoristas ajudantes e mecânicos, taxas de licenciamento anual dos veículos e seguros. Os custos operacionais foram baseados na planilha detalhada dos custos fixos mensais e custos variáveis por quilômetro de veículos bastante usados na transferência e na coleta e entrega da associação nacional do transporte de cargas e logística – NTC&Logística de 2009.

- Salários ($C_{salários}$)

Segundo planilha do NTC em 2009 as empresas gastavam mensalmente aproximadamente R\$ 4.548,01 por veículo da rota em salários encargos e benefícios com motorista, ajudante e um mecânico a cada 5 veículos da frota. Assumindo que a remuneração acompanhou o IPCA (ajuste de maio de 2009 a maio de 2021 igual a 95%) estima-se que atualmente as empresas gastam aproximadamente R\$ 8.868,62 por veículo em rota por mês.

Com isso, a estimativa de custo anual com salários de funcionários da rota de Campo Grande que possui 130 veículos é de R\$ 13.835.040,81.

- Licenciamento anual do veículo ($C_{licenciamento}$)

Este item reúne as taxas e dos impostos que a empresa deve recolher antes de colocar o veículo em circulação nas vias públicas dividido pelo período de vigência das mesmas. Os comuns a todos os veículos são: Imposto sobre a propriedade de veículos automotores (IPVA) - anual; Seguros por danos pessoais causados por veículos automotores (DPVAT) – anual e

Taxa de licenciamento (TL) paga ao Detrans estaduais - anual;

Geralmente, o IPVA é um percentual sobre o valor do veículo. No caso do Estado de Rio de Janeiro, este percentual é de 4% para veículos a diesel. Já o DPVAT e a TL constituem despesas de baixo valor.

Portanto, como estimativa para o custo de licenciamento anual considera-se 4% do valor indicado como investimento inicial da frota, totalizando um valor de R\$ 1.179.308,00.

- Seguros (C_{sv})

Representa um fundo mensal que deve ser formado para pagar o seguro ou para financiar eventuais sinistros (colisão, incêndio, roubo, entre outros) ocorridos com o veículo. Estas despesas são determinadas conforme normas estabelecidas pelas companhias de seguro. O chamado Prêmio (valor total a ser pago à seguradora) é obtido somando-se uma parcela calculada com base no Prêmio de Referência (valor básico a ser pago à seguradora) com outra calculada com base na Importância segurada (valor do veículo segurado). Todos os valores são fornecidos pelas seguradoras e calculados conforme a Equação 3.

$$C_{sv} = (\text{custo da apólice} + 6\% \times I) \times \text{IOF} \quad 3$$

Onde o custo da apólice foi considerado um valor proporcional ao valor do veículo de 145,80 reais e um IOF de 7%. Portanto, o seguro do casco do veículo pode ser estimado em um valor de aproximadamente de R\$ 13.987,93 e um total de R\$ 1.818.430,92 para cobrir o seguro de toda a frota da empresa.

4.2.2 Custos variáveis da frota (C_v)

Os custos variáveis são os gastos na fabricação de um produto ou na prestação de um serviço que variam em função da quantidade de produzida (produtos ou serviços prestados). Com isso, nesta seção são calculados os custos variáveis da rota por quilômetro rodado.

4.2.2.1 Custos com combustível (C_{comb})

De acordo com o levantamento da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o valor médio do diesel nas bombas atingiu R\$ 4,616 em agosto de 2021. Dado que os veículos da rota de Campo Grande rodam 29.250 km/dia e consomem 3.750 litros de diesel, observa-se que o custo diário da empresa com combustível para esta rota é de aproximadamente R\$ 17.310,00, o que indica R\$ 0,59 por quilômetro rodado.

4.2.2.2 Custos com lubrificantes (C_{lub})

De acordo com NTC o custo com a troca de lubrificantes (motor, caixa de câmbio e diferenciais) é calculado conforme Equação 4.

$$C_{lub} = [1 \times (2 + 3) / 4] + (5 \times 6 / 7) \quad 4$$

Tabela 5 - Componentes para o cálculo do custo de lubrificantes

Fonte: AUTOR

| | |
|---|-----------|
| 01 - Preço do óleo de cárter por litro (R\$) | 14,72 |
| 02 - Capacidade de óleo de cárter (litros) | 6,50 |
| 03 - Reposição óleo de cárter até a próxima troca(litros) | 1,50 |
| 04 - Intervalo de troca de óleo de cárter (km) | 30000,00 |
| 05 - Preço do óleo de câmbio e diferencial (R\$/litro) | 22,04 |
| 06 - Capacidade do câmbio e do diferencial (litros) | 4,10 |
| 07 - Intervalo entre trocas câmbio e diferencial (km) | 120000,00 |

É válido ressaltar que os preços do óleo de cárter e do óleo de câmbio e diferencial foram adquiridos ajustando conforme o IPCA do período entre 2009 e 2021. Logo, o custo de lubrificantes é de R\$ 0,0047 por quilômetro rodado.

4.2.2.3 Custos com pneus (C_{pneus})

São as despesas resultantes do consumo dos pneus utilizados no veículo e também no equipamento, quando se tratar de reboque ou semirreboque. Admite-se uma perda prematura média de 7% das carcaças, ou seja, de cada cem pneus, apenas 93 permitem recuperação. Deve-se considerar também que cada pneu possa ser recapado algumas vezes, ao longo da sua vida útil, conforme Equação 5.

$$C_{pneus} = [((1 + 2) \times 4 \times 5) + 7 \times 3 \times 4] / 6 \quad 5$$

Tabela 6 - Componentes para o cálculo do custo de pneus

Fonte: AUTOR

| | |
|-----------------------------------|----------|
| 01 - Valor do pneu (R\$) | 869,70 |
| 02 - Valor da câmara (R\$) | 0,00 |
| 03 - Valor da recauchutagem | 482,63 |
| 04 - Quantidade de pneus | 4,00 |
| 05 - Perdas de pneus novos | 1,07 |
| 06 - Vida útil total do pneu (km) | 70000,00 |
| 07 - Número de recauchutagens | 2,00 |

Logo, o custo com pneus é de R\$ 0,1083 por quilômetro rodado.

4.2.2.4 Custos com peças e acessórios e material de manutenção ($C_{peças}$)

Corresponde à previsão de despesas mensais com peças, acessórios e material de manutenção do veículo. Uma vez apuradas, essas despesas devem ser divididas pela quilometragem mensal percorrida, para se obter o valor por quilômetro. Pode corresponder a 1% do valor do veículo completo e sem pneus, por mês. Cabe a cada empresa determinar o valor mais preciso e adequado para este parâmetro. No trabalho foi utilizada a Equação 6, conforme planilha NTC,2009.

$$(C_{peças}) = [(1 - 2 \times 3 - 4) * 5] / 6 \quad 6$$

Tabela 7 - Componentes para o cálculo do custo de peças e acessórios

Fonte: AUTOR

| | |
|---|------------|
| 01 - Valor do veículo | 226.790,00 |
| 02 - Quantidade de pneus | 4,00 |
| 03 - Valor do pneu | 869,70 |
| 04 - Valor do estepe | 869,70 |
| 05 - Taxa mensal peças e material de manutenção | 0,02 |
| 06 - Quilometragem mensal de referência | 4.000,00 |

Logo, o custo com peças e acessórios e material de manutenção é de R\$ 1,0844 por quilômetro rodado.

4.2.2.5 Custos com lavagem e lubrificação de chassi (C_{lav})

São as despesas com lavagem e lubrificação externa do veículo. O custo por quilômetro é obtido dividindo-se o custo de uma lavagem completa do veículo pela quilometragem recomendada pelo fabricante para lavagem periódica, conforme Equação 7.

$$(C_{lav}) = \frac{1}{2} \quad 7$$

Tabela 8 - Componentes para o cálculo do custo de lavagem e lubrificação de chassi

Fonte: AUTOR

| | |
|--|----------|
| 01 - Custo de uma lavagem/engraxamento (R\$) | 100,00 |
| 02 - Intervalo entre duas lavagens (km) | 2.000,00 |

Logo, o custo com lavagem e lubrificação de chassi é de R\$ 0,005 por quilômetro rodado.

4.2.2.6 Custo das emissões veiculares (C_{ev})

Segundo Serôa da Motta (1998), a necessidade de se valorar os bens ambientais surge da necessidade de se alocar o orçamento de um projeto da melhor forma possível, considerando todos os custos e benefícios a ele associados. A análise de custo/benefício visa atribuir um valor social a todos os efeitos de um determinado projeto, investimento ou política. Os efeitos negativos são encarados como custos e os positivos como benefícios. Como se pretende comparar custos e benefícios, surge a necessidade de expressá-los em uma medida comum, ou seja, em custos e benefícios expressos em termos monetários.

No método proposto pelos autores LANDMANN, RIBEIRO e DEÁK, considerou-se como ponto de partida, um cenário no qual as emissões veiculares totais teriam sido reduzidas a um nível seguro, ou seja, a poluição do ar por fontes móveis estaria controlada e não haveria mais doenças e mortes devido a estas fontes. Neste cenário, o custo da poluição do ar em termos de danos na saúde e no desgaste de materiais seria nulo, pois todo o custo da poluição do ar teria sido internalizado pelo sistema de controle. Esta é a situação desejada e uma realidade em muitos países desenvolvidos: carros limpos, poluição do ar controlada e o fim das doenças e mortes provocadas pelas altas concentrações de gases e partículas poluentes na atmosfera.

No método proposto, os custos do controle das emissões veiculares são calculados com base nos custos dos equipamentos de controle das emissões, mais especificamente, no custo dos catalisadores. Esta simplificação foi adotada porque o catalisador é o equipamento mais importante do sistema de controle das emissões veiculares, e porque ele apresenta preço de mercado mais elevado, em média R\$ 4.500,00 segundo pesquisa feita em sites da internet para os veículos similares ao modelo Renault Master Furgão, e vida útil em torno de 80.000 quilômetros, conforme informação do fabricante.

Considerou-se também um custo institucional referente ao controle das emissões, custo este que inclui os custos de implantação, manutenção e fiscalização das emissões veiculares. O valor da taxa de inspeção veicular anual no Rio de Janeiro é um valor próximo a R\$ 156,69/ano, foi considerado bastante representativo desta parcela de custos. Para se poder trabalhar com o custo institucional na mesma unidade que o custo do catalisador, aplicou-se a Equação 8.

$$C_i = \frac{V_{\text{útil}}}{D_m} * T_{iv} \quad 8$$

Onde $V_{\text{útil}}$ é a vida útil do catalisador em quilômetros, C_i é o custo institucional em reais, D_m é a distância em quilômetros média percorrida por um veículo durante um ano (na empresa em questão este valor está em torno de 70.200 km/ano) e T_{iv} é a taxa de inspeção veicular em reais por ano.

Assim, os custos do controle das emissões veiculares por quilômetro podem ser estimados a partir da soma direta dos custos dos catalisadores e do custo institucional, dividido pela vida útil do catalisador em quilômetros, conforme Equação 9:

$$C_{ev} = \frac{(P_c + C_i)}{V_{\text{útil}}} \quad 9$$

Onde P_c é o preço médio do catalisador em reais (R\$ 4.500,00). Logo, o custo das emissões veiculares por quilômetro rodado da roda é de aproximadamente R\$ 0,058

4.3 Sumários dos custos anuais da frota de Campo Grande

Conforme exposto na seção anterior, os custos fixos da frota são valores anuais que não variam em função da quantidade de quilômetros rodados. Já os custos variáveis são dados por um preço média a cada quilômetro rodado pela frota. Logo, para obter os custos totais anuais (C_t) da frota de Campo Grande é necessário calcular pela Equação 10.

$$C_t = C_f + C_v * D \quad 10$$

Onde C_f são os custos fixos em reais, C_v é a soma de custos variáveis por quilômetro rodado e D é a distância anual percorrida pela frota (no caso estudado é de 9.126.000 km).

Tabela 9 - Custos anuais totais da frota à diesel em operação

Fonte: AUTOR

| CUSTOS FIXOS ANUAIS | | R\$ | |
|-----------------------------|---|-----|---------------|
| Custos de capital (C_c) | Custo de capital anual da frota (C_{cVD}) | R\$ | 3.149.545,28 |
| Custos operacionais | Salários, encargos e benefícios com motorista, ajudante e mecânico ($C_{salários}$) | R\$ | 13.835.040,81 |
| | Licenciamento (IPVA + Vistoria) - 4% do Investimento inicial ($C_{licenciamento}$) | R\$ | 1.179.308,00 |

| | | | |
|-------|---|------------|-------------------|
| | Seguro do Casco do Veículo (C_{sv}) | R\$ | 1.818.430,92 |
| C_f | | R\$ | 19.982.325 |

| CUSTOS VARIÁVEIS ANUAIS | | R\$/km | |
|--|--|---------------|--------------|
| Custo ambiental dos poluentes emitidos | Emissões veiculares (C_{ev}) | R\$ | 0,058 |
| Custos operacionais | Combustível (C_{comb}) | R\$ | 0,592 |
| | Lubrificantes (C_{lub}) | R\$ | 0,005 |
| | Pneus (câmeras e protetores) (C_{pneus}) | R\$ | 0,108 |
| | Peças e acessórios ($C_{peças}$) | R\$ | 1,084 |
| | Lavagem e lubrificação de chassi (C_{lav}) | R\$ | 0,050 |
| C_v | | R\$ | 1,898 |

| | | | |
|--|--|------------|-------------------|
| CUSTOS TOTAIS ANUAIS (C_t) | | R\$ | 37.300.655 |
|--|--|------------|-------------------|

5 INSTALAÇÃO E OPERAÇÃO DA FROTA DE VUC A HIDROGÊNIO VERDE

Para analisar a viabilidade econômica da substituição da frota de veículos a diesel por uma frota de veículos movidos a hidrogênio verde da empresa é feita uma análise dos custos de produção, armazenamento e transporte do hidrogênio, englobando todo o custo dos processos de produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água, transporte deste hidrogênio, estações de armazenamento e abastecimento de hidrogênio para veículos, conforme demonstrados na Figura 6.

Figura 6 - Unidades necessárias para a produção descentralizada do hidrogênio verde

Fonte: AUTOR



Neste capítulo serão comparados os custos da utilização do hidrogênio verde produzido de forma centralizada com a distribuída. Com a produção centralizada, realizada em um único, ou poucos locais, a planta de eletrólise possui o benefício da produção em grande escala, porém é necessário transportar posteriormente o hidrogênio para as estações de abastecimento. O transporte de hidrogênio exige a instalação de gasodutos e gasto de energia para bombeamento do gás ou transporte rodoviário do gás, na maioria dos casos. Isso implica em altos custos

operação. Por outro lado, a produção distribuída, realizada na fábrica da empresa, não requer custos de distribuição, apenas o custo inicial de instalação da estação de eletrólise e sua utilização (custo da água, energia renovável e manutenção do equipamento).

5.1 Dados operacionais da frota movida a hidrogênio verde

Com as especificações diferentes entre os veículos, é necessário redimensionar a frota de Campo Grande com os veículos movidos a hidrogênio verde, estimando a quantidade de veículos necessária, a distância percorrida, consumo de energia e combustível.

5.1.1 Quantidade e especificações dos veículos (Q_{VH2V})

Com comercialização no primeiro semestre de 2020, o Renault MASTER Z.E. Hydrogen tem uma autonomia de 350 km (valor a aguardar homologação pelo protocolo WLTP). Com dois depósitos de hidrogênio instalados sob os chassis, este veículo é polivalente com volume da zona de carga de 10,8 m³ a 20 m³ e uma carga útil máxima de 1200 kg.

A escolha deste veículo para o estudo se deu por ser um VUC no estilo van semelhante ao Renault MASTER Furgão Vitré utilizado pela operação original da empresa. Porém, Renault MASTER Z.E. Hydrogen possui uma capacidade de transporte de carga menor, sendo necessária uma quantidade maior de veículos na rota.

Figura 7 - Renault MASTER Z.E. Hydrogen

Fonte: Renault, 2019



A fim de manter a taxa de ocupação da carga útil do veículo em 81%, prezando a segurança da operação de logística da empresa, a quantidade de veículos movidos a células a

combustível de hidrogênio foi calculada por meio da Equação 11.

$$Q_{VH2V} = \frac{M_r}{(C_u * T_o)} \quad 11$$

Onde M_r representa a massa média por dia (no estudo de caso de Campo Grande utiliza-se o valor aproximado de 168.480 kg), C_u é a carga útil do veículo (1200 kg) e T_o é a taxa de ocupação máxima (81%).

A frota alternativa movida a hidrogênio verde será de 173 veículos. Portanto, os 1560 clientes que a frota atende, serão redistribuídos e cada novo veículo atenderá em média 9 clientes com uma quantidade média de caixas por cliente de 24 packs de 12 cervejas.

5.1.2 Distância percorrida

Como cada veículo atenderá menos clientes, o tempo parado em cada cliente será de 20 minutos, totalizando as mesmas 4,5 horas contando o horário de almoço dos funcionários de 1,5 horas. Logo, o tempo em rota dos veículos continua sendo 4,5 horas e ao considerar que a velocidade média dos veículos será a mesma, cada veículo da rota continuará percorrendo 225 km/dia. Porém, como a frota é maior, a distância percorrida da frota é 33% maior que a frota movida a diesel, com 12.129.000 km rodados anualmente.

5.1.3 Consumo de energia

Nas células a combustível, o hidrogênio (H₂) reage com o oxigênio (O₂) da atmosfera. A energia liberada transforma-se em corrente elétrica, já o calor e vapor de água são outros produtos resultantes dessa reação.

A partir de uma autonomia de 350 km que ainda está para ser confirmada pelo WLTP, que significa *Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure* (procedimento de teste global harmonizado para veículos ligeiros), o Renault MASTER Z.E. Hydrogen rende aproximadamente 3,3 km/l de hidrogênio.

Com uma massa específica muito baixa e um poder calorífico inferior extremamente alto comparados com o diesel, o hidrogênio como combustível possui uma densidade energética aproximadamente 70% menor por quilômetro rodado que o veículo movido à diesel de petróleo.

Tabela 10 - Cálculo do consumo de energia

Fonte: AUTOR

| | |
|---------------------------------------|------------------|
| Autonomia WLTP (km) | 350,0 |
| Capacidade do tanque combustível (kg) | 4,2 |
| Capacidade do tanque combustível (l) | 106,0 |
| Consumo de combustível (km/l) | 3,3 |
| Densidade do combustível (kg/l) | 0,039 |
| Poder calorífico inferior (kJ/kg) | 120.000,0 |
| Densidade energética (kJ/l) | 4.732,1 |
| Energia consumida (kJ/km) | 1.433,1 |
| Energia diária consumida (kJ) | 55.713.428,6 |
| Energia anual consumida (kJ) | 17.382.589.714,3 |

Mesmo com uma quilometragem diária significativamente maior por conta do número maior de veículos da rota, a energia consumida pela frota reduziria anualmente 60% com a troca da tecnologia dos veículos. A economia de energia anual, portanto, em kWh é de aproximadamente 6.974.610 kWh e o fator de conversão em termos de redução de emissões é de 0,33 kg CO_2 .

5.1.4 Consumo de combustível

Com um tanque de 106 litros e uma autonomia de 350 km, pode-se concluir que o veículo consome aproximadamente 0,308 l/km. Uma frota com 173 veículos percorre aproximadamente 38.875 km/dia. Portanto, o consumo diário de hidrogênio verde desta frota de Campo Grande será de 11.773,6 litros.

5.2 Custos da frota movida à hidrogênio verde

De posse dos dados operacionais estimados da frota no item anterior, é possível também estimar todos os custos implícitos na aquisição e operação da rota de Campo Grande com veículos movidos a hidrogênio verde.

5.2.1 Custos fixos da frota (C_{fH2V})

Além dos custos fixos tradicionais de uma frota de veículos (custo de capital anual de

aquisição dos veículos, salários dos funcionários, licenciamento anual e seguros), nesta seção também serão calculados os custos de capital anuais referentes a aquisição de estações de abastecimento e implantação da planta de eletrólise dimensionada para suprir o consumo de hidrogênio da frota.

5.2.1.1 Custo de capital anual do veículo (C_{CH2V})

Da mesma maneira que foi calculado o custo de capital anualizado para a aquisição dos veículos à diesel de petróleo no item 4.2.1.1 deste trabalho será calculado o custo de capital anual do veículo movido por células a combustível de hidrogênio verde (C_{CH2V}). Os parâmetros para o cálculo se adequaram as especificações do novo VUC:

- Investimento inicial (I_{H2V})

Segundo site da Automotive Business, o preço para o Renault Master Z.E. Hydrogen ainda está para ser lançado para o mercado. Entretanto, a Renault já lançou uma versão similar, Kangoo Z.E. Hydrogen, com um preço de 48.300 euros (incluindo a compra da bateria).

Atualmente, os carros elétricos movidos a bateria e a células de combustível de hidrogênio vendidos no país não pagam o imposto de importação e tem a alíquota de IPI reduzida para 7%. Com a nova regra proposta, o Projeto de Lei 5308/20, ficam isentos o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) as importações e as saídas de veículos elétricos ou híbridos. O texto também reduz a zero as alíquotas do PIS/Pasep e da Cofins incidentes na importação e sobre a receita bruta de venda no mercado interno desses veículos.

Considerando as isenções estipuladas no projeto de lei para o incentivo dos sistemas de propulsão alternativos de veículos, foi considerado apenas a incidência do ICMS de aproximadamente 12% e uma cotação do euro de 6,2 reais. Com isso, o investimento inicial de cada veículo ficou em R\$ 335.395,2 e um montante significativo de R\$ 58.023.369,6 para a aquisição de toda a frota com 173 veículos.

- Vida útil ($V_{\text{útil}_{H2V}}$)

Apesar das marcas terem se esforçado em desenvolver uma tecnologia de ponta para os carros movidos a hidrogênio, com tanques modernos e aptos para evitar vazamentos, ainda assim trata-se de um gás inflamável. Portanto, os tanques de hidrogênio possuem atualmente uma vida útil de 15 anos, estabelecida por lei. Com isso foi considerada a vida útil dos veículos compatíveis com os tanques de armazenamento de hidrogênio.

- Valor residual do VUC ($V_{r_{H2V}}$)

Como ainda é um veículo novo no mercado, não foi possível estimar um preço de

referência que o mercado está pagando no veículo após 15 anos de uso, portanto, foi considerado como nulo o valor residual dos veículos movidos a células a combustível de hidrogênio.

5.2.1.2 Custo de capital anual da estação de abastecimento (C_{CABAST})

Segundo o departamento de energia dos Estados Unidos (DOE), uma estação de abastecimento hidrogênio tem em média 1.240 kg de capacidade de hidrogênio por dia e requer aproximadamente 1,9 milhões de dólares em capital.

Conforme descrito na seção 5.1.4, o consumo de combustível da frota é de 11.773,6 litros de hidrogênio, que equivalem a 464,3 kg de hidrogênio. Portanto, para este investimento será considerada uma estação de abastecimento de aproximadamente 600 kg/dia com um valor de aquisição de 950 mil dólares. Para a conversão dos dólares foi considerada o valor de 5,2 reais, totalizando um valor de investimento inicial de R\$ 4.940.000,00 que quando anualizado por meio pela Equação 1 e considerando a mesma vida útil dos veículos movidos a células a combustível de hidrogênio verde de 15 anos, obtém-se o custo de capital anual da estação de abastecimento (C_{CABAST}) de R\$ 484.007,12.

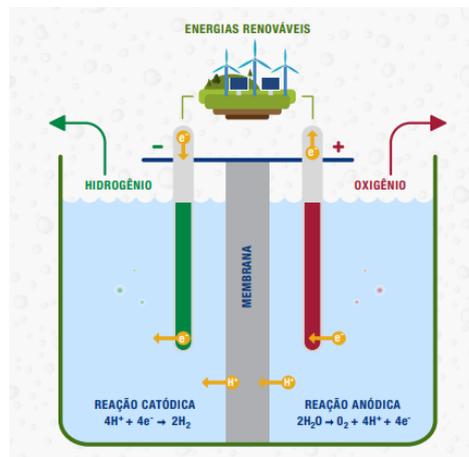
5.2.1.3 Custo de capital anual da planta de eletrólise ($C_{Celetrolise}$)

Para a produção de hidrogênio verde de forma distribuída serão analisados os custos da produção de hidrogênio por meio de uma planta de eletrólise localizada no mesmo local da estação de abastecimento de hidrogênio do veículo de carga urbano.

O princípio da eletrólise da água é simples, mas permite a construção de diferentes tecnologias baseadas em vários aspectos físico-químicos e aspectos eletroquímicos. Os eletrolisadores modernos são classificados de acordo com o tipo de eletrólito utilizado (meio condutor iônico presente entre seus eletrodos, cátodo e anodo).

Figura 8 - Esquema de um eletrolisador PEM

Fonte: Neoenergia (2020)



As tecnologias mais conhecidas são:

- Alcalina, na qual o eletrólito corresponde uma solução aquosa de KOH (Hidróxido de Potássio) e;
- PEM, onde o eletrólito corresponde a um condutor iônico sólido, geralmente na forma de uma membrana polimérica.

Segundo IRENA, apesar de sua disponibilidade e maturidade no mercado, PEM e eletrolisadores de solução alcalina ainda são considerados muito caro para ambos, CAPEX e perspectivas OPEX, em comparação com a produção de hidrogênio por meio de combustíveis fósseis. A tecnologia de eletrolisadores PEM são 50% - 60% mais caros do que a tecnologia de eletrólito alcalino, representando uma barreira adicional à penetração no mercado. Neste estudo, portanto, será utilizado como base os eletrolisadores alcalinos.

O custo unitário de capital da planta de eletrólise ($C_{Celetrolise}$) depende do tamanho da planta, ou seja, decresce com o aumento da capacidade de produção da planta. O aumento da produção permite uma melhor utilização da capacidade e com isto os custos fixos são distribuídos por maiores quantidades de produto (Espínola, 2008)

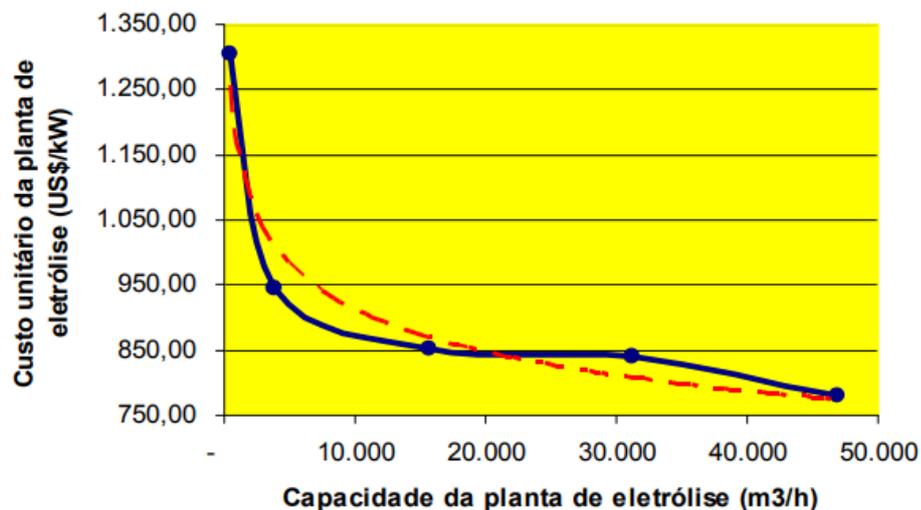
Na Tabela 11 expressa a estimativa do custo de capital de algumas plantas de eletrólise de diferentes capacidades.

Tabela 11 - Custo unitário de capital da planta de eletrólise em função da capacidade de produção
 Fonte: Espínola (2008)

| Capacidade de produção de H ₂ (m ³ /h) | Potência da planta de eletrólise (MW) | Custo unitário da planta de eletrólise (US\$/kW) |
|--|---------------------------------------|--|
| 485 | 2,3 | 1.304 |
| 3.907 | 18,6 | 945 |
| 15.627 | 74,5 | 853 |
| 31.254 | 149,0 | 841 |
| 46.880 | 223,5 | 780 |

A figura 9 (um gráfico) demonstra os dados da Tabela 11.

Figura 9 - Custo unitário de capital da planta de eletrólise em função da capacidade de produção
Fonte: (Espínola, 2008)



Conforme se aumenta a capacidade de produção, o custo unitário de eletrólise diminui e a curva gerada é representada pela Equação 12 (Espínola, 2008):

$$C_{\text{Celetrolise}} = 2.424,9 C_p^{(-0,1062)} \quad 12$$

Onde C_p é a capacidade da planta em m³/h e $C_{\text{Celetrolise}}$ é o custo unitário da planta de eletrólise em US\$/kW.

A partir da massa específica do hidrogênio de 90 g/m³ do hidrogênio, a frota em questão consome diariamente 5.158,7 m³, o que equivale aproximadamente uma produção de 214,9 m³/h esperada pela planta de eletrólise em dimensionamento. Logo, aplicando a Equação 12, o

custo unitário da planta é de 1.365,2 US\$/kW.

Como é de se esperar, observa-se que a capacidade de produção de hidrogênio de uma planta de eletrólise é proporcional a sua potência instalada. Portanto, para suprir o consumo de 214,9 m³/h da frota será necessária a implantação de uma planta de eletrólise de 1 MW.

Seguindo as mesmas premissas de cotação do dólar de 5,2 reais do item anterior, a implantação da planta de eletrólise requererá um CAPEX de R\$ 7.236.366,90, que anualizado irá compor o valor de R\$ 708.998,60.

5.2.1.4 Custo operacionais fixos (OPEX)

Assim como a frota original, os custos operacionais fixos englobam os salários dos motoristas ajudantes e mecânicos, taxas de licenciamento anual dos veículos e seguros.

- Salários ($C_{Salários_{H2V}}$)

O custo com os salários por veículo não será alterado do que foi calculado no item 4.2.1.2. Porém, como a frota movida por células a combustível de hidrogênio possuirá mais veículos para atender a todos os clientes da rota de Campo Grande, o valor total anual gasto em salários desta nova frota será de R\$ 18.411.246,61.

- Licenciamento Anual ($C_{licenciamento_{H2V}}$)

Assim como na frota original a diesel, o valor anual do licenciamento anual é de 4% do investimento total feito para a aquisição dos veículos da frota. Portanto, esse custo anual para a frota de hidrogênio verde será de R\$ 2.320.934,78

- Seguro ($C_{sv_{H2V}}$)

Utilizando a equação 1 do item 4.2.1.1 e adaptando o custo da apólice e o investimento inicial aos valores correspondentes a frota com veículos movidos à hidrogênio, o custo anual com seguro do casco do veículo será de R\$ 3.195.320,88.

5.2.2 Custos variáveis da frota

Para os custos variáveis da frota movida por células à combustível de hidrogênio, é possível considerar como inalterados por quilômetros rodados apenas o custo da troca de pneus (C_{pneus}) e custo com lavagem e lubrificação de chassi (C_{lav}). Como o veículo movido a células a combustível de hidrogênio verde não possui motor a combustão interna nem caixa de marcha não foram considerado os custos com lubrificantes (C_{lub}).

Nesta seção, além dos custos variáveis já calculados para a frota original, como custo

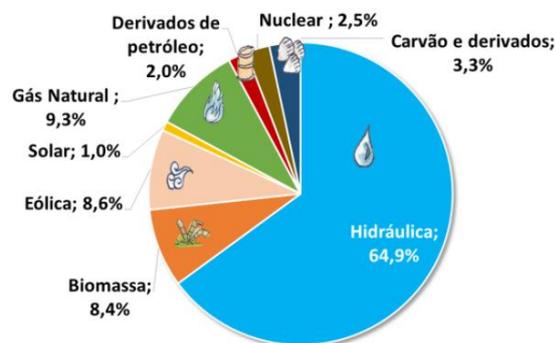
com combustível, pneus e peças e acessórios, também serão calculados os custos de transporte do hidrogênio, operação e manutenção, tanto da estação de abastecimento de hidrogênio, como da planta de eletrólise para o caso de a empresa optar pela produção descentralizada do hidrogênio verde para combustível.

5.2.2.1 Custo do combustível produzido de forma centralizada (C_{comb_H2V})

Além da regulamentação e planejamento de mercado, o custo de produção é uma grande barreira para o desenvolvimento do mercado de hidrogênio verde.

O maior componente de custo individual para no local produção de hidrogênio verde é o custo de a eletricidade renovável necessária para alimentar uma planta de eletrólise. Isso torna a produção de hidrogênio verde mais cara do que o hidrogênio azul. Um baixo custo de eletricidade é, portanto, essencial para produzir hidrogênio verde competitivo. Isso cria uma oportunidade para o mercado de hidrogênio verde em locais como o Brasil, que possui recursos solares e eólicos ideais, a fim de alcançar competitividade no custo da energia elétrica renovável oferecida. A matriz elétrica brasileira é ainda mais renovável do que a energética, isso porque grande parte da energia elétrica gerada no Brasil vem de usinas hidrelétricas, observa-se na Figura 10 que aproximadamente 65% vêm de fonte hidráulica. A energia eólica também vem crescendo bastante, contribuindo para que a nossa matriz elétrica continue sendo, em sua maior parte, renovável.

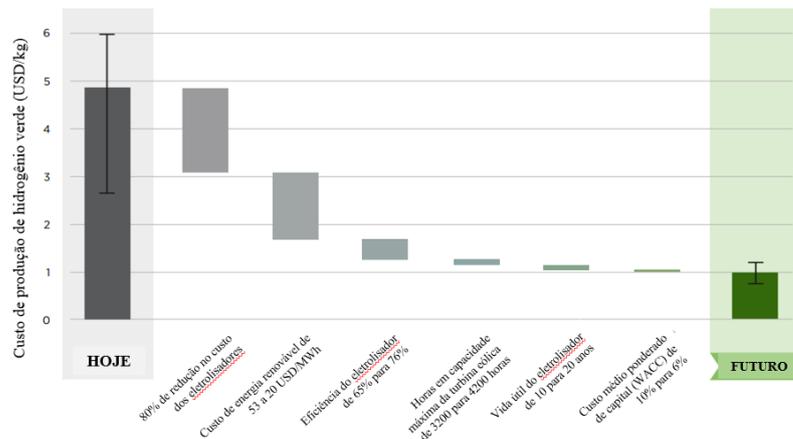
Figura 10 - Matriz Elétrica Brasileira 2019
Fonte: Balanço Energético Nacional (2020)



O baixo custo da eletricidade não é suficiente por si só para produção competitiva de hidrogênio verde, mas sua combinação com reduções no custo das instalações de eletrólise pode se tornar muito eficiente para tornar o hidrogênio verde mais barato que o azul. A Figura 11 mostra como até 85% dos custos de produção de hidrogênio verde podem ser reduzidos no longo prazo por uma combinação de eletricidade mais barata e investimento CAPEX de

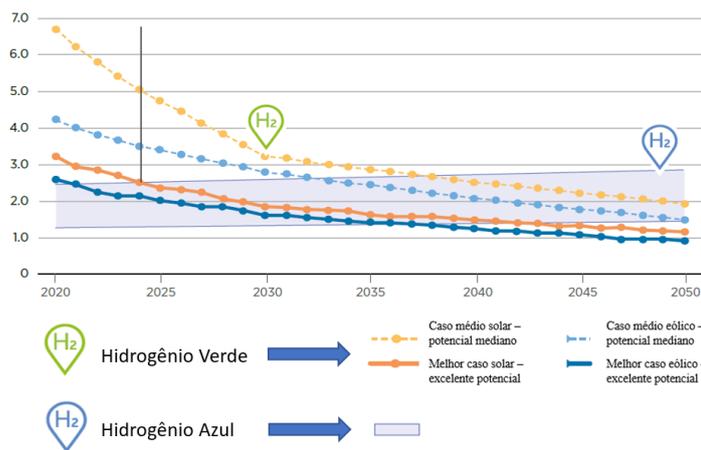
eletrolisador, além de maior eficiência e operação otimizada dos eletrolisadores.

Figura 11 - Componentes para a redução do custo do hidrogênio verde
 Fonte: IRENA (2020)



O hidrogênio verde é atualmente mais caro do que o hidrogênio convencional produzido de combustíveis fósseis (hidrogênio cinza). No entanto, os custos do hidrogênio verde estão caindo, em grande parte devido à queda nos custos de energia elétrica renovável. Observa-se na Figura 12, o hidrogênio verde ainda é 2-3 vezes mais caro do que o hidrogênio azul, porém a tendência é que em aproximadamente 30 anos essa posição se inverta.

Figura 12 - Custo nivelado dos tipos de hidrogênio (USD/kg)
 Fonte: IRENA (2020)



O custo da energia renovável, o custo e desempenho dos eletrolisadores, e o fator de carga do eletrolisador determinam o custo de produção de hidrogênio verde. Segundo IRENA, custos de produção de cerca de US \$ 2-3 por quilo para hidrogênio verde são viáveis na próxima década nas melhores localizações. Baixo custo pode também ser alcançado mais cedo em locais

com bons recursos de energia renovável.

O estudo IRENA é global, e o Brasil como já mencionado possui potencial de geração dos recursos renováveis espetaculares, como por exemplo fatores de capacidades eólicos ultrapassando 60% e solares acima de 35%. Portanto, para o estudo de caso em questão foi utilizado o valor da média entre o melhor caso de solar e o melhor caso de eólica, aproximadamente 3 dólares por quilograma de hidrogênio verde.

Como hidrogênio possui uma densidade de 0,039 kg/l e, neste estudo, considera-se o valor de conversão de 5,2 reais por dólar, foi calculado um custo diário de 7.242,70 reais. Logo, como esta frota roda aproximadamente 38.875 km, o custo com combustível (C_{comb_H2V}) para adquirir o hidrogênio verde centralizadamente é de aproximadamente R\$ 0,186 por quilômetro rodado.

5.2.2.2 Custos de transporte do hidrogênio (C_{trans_H2V})

Conforme mencionado anteriormente, o uso do hidrogênio produzido de forma centralizada necessita que este seja transportado e armazenado, para estes processos existem várias possibilidades. Os estados principais em que o hidrogênio pode ser armazenado e transportado são: estado gasoso (gás comprimido), estado líquido (hidrogênio liquefeito) e compostos intermediários (hidreto metálico e sistemas com base de carbono).

O hidrogênio deve ser armazenado e transportado de forma compatível com a qual será utilizada em seu uso final, evitando assim perdas do potencial energético nos processos de mudanças de estado do hidrogênio. No caso do hidrogênio para uso nas células a combustível veicular, deve-se ressaltar que o hidrogênio será utilizado em estações de abastecimento na forma gasosa.

Com a queda dos custos de produção de hidrogênio, os custos de distribuição de hidrogênio estão se tornando cada vez mais importante. Para distâncias de curto e médio alcance, ou seja, distâncias nacionais, os dutos adaptados podem atingir baixíssimos custos de transporte (menor ou igual a US \$ 0,1/kg por até 500km). No entanto, esses custos são realizáveis apenas se as redes de dutos existentes estiverem disponíveis e adequadas para adaptação (por exemplo, garantindo prevenção de vazamentos), e grandes volumes de hidrogênio são transportados, garantindo altas taxas de utilização. Para demanda mais baixa ou altamente flutuante, ou para fazer a ponte entre o desenvolvimento e a implantação de uma rede de dutos completa, transportar hidrogênio por meio do transporte rodoviário - na forma gasosa ou líquida - é a opção mais atraente. Segundo Hydrogen Council, o transporte rodoviário do

hidrogênio por aproximadamente 300 km pode atingir custos de cerca de US \$ 1,2/kg. Portanto, considerando o valor de cambio do dólar como 5,2 reais e que o consumo anual de hidrogênio verde seria em torno de 144.855 kg, o custo de transporte é de aproximadamente R\$ 0,075/km.

5.2.2.3 Custos com peças e acessórios e material de manutenção ($C_{peças_H2V}$)

Como este custo corresponde à previsão de despesas mensais com peças, acessórios e material de manutenção do veículo, este é calculado em função do valor do veículo. Com isso, conforme calculado pela Equação 13, como o veículo movido por células de hidrogênio possui uma tecnologia ainda não muito difundida, entende-se que valor gasto com peças e acessórios será mais elevado.

$$(C_{peças_H2V}) = [(1 - 2 \times 3 - 4) * 5] / 6 \quad 13$$

Tabela 12 - Componentes para o cálculo do custo de peças e acessórios do VUC movido a células a combustível de hidrogênio

Fonte: AUTOR

| | |
|---|------------|
| 01 - Valor do veículo | 335.395,20 |
| 02 - Quantidade de pneus | 4,00 |
| 03 - Valor do pneu | 869,70 |
| 04 - Valor do estepe | 869,70 |
| 05 - Taxa mensal peças e material de manutenção | 0,02 |
| 06 - Quilometragem mensal de referência | 4.000,00 |

Logo, o custo com peças e acessórios e material de manutenção é de R\$ 1,614 por quilômetro rodado.

5.2.2.4 Custos de operação e manutenção da planta de eletrolise ($C_{O\&M_H2V}$)

Segundo estudo de Lin e Hausenner (2017), o custo anual com operação e manutenção de uma planta de eletrólise ($C_{O\&M_H2V}$) equivale a aproximadamente 4% do investimento em equipamentos (C_{el}), conforme Equação 14. Esse valor não leva em consideração o custo com eletricidade da planta, custo este que possui grande representatividade.

$$C_{O\&M_H2V} = 0,04 C_{C_{eletrólise}} \quad 14$$

Logo, o custo por quilômetro rodado com operação e manutenção da planta de eletrólise

é de R\$ 0,024.

5.2.2.5 Custos de energia renovável para a planta de eletrólise (C_{er})

A rastreabilidade da energia renovável é extremamente importante para garantir que o hidrogênio obtido por meio da eletrólise é um hidrogênio verde, ou seja, livre de emissão de gases poluentes. Portanto, para garantir um custo de energia renovável competitivo, foi considerado que a empresa firmou um contrato de longo prazo *flat*, ou seja, sem sazonalidade com lastro de 1 MW médio de energia incentivada, ou seja, energia proveniente de fontes de energia renováveis, como sol, vento ou chuva.

O momento atual de crise hídrica abalou muito os preços dos contratos de energia, principalmente os de curto prazo. No início do ano, o preço no mercado *spot* (mercado de curto prazo) girava na casa de R\$ 100 a R\$ 150 MWh e, hoje, está em R\$ 580/MWh. Os contratos de longo prazo foram menos afetados, porém ainda sim obtiveram alta nos preços, os quais eram negociados no início no ano por 150 reais o MWh e hoje estão sendo negociados por 170 a 200 reais o mesmo tipo de MWh.

Segundo relatório semanal de preços de mercado DCIDE, consultoria especializada no mercado livre de energia elétrica, os preços de referência de setembro de 2021 para contratos de longo prazo de energia convencional com início de suprimento em 2025 são de aproximadamente 170 reais por MWh e o *SWAP* de incentivada está em torno de 35 reais por MWh. Logo, foi considerado para esse contrato de energia incentivada o valor de 205 reais por MWh.

A fim de certificar internacionalmente a energia renovável utilizada, será incluído no contrato também o valor de R\$ 1,5 por MWh utilizado para adquirir o *I-REC*, rastreando assim, a origem renovável de cada MWh consumido. Portanto, conforme Tabela 13, o custo anual com energia renovável (C_{er}) é de aproximadamente R\$ 1.576.147,60.

Os valores dos encargos, impostos e tarifas de uso de transmissão de energia estão incluídos nos custos estimados de manutenção e operação das plantas de eletrólise e do centro de distribuição de bebidas de Campo Grande.

Tabela 13 - Componentes para o cálculo do custo com a energia renovável para a produção descentralizada do hidrogênio verde

Fonte: AUTOR

| | |
|---------------------------------------|-------|
| Potência da planta de eletrólise (MW) | 1,0 |
| Energia por dia (MWh) | 24 |
| Preço (R\$/MWh) | 206,5 |

| | |
|--------------------------------|-------------|
| Custo de energia por dia (R\$) | 5.051,8 |
| Custo de energia por ano (R\$) | 1.576.147,6 |

Logo, o custo por quilômetro rodado com a tarifa de energia renovável da planta de eletrólise é de R\$ 0,130.

5.2.2.6 Custos de manutenção e operação da estação de abastecimento de hidrogênio ($C_{O\&M\ ABAST}$)

Assim como o custo anual com operação e manutenção de uma planta de eletrólise ($C_{O\&M\ H2V}$), o custo anual de manutenção da estação de abastecimento de hidrogênio ($C_{O\&M\ ABAST}$) foi considerada um valor aproximado de 4% do investimento inicial realizado na estação de abastecimento.

Logo, o custo por quilômetro rodado com operação e manutenção da estação de abastecimento de hidrogênio é de R\$ 0,016.

5.3 Sumário dos custos da frota movida a células a combustível de hidrogênio

Para calcular os custos anuais da frota movida a células a combustível de hidrogênio verde utiliza-se a mesma Equação 10 descrita na seção 4.3 deste trabalho. Porém, no caso da frota de hidrogênio serão analisados dois cenários.

Conforme descrito na tabela 14, na alternativa 1 será considerado que a empresa fará a aquisição do hidrogênio verde produzido centralizadamente, portanto, os custos de capitais incluem os veículos e a estação de abastecimento de hidrogênio e nos custos variáveis há o custo do combustível e de transporte do hidrogênio verde.

Tabela 14 - Alternativa 1 - Avaliação de custos para a produção de hidrogênio verde de forma centralizada
Fonte: AUTOR

| CUSTOS FIXOS ANUAIS | | Valor |
|-----------------------------|---|-------------------|
| Custos de capital (C_c) | Custo de capital anual da frota (C_{CH2V}) | R\$ 5.684.964,33 |
| | Custo de capital da estação de abastecimento (C_{ABAST}) | R\$ 484.007,12 |
| Custos operacionais | Salário, encargos e benefícios com motorista, ajudante e mecânico ($C_{salários\ H2V}$) | R\$ 18.411.246,61 |
| | Licenciamento (IPVA + Vistoria) - 4% do Investimento inicial ($C_{licenciamento\ H2V}$) | R\$ 2.320.934,78 |

| | | |
|--------------|---|---------------------------|
| | Seguro do Casco do Veículo (C_{sv_H2V}) | R\$ 3.195.320,88 |
| total | | R\$ 30.096.474 |

| CUSTOS VARIÁVEIS ANUAIS | | R\$/km |
|-------------------------|---|----------------------|
| Custos operacionais | Manutenção da estação de abastecimento de H2 ($C_{O\&M_ABAST}$) | R\$ 0,016 |
| | Combustível (C_{comb_H2V}) | R\$ 0,186 |
| | Transporte (C_{trans_H2V}) | R\$ 0,075 |
| | Lubrificantes (C_{lub}) | R\$ - |
| | Pneus (C_{pneus}) | R\$ 0,108 |
| | Peças e acessórios ($C_{peças_H2V}$) | R\$ 1,614 |
| | Lavagem e lubrificação de chassi (C_{lav}) | R\$ 0,050 |
| total | | R\$ 2,049 |

| | | |
|-----------------------------|--|---------------------------|
| CUSTOS TOTAIS ANUAIS | | R\$ 54.952.546 |
|-----------------------------|--|---------------------------|

Já na alternativa 2, há nos custos de capitais, além dos veículos e da estação de abastecimento, o custo de capital dos equipamentos planta de eletrólise, que incluem não apenas os equipamentos de eletrólise, mas também as unidades de compressão e purificação do hidrogênio. Não sendo, portanto, necessário incluir os custos variáveis com combustível e de transporte do hidrogênio, conforme descrito na Tabela 15.

Tabela 15 - Alternativa 2 - Avaliação de custos para a produção de hidrogênio verde de forma descentralizada
Fonte: AUTOR

| CUSTOS FIXOS ANUAIS | | Valor |
|-----------------------------|---|---------------------|
| Custos de capital (C_c) | Custo de capital anual da frota (C_{CH2V}) | R\$ 5.684.964,33 |
| | Custo de capital anual da estação de abastecimento (C_{ABAST}) | R\$ 484.007,12 |
| | Custo de capital anual da planta de eletrolise ($C_{eletrólise}$) | R\$ 708.998,60 |

| | | |
|---------------------|--|---------------------------|
| Custos operacionais | Salários, encargos e benefícios com motorista, ajudante e mecânico ($C_{salários\ H2V}$) | R\$ 18.411.246,61 |
| | Licenciamento (IPVA + Vistoria) - 4% do Investimento inicial ($C_{licenciamento\ H2V}$) | R\$ 2.320.934,78 |
| | Seguro do Casco do Veículo ($C_{sv\ H2V}$) | R\$ 3.195.320,88 |
| total | | R\$ 30.805.472 |

| CUSTOS VARIÁVEIS ANUAIS | | R\$/km |
|-------------------------|--|----------------------|
| Custos operacionais | Manutenção da estação de abastecimento de H2 ($C_{O\&M\ ABAST}$) | R\$ 0,016 |
| | Manutenção da planta de eletrolise ($C_{O\&M\ H2V}$) | R\$ 0,024 |
| | Energia elétrica renovável (C_{er}) | R\$ 0,130 |
| | Combustível ($C_{comb\ H2V}$) | R\$ - |
| | Lubrificantes (C_{lub}) | R\$ - |
| | Pneus (câmeras e protetores) (C_{pneus}) | R\$ 0,108 |
| | Peças e acessórios ($C_{peças\ H2V}$) | R\$ 1,614 |
| | Lavagem e lubrificação de chassi (C_{lav}) | R\$ 0,050 |
| total | | R\$ 1,942 |

| | |
|-----------------------------|---------------------------|
| CUSTOS TOTAIS ANUAIS | R\$ 54.363.515 |
|-----------------------------|---------------------------|

Observa-se que a diferença de custo é de aproximadamente 600 mil reais a menos nos custos anuais caso a empresa optasse pela produção do seu próprio hidrogênio verde com a implantação de uma planta de eletrólise local. Dado a ordem de grandeza do projeto, a diferença é pequena entre as alternativas, porém é válido ressaltar que o hidrogênio verde como forma de combustível ainda não é muito difundido no mercado, portanto, pode ser difícil acesso ao estoque de hidrogênio verde de empresas de produção de gases de forma centralizada.

6 ANÁLISES DOS RESULTADOS

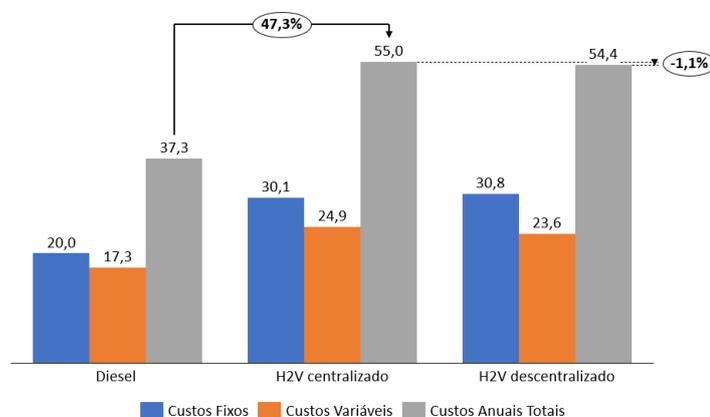
Ao planejar um projeto, seja a melhoria de um processo ou troca de veículos e maquinários, é imprescindível realizar uma análise da viabilidade financeira dele, ou seja, avaliar se o projeto dará um retorno financeiro frente à todas as outras possibilidades que poderiam ter sido utilizadas com o dinheiro investido nele. Isto ocorre porque algumas melhorias são muito custosas de serem implementadas e seus benefícios são pequenos e acabam sendo economicamente inviáveis. É o chamado custo de oportunidade, onde muitas vezes teria sido melhor investir esse dinheiro em rendas fixas ou em outros projetos onde seria possível retornos superiores.

Para avaliar a viabilidade econômica da substituição dos veículos a diesel por veículos a hidrogênio, utilizou-se o método do custo anual equivalente. O método do custo anual equivalente é utilizado para se comparar projetos com benefícios de difícil valoração. Este método permite identificar a alternativa de menor custo para se chegar a determinados resultados. O custo anual equivalente pode ser considerado um valor que atualiza “todos” os custos do projeto, incluindo os custos de investimentos. Resulta da transformação do fluxo de todos os custos num fluxo anual uniforme, de tal forma que seja possível comparar o custo e a viabilidade dos dois projetos.

Pelos dados obtidos no estudo pode-se observar na Figura 13 que os custos anuais de aquisição e operação de uma frota movida a hidrogênio verde estão atualmente em torno de 47% maiores que os custos anuais usuais da empresa com veículos movidos a diesel de petróleo.

Figura 13 - Custos anuais em Milhões de reais para o cenário estudado no trabalho

Fonte: AUTOR



No estudo de caso, observa-se que o redimensionamento da frota com o aumento expressivo no número de veículos e consequentemente no número de quilômetros rodados

diariamente possui extrema relevância no crescimento expressivo tanto no custo fixo por conta da aquisição de 173 veículos, ao invés de 130, e nos custos variáveis que são em função da quilometragem rodada. Portanto, é válido ressaltar que foi pesquisado os modelos de veículos urbanos de carga similares do tipo van utilizados pela operação original da empresa com a tecnologia de propulsão a hidrogênio e o Renault MASTER Z.E. Hydrogen se mostrou o mais adequado. Com carga útil de 1200 quilogramas, atende melhor a frota que os outros veículos similares. Stellantis Hydrogen Full Cell e e-Expert Hydrogen, recém anunciado pelas empresas Stellantis e Peugeot, respectivamente possuem carga útil de apenas 1100 quilogramas para transporte de carga, o que oneraria ainda mais essa substituição.

Neste Capítulo serão elaboradas hipóteses de cenários não atuais para o ano de 2021, porém que podem se tornar reais dentro de outros cenários de desenvolvimento da tecnologia de células a combustível de hidrogênio verde para o transporte e macroeconomia em geral.

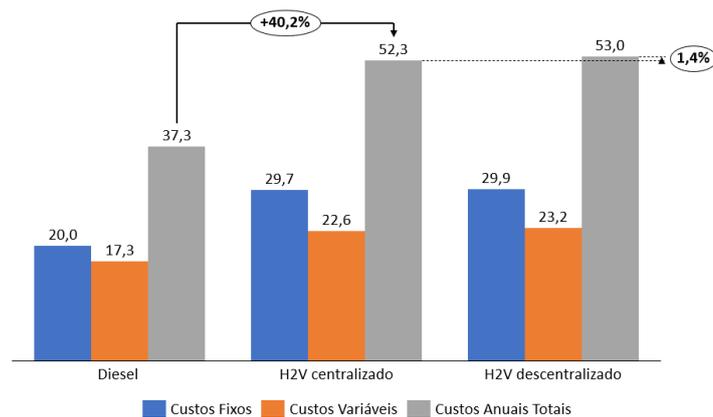
6.1 Cenário 1: Custo de produção do hidrogênio verde

Primeiramente foi simulado um cenário futuro, no qual os parâmetros listados na Figura 11 deste trabalho foram atendidos, portanto, o hidrogênio verde produzido centralizadamente no Brasil (país com potencial de recursos eólicos extremamente atrativos) estaria na faixa de 1 USD/kg. Já o custo de transporte do hidrogênio que hoje está aproximadamente 1,2 USD/kg, neste cenário também foi reduzido na mesma proporção do custo de produção, obtendo o valor de 0,4 USD/kg.

Observa-se que houve uma significativa alteração nos custos variáveis para a alternativa de aquisição do hidrogênio verde centralizadamente, tornando esta solução a mais atrativa para uma empresa que tenha o objetivo de inserir uma frota movida a hidrogênio verde em sua operação. Os custos fixos também se alteraram, pois para esse cenário foi considerada a premissa de redução dos custos dos equipamentos da planta de eletrólise e estação de abastecimento de 80%.

Figura 14 - Custos anuais em Milhões de reais para o cenário 1

Fonte: AUTOR

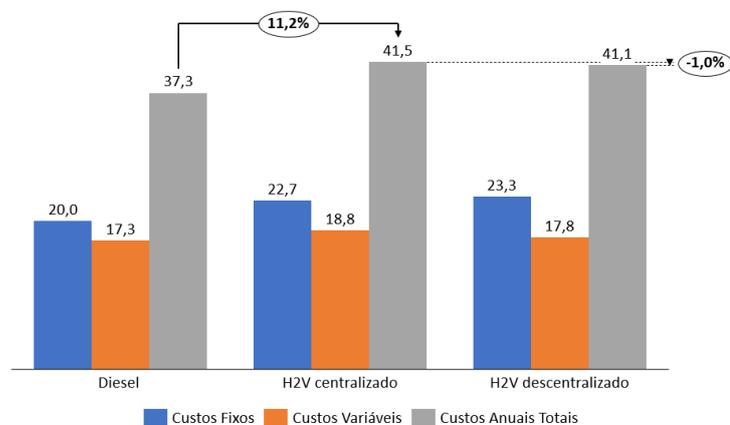


6.2 Cenário 2: Aumento da carga útil do veículo movido à hidrogênio

Em um segundo momento foi simulado um cenário, no qual há um veículo urbano de carga movido a células a combustível de hidrogênio no mercado com carga útil similar ao VUC usado pela empresa na frota movida a diesel de petróleo. Ou seja, neste cenário o VUC de hidrogênio teria uma carga útil de 1593 kg, excluindo assim a necessidade de redimensionar a frota, aumentando o número de veículos e quilometragem diária rodada.

Na Figura 15 observa-se que neste cenário os custos anuais da frota movida a hidrogênio verde caíram aproximadamente 25% comparado ao cenário inicial estudado, chegando a um acréscimo de apenas 10% nos custos anuais da frota operacional hoje movida ao diesel de petróleo, caso a empresa optasse pela produção do hidrogênio verde in-loco, ou seja, produção no próprio centro de distribuição de bebidas de Campo Grande.

Figura 15 - Custos anuais em Milhões de reais para o cenário 2
Fonte: AUTOR



6.3 Cenário 3: Mudanças no cenário político-econômico brasileiro

Diversos fatores interferem na cotação do câmbio das moedas internacionais, dentre eles

estão o saldo da balança comercial, o turismo internacional, reservas cambiais e crises financeiras, políticas e sanitárias.

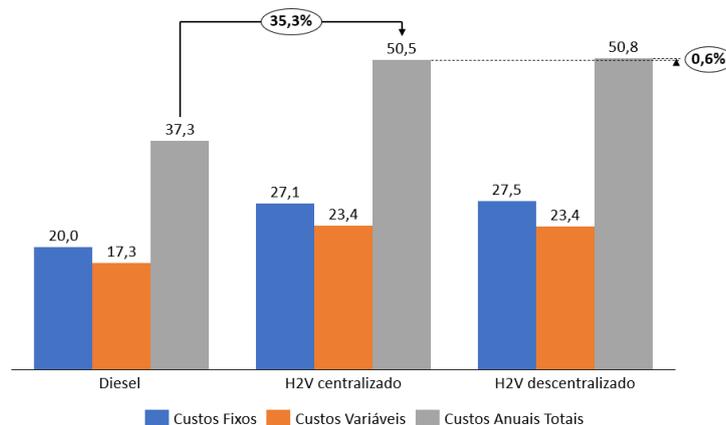
Em 2020, o real foi a moeda que mais se desvalorizou em relação ao dólar entre as 33 mais negociadas do mundo. Só de janeiro a setembro, a desvalorização do real foi de 39,59%. De fato, quando há incertezas no mundo como aconteceu em 2020 com a pandemia, o dólar ganha força.

Neste cenário será considerado uma mudança disruptiva no cenário político e econômico brasileiro, com uma positiva retomada da economia pós crise do coronavírus e reformas políticas e tributárias que valorizem o real, retomando a patamares atingidos em 2017, pós recessão que o país sofria desde 2014. O valor do câmbio do dólar neste cenário será de R\$ 3,00 e do euro de R\$ 4,00.

No Figura 16 observa-se que neste cenário a redução foi expressiva nos custos fixos quando comparados com o cenário inicial estudado, pois o valor do câmbio possui maior influência nos custos de capitais de aquisição dos veículos movidos a células a combustível de hidrogênio, da estação de abastecimento e da planta de eletrólise. Outro fator relevante a destacar é que este cenário resultou em custos anuais para a produção descentralizada maiores que a aquisição do hidrogênio verde de empresas especializadas que produziriam centralizadamente. Isso se deve a relevância maior do câmbio nos custos variáveis do hidrogênio centralizado, dado que ainda está vinculado a tecnologias importadas e os preços de referências atuais ainda estão em dólar.

Figura 16 - Custos anuais em Milhões de reais para o cenário 3

Fonte: AUTOR



6.4 Cenário 4: Desenvolvimento tecnológico e mudanças político-econômicas

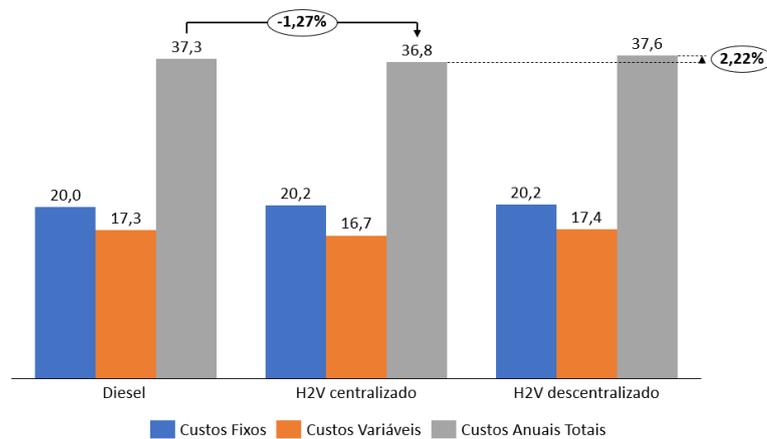
Neste cenário foi considerado as três hipóteses anteriores ocorrendo simultaneamente. Ou seja, custo de aquisição e transporte do hidrogênio verde no valor de 1,4 USD/kg, a

existência no mercado de um VUC que comporte a mesma carga útil do veículo operacional à diesel utilizado pela empresa no mesmo preço de aquisição do Renault MASTER Z.E. Hydrogen e uma macroeconomia recuperada, na qual o valor do câmbio retornaria aos patamares de 2017 (Dólar por R\$ 3,00 e Euro por R\$ 4,00).

Os resultados obtidos ilustrados pelo Figura 17 demonstra que inserir a tecnologia do hidrogênio verde como combustível para o setor de transporte não está tão longe de ser viável financeiramente.

Figura 17 - Custos anuais em Milhões de reais para o cenário 4

Fonte: AUTOR



Uma combinação de um avanço da tecnologia extremamente viável com incentivos e reformas político-econômicas necessárias tornariam o projeto financeiramente viável pela ótica do custo anual equivalente. Neste cenário hipotético, a empresa economizaria aproximadamente 500 mil reais se optasse pela alternativa de adquirir o hidrogênio verde de empresa terceira que o produza centralizadamente e assim consiga desconto de escala para vendê-lo por um preço muito competitivo de 1 USD/kg.

7 CONCLUSÃO

Conforme exposto no trabalho é possível concluir que o cenário atual não favorece a viabilidade financeira da troca da frota a diesel por uma frota movida a células a combustível de hidrogênio verde, onerando significativamente os custos anuais de operação de distribuição de bebidas da empresa em quase o dobro do custo atual.

Porém, é válido ressaltar que o mundo está extremamente entusiasmado com a nova economia do hidrogênio. Com isso, diversas empresas estão se mobilizando para o desenvolvimento cada vez mais eficaz dessa tecnologia, a fim de baratear os equipamentos não só de produção do hidrogênio verde, mas também das células a combustível de hidrogênio para o setor de transporte.

Outro fator relevante atualmente para a viabilidade está no vínculo dessas novas tecnologias com o mercado internacional, portanto, os altos valores de câmbio do dólar e euro influenciaram negativamente a viabilidade. Como forma de mitigar esse fator no futuro, empresas interessadas nesta nova economia já possuem projetos de P&D para nacionalizar essa produção de hidrogênio, como por exemplo a geradora AES Brasil que fez parceria com a empresa Hytron e o IATI - Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação para desenvolver um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da ANEEL e pretende criar solução nacional para gerar energia com hidrogênio.

Ao analisar, portanto, a viabilidade econômica do projeto, essa visão muda drasticamente, pois nesta análise não entra apenas aspectos financeiros para atestar a viabilidade e sim os benefícios sociais do projeto proposto. O trabalho proposto possui foco não somente na sustentabilidade energética, mas também social desta substituição da frota do centro de distribuição de Campo Grande. Conforme exposto no trabalho, esse projeto resultaria em uma redução significativa de aproximadamente 60% no consumo anual de energia necessária e evitaria aproximadamente a emissão de 2.300 toneladas de CO_2e por ano.

Portanto, pode-se concluir que o projeto proposto se mostra economicamente viável, dada a atual busca incessante pela descarbonização de setores como o transporte, que protagonizam dentre os setores que mais emitem gás carbônico na atmosfera. Essa preocupação com a sustentabilidade ambiental e social está cada vez mais enraizada na sociedade que clientes optam por consumir empresas que estejam dentro de padrões e inovem no conceito ESG. A sigla vem do inglês *Environmental, Social and Governance*, que em português pode ser traduzido como ambiental, social e governança. A adoção do conceito ESG representa uma verdadeira mudança de paradigma nas relações entre as empresas e seus investidores, já que

práticas tradicionalmente associadas à sustentabilidade passaram a ser consideradas como parte da estratégia financeira das empresas.

Uma combinação futura de cenário favorável político-econômico brasileiro e de desenvolvimento da tecnologia voltada para o hidrogênio verde como combustível para o setor de transporte é esperada para consolidar a viabilidade não apenas econômica do projeto, mas também a viabilidade financeira desta substituição de veículos e tecnologias.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se os seguintes trabalhos para contribuir com o desenvolvimento da economia do hidrogênio verde no Brasil:

- Definição de uma metodologia de rastreabilidade do hidrogênio verde que seja internacionalmente reconhecida. *CertifHy* atualmente é executado na forma de um piloto de Certificados de Garantia de Origem do hidrogênio azul e verde, porém ainda não é globalmente reconhecido;
- Avaliar os aspectos tributários sobre a viabilização do setor, assim como a aplicabilidade ao hidrogênio de incentivos existentes no setor energético, como REIDI e debêntures de infraestrutura;
- Avaliar a possibilidade de utilização da infraestrutura existente para transporte e estocagem de hidrogênio, inclusive em mistura com gás natural, considerando desde o sistema dutoviário até os equipamentos dos consumidores;
- Estimar os impactos da precificação de carbono (nacional e internacional) na competitividade relativa do hidrogênio.
- Identificar fontes e instrumentos de financiamento internacional, tais como fundos “verdes”, agências de cooperação internacional e bancos multilaterais de desenvolvimento e fundos de investimento, para o apoio e realização de projetos relacionados à produção e uso de hidrogênio no Brasil;

8 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Igor. ALENCAR, Ane. ANGELO, Claudio. AZEVEDO, Tasso. BARCELLOS, Felipe. COLUNA, Iris. JUNIOR, Ciniro. CREMER, Marcelo. PIATTO, Marina. POTENZA, Renata. QUINTANA, Gabriel. SHIMBO, Júlia. TSAI, David. ZIMBRES, Bárbara. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil 1970-2019**. SEEG, 2020, 1-41.

A RENAULT CIRCULA A HIDROGÊNIO COM O MASTER Z.E HYDROGEN E O KANGOO Z.E HYDROGEN. Renault Pro+.2019.

ANDRADE, Vivian. **I-REC: quais são os benefícios dos certificados de energia renovável?** Instituto Totum. 2018. Disponível em <<https://www.institutototum.com.br/index.php/noticias/28-programa-de-certificacao-de-energia-renovavel/361-i-rec-quais-os-beneficios-dos-certificados-de-energia-renovavel>>. Acesso em: 15 de outubro de 2021.

BASES PARA A CONSOLIDAÇÃO DA ESTRATÉGIA BRASILEIRA DO HIDROGÊNIO. Empresa de pesquisa energética, 2021. Disponível em <[https://www.epe.gov.br/sites/pt/publicacoes/dados/zabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao569/Hidrogeno%20CC%20nio_23Fev2021NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites/pt/publicacoes/dados/zabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao569/Hidrogeno%20CC%20nio_23Fev2021NT%20(2).pdf)>. Acesso em: 12 de setembro de 2021.

PROGRAMA NACIONAL DO HIDROGÊNIO. Ministério de Minas e Energia, 2021. Disponível em <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrogenioRelatriodiretrizes.pdf>>. Acesso em: 29 de setembro de 2021.

CASTRO, Nivalde. De. CÂMARA, Lorrane. **Transição energética e o hidrogênio: oportunidades, desafios e perspectivas**. GESEL, UFRJ. 2020.

COUNCIL, Hydrogen. **Hydrogen Insights –A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness**. 2021.

D,AGOSTO. Marcio. OLIVEIRA, Cinthia. ALMEIDA, Isabela. COSTA, Mariane. **Guia de logística de aplicação: um caminho para a logística sustentável**. Ed. IBTS. Rio de Janeiro, 2018.

DA SILVA, Camila Padovan. **Correios e sua distribuição urbana de cargas**. 2019.

ESTAÇÕES DE ABASTECIMENTO DE HIDROGÊNIO. Air products, 2018. Disponível em <<http://www.airproducts.com.br/Industries/Energy/Power/Power-Generation/hydrogen-fueling-stations.aspx>>. Acesso em 10 de setembro de 2021.

ESPÍNOLA, Michel Osvaldo Galeano. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da energia vertida turbinável da usina hidrelétrica de Itaipu para a síntese de amônia**. Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008.

FOGAÇA, Jennifer. “Óleo Diesel.”; Prepara ENEM. Disponível em <<https://www.preparaenem.com/quimica/oleo-diesel.htm>>. Acesso em: 20 de setembro de 2021.

KOLEVA, Mariya. MELAINE, Marc. **Hydrogen Fueling Stations Cost**. Department of United States of América. 2021. Pg. 1-4.

LIN, Meng; HAUSSENER, Sophia. **Techno-economic modeling and optimization of solar-driven high-temperature electrolysis systems**. Solar Energy, v. 155, p. 1389-1402, 2017.

LANDMANN, Marcelo Camilli; RIBEIRO, Helena; DEÁK, Csaba. **Uma proposta metodológica para estimar o custo da poluição do ar nas análises de viabilidade de sistemas de transportes urbanos**. TRANSPORTES, v. 15, n. 1, 2007.

MATRIZ ENERGÉTICA E ELETRICA. Empresa de pesquisa energética, 2019. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 16 de outubro de 2021.

OUTLOOK, IRENA Global Renewables. **Energy transformation 2050**. IRENA: Abu Dhabi, UAE, 2020.

O QUE SÃO COMBUSTÍVEIS? Empresa de pesquisa energética, 2019. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/o-que-sao-combustiveis>>. Acesso em: 19 de outubro de 2021.

PALADINO, Patrícia Andréa. **Uso do hidrogênio no transporte público da cidade de São Paulo**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS CARROS MOVIDOS A HIDROGÊNIO. Mapfre .2021. Disponível em <<https://www.mapfre.com.br/para-voce/seguro-auto/artigos/vantagensedesvantagensdoscarrosmovidosahidrogenio/#:~:text=Os%20tanques%20de%20hidrog%C3%AAnio%20possuem,%C3%BAtil%20menor%20do%20pr%C3%B3prio%20autom%C3%B3vel.>>. Acesso em 10 de outubro de 2021.

VIEIRA, Felipe. **Uso de caminhões elétricos como veículo de entrega urbana no transporte de bebidas a partir de centros de distribuição no rio de Janeiro**. UFRJ, 2020.