

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Douglas Flores Copetti

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E  
ECONÔMICA DA TROCA DE EMPILHADEIRSA À COMBUSTÃO  
POR MODELOS ELÉTRICOS**

Santa Maria, RS  
2023

Douglas Flores Copetti

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA  
TROCA DE EMPILHADEIRAS À COMBUSTÃO POR MODELOS ELÉTRICOS**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Processamento de Energia, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Luciane Neves Canha

Santa Maria, RS  
2023

Copetti, Douglas Flores  
Metodologia para análise da viabilidade técnica e econômica da troca de empilhadeiras à combustão por modelos elétricos / Douglas Flores Copetti.- 2023.  
96 p.; 30 cm

Orientadora: Luciane Neves Canha  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2023

1. Empilhadeiras 2. Transição energética 3. Transação de energia I. Neves Canha, Luciane II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, DOUGLAS FLORES COPETTI, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

---

© 2023

Todos os direitos autorais reservados a Douglas Flores Copetti. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço Eletrônico: douglas.copetti@acad.ufsm.br

Douglas Flores Copetti

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA  
TROCA DE EMPILHADEIRAS À COMBUSTÃO POR MODELOS ELÉTRICOS**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Processamento de Energia, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

**Aprovada em 18 de dezembro de 2023**

**Luciane Neves Canha, Dra. (UFSM)**  
**(Presidente/Orientadora)**

**Lucas Feska Ramos, Dr. (UFSM)**

**André Nunes de Souza, Dr. (UNESP)**

Santa Maria, RS  
2023

*Dedico este trabalho à Deus, que me deu os meios e capacidades para desenvolvê-lo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha esposa, pois esse desenvolvimento também é dela, que torna os obstáculos mais fáceis por estar do meu lado.

Expresso minha profunda gratidão aos meus pais, cujo apoio incansável e incentivo constante no meu percurso acadêmico foram fundamentais.

Sou grato à Dr<sup>a</sup> Luciane Neves Canha, que por sua orientação propiciou um caminho claro e enriquecedor para mim.

Outrossim, expresso minha apreciação à Universidade Federal de Santa Maria, seu compromisso com a educação proporcionaram tal pesquisa.

*“Confie no Senhor de todo o seu coração e não se apóie em seu próprio entendimento; reconheça o Senhor em todos os seus caminhos, e ele endireitará as suas veredas.”*

Provérbios 3:5-6.

## RESUMO

### **METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA TROCA DE EMPILHADEIRAS À COMBUSTÃO POR MODELOS ELÉTRICOS**

AUTOR: Douglas Flores Copetti  
ORIENTADORA: Dr<sup>a</sup> Luciane Neves Canha

Em um cenário global cada vez mais pautado pela imperativa necessidade de mitigação das emissões de gases de efeito estufa e pela busca de soluções sustentáveis, a indústria enfrenta o desafio de reconfigurar suas operações logística de modo ecologicamente responsável. Este estudo se propõe a ser um instrumento nesse contexto, ao examinar a viabilidade da transição de empilhadeiras movidas por combustíveis fósseis para seus equivalentes elétricos. A pesquisa se ancora em uma revisão bibliográfica acerca de empilhadeiras elétricas e ao conceito de transacionamento de energia via veículos elétricos. Outrossim, explora-se o potencial de transacionar energia por meio das empilhadeiras elétricas. No estudo de caso realizado, foi calculada uma economia de R\$ 1.865.653,37 mediante a substituição do *leasing* de modelos movidos a gás liquefeito de petróleo por empilhadeiras elétricas equipadas com baterias de chumbo ácido. Este dado é complementado por uma redução de 2.646 toneladas de emissões de carbono equivalente ao longo do período de análise.

**Palavras-chave:** Empilhadeiras. Transição energética. Transação de energia.



## **ABSTRACT**

### **METHODOLOGY FOR THE ANALYSIS OF TECHNICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY OF REPLACING COMBUSTION FORKLIFTS WITH ELECTRIC MODELS**

AUTHOR: Douglas Flores Copetti  
ADVISOR: Dr<sup>a</sup> Luciane Neves Canha

In an increasingly global scenario guided by the imperative need to mitigate greenhouse gas emissions and the search for sustainable solutions, the industry faces the challenge of reconfiguring its logistics operations in an ecologically responsible manner. This study aims to be an instrument in this context, by examining the feasibility of transitioning from fossil fuel-powered forklifts to their electric equivalents. The research is anchored in a literature review about electric forklifts and the concept of energy transaction through electric vehicles. Furthermore, the potential to transact energy through electric forklifts is explored. In the conducted case study, a saving of R\$ 1,865,653.37 was calculated through the replacement of leasing models powered by liquefied petroleum gas with electric forklifts equipped with lead-acid batteries. This data is complemented by a reduction of 2,646 tons of equivalent carbon emissions over the analysis period.

**Keywords:** Forklifts. Energy Transition. Energy Transaction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa da estrutura do documento .....	21
Figura 2 – Apresentação de diferentes tipos de empilhadeiras.....	23
Figura 3 – Ilustração do sistema de compensação de energia elétrica.....	31
Figura 4 – Diagrama de fluxo de potência para V2G .....	33
Figura 5 – Topologia de um sistema V2H .....	34
Figura 6 – Representação de um sistema V2B .....	35
Figura 7 – Comparação de custos para <i>leasing</i> de uma empilhadeira de 2,5 toneladas no período de 5 anos .....	62
Figura 8 – Comparação de custos para aquisição de uma empilhadeira de 2,5 toneladas no período de 5 anos .....	64
Figura 9 – Comparação de custos para <i>leasing</i> de 18 empilhadeiras de 2,5 toneladas no período de 5 anos. ....	65
Figura 10 – Comparação de custos para aquisição de 18 empilhadeiras de 2,5 toneladas no período de 5 anos. ....	66
Figura 11 – Comparação de custos para <i>leasing</i> ou aquisição de 18 empilhadeiras de 2,5 toneladas no período de 5 anos .....	67
Figura 12 – Comparativo de dispêndios entre GLP, Pb-acid e LiPo no cenário de aquisição. ....	68
Figura 13 – Comparativo de dispêndios entre GLP, Pb-acid e LiPo no cenário de <i>leasing</i> .....	70
Figura 14 – <i>Payback</i> para aquisição de 18 empilhadeiras de 2,5 toneladas entre GLP e Pb-acid no cenário de aquisição .....	72
Figura 15 – <i>Payback</i> para aquisição de 18 empilhadeiras de 2,5 toneladas entre GLP e LiPo no cenário de aquisição .....	72
Figura 16 – <i>Payback</i> para aquisição de 18 empilhadeiras de 2,5 toneladas entre GLP e Pb-acid no cenário de <i>leasing</i> .....	73
Figura 17 – <i>Payback</i> para aquisição de 18 empilhadeiras de 2,5 toneladas entre GLP e LiPo no cenário de <i>leasing</i> . ....	74
Figura 18 – Comparação de carbono para 18 empilhadeiras.....	76
Figura 19 – Comparação da necessidade de plantio para 18 empilhadeiras.....	77
Figura 20 – Representação generalizada de um carregador bidirecional de baterias de único estágio .....	82
Figura 21 – Diagrama da proposta de V2Ind.....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados relativos ao contexto da empresa .....	39
Tabela 2 – Dados comerciais das empilhadeiras.....	39
Tabela 3 – Dados técnicos das empilhadeiras.....	40
Tabela 4 – Dados quanto ao fator de emissão .....	51
Tabela 5 – Dados quanto a capacidade calorífica .....	52
Tabela 6 – Estudo de caso – dados quanto ao contexto da empresa .....	57
Tabela 7 – Estudo de caso – dados quanto ao modelo de GLP .....	58
Tabela 8 – Estudo de caso – dados quanto ao modelo de chumbo ácido .....	58
Tabela 9 – Estudo de caso – dados quanto ao modelo de íons de lítio .....	58
Tabela 10 – Estudo de caso - dados quanto ao custo com uma unidade em 5 anos na modalidade de <i>leasing</i> .....	62
Tabela 17 – Estudo de caso – dados quanto ao custo cum uma unidade em 5 anos na modalidade de aquisição.....	64

## LISTA DE SIGLAS

NR11	Norma Regulamentadora 11
NR15	Norma Regulamentadora 15
VEs	Veículos Elétricos
V2G	<i>Vehicle-to-Grid</i>
V2B	<i>Vehicle-to-Building</i>
V2H	<i>Vehicle-to-Home</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
MMAE	Mercado Multi-Agente de Eletricidade
SGER	Sistemas de Gerenciamento de Energia Residencial
PHEVs	Veículos Elétricos Híbridos Plug-in
PV	Geração Solar Fotovoltaica
GDF	Geração Distribuída Fotovoltaica
MO-HEMS	Estratégia de Gerenciamento de Energia Doméstica com Múltiplos Objetivos
B2V	<i>Building-to-Vehicle</i>
HEC	Controlador de Energia Residencial
BEMS	<i>Building Energy Management System</i>
CHAdEMO	<i>Charge de Move</i>
CCS	<i>Combined Charging System</i>
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
O&M	Operação e Manutenção
INSS	Instituto Nacional do Seguro Social
FGTS	Fundo de Garantia do Tempo de Serviço
IRRF	Imposto de Renda Retido na Fonte
VT	Vale Transporte
SAP	<i>Systems, Applications, and Products in Data Processing (Software da SAP SE)</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
PB	<i>Payback</i>
FCA	Fluxo de Caixa Anual
ROI	<i>Return on Investment</i>
LL	Lucro líquido
IT	Investimento total
GEE	Gases de Efeito Estufa

FE	Fator de Emissão
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
Pb-acid	<i>Chumbo Ácido</i>
LiPo	Íons de Lítio
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
CGH	Centrais Geradores Hidrelétricas
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
V2I	<i>Vehicle-to-Infrastructure</i>
V2Ind	<i>Vehicle-to-Industry</i>
SoC	<i>State of Charge</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua

## LISTA DE SÍMBOLOS

$CO_{2eq}$	Dióxido de carbono equivalente
NiCd	Níquel-cádmio
LiFePO <sub>4</sub>	Fosfato de ferro-lítio
kWh	Quilowatt-hora
h	horas
un	unidades
$\sigma$	Consumo
$\delta$	Dispêndio ou custo
$\eta$	Eficiência
T	Tempo ou período
D	Dias
$\bar{x}$	Média
$\bar{\sigma}$	Consumo médio
$\bar{\delta}$	Custo médio
T <sub>aa</sub>	Período de anos da análise
T <sub>ta</sub>	Período de trabalho anual
T <sub>td</sub>	Período de trabalho diário
$\delta_{cht}$	Dispêndio de combustível por hora trabalhada
$\delta_{EHt}$	Dispêndio de energia por hora trabalhada
$\delta_{ho}$	Dispêndio horário com operador
$\delta_{L1u-T}$	Dispêndio com leasing para uma unidade no período total da análise
$\delta_{C1u-T}$	Dispêndio com combustível para uma unidade no período total da análise
$\delta_{E1u-T}$	Dispêndio com energia para uma unidade no período total da análise
$\delta_{O\&M(1u-T)}$	Dispêndio com operação e manutenção no cenário de locação para uma unidade no período total da análise
$\delta_{Mm}$	Dispêndio com manutenção do modelo
I <sub>0</sub>	Investimento inicial
FCA	Fluxo de caixa anual
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
FEC <sub>02</sub>	Fator de emissão de dióxido de carbono

$C_l$	Capacidade calorífica por litro
$C$	Capacidade calorífica
$\rho$	Densidade
$\sigma_c$	Consumo de combustível
$N_{ec}$	Número de empilhadeiras considerada
$\sigma_{dc}$	Consumo diário de combustível
$T_a$	Período da análise
$C_x$	Capacidade calorífica específica da matéria-prima
$\delta M_{me}$	Dispêndio com manutenção para modelos elétricos
$\delta L_{(1u-T)}(GLP)$	Dispêndio com leasing para uma unidade de GLP no período total da análise
$\delta L_{(1u-T)}(Pb-acid)$	Dispêndio com leasing para uma unidade de Pb-acid no período total da análise
$\delta L_{(1u-T)}(LiPo)$	Dispêndio com leasing para uma unidade de LiPo no período total da análise
$\delta c_{(1u-T)}(GLP)$	Dispêndio com combustível para uma unidade de GLP no período total da análise
$\delta E_{(1u-T)}(Pb-acid)$	Dispêndio com energia para uma unidade de Pb-acid no período total da análise
$\delta E_{(1u-T)}(LiPo)$	Dispêndio com energia para uma unidade de LiPo no período total da análise
$\delta O\&M_{L(1u-T)}(GLP)$	Dispêndio com energia para uma unidade de LiPo no período total da análise
$\delta O\&M_{(1u-T)}(Pb-acid)$	Dispêndio com operação e manutenção no cenário de locação para uma unidade de Pb-acid no período total da análise
$\delta O\&M_{(1u-T)}(LiPo)$	Dispêndio com operação e manutenção no cenário de locação para uma unidade de LiPo no período total da análise
$\delta A_{(1u-Tt)}(GLP)$	Dispêndio de aquisição de uma empilhadeira de GLP
$\delta A_{(1u-Tt)}(Pb-acid)$	Dispêndio de aquisição de uma empilhadeira de Pb-acid

$\delta A_{(1u-Tt)(LiPo)}$	Dispêndio de aquisição de uma empilhadeira de LiPo
$\delta O\&MA_{(1u-T)(GLP)}$	Dispêndio com operação e manutenção no cenário de aquisição para uma unidade de GLP no período total da análise
$\delta O\&MA_{(1u-T)(Pb-acid)}$	Dispêndio com operação e manutenção no cenário de aquisição para uma unidade de GLP no período total da análise
$\delta O\&MA_{(1u-T)(LiPo)}$	Dispêndio com operação e manutenção no cenário de aquisição para uma unidade de GLP no período total da análise
$\sigma_c(GLP)$	Consumo de gás liquefeito de petróleo
$\delta_{Mud}$	Dispêndio com multa por ultrapassagem de demanda
DR	Demanda registrada
DC	Demanda contratada
tU	Tarifa de ultrapassagem
P <sub>ec</sub>	Potência associada ao número de empilhadeiras consideradas
n <sub>ec</sub>	Número de empilhadeiras consideradas
P <sub>1e</sub>	Potência de uma empilhadeira
E <sub>pec</sub>	Energia passível de ser disponibilizada pelas empilhadeiras em horário de ponta no período de um mês
E <sub>p</sub>	Consumo médio de energia durante o horário de ponta
C <sub>e</sub>	Custo de energia
T <sub>fp</sub>	Taxa de uso do sistema de distribuição durante o horário de fora de ponta
T <sub>p</sub>	Taxa de uso do sistema de distribuição durante o horário de ponta
S <sub>Ep</sub>	Economia proveniente de aplicar o V2Ind durante o horário de ponta
S <sub>ud</sub>	Economia mensal por evitar multas de ultrapassagem de demanda



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....;	19
1.1	OBJETIVOS .....	20
1.1.1	<b>Objetivo geral</b> .....	20
1.1.1	<b>Objetivo Específicos</b> .....	20
1.2	ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	21
<b>2</b>	<b>ANÁLISE DA MODERNIZAÇÃO NA MOVIMENTAÇÃO LOGÍSTICA</b>	22
2.1	MOVIMENTAÇÃO LOGÍSTICA.....	22
2.2	EMPILHADEIRAS.....	23
2.2.1	<b>Tecnologias de propulsão para empilhadeiras</b> .....	24
2.2.2	<b>Análise custo-benefício da adoção de empilhadeiras elétricas</b> ....	26
2.2.3	<b>Infraestrutura de carregamento</b> .....	28
2.3.4	<b>Impacto ambiental</b> .....	26
2.3	CONSIDERAÇÕES DE FECHAMENTO DO CAPÍTULO.....	29
<b>3</b>	<b>INTEGRAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS EM REDES INTELIGENTES</b>	30
3.1	PESQUISAS ACADÊMICAS CONVERGENTES.....	29
3.2	DEFINIÇÕES DE CONCEITOS CHAVES.....	32
3.2.1	<b>V2G( <i>Vehicle-to-Grid</i>)</b> .....	33
3.2.2	<b>V2H ( <i>Vehicle-to-Home</i>)</b> .....	34
3.2.3	<b>V2B ( <i>Vehicle-to-Building</i>)</b> .....	34
3.3.4	<b>Componenetes e infraestrutura necessários para V2B</b> .....	35
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	36
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	37
4.1	DADOS RELATIVOS AO CONTEXTO DA EMPRESA.....	38
4.1.1	<b>Dados relativos ao contexto da empresa</b> .....	38
4.1.2	<b>Dados relativos ao modelo da empresa</b> .....	39
4.2	ANÁLISE DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL.....	40
4.3	ANÁLISE DE CUSTO COM COMBUSTÍVEL, ENERGIA E O&M.....	42
4.3.1	<b>Custos com combustível</b> .....	42
4.3.2	<b>Custos com energia</b> .....	42
4.3.3	<b>Custos com O&amp;M</b> .....	43
4.4	ANÁLISE DE CUSTOS ENTRE CENÁRIOS.....	45
4.4.1	<b>Cenário de <i>leasing</i></b> .....	45
4.4.2	<b>Custos de aquisição</b> .....	47
4.4.3	<b>Comparação entre os cenários de <i>leasing</i> e aquisição</b> .....	47
4.5	ANÁLISE ECONÔMICA.....	49
4.6	QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> .....	50
4.7	ANÁLISE DO IMPACTO AMBIENTAL.....	53

4.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	55
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA DE METALURGIA.....</b>	<b>56</b>
	<b>DA REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL</b>	
5.1	ESTUDO DE CASO - DADOS DE ENTRADA .....	56
<b>5.1.1</b>	<b>Estudo de caso - dados relativos ao .....</b>	<b>56</b>
	<b>contexto da empresa</b>	
<b>5.1.2</b>	<b>Estudo de caso - dados relativos ao .....</b>	<b>58</b>
	<b>modelo da empilhadeira</b>	
5.2	ESTUDO DE CASO - ANÁLISE DE.....	59
	CONSUMO DE COMBUSTÍVEL	
5.3	ESTUDO DE CASO - ANÁLISE DE.....	59
	CUSTO COM COMBUSTÍVEL, ENERGIA E O&M	
<b>5.3.1</b>	<b>Estudo de caso - custos com combustível.....</b>	<b>59</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Estudo de caso - custos com energia.....</b>	<b>59</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Estudo de caso - custos com O&amp;M.....</b>	<b>60</b>
5.4	ESTUDO DE CASO - ANÁLISE DE.....	60
	CUSTOS ENTRE CENÁRIOS	
<b>5.4.1</b>	<b>Estudo de caso - cenário de <i>leasing</i>.....</b>	<b>60</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Estudo de caso - custos de aquisição.....</b>	<b>63</b>
<b>5.4.3</b>	<b>Estudo de caso – comparação entre cenários.....</b>	<b>65</b>
5.5	ESTUDO DE CASO - ANÁLISE ECONÔMICA.....	67
5.6	ESTUDO DE CASO – QUANTIFICAÇÃO.....	74
	DA EMISSÃO DE CO <sub>2</sub>	
5.7	ESTUDO DE CASO – ANÁLISE.....	75
	DO IMPACTO AMBIENTAL	
5.8	ESTUDO DE CASO – CONSIDERAÇÕES.....	77
	FINAIS DO CAPÍTULO	
<b>6</b>	<b>ANÁLISE DO USO DE EMPILHADEIRAS ELÉTRICAS PARA</b>	<b>79</b>
	<b>TRANSACIONAR ENERGIA</b>	
6.1	CONCEITUAÇÃO E BENEFÍCIOS.....	79
6.2	INFRAESTRUTURA.....	81
6.3	DESAFIOS.....	83
6.4	ANÁLISE DE POTENCIAL DO V2IND COM DADOS REAIS.....	85
<b>6.4.1</b>	<b>Economia por minimizar a multa de ultrapassagem de demanda</b>	<b>85</b>
<b>6.4.2</b>	<b>Economia por minimizar o consumo durante o horário de ponta</b>	<b>86</b>
<b>6.4.3</b>	<b>Economia total pelo uso de V2Ind</b>	<b>88</b>
6.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	89
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>90</b>
7.1	TRABALHOS FUTUROS.....	91
7.2	ARTIGOS PUBLICADOS.....	91
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>92</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Conforme o relatório de emissões 2023 do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, 2023), houve alta de 1,2% em nível global de emissões de dióxido de carbono entre 2021 e 2022. Nesse contexto, as preocupações ambientais crescentes e a necessidade de reduzir as emissões de carbono têm impulsionado a busca por soluções mais sustentáveis em vários setores (MATTOS, 2001; GUIMARÃES, 2021), principalmente na indústria (MORAES et al., 2023). Assim, eleva-se o interesse em adotar alternativas mais limpas e eficientes para operações de movimentação de cargas.

Uma opção promissora é a utilização de empilhadeiras elétricas, que podem oferecer benefícios significativos em termos de eficiência energética e redução de gases de efeito estufa (MORAES, 2022). Nesse sentido, em relação às empilhadeiras movidas a combustíveis fósseis, como diesel ou gás, as empilhadeiras elétricas não emitem poluentes atmosféricos durante a operação, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar em ambientes internos e apresentando-se como uma fonte de energia mais limpa e renovável (JUNIOR, 2015).

Novas tecnologias surgem de forma cada vez mais acelerada; a implementação, todavia, às vezes é vagarosa. No Brasil, as empilhadeiras elétricas, apesar dos aspectos tecnológicos frente aos modelos tradicionais, ainda são preteridas em parte das empresas. A maior barreira é a necessidade de uma compreensão mais profunda por parte dos tomadores de decisão nas empresas. Que conforme Júnior, Gomes e Bork (2015), apesar do alto valor de entrada de um modelo elétrico, este pode ser uma opção economicamente mais rentável que os modelos à combustão. No entanto, para amparar essa afirmação, são necessárias análises que possam fornecer respaldo a esse tipo de problemática.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho se propõe a elaborar uma metodologia capaz de realizar análise quanto à viabilidade técnica e econômica da substituição de modelos à combustão de empilhadeiras por versões elétricas.

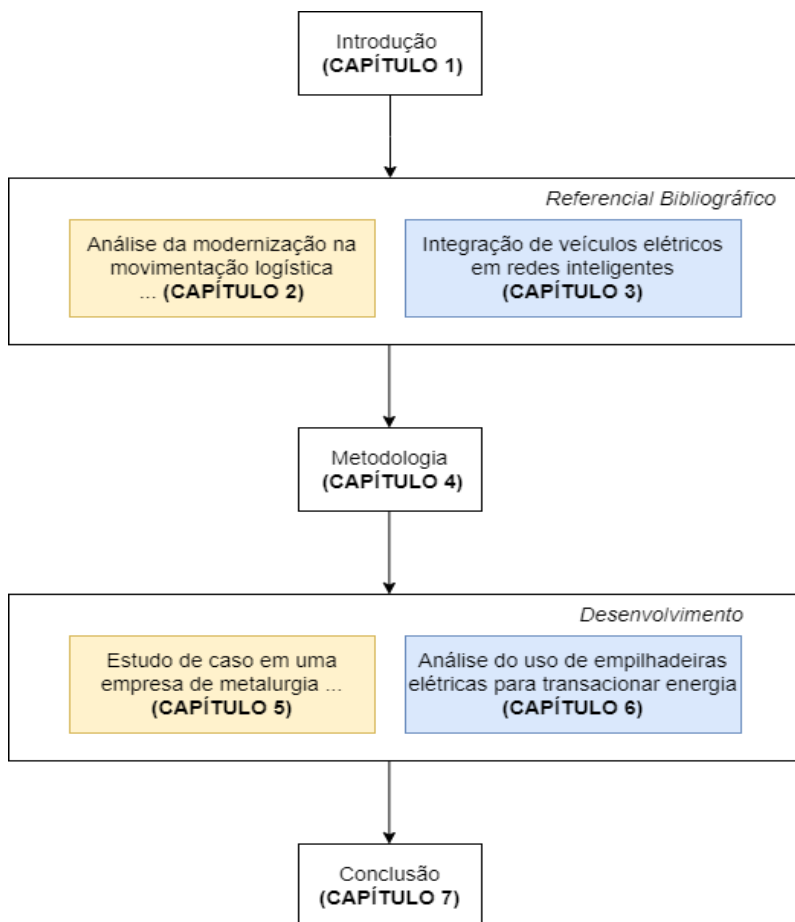
### 1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre os conceitos fundamentais pertinentes as empilhadeiras elétricas e ao transacionamento de energia por meio de veículos elétricos;
- Averiguar o custo de aquisição em comparação com a locação da frota de intra-logística;
- Prospectar o custo operacional de empilhadeiras tradicionais em comparação com modelos elétricos;
- Analisar o impacto econômico da troca de empilhadeiras à combustão por modelos elétricos;
- Promover uma análise de emissões de dióxido de carbono equivalente durante a operação de modelos à combustão e elétricos;
- Investigar o potencial das empilhadeiras elétricas como ferramentas ativas na transação de energia dentro do ambiente industrial.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para atingir os objetivos propostos, o presente trabalho foi estruturado em 5 capítulos, conforme ilustra-se mediante a Figura 1.

Figura 1 – Mapa da estrutura do documento



Fonte: (Autor, 2023).

No capítulo 2, realiza-se uma revisão sobre movimentação intralogística. Já no capítulo 3 apresenta-se uma revisão quanto a transacionamento de energia.

Depois, por meio do capítulo 4, estrutura-se os métodos de abordagem. No capítulo 5, é realizado um estudo de caso que analisa a viabilidade de substituir empilhadeiras à combustão por modelos elétricos.

Posteriormente, o capítulo 6 propõe o uso das empilhadeiras como unidades de armazenamento de energia que podem ser empregadas para transações energéticas. Por fim, são apresentadas as conclusões do trabalho.

## 2 ANÁLISE DA MODERNIZAÇÃO NA MOVIMENTAÇÃO LOGÍSTICA

Este capítulo visa explorar o estado da arte quanto a movimentação logística dentro do contexto industrial, com um enfoque especial no papel que as empilhadeiras desempenham nesse cenário.

### 2.1 MOVIMENTAÇÃO LOGÍSTICA

No âmbito industrial faz-se necessário o transporte de múltiplos itens, tais como mercadorias, insumos, ferramentas e equipamentos. Contudo, há cargas que não são possíveis ou não há eficiência em realizar o processo de locomoção apenas com força humana, portanto, demandado do amparo de uma assistência mecânica (TERUO; JUNIOR; OLIVEIRA, 2015). Nesse contexto, ganha destaque as empilhadeiras, as quais tratam-se de equipamentos que possibilitam o transporte de cargas de maneira facilitada, rápida e segura (SCHMIDT, 2019).

O aprimoramento de tecnologias e métodos de armazenamento e transporte torna-se cada vez mais eficiente. Assim, a avaliação e compreensão dos processos relacionados as boas práticas em todas as atividades de transporte, da recepção à gestão de estoque, são essenciais para vantagens competitivas. Afinal, um processo único pode conferir um diferencial competitivo a uma organização. A tecnologia permite às empresas melhorarem seus processos logísticos com diferentes métodos, agregando valor de tempo, qualidade e, principalmente, informações ao processo total (SANTOS et al., 2019).

Como as empresas buscam investir nessas questões para manter-se no mundo mercadológico e alçarem um melhor controle de seus processos, a produtividade tecnológica pode ser percebida no surgimento de novas ideias para melhorar a evolução nos serviços. O que aflora uma competição vantajosa entre as organizações no que tange a um serviço de qualidade e eficiente (LÉO; TELLO-GAMARRA, 2017).

Uma organização prospecta sucesso quando o produto chega em seu cliente no tempo e momento adequado, gerando percepção de seu valor (KATO, 2003). Dessa forma, as pesquisas feitas aos processos logísticos são de grande importância, onde inovações recentes têm trazido uma visão de novos horizontes de desempenho (SANTOS et al., 2019).

A área de logística pode ser considerada, conforme Rodrigues et al. (RODRIGUES et al., 2014), a força motriz das organizações. Uma vez que está incluso todas as macroatividades desde o suprimento, operações e integração por sistemas e máquinas eficientes. As referências de maquinários influenciam no processo de logística, haja vista que através de novas tecnológicas é possível reduzir o tempo e melhorar o fluxo de informações e produtos. Sendo que a gerência de maquinário tem sido essencial nas aplicações das operações logísticas devido a relação direta com a eficiência de combinar produtividade, inovação e tecnologia para gerar lucro (SANTOS et al., 2019).

## 2.2 EMPILHADEIRAS

Dentro da logística, há uma extensa gama de aplicações no que tange às empilhadeiras, tanto em contextos industriais como comerciais. Sendo as mesmas utilizadas para movimentação de todo tipo de materiais desde alimentos até peças metalúrgicas. Seu uso majoritário envolve movimentar cargas para embarque ou desembarque, movimentação de armazenagem ou ainda entre estações de trabalho para diferentes processos (GAINES; ELGOWAINY; WANG, 2008).

Para atender diferentes aplicações, há diferentes modelos de empilhadeiras. Os mais comuns são as transpaleteiras, as patoladas e as contrabalançadas. Nesse sentido, faz-se uso da Figura 2.

Figura 2 – Apresentação de diferentes tipos de empilhadeiras



Fonte: (Autor, 2023).

Á frente na imagem, há uma transpaleteira, que permite locomoção de carga no eixo horizontal. No meio, tem-se uma empilhadeira patolada, a qual possui além da capacidade de locomoção no eixo horizontal, também capacidade de elevação da carga. Por último, o modelo contrabalanceado é capaz de locomover cargas tanto no eixo horizontal quanto vertical mas com uma capacidade de carga elevada, na ordem de algumas toneladas.

Não obstante, é importante citar que há diferentes formas de suprir a necessidade energética de uma empilhadeira. Pois, a empilhadeira é uma ferramenta que soluciona o problema de trabalho com cargas pesadas através do movimento de giro de um motor e existem distintas formas de fornecer energia a esse motor. Embora uma grande variedade de dispositivos esteja disponível, a característica comum relevante é que se demanda de energia para mover os materiais (GAINES; ELGOWAINY; WANG, 2008). Nesse ínterim, as duas grandes categorias principais são as de empilhadeiras à combustão e modelos baseados em eletricidade. Sendo os modelos à combustão as versões clássicas enquanto as empilhadeiras elétricas são modelos envoltos a revoluções tecnológicas mais recentes.

### **2.2.1 Tecnologias de propulsão para empilhadeiras**

A utilização de empilhadeiras se dá com o intuito de movimentação de cargas, seja a nível do solo ou com capacidade de elevação no eixo vertical (Ministério do Trabalho e Emprego, 2016). Empilhadeiras à combustão têm diversos modelos e aplicações e isso também é verdade para modelos elétricos. Todavia, a grande diferença entre elas é sua fonte energética, em que para modelos elétricos tem-se a presença de um armazenador de energia elétrica, geralmente uma bateria, em conjunto com um motor elétrico.

Em meio à revolução industrial do século XVIII, a humanidade desenvolveu o funcionamento do primeiro motor a combustão interna de quatro tempos da história, o que foi um enorme avanço em relação aos motores à vapor existentes. Esse tipo de tecnologia, baseada em combustão interna, consolidou-se e estendeu-se até a atualidade como a principal força motriz em aplicações importantes, como na indústria e no setor de transportes (JÚNIOR, 2021).



Nesse contexto, as empilhadeiras com motores de combustão interna são divididas em dois principais grupos: as de motores de ignição por centelha, que são movidas por gasolina, propano ou gás natural comprimido, e as de motores de ignição por compressão, que são movidas a diesel (GAINES; ELGOWAINY; WANG, 2008). Além da diferença no método de queima e no tipo de combustível, as empilhadeiras com tecnologia de ignição por compressão apresentam maior potência do que as de ignição por centelha. No entanto, também emitem mais poluentes.

Já uma empilhadeira elétrica é um equipamento que permite deslocar uma carga, mas para isso demanda energia. A fonte escolhida nesses modelos costuma ser uma bateria, embora existam outros modelos, como por exemplo, células de hidrogênio. A bateria desempenha várias funções em uma empilhadeira. Primeiramente, fornece energia para o acionamento e o levantamento de cargas, além da possibilidade, em alguns casos, de receber energia regenerativa recuperada da frenagem (GAINES; ELGOWAINY; WANG, 2008). No contexto das empilhadeiras, existem dois modelos principais de baterias que se destacam: a bateria de chumbo ácido e a de íons de lítio.

A bateria de chumbo ácido é interessante devido a sua simplicidade de fabricação e ao fato de ser mais barata em comparação com outros modelos. Além disso, ela pode ser reciclada. No entanto, possui baixa densidade de energia, é pesada, apresenta desempenho reduzido em função da temperatura, requer manutenção periódica, possui um tempo de recarga mais longo e sofre de efeito memória.(TERUO; JUNIOR; OLIVEIRA, 2015).

Por outro lado, as baterias de íons de lítio têm sido amplamente utilizadas em segmentos que exigem alta densidade de energia, pois o lítio é um elemento altamente reativo, permitindo a liberação de grandes quantidades de energia mesmo em baterias pequenas e leves. Além disso, é importante mencionar que as baterias de íons de lítio não possuem efeito memória, apresentam a possibilidade de carga rápida e exigem pouca manutenção. No entanto, essas baterias ainda possuem uma complexidade significativa: o alto preço devido ao custo de fabricação.

No contexto das empilhadeiras elétricas, os modelos mais difundidos são equipados com baterias de chumbo-ácido, seguidos por baterias de íons de lítio. Outras tecnologias relacionadas a baterias, como níquel-cádmio (NiCd) e fosfato de ferro-lítio (LiFePO<sub>4</sub>), são menos prevalentes na indústria. No entanto, é importante ressaltar que as baterias não são a única forma de armazenamento de energia disponível.

Uma tecnologia alternativa aplicada em empilhadeiras elétricas é a geração de energia por meio de hidrogênio (GOLDENSTEIN; AZEVEDO, 2006). Embora o hidrogênio não seja uma forma direta de armazenar eletricidade, ele pode ser usado como um meio de armazenamento de energia. Nesse caso, o hidrogênio é gerado por meio de processos de eletrólise da água, utilizando uma fonte de energia. O hidrogênio gerado é armazenado e posteriormente utilizado para gerar eletricidade por meio de células de combustível.

As empilhadeiras de hidrogênio são equipamentos que utilizam células de combustível de hidrogênio para gerar eletricidade (LINARDI, 2014). O hidrogênio é armazenado em tanques pressurizados, geralmente na forma gasosa ou líquida. Quando a energia é necessária, o hidrogênio é direcionado para as células de combustível, onde ocorre uma reação química entre o hidrogênio e o oxigênio do ar, produzindo eletricidade que é utilizada para alimentar o motor elétrico da empilhadeira.

As perspectivas futuras para o uso de empilhadeiras de hidrogênio e outras tecnologias de armazenamento de energia são promissoras. Nos Estados Unidos já há mais de 25.000 empilhadeiras à hidrogênio em operação (LAMEIRAS, 2019). Todavia, a comercialização de tais empilhadeiras não é uma realidade no Brasil devido ao alto custo de aquisição. A medida que os desafios são superados, espera-se uma adoção mais ampla dessa tecnologia em diversos setores.

Em resumo, as empilhadeiras de hidrogênio e outras tecnologias de armazenamento de energia representam uma direção promissora para a transição global para uma economia mais sustentável e descarbonizada (MORAES, 2022). Com investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento, bem como políticas favoráveis, espera-se que essas tecnologias desempenhem um papel cada vez mais importante no cenário energético do futuro.

### **2.2.2 Análise de custo-benefício da adoção de empilhadeiras elétricas**

Um ponto importante a ser considerado é que as empilhadeiras tradicionais, tanto as de ignição por centelha quanto as de ignição por compressão, emitem gases tóxicos, o que requer controle de concentração para evitar riscos à saúde dos trabalhadores. Além disso, as empilhadeiras a combustão geram ruído e calor para o operador, e as empilhadeiras a gás apresentam maior risco de explosão. Além dos problemas de saúde, as emissões de gases também contribuem para o aquecimento global (MATTOS, 2001).

É válido mencionar a Norma Regulamentadora NR 11 (Ministério do Trabalho e Emprego, 2016), que destaca a necessidade de controle das emissões de gases tóxicos em locais fechados ou pouco ventilados, a fim de evitar concentrações acima dos limites permitidos. Esses limites são estabelecidos na NR 15, que trata das atividades e operações insalubres (Ministério do Trabalho e Emprego, 2019).

A opção por modelos elétricos também traz benefícios em termos de modernização da indústria. As empilhadeiras elétricas estão relacionadas ao desenvolvimento tecnológico e são frequentemente utilizadas em conjunto com técnicas de monitoramento de dados, o que aumenta a eficiência das operações e melhora os fluxos de trabalho. Além disso, as empilhadeiras elétricas apresentam menor vibração devido ao motor elétrico. Em comparação, os motores a combustão têm uma quantidade maior de peças móveis, o que resulta em maior necessidade de manutenção. Outro ponto é que há variação no desempenho da empilhadeira à combustão de acordo com a qualidade do combustível.

Uma vantagem das empilhadeiras elétricas é o menor consumo de energia, o que também as torna interessantes do ponto de vista econômico. De fato, conforme Júnior, Gomes e Bork (2015) levando em consideração os valores de compra, manutenção e consumo total de combustível, a empilhadeira elétrica é uma alternativa com menor custo total. Além disso, as empilhadeiras elétricas têm possibilitado ganhos de produtividade na ordem de 10%, contrabalanceando o investimento inicial e reduzindo o número de empregados nas operações específicas, o que contribui para uma melhor utilização da plataforma onde ocorrem diversas operações (SILVA, 1999).

O principal ganho econômico das empilhadeiras elétricas está na redução significativa do consumo de combustível. No entanto, seu custo de aquisição é maior. Basicamente, o investimento é pago ao longo do período de utilização da máquina. Portanto, quanto mais a empilhadeira for utilizada, mais rápido será o retorno do investimento. Isso significa que a análise financeira varia consideravelmente dependendo do contexto específico de uma organização. Da mesma forma, os custos de insumos, como gás, diesel e energia, também variam de acordo com a localização, o consumo e a capacidade comercial da empresa.

Nesse sentido, é de extrema importância realizar uma análise ambiental que leve em consideração os equipamentos utilizados, as horas de uso, os turnos de trabalho, os custos de insumos, as perdas durante a operação e outros fatores relevantes para obter uma avaliação precisa do custo total de operação e fazer a comparação entre os modelos a combustão e os modelos elétricos.

### 2.2.3 Infraestrutura de carregamento

Na operação de empilhadeiras elétricas, a infraestrutura de carregamento é crucial (ANTAS, 2012), incluindo:

- Estações de recarga equipadas com dispositivos apropriados.
- Infraestrutura elétrica, fornecendo e controlando a energia necessária.
- Sistemas de monitoramento para garantir recargas eficientes e seguras.
- Manutenção e suporte técnico regulares.

A infraestrutura deve ser bem planejada, considerando demanda de recarga, número de empilhadeiras, capacidade das baterias, tempo de recarga e de operação e segurança.

No cenário de transição para frotas elétricas, a infraestrutura de recarga deve expandir conforme as futuras demandas. Isso pode implicar em mais estações de recarga, maior capacidade elétrica ou soluções de recarga inteligente.

A adequada infraestrutura de recarga é vital para a eficácia das empilhadeiras elétricas, permitindo aproveitar ao máximo seus benefícios, como redução de emissões, economia de custos e melhoria da sustentabilidade.

Além disso, algumas empresas oferecem pacotes de leasing para empilhadeiras elétricas, funcionando de forma semelhante a um aluguel (VOIGT, 2022). Entretanto, que incluem infraestrutura de recarga e manutenção, fornecendo uma solução integrada para os clientes, simplificando a adoção de empilhadeiras elétricas.

### 2.2.4 Impacto ambiental

A adoção de empilhadeiras elétricas traz consigo diversos benefícios ambientais significativos, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e a melhoria da qualidade do ar (JÚNIOR; GOMES; BORK, 2015). Além disso, a adoção desses equipamentos também envolve considerações importantes relacionadas ao descarte e à reciclagem das baterias de íons de lítio, bem como seus impactos ambientais. A transição para uma matriz energética limpa também é um fator relevante a ser discutido.

Uma das principais vantagens das empilhadeiras elétricas em termos de impacto ambiental é a redução das emissões de gases de efeito estufa (MARTINS; MEDEIROS, 2011). Ao contrário das empilhadeiras movidas a combustíveis fósseis, as empilhadeiras elétricas não emitem gases nocivos durante sua operação (JUNIOR, 2015). A eletricidade utilizada para alimentar esses equipamentos pode

ser proveniente de fontes renováveis, como energia solar ou eólica, resultando em emissões zero durante o uso. Essa redução direta das emissões contribui para a mitigação das mudanças climáticas e para a melhoria da qualidade do ar nas áreas em que as empilhadeiras são utilizadas.

No entanto, é importante considerar o ciclo de vida completo das empilhadeiras elétricas (BOLOGNESI, 2021), incluindo o descarte e a reciclagem das baterias. Pois um descarte inadequado pode gerar impactos ambientais significativos. É crucial implementar políticas e práticas de reciclagem adequadas para minimizar o impacto negativo no meio ambiente. A reciclagem de baterias de íons de lítio permite a recuperação de materiais valiosos, como lítio, cobalto e níquel, reduzindo a dependência de recursos naturais e evitando a contaminação do solo e da água por materiais perigosos.

Além disso, a adoção de uma matriz energética limpa é fundamental para maximizar o potencial ambiental das empilhadeiras elétricas. Sendo que garantir que a eletricidade utilizada seja proveniente de fontes renováveis é crucial para alcançar uma pegada ambiental reduzida (VIANNA; GARCIA; SZANIECKI, 2019). Isso pode ser realizado por meio de parcerias com fornecedores de energia verde ou pela instalação de sistemas de geração de energia renovável no local, como painéis solares ou turbinas eólicas. Ao adotar essas práticas, as empresas podem garantir que a operação das empilhadeiras elétricas esteja alinhada com a busca por uma economia de baixo carbono e contribua para a sustentabilidade ambiental de longo prazo.

A adoção de empilhadeiras elétricas tem um potencial impacto ambiental positivo, relacionado a redução das emissões de gases de efeito estufa e na melhoria da qualidade do ar (JÚNIOR; GOMES; BORK, 2015). No entanto, é importante considerar o ciclo de vida completo desses equipamentos, incluindo o descarte e a reciclagem adequada das baterias. Além disso, a adoção de uma matriz energética limpa é fundamental para maximizar os benefícios ambientais. Com políticas e práticas adequadas, as empilhadeiras elétricas podem desempenhar um papel importante na transição para um futuro mais sustentável e descarbonizado (JUNIOR, 2015).

### 2.3 CONSIDERAÇÕES DE FECHAMENTO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, discutiu-se a importância crescente das empilhadeiras elétricas na indústria de movimentação de cargas, destacando-as como uma alternativa sustentável e com potencial menos poluente em comparação com as empilhadeiras a combustíveis fósseis.

### 3 INTEGRAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS EM REDES INTELIGENTES

Este capítulo aborda a integração de veículos elétricos (VEs) em redes de energia através de estratégias como *Vehicle-to-Grid* (V2G), *Vehicle-to-Building* (V2B) e *Vehicle-to-Home* (V2H). O transacionamento de energia surge como uma resposta direta às crescentes necessidades energéticas (CORREIA, 2016). Historicamente, a produção e consumo de energia eram processos linearmente definidos: usinas de energia produziam eletricidade, que era distribuída aos consumidores através de redes centralizadas (RODRIGUES, 2017). No entanto, com a evolução da tecnologia e a adoção de fontes renováveis, o panorama energético tornou-se substancialmente mais complexo e interconectado.

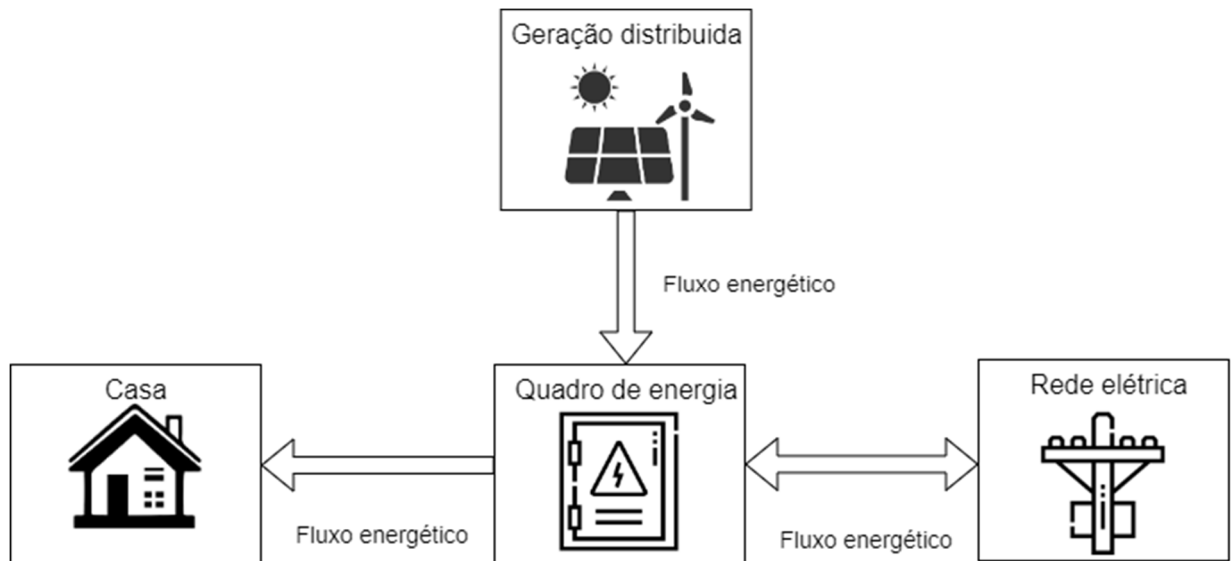
Em uma era onde residências possuem painéis solares, indústrias operam suas próprias turbinas eólicas e veículos elétricos circulam pelas ruas, a dinâmica do consumo e da geração de energia transformou-se profundamente. Nesse novo cenário, a capacidade de vender, comprar ou simplesmente armazenar energia torna-se importante.

O conceito vai além de apenas transferir energia de um ponto a outro. Ele engloba a ideia de uma rede energética inteligente (*smart grid*), onde cada participante, seja uma grande usina ou um simples veículo elétrico, pode atuar tanto como consumidor quanto como fornecedor (MEDEIROS et al., 2022). Esta rede flexível permite uma gestão mais eficaz dos recursos energéticos, otimizando o uso, minimizando desperdícios e, em última análise, reduzindo custos e impactos ambientais.

Particularmente no contexto brasileiro, uma virada significativa ocorreu em relação ao transacionamento de energia. Conforme estabelecido pela Resolução Normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) n482/2012, a partir de 17 de abril de 2012, os consumidores brasileiros obtiveram o direito de gerar sua própria energia elétrica usando fontes renováveis. Mais do que isso, eles passaram a ter a capacidade de fornecer seu excedente energético para a rede de distribuição local (MEGIER, 2020).

A Figura 3 apresenta o modelo de compensação de energia elétrica no Brasil. Quando a geração é menor que o consumo, a rede local supre a diferença. Quando a geração é superior ao consumo, a energia é injetada na rede gerando créditos de energia ao usuário.

Figura 3 – Ilustração do sistema de compensação de energia elétrica



Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2016).

### 3.1 PESQUISAS ACADÊMICAS CONVERGENTES

O campo do transacionamento de energia tem sido amplamente explorado em diferentes aspectos, desde a comercialização em mercados de eletricidade até a gestão de energia em ambientes residenciais. A dissertação de mestrado de Correia (2016) oferece uma abordagem multi-agente para a comercialização de energia renovável em mercados de eletricidade. Este estudo é interessante para entender as complexidades do moderno Mercado Multi-Agente de Eletricidade (MMAE).

Complementando a visão do MMAE, o trabalho de Medeiros (2022) foca na gestão de energia elétrica em ambientes residenciais. Esse estudo levanta a questão da crescente necessidade de Sistemas de Gerenciamento de Energia Residencial (SGER) eficientes, especialmente em casas equipadas com veículos elétricos.

Outra vertente da pesquisa em SGER é explorada por Yang (2021), que investiga o uso de Veículos Elétricos Híbridos Plug-in (PHEVs) como uma alternativa para armazenamento de energia. Este estudo é particularmente relevante para a resiliência energética em residências equipadas com geração solar fotovoltaica (PV).

O trabalho de Sattarpour e colaboradores (2018) aborda uma Estratégia de Gerenciamento de Energia Doméstica com Múltiplos Objetivos (MO-HEMS) que integra cargas controláveis e não controláveis, armazenamento de energia, e Geração Distribuída Fotovoltaica (GDF).

Na mesma linha, Zupančič e colaboradores (2020) exploram a operação integrada de VEs em SGERs. A pesquisa aponta para benefícios na operação do sistema de distribuição, sobretudo pela contribuição dos VEs como armazenamento móvel de energia.

O estudo de Solanke (2020) introduz o conceito de V2G, que tem o potencial de fornecer serviços ancilares à rede elétrica. Este conceito é corroborado pelo relatório de IRENA (2019), que sugere estratégias para a utilização eficiente dos VEs como armazenamento móvel, especialmente durante períodos em que estão estacionados.

Finalmente, a pesquisa de Megier (2020) e Correia (2022) expandem o âmbito de discussão para as redes elétricas inteligentes, focando, respectivamente, na transação *peer-to-peer* de energia elétrica e na integração de VEs e fontes renováveis através de algoritmos de gerenciamento V2B e *Building-to-Vehicle* (B2V).

### 3.2 DEFINIÇÕES DE CONCEITOS CHAVES

O transacionamento de energia envolve a compra, venda e troca de energia elétrica entre diversos agentes no ecossistema energético. Esta prática tem se tornado cada vez mais complexa devido à incorporação de tecnologias digitais e fontes renováveis, permitindo uma administração energética mais eficiente e sustentável.

As redes elétricas inteligentes representam uma inovação significativa neste contexto. Utilizam tecnologia da informação para monitorar e reagir automaticamente ao comportamento de fornecedores e consumidores. Este nível de automação melhora a eficiência, confiabilidade e sustentabilidade da produção e distribuição de eletricidade.

O termo "prosumidor", uma fusão das palavras "produtor" e "consumidor", sinaliza uma transformação nos modelos tradicionais de distribuição de energia. Os prosumidores não apenas consomem energia, mas também têm a capacidade de produzi-la, comumente através de fontes renováveis. Este novo agente torna a rede energética mais descentralizada e flexível.

A relevância dos prosumidores é amplificada com a incorporação de tecnologias como V2G, V2B e V2H, que permitem que veículos elétricos atuem como prosumidores dentro da rede elétrica (GAETE-MORALES et al., 2021; NADEEM et al., 2018).

Segundo Correia (2022), a integração crescente de fontes de energia renováveis e a transição para veículos elétricos são motivadas, em grande parte, por



preocupações ambientais. Contudo, essa mudança apresenta desafios significativos para a gestão das redes elétricas. Tecnologias como V2G e V2B, que utilizam fluxos bidirecionais de energia, veem a bateria do veículo elétrico como uma unidade de armazenamento flexível que pode mitigar o impacto desses desafios na rede elétrica (WU et al., 2020; ZAGRAJEK KRZYSZTOF; WRÓBLEWSKI, 2021).

### 3.2.1 V2G (Vehicle-to-Grid)

O princípio do V2G, também conhecido como "Veículo para a Rede", foi inicialmente introduzido por Amory Lovins e Willian Kempton, como referenciado em Solanke (2020). Esta nova abordagem sugere que a energia acumulada nas baterias de veículos elétricos pode ser redirecionada para a rede elétrica em momentos de elevada demanda, veja a Figura 4. Este aporte energético tem o potencial não apenas de equalizar variações na demanda da rede, mas também de fornecer serviços auxiliares cruciais, como a normalização de tensão e frequência. Consoante Medeiros (2022), o trabalho de Solanke (2020) salienta que, embora a energia proveniente do V2G possa ter um impacto limitado nos sistemas de geração e transmissão, sua administração eficaz pode conferir benefícios substanciais aos sistemas de distribuição de energia elétrica.



Fonte: Adaptado de (TAN; RAMACHANDARAMURTHY; YONG 2016).

A incorporação crescente de fontes renováveis de energia na rede elétrica, como a solar e a eólica, cuja produção é intermitente e não facilmente despachável, aumenta os desafios associados à administração equilibrada entre geração e consumo na rede. Utilizando estratégias de carregamento avançadas que permitem uma comunicação bidirecional entre o veículo e a rede elétrica, os veículos elétricos podem funcionar como cargas ajustáveis. Isso capitaliza sua flexibilidade e viabiliza transações energéticas entre o veículo e tanto a rede elétrica quanto edificações, por meio de sistemas V2G e V2B (CORREIA, 2022).

### 3.2.2 V2H (Vehicle-to-Home)

A tecnologia V2H consiste em utilizar a bateria do veículo elétrico como uma fonte de armazenamento de energia que pode ser retroalimentada para o sistema residencial quando necessário, a Figura 5 demonstra uma residencia com essa capacidade. Esta abordagem é especialmente relevante para casas equipadas com tecnologia de automação residencial e um Controlador de Energia Residencial (HEC, na sigla em inglês) (ZHAO; ARAVINTHAN, 2013). O HEC atua como um gerente inteligente de energia, controlando a operação de todos os aparelhos domésticos inteligentes, incluindo o veículo elétrico.



Fonte: (Autor, 2023).

Um dos benefícios do V2H é a capacidade de otimizar o uso de energia com base nos preços em tempo real. Quando os preços da energia estão baixos, o HEC pode direcionar o sistema para carregar a bateria do VE. Em contrapartida, durante períodos em que a energia está mais cara, o HEC pode interromper a compra de energia da rede e utilizar a bateria do VE para fornecer energia aos aparelhos domésticos, gerando assim uma economia significativa nos custos de energia para o usuário final.

Além da economia financeira, o V2H também tem potencial para fornecer resiliência energética em casos de emergência. Em situações de interrupção de energia, o VE pode agir como uma fonte temporária de energia, fornecendo eletricidade para funções críticas da casa, como iluminação e refrigeração.

### 3.2.3 V2B (Vehicle-to-Building)

Um sistema V2B, conforme apresentado na Figura 6, é frequentemente visto como uma versão mais simplificada e imediatamente implementável do V2G (PANG; DUTTA; KEZUNOVIC, 2011; OLIVARES et al., 2014). Operando em menor escala e permitindo fluxos bidirecionais de energia, o V2B possibilita a integração do veículo elétrico na gestão energética de edificações. Isso contribui para a assimilação de fontes de energia renováveis no local e na minimização dos custos associados. Essa

abordagem alinha-se bem com a crescente adoção de painéis solares em contextos residenciais e comerciais, que visam tanto o autoconsumo como a venda do excedente energético para a rede ou até mesmo leilões (CORREIA, 2022).



Fonte: Adaptado de (BUONOMANO, 2020).

Além de aplicações residenciais, a viabilidade do V2B é estudada em contextos como edifícios comerciais de grande escala e complexos universitários, onde é frequentemente incorporado em modelos de micro-redes. Uma micro-rede é basicamente uma instância de rede elétrica em escala reduzida, focada na gestão e coordenação local de diversas cargas, fontes de geração distribuída e sistemas de armazenamento energético. A administração localizada de recursos simplifica a implementação do conceito de *smartgrids* (OLIVARES et al., 2014), facilitando a transição para o modelo V2G.

### 3.2.4 Componentes e infraestrutura necessários para V2B

O desenvolvimento de uma solução V2B eficaz requer um conjunto de componentes e infraestruturas sofisticadas para assegurar a gestão eficiente da energia (IQBAL SHEE- RAZ; ABDELBAKY, 2020).

O primeiro e mais óbvio componente é um veículo elétrico, equipado com tecnologia que permite a recarga bidirecional. Isso possibilita não apenas o carregamento da bateria do veículo a partir da rede elétrica, mas também o fornecimento de energia de volta para o edifício ou a rede.

Os carregadores bidirecionais são essenciais para facilitar o fluxo de energia entre o VE e o edifício. Estes carregadores devem ser compatíveis com os padrões de carregamento relevantes (por exemplo, CHAdeMO, CCS, Tesla) e precisam ser capazes de se comunicar com o sistema de gerenciamento de energia do edifício.

Já o BEMS (Building Energy Management System) atua como o cérebro do sistema V2B. Ele monitora e controla a distribuição de energia no edifício, otimizando o uso e armazenamento de energia. O BEMS também pode se comunicar com a rede elétrica para receber sinais sobre tarifas de energia em tempo real.

Uma rede de comunicação é necessária para a transmissão de dados entre o VE, o carregador bidirecional e o BEMS. Isso geralmente é realizado através de uma conexão de internet segura, mas outras tecnologias de comunicação também podem ser empregadas.

Algoritmos de otimização e software de interface do usuário são cruciais para tornar o sistema V2B fácil de usar e eficiente em termos de energia. Eles ajudam na programação do carregamento e descarregamento com base nas necessidades do edifício e nas tarifas de energia em tempo real.

### 3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo explorou a dinâmica do transacionamento de energia, abordando os conceitos-chave, as principais topologias e componentes essenciais do sistema.

## 4 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo apresentar a metodologia adotada para o desenvolvimento do estudo. A estrutura metodológica abrange a análise de viabilidade econômica e ambiental na substituição de empilhadeiras a combustão por modelos elétricos, bem como a exploração do potencial dessas empilhadeiras elétricas na transação de energia em ambientes industriais. Esta abordagem serve como base para o estudo de caso subsequente e pode ser adaptada a outros contextos empresariais.

A análise de viabilidade fica estruturada em fases, sendo a primeira responsável pela definição dos parâmetros de entrada pertinentes para a análise, ou seja, na definição de quais dados serão intrinsecamente necessários para possibilitar uma comparação entre os possíveis cenários investigados. Na sequência, ou seja, na fase 2, analisa-se o consumo de combustível da empresa para uma determinação precisa da média de consumo de combustível, dado que será demasiadamente importante na sequência das fases.

Ademais, na fase 3 realiza-se os cálculos relativos ao custo com combustível, energia e com operação e manutenção (O&M) para o modelo de combustão atual e para modelos elétricos: chumbo ácido e íons de lítio. Na fase 4, será analisado comparações de custos entre cenários, refletindo sobre a estruturação dos gastos divididos entre capital, combustível e O&M.

Outrossim, na fase 5 realiza-se o cálculo de payback, comparando economicamente a viabilidade entre o modelo de combustão atual e seus pares elétricos, considerando tanto cenários de locação quanto de aquisição. Já na fase 6, trata-se do equacionamento do dióxido de carbono gerado através da queima de combustível estimado na fase anterior. Para na fase 7, ponderar quanto ao impacto ambiental da tomada de decisão. E com a informação levantada em todas as fases, realizar as considerações de fechamento da análise.

Além disso, a análise da utilização de empilhadeiras elétricas como ferramentas ativas para transações energéticas é outro foco deste trabalho. Nesse sentido, será apresetanda a ideia central de como as empilhadeiras podem ser utilizadas para transacionar energia, bem como os benefícios associados a essa abordagem. Em seguida, a infraestrutura necessária para tal implementação será detalhada. Posteriormente, será discutido os desafios inerentes a essa implementação. Por fim, os dados do estudo de caso serão utilizados para avaliar o potencial de redução de custos através dessa estratégia.

Com o fluxo lógico da análise agora estabelecido, é importante destacar que o capítulo 5 se dedicará à execução dos passos do estudo de caso voltado para a análise de viabilidade da substituição de empilhadeiras a combustão por modelos elétricos. Enquanto o capítulo 6 focará na análise relacionada ao transacionamento de energia. Já na sequência do atual capítulo, será detalhado cada fase da análise de viabilidade, elucidando as considerações técnicas necessárias para a execução de cada etapa.

#### 4.1 DADOS RELATIVOS AO CONTEXTO DA EMPRESA

Para efetuar todas as demais etapas apresentadas no fluxo metodológico é necessário antes dispor de algumas informações que são basilares para a execução dos cálculos. Tais dados podem ser divididos quanto a aspectos relativos as empilhadeira e quanto aos dados relativos ao contexto da empresa. A estruturação de quais dados são necessários, se deu com base nos valores de entrada das fases seguintes, sendo que sem os mesmos não poderia se dar a sequência do estudo.

##### 4.1.1 Dados relativos ao contexto da empresa

No que tangencia os dados quanto ao contexto da empresa é necessário saber o período de trabalho, ou seja, o número de horas por dia e de dias por ano que as empilhadeiras serão utilizadas. Além disso, é importante o preço comercial que a empresa consegue adquirir os combustíveis, ou seja, valor médio do GLP, do diesel, da gasolina e da energia elétrica, tanto da energia em si quanto da Tarifa do Uso do Sistema de Distribuição (TUSD). Não obstante, deve-se considerar o número de empilhadeiras avaliadas bem como o período total de análise, conforme apresenta a Tabela 1.

Tabela 1: Dados relativos ao contexto da empresa

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Período de trabalho diário:	Número de horas por dia (h/dia)
Dias úteis de trabalho anual:	Número de dias (dias)
Valor médio do gás:	Valor monetário em reais por quilograma (R\$/kg)
Valor médio do diesel:	Valor monetário em reais por litro (R\$/l)
Valor médio da energia ponta:	Valor monetário em reais por quilowatt-hora (R\$/kWh)
Valor médio de energia fora ponta:	Valor monetário em reais por quilowatt-hora (R\$/kWh)
Valor médio da TUSD ponta:	Valor monetário em reais por quilowatt-hora (R\$/kWh)
Valor médio da TUSD fora ponta:	Valor monetário em reais por quilowatt-hora (R\$/kWh)
Número de empilhadeiras consideradas:	Valor numérico (unidades)
Período total da análise:	Valor em anos

Fonte: (Empresa analisada, 2023).

#### 4.1.2 Dados relativos ao modelo da empilhadeira

No que tange aos dados derivados dos modelos de empilhadeiras, solicita-se informações relativas a versão baseada em combustível fóssil e também para versões elétricas, tanto de chumbo ácido quanto de íons de lítio. Sendo que o modelo a combustão escolhido para análise pode ser tanto de gasolina, diesel ou de gás liquefeito de petróleo, sendo esses os modelos com maior disponibilidade no mercado brasileiro. Com tais informações é possível efetuar análises entre a versão a combustão adotada pela empresa, em contraste a uma migração para um modelo elétrico.

Nesse contexto, os dados intrínsecos aos modelos dividem-se em duas categorias. A primeira classe diz respeito ao conjunto de dados que são encontrados nas especificações técnicas de cada empilhadeira, enquanto a outra parte refere-se aos valores comerciais para locação ou aquisição daquele equipamento.

Os valores comerciais dizem respeito a soma para aquisição do maquinário e ao dado do valor de locação mensal, constituindo assim a Tabela 2. Sendo esses dados suficientes para análise no caso de modelos a combustão. E no caso de modelos elétricos, se inclui o valor do carregador compatível e de uma bateria sobressalente no caso de Pb-acid.

Tabela 2: Dados comerciais das empilhadeiras

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Valor de locação mensal:	Valor monetário em reais (R\$)
Valor de aquisição:	Valor monetário em reais (R\$)

Fonte: (Empresa analisada, 2023).

Para modelos de chumbo ácido, deve-se considerar o valor de mais uma

bateria pois é necessário possibilitar a troca rápida quando a empresa possui demanda que necessita de tal agilidade. Haja vista que a recarga para modelos de chumbo ácido leva algumas horas, tempo que para muitas empresas é inadmissível ficar com o equipamento parado. De modo que é feita a troca por uma bateria totalmente carregada, a qual permite que a empilhadeira continue rodando enquanto a bateria descarregada recebe energia. O que não é necessário para empilhadeiras de íons de lítio que apresentam recarga rápida e não precisam obedecer a um ciclo regrado para carga e descarga, aproveitando-se do conceito de recarga de oportunidade.

Já no que tange aos dados de especificação técnica dos modelos, um dado comum, em partes, é o consumo médio. O que varia é qual o combustível que está sendo consumido. Para a quantificação, os fabricantes devem seguir a norma internacional do ciclo VDI, a qual possibilita avaliar o consumo médio de uma empilhadeira. Nesse sentido, apresenta-se a Tabela 3, sendo que os parâmetros com “\*” indicam que são dados relativos apenas aos modelos elétricos.

Tabela 3: Dados técnicos das empilhadeiras

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Modelo:	Modelo do fabricantes
Capacidade:	Valor em quilogramas (kg)
Consumo médio:	Litros (l/h) ou quilowatt-hora por hora (kWh/h)
*Parâmetro de tensão da bateria:	Valor em Volts (V)
*Parâmetro de carga elétrica da bateria:	Valor em Ampera-hora (Ah)

Fonte: (Empresa analisada, 2023).

Mediante a obtenção de tais dados, tem-se os parâmetros necessários para dar sequência as próximas fases. Ademais, os dados relativos ao cenário de uma empresa oscilam bastante de uma organização para outra. Além de que podem menear significativamente para uma mesma instituição em um pequeno espaço de tempo, por exemplo devido a oscilação do valor comercializado de determinado combustível. Contudo, realizando os ajustes quanto aos valores de entrada, pode-se atualizar todo o restante da análise, ressaltando um caráter generalista da metodologia, a qual pode ser aproveitada para vários estudos de viabilidade.

## 4.2 ANÁLISE DE CONSUMO DE COMBUSTÍVE

Para tal análise é necessário o conhecimento do consumo de combustível. Ou seja, no caso de empilhadeiras à gasolina ou a diesel ter-se o dado do consumo diário de litros de combustível. Já no caso de modelos a GLP, mensurar quantos quilogramas de gás são consumidos. Na realidade, as empilhadeiras



movidas a GLP apresentam um cilindro de P20, ou seja, um cilindro com capacidade de 20 quilos. Logo, é possível que a informação seja a de cilindro consumidos por mês. Para estimar o consumo basta aplicar a Equação 1, a qual multiplica a capacidade do cilindro em quilogramas para realizar a determinação.

$$\sigma_{GLP} = \sigma_{ci} \times 20 \quad (1)$$

Onde:

$\sigma_{GLP}$  = Consumo diário de gás liquefeito de petróleo (kg),

$\sigma_{ci}$  = Cilindros consumidos (unidades).

É possível que a empresa tenha o dado de consumo de combustível por empilhadeira. O que facilita bastante a análise, conforme equacionado acima, todavia, é ainda possível que o consumo de tal combustível seja dado em vários processos da empresa, de modo que haja apenas o consumo global total disponível. De toda forma, necessita-se do dado de consumo de combustível por empilhadeira para a continuidade da análise.

Uma alternativa possível, é utilizar-se do valor de período de trabalho diário informado nos dados de entrada do contexto da empresa e do consumo médio do modelo de empilhadeira. Assim, é possível aplicar a Equação 2, pela qual obtém-se o valor de consumo de combustível por dia.

$$\sigma_{dc} = \bar{\sigma}_m * T_{td} \quad (2)$$

Onde:

$\sigma_{dc}$  = Consumo diário de combustível (kg ou l),

$\bar{\sigma}_m$  = Consumo médio do modelo (kg/h ou l/h),

$T_{td}$  = Período de trabalho diário (h).

Na sequência, aplica-se a Equação 3:

$$\sigma_{hc} = \frac{\sigma_{dc}}{T_{td}} \quad (3)$$

Onde:

$\sigma_{hc}$  = Consumo horário de combustível (kg/h ou l/h),

$\sigma_{dc}$  = Consumo diário de combustível (kg ou l),

$T_{td}$  = Período de trabalho diário (h).

Pela qual determina-se o consumo horário de combustível.

### 4.3 ANÁLISE DE CUSTO COM COMBUSTÍVEL, ENERGIA E O&M

Nessa fase encontram-se os valores que compõe os custos com empilhadeiras para além do valor de capital para aquisição ou do dispêndio mensal na modalidade de locação já informados na entrada de dados. Ou seja, tratando dos valores pertinentes ao gasto com combustível para modelos a combustão e com energia nas versões elétricas e ainda os gastos com operação e manutenção.

#### 4.3.1 Custos com combustível

Por meio do dado de consumo de combustível bem como do custo com o valor de combustível, conhece-se o custo monetário com combustível. Para tal, basta aplicar a Equação 4, tal qual abaixo. Variando na análise o valor do diesel, da gasolina e do GLP para modelos a combustão.

$$\delta_{cht} = \sigma_{hc} * R\$_c \quad (4)$$

Onde:

$\delta_{cht}$  = Dispêndio de combustível por hora trabalhada (R\$/h),

$\sigma_{hc}$  = Consumo horário de combustível (kg/h ou l/h),

$R\$_c$  = Valor do combustível (R\$/kg ou R\$/l).

#### 4.3.2 Custos com energia

Quanto aos custos com energia, deve-se aplicar a Equação 5, na qual multiplica-se o valor médio do quilowatt hora pelo dado do consumo médio de quilowatt hora por hora e pelo fator de carga dividido pela eficiência do carregador.

$$\delta_{Eht} = \frac{(\bar{\delta}_{kWh} * \bar{\sigma}_{kWh/h} * \lambda)}{\eta_c} \quad (5)$$

Onde:

$\delta_{Eht}$  = Custo com energia por hora trabalhada (R\$/h),

$\bar{\delta}_{kWh}$  = Custo médio do quilowatt hora (R\$/kWh),

$\bar{\sigma}_{kWh/h}$  = Consumo médio de quilowatt hora por hora (kWh/h),

$\lambda$  = Fator de carga (adimensional),

$\eta_c$  = Eficiência do carregador (adimensional).

Chegando-se assim no valor de custo com energia por hora trabalhada.

### 4.3.3 Custos com O&M

Os custos com operação incidem tanto no cenário de leasing quanto no de aquisição. Entretanto, os dispêndios intrínsecos a manutenção, são absorvidos pela empresa locadora no contexto de leasing, pois ao oferecer o serviço de disponibilização logística o contrato é de um pacote completo para os clientes, o que inclui não apenas o empréstimo do equipamento, mas também a manutenção regular dele, desde que não seja decorrente de mau uso ou danos intencionais por parte do locatário.

No que tange a operação, os custos relativos à mão de obra são levantados com base no salário base informado nos dados de entrada, mais a soma dos encargos. Assim, aplica-se a Equação 6.

$$\delta_{ho} = \frac{(S_b + \delta_{INSS} + \delta_{FGTS} + \delta_{IRRF} + \delta_{VT}) + R\$13,00 * \delta_{tf}}{220h * 11} \quad (6)$$

$\delta_{ho}$  = Dispêndio horário com operador (R\$/h),

$S_b$  = Salário base (R\$),

$\delta_{INSS}$  = Dispêndio com Instituto Nacional do Seguro Social (R\$),

$\delta_{FGTS}$  = Dispêndio com Fundo de Garantia do Tempo de Serviço (R\$),

$\delta_{IRRF}$  = Dispêndio com Imposto de Renda Retido na Fonte (R\$),

$\delta_{VT}$  = Dispêndio com vale transporte (R\$),

$\delta_{tf}$  = Dispêndio com o terço de férias (R\$).

Ou seja, soma-se o salário do operador mais todos os encargos relacionados, incluindo o décimo terceiro salário e divide-se pelo número de horas que o operador trabalha no ano, ou seja, as 220 horas mensais, a jornada de trabalho mais comum no Brasil, multiplicado por 11 meses, já que em um dos meses o operador está de férias e não disponível para operar a empilhadeira. Para assim, encontrar o custo horário com o operador.

No que tange a manutenção, para os cenários de aquisição deve-se pontuar que há manutenção preventiva, preditiva e corretiva a ser considerada. Todavia, tais valores vão oscilar dependendo da operação diária, ou seja, da aplicação do equipamento, das condições do piso, do cuidado do operador e do período de utilização. Proporcionando uma flutuação elevada de valor para cada empresa.

Entretanto, um caminho para transpor tal problemática é o seguinte. Para empresas com empilhadeiras a combustão necessita-se mapear para um dado período o gasto com manutenção ao longo do tempo. Um aspecto positivo é que as

empresas de porte médio ou grande costumam contar com softwares de gestão que computam toda a questão dos dados referentes a entradas e saídas, sendo um exemplo desse tipo de aplicação o SAP, amplamente utilizado por empresas brasileiras.

Assim, é possível rever todos os gastos relativos a manutenção com determinado equipamento ao longo dos anos, levantando o gasto total para equipamentos a combustão. Realizando a divisão pelo período, conhece-se o gasto de modelos a combustão por hora trabalha.

Uma segunda alternativa, no caso de uma empresa não possuir tal histórico próprio é utilizar-se um dado médio. Uma possibilidade é seguir o parâmetro do Electric Power Research Institute (2023), o qual indica 2 \$/h como valor médio de O&M para empilhadeiras baseadas em combustão.

Tal valor trata-se de um dado americano, seria interessante um levantamento brasileiro, entretanto não se encontrou tal informação na bibliográfica nacional. Contudo, o dado serve como alternativa quando não há disponibilidade do histórico de custos através de softwares de gestão empresarial.

Com o valor de manutenção para equipamentos a combustão levantado, pode-se calcular a economia em caso de versões elétricas, pois é possível utilizar como referência o dado proveniente do EPRI que indica uma economia média de 37,5% para empilhadeiras elétricas em comparação com versões a combustão (INSTITUTE, 2023). Outra referência que utilizou como base os dados do instituto foi uma comparação analítica dos ganhos relativos a empilhadeiras elétricas (FIRSTENERGY, 2023). Assim, utilizando tal dado pode-se através do gasto do equipamento a combustão calcular o dispêndio com equipamentos elétricos. Para tal, apresenta-se a Equação 7.

$$\delta_{Mme} = \delta_{Mmc} * (1 - 0,375) \quad (7)$$

Onde:

$\delta_{me}$ : Dispêndio com manutenção para modelos elétricos (R\$/h),

$\delta_{mc}$ : Dispêndio com manutenção para modelos a combustão (R\$/h).

Através dessa equação percebe-se que para o gasto de modelos elétricos deve-se utilizar de entrada o gasto de modelos a combustão reajustados reduzindo a economia de 37,5%, tal qual indicado pelo EPRI.

Por tais considerações pode-se calcular de forma aproximada os gastos com O&M. Todavia, cabe pontuar que se trata de aproximações para fornecer um norte. Pois uma determinação exata e precisa tratar-se de um desafio demasiado

complexo para uma análise generalista, pois há muitas variáveis a serem observadas para cada cenário que conforme abordado anteriormente, sofrem oscilação a partir da aplicação da empilhadeira, da condição do piso, do zelo do operador e do período de utilização. Contudo, tal método apresentado é capaz de propor uma aproximação que auxilia na análise global, pois apesar do O&M tratar-se do pilar menos significativo da análise, impacta no resultado.

#### 4.4 ANÁLISE DE CUSTOS ENTRE CENÁRIOS

Nesta fase, será efetuada uma análise dos custos concernentes aos cenários, mediante uma ponderação da estruturação dos dispêndios dispostos entre o capital, o consumo energético e os custos de O&M. Para isso, propõe-se a elaboração de gráficos que permitirão visualizar de forma clara e objetiva as diferenças entre os custos dos diferentes modelos de empilhadeiras.

##### 4.4.1 Cenário de *leasing*

Para a análise inicial, será comparado o custo de locação de modelos de empilhadeiras a combustão e elétricas. Para uma melhor compreensão da dinâmica da análise, serão considerados apenas uma unidade de empilhadeira e o período de contrato. Sendo os gastos divididos em três componentes principais: leasing, consumo de combustível e O&M. Também, será apresentado o custo total, que permitirá uma análise mais completa e precisa dos gastos envolvidos na locação de cada tipo de empilhadeira.

Para realizar essa avaliação, o valor de leasing é estipulado mediante cotação, e multiplicado pelo número de meses do contrato, conforme a Equação 8.

$$\delta L_{1u-T} = \delta L_{1u} * (12 * T_{aa}) \quad (8)$$

Onde:

$\delta L_{1u-T}$  = Dispêndio com leasing para uma unidade no período total da análise (R\$),

$\delta L_{1u}$  = Dispêndio com leasing mensal para uma unidade (R\$/mês),

$T_{aa}$  = Período de anos da análise (an.).

Já o gasto com combustível foi obtido mediante o custo de combustível por hora trabalhada, multiplicado pelo período de trabalho diário e os dias úteis de trabalho relacionados ao contrato, conforme a Equação 9.

$$\delta C_{1u-T} = \delta_{cht} * T_{td} * T_{ta} * T_{aa} \quad (9)$$

Onde:

$\delta C_{1u-T}$  = Dispêndio com combustível para uma unidade no período total da análise (R\$),

$\delta_{cht}$  = Dispêndio de combustível por hora trabalhada (R\$/h),

$T_{td}$  = Período de trabalho diário (h),

$T_{ta}$  = Período de trabalho anual (d),

$T_{aa}$  = Período de anos da análise (an.).

De forma análoga, o dispêndio com energia foi obtido apenas substituindo o custo de combustível por hora trabalhada pelo custo de energia por hora trabalhada, conforme Equação 10.

$$\delta E_{1u-T} = \delta_{Eht} * T_{td} * T_{ta} * T_{aa} \quad (10)$$

Onde:

$\delta E_{1u-T}$  = Dispêndio com energia para uma unidade no período total da análise (R\$),

$\delta_{Eht}$  = Dispêndio de energia por hora trabalhada (R\$/h),

$T_{td}$  = Período de trabalho diário (h),

$T_{ta}$  = Período de trabalho anual (d),

$T_{aa}$  = Período de anos da análise (an.).

Enquanto os custos com O&M, conforme Equação 11, no caso de leasing, ficaram apenas a cargo do salário do operador de empilhadeira.

$$\delta O\&M_{L(1u-T)} = \delta_{ho} * T_{td} * T_{ta} * T_{aa} \quad (11)$$

Onde:

$\delta O\&M_{L(1u-T)}$  = Dispêndio com operação e manutenção no cenário de locação para uma unidade no período total da análise (R\$),

$\delta_{ho}$  = Dispêndio horário com operador (R\$/h),

$T_{td}$  = Período de trabalho diário (h),

$T_{ta}$  = Período de trabalho anual (d),

$T_{aa}$  = Período de anos da análise (an.).

Isso, pois na modalidade de leasing as empresas locatárias trabalham com o serviço da disponibilização logística como um todo e não apenas no empréstimo do equipamento, ficando responsáveis pelo gasto com manutenção, desde que não seja por mau uso do locador.

O custo total no cenário de locação pode ser calculado por meio da soma

do dispêndio com leasing, do dispêndio com combustível, para modelos à combustão, ou do dispêndio com energia, para modelos elétricos, e ainda do dispêndio com O&M.

Ou seja, no caso de modelos a combustão pode ser aplicado a Equação 12 e no caso de modelos elétricos a Equação 13.

$$\sum \delta L_{1u(\text{combustão})} = \delta L_{1u-T} + \delta c_{1u-T} + \delta O\&M_{L(1u-T)} \quad (12)$$

$$\sum \delta L_{1u(\text{elétrico})} = \delta L_{1u-T} + \delta E_{1u-T} + \delta O\&M_{L(1u-T)} \quad (13)$$

Onde:

$\sum \delta L_{1u(\text{combustão})}$  = Somatório de dispêndios no cenário de leasing para uma unidade de modelo à combustão (R\$),

$\delta L_{1u-T}$  = Dispêndio com leasing para uma unidade no período total da análise (R\$),

$\delta c_{1u-T}$  = Dispêndio com combustível para uma unidade no período total da análise (R\$),

$\delta O\&M_{L(1u-T)}$  = Dispêndio com operação e manutenção no cenário de locação para uma unidade no período total da análise (R\$),

$\sum \delta L_{1u(\text{elétrico})}$  = Somatório de dispêndios no cenário de leasing para uma unidade de modelo elétrico (R\$),

$\delta E_{1u-T}$  = Dispêndio com energia para uma unidade no período total da análise (R\$).

Assim, tem-se todos os valores para representação em gráfico de barra lado a lado dos diferentes modelos de empilhadeiras comparados no cenário de locação. Permitindo, uma visualização compacta das opções.

#### 4.4.2 Cenário de aquisição

O próximo passo, é realizar uma análise similar, mas considerando a comparação de custos para aquisição de uma empilhadeira. Nesse sentido, os custos com capital são substituídos do valor gasto com leasing para o dispêndio de aquisição. Nesse cenário, os custos com combustível e energia não se alteram, todavia de manutenção sim, que dessa vez fica como responsabilidade própria e pode ser calculado, mediante a aplicação da Equação 14.

$$\delta O\&M_{A(1u-T)} = (\delta_{ho} + \delta_{Mm}) \cdot T_{td} \cdot T_{ta} \cdot T_{aa} \quad (14)$$

Onde:

$\delta O\&M_{A(1u-T)}$  = Dispêndio com operação e manutenção no cenário de aquisição para uma unidade no período total da análise (R\$),

$\delta_{ho}$  = Dispêndio horário com operador (R\$/h),

$\delta_{Mm}$  = Dispêndio com manutenção do modelor (R\$/h),

$T_{td}$  = Período de trabalho diário (h),

$T_{ta}$  = Período de trabalho anual (d),

$T_{aa}$  = Período de anos da análise (an.).

O custo total no cenário de aquisição pode ser calculado por meio da soma do dispêndio com aquisição inicial, do dispêndio com combustível, para modelos à combustão, ou do dispêndio com energia, para modelos elétricos, e ainda do dispêndio com O&M.

Ou seja, no caso de modelos a combustão pode ser aplicado a Equação 15 e no caso de modelos elétricos a Equação 16.

$$\sum \delta A_{1u(\text{combustão})} = \delta A_{1u-T} + \delta C_{1u-T} + \delta O\&M_{A(1u-T)} \quad (15)$$

$$\sum \delta A_{1u(\text{elétrico})} = \delta A_{1u-T} + \delta E_{1u-T} + \delta O\&M_{A(1u-T)} \quad (16)$$

Onde:

$\sum \delta A_{1u(\text{combustão})}$  = Somatório de dispêndios no cenário de aquisição para uma unidade de modelo à combustão (R\$),

$\delta A_{1u-T}$  = Dispêndio com aquisição para uma unidade no período total da análise (R\$),

$\delta C_{1u-T}$  = Dispêndio com combustível para uma unidade no período total da análise (R\$),

$\delta O\&M_{A(1u-T)}$  = Dispêndio com operação e manutenção no cenário de aquisição para uma unidade no período total da análise (R\$),

$\sum \delta A_{1u(\text{elétrico})}$  = Somatório de dispêndios no cenário de aquisição para uma unidade de modelo elétrico (R\$),

$\delta E_{1u-T}$  = Dispêndio com energia para uma unidade no período total da análise (R\$).



Tal qual realizou-se para o modelo de leasing, tem-se todos os valores para representação em gráfico de barra lado a lado dos diferentes modelos de empilhadeiras comparados no cenário de aquisição. De modo que se tem a possibilidade de analisar de forma compacta os dados trabalhados.

#### **4.4.3 Comparação entre os cenários de leasing e aquisição**

Os valores dessas duas análises iniciais foram apresentados mediante gráficos em que se evidencia os valores que constituem o todo, conforme capital, combustível e O&M. Tais gráficos apresentam valores de menor ordem que podem ser mais bem compreendidos para uma análise inicial da dinâmica, por isso estão em função de uma única empilhadeira. Na sequência, atualiza-se os gráficos apenas multiplicando pelo número total de equipamentos consideradas para ter-se os valores absolutos.

Depois, utiliza-se todos os valores totais em comparação entre os modelos e entre os cenários. No caso, comparado gastos totais com modelo a combustão e elétricos para os cenários de locação e de aquisição. A partir dessas análises, será possível extrair informações valiosas sobre os custos envolvidos na locação e aquisição de empilhadeiras, bem como sobre as diferenças entre modelos a combustão e elétricos.

#### **4.5 ANÁLISE ECONÔMICA**

Nesta análise, inicialmente, realiza-se uma comparação dos custos entre as opções de adquirir ou alugar empilhadeiras. No caso da aquisição, é considerado o investimento inicial no ano 0. Para isso, multiplica-se o custo de aquisição pelo número de empilhadeiras necessárias. Nos anos seguintes, os gastos são calculados utilizando valores da seção 4.4. Portanto, subtrai-se o ano inicial e divide-se pelo número de anos analisados. Esse processo é aplicado aos diferentes modelos disponíveis.

Na análise de locação, o processo é semelhante, exceto que o custo de aquisição é excluído no ano 0. No entanto, durante todo o período, são adicionados os custos de leasing mencionados na seção 4.4 aos custos absolutos.

Com base nessas informações, é calculado o período de *payback* tanto para o cenário de aquisição quanto para o de locação. Ano após ano, é determinada a diferença entre os modelos a combustão e elétricos, permitindo estabelecer o fluxo de caixa e o retorno total do investimento ao longo do tempo. O *payback* é um

método de investimento que indica o tempo necessário para recuperar o valor investido. A fórmula do *payback* é representada pela Equação 17.

$$PB = \frac{I_0}{FCA} \quad (17)$$

Onde:

$PB$  = *Playback* (anos),

$I_0$  = Investimento inicial (R\$),

$FCA$  = Fluxo de caixa anual (R\$).

O investimento inicial é o valor total investido no projeto no ano 0, enquanto o fluxo de caixa anual é a quantia que o projeto gera ou economiza a cada ano, subtraída dos custos do projeto. Assim, o *payback* permite estipular a quantidade de anos necessários para o retorno do investimento. É importante ressaltar que o *payback* não leva em consideração o valor do dinheiro no tempo, nem outros fatores importantes como riscos, incertezas e oportunidades de reinvestimento. No entanto, é tradicionalmente utilizado como um forte indicador para auxiliar na tomada de decisão.

Dessa forma, é necessária uma análise mais aprofundada, considerando o capital disponível, outras oportunidades de investimento, sinergia com os objetivos da empresa e demais questões que competem à alta gerência para a tomada de decisão. Contudo, o *payback* é uma ferramenta importante para auxiliá-los nesse processo.

Outra parametro útil é o retorno sobre o investimento (ROI) que pode ser obtido mediante a Equação 18.

$$ROI = \frac{\text{Lucro Líquido}}{\text{Investimento Total}} * 100 \quad (18)$$

Onde:

ROI = *Return on investment*,

LL = Lucro líquido,

IT = Investimento total.

Sendo o ROI uma métrica financeira amplamente utilizada para avaliar a eficiência de um investimento ou para comparar a eficácia de diferentes investimentos (PANDEIA; KUMAR, 2022).

#### 4.6 QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>

A emissão de gases poluentes é responsável pela promoção do efeito

estufa. Por esse motivo, a redução da geração desses gases vem sendo cada vez mais posta em pauta. Portanto, é importante determinar o quanto um processo emite de CO<sub>2</sub>. Nesse contexto, um parâmetro pertinente é o fator de emissão, o qual trata-se de um indicador relacionado à quantidade de gases emitidos a partir da queima ou transformação de uma matéria-prima. Para essa pesquisa, considerou-se os valores de fator de emissão conforme a Tabela 4, que foi elaborada com base nos dados do Cálculo das Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) da Região Metropolitana de Campinas, conforme WayCarbon (2018).

Tabela 4: Dados quanto ao fator de emissão

<b>Matéria Prima</b>	<b>FECO<sub>2</sub></b>
Gás Liquefeito de Petróleo	63100 kg/TJ
Diesel	74100 kg/TJ
Gasolina	69300 kg/TJ

Fonte: Adaptado de WayCarbon (2018).

Outro parâmetro considerado é a capacidade calorífica da matéria prima. Sendo que se faz necessário uma ressalva nesse ponto. Há o dado tabelado de MJ/kg, o que é um valor final para GLP, entretanto para diesel e gasolina que são medidos em litros, faz-se necessário uma correção para MJ/l para facilitar a análise. Nesse sentido deve-se considerar a densidade operando o ajuste pela Equação 19.

$$C_l = C \times \rho \quad (19)$$

Onde:

$C_l$  = Capacidade calorífica por litro (MJ/l),

$C$  = Capacidade calorífica (MJ/kg),

$\rho$  = densidade (kg/l).

Dessa forma, considerando a densidade de 0,85 kg/l para diesel e de 0,77 kg/l para gasolina, ajusta-se de 42,5 MJ/kg e de 37,7MJ/kg para 36,1MJ/l e 29,0MJ/l respectivamente. Considerando ainda o dado de 46,6 MJ/kg para capacidade calorífica do GLP, chega-se à Tabela 5.

Tabela 5: Dados quanto a capacidade calorífica

<b>Matéria prima</b>	<b>Capacidade calorífica</b>
Gás liquefeito de petróleo:	46,6 MJ/kg
Diesel:	36,1 MJ/l
Gasolina:	29,0 MJ/l

Fonte: Adaptado de WayCarbon (2018).

Na sequência, necessita-se do volume de consumo da determinada matéria prima analisada. Tal dado, pode ser obtido por meio da Equação 20. Na qual, resgata-se o dado de consumo diário calculado no subcapítulo de análise do consumo de combustível, bem como realiza-se o ajuste para o número de empilhadeiras consideradas e no período da análise informa-se quantos dias estão sendo considerados no consumo.

$$\sigma_c = N_{ec} \times \sigma_{dc} \times T_a \quad (20)$$

Onde:

$\sigma_c$  = Consumo de combustível (kg ou l),

$N_{ec}$  = Número de empilhadeiras consideradas (unidades),

$\sigma_{dc}$  = Consumo diário de combustível (kg ou l),

$T_a$  = Período da análise (d).

Por meio desses parâmetros pode-se primeiramente encontrar a energia em joule associada ao consumo da matéria prima e a capacidade calorífica associada. Conforme verifica-se na Equação 21. Na qual, pontua-se que se a matéria prima for GLP utiliza-se a capacidade calorífica em MJ/kg enquanto se for diesel ou gasolina adota-se a capacidade calorífica em MJ/l.

$$E = \sigma_c \times C_x \quad (21)$$

Onde:

$E$  = Energia (MJ),

$\sigma_c$  = Consumo de combustível (kg ou l),

$C_x$  = Capacidade calorífica específica da matéria-prima (MJ/kg ou MJ/l).

Para assim, por meio da aplicação da Equação 22, em que se multiplica a energia pelo fator de emissão, conhecer o valor de emissão de CO<sub>2</sub> em quilogramas. Sendo necessário converter as unidades corretamente, no caso passando-se a energia para TJ de modo a ter-se a mesma base de unidade do fator de emissão, o que ao final resulta apenas em quilogramas de dióxido de

carbono equivalente.

$$CO2_{eq} = \frac{E}{10^6} \times FE_{CO2} \quad (22)$$

Onde:

$CO2_{eq}$  = Dióxido de carbono equivalente (kg),

$E$  = Energia (MJ),

$FE_{CO2}$  = Fator de emissão de dióxido de carbono (kg/TJ).

É importante pontuar que, no caso das empilhadeiras elétricas, também há a emissão de CO<sub>2</sub>, no caso durante o processo de geração da energia elétrica. Assim, é importante descontar do volume de CO<sub>2</sub> calculado para modelos à combustão do que é emitido para gerar energia para determinar a diferença de quanto CO<sub>2</sub> é evitado de ser produzido ao migrar de um modelo à combustão para elétrico.

Nesse contexto, a energia no Brasil é gerada de forma majoritária por hidroelétricas, seguida por termelétricas e posteriormente parques eólicos, além da energia solar que está em ascensão e demais fontes em menor escala. Assim, no caso de parques eólicos e usinas solares pode-se considerar a emissão como praticamente nula. Já hidroelétricas apesar de se tratar de fontes teoricamente limpas e renováveis geram um pouco de CO<sub>2</sub>, não durante a geração de eletricidade propriamente dita, mas pela decomposição da matéria orgânica da região inundada, contudo trata-se de um valor ínfimo comparado a termelétricas. Conforme Farret e Simões (2006) no caso de termoelétricas baseadas em gás tem-se a emissão 400 gCO<sub>2</sub>/kWh enquanto quando utiliza-se carvão tem-se 1160 gCO<sub>2</sub>/kWh.

Assim, é necessário avaliar a matriz de geração da distribuidora que fornece energia para determinar quanto de CO<sub>2</sub> é gerado para cada kWh, de modo a somar o valor total de dióxido de carbono emitido devido a energia utilizada na carga das empilhadeiras elétricas. Valor esse que deve ser abatido da geração de CO<sub>2</sub> por parte do modelo à combustão, de modo a fornecer uma comparação justa do volume de CO<sub>2</sub> evitado de ser emitido ao ambiente por realizar a troca de um modelo para outro. Todavia, nos casos em que a energia, em sua totalidade, proveniente de fontes renováveis, pode-se considerar a emissão de CO<sub>2</sub> para eletricidade nula.

#### 4.7 ANÁLISE DO IMPACTO AMBIENTAL

Além da análise dos custos envolvidos na locação e aquisição de empilhadeiras, é importante considerar o impacto ambiental dessas escolhas. A

adoção de equipamentos mais eficientes em termos de consumo energético e emissões de gases poluentes pode trazer benefícios significativos para o meio ambiente.

Nesse sentido, é importante avaliar as diferenças ambientais entre os modelos de empilhadeiras à combustão e elétricos, uma vez que esses apresentam características diferentes em relação ao uso de combustíveis e à emissão de gases poluentes.

A análise pode ser feita considerando as emissões de CO<sub>2</sub> emitidos pelos modelos de empilhadeiras em uso, bem como o consumo de energia elétrica e a geração de carbono associada para a geração dessa energia. Nesse sentido,

deve-se apresentar um primeiro gráfico em que se tem a geração de CO<sub>2</sub> relacionada a cada modelo em função do número de empilhadeiras rodando no período de contrato conforme período de trabalho diário.

Outrossim, as empresas geram emissões de CO<sub>2</sub> em suas atividades, tais emissões podem ser significativas e contribuir para o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, exacerbando o aquecimento global e seus efeitos negativos. Por isso, a compensação de CO<sub>2</sub> através do plantio de árvores se faz necessária. Haja vista o papel da flora na captura de carbono, que ocorre durante o processo de fotossíntese em que o CO<sub>2</sub> é utilizado, em conjunto com a energia do sol, para geração de açúcares e outros compostos orgânicos. Desse modo, o carbono é armazenado nas árvores, bem como no solo circundante, na forma de matéria orgânica.

Portanto, é interessante determinar o número de árvores necessário para compensar o volume de CO<sub>2</sub> gerado. Todavia, a quantidade de dióxido de carbono que uma árvore pode absorver varia bastante conforme sua espécie. Assim, nessa pesquisa utiliza-se o parâmetro de 163,14 kg de dióxido de carbono absorvido nos primeiros vinte anos de uma árvore considerando o bioma da mata atlântica conforme dados de bibliografia (MARTELLI et al., 2018), ressaltando que se trata de um valor médio.

Com tais considerações, para determinar a quantidade de árvores para captura do CO<sub>2</sub> gerado, deve-se aplicar a Equação 23. Na qual o CO<sub>2</sub> deve estar representado em quilogramas, sofrendo a divisão sobre o parâmetro relacionado a absorção de carbono também em quilogramas. De modo a encontrar o número de árvores como o quociente entre tais valores.

$$\Lambda = \frac{CO_{2eq}}{163,14} \quad (23)$$

Onde:

$\Lambda$  = Árvores

$CO_{2eq}$  = Dióxido de carbono equivalente (kg).

Vale pontuar que as árvores precisam de tempo para crescer e absorver carbono. Portanto, para sequestrar a quantidade de carbono considerada, as árvores precisam ser plantadas e mantidas por 20 anos para permitir seu desenvolvimento até o ponto em que tenham transformado o carbono absorvido gradualmente em matéria orgânica.

Com tal dado, pode ser elaborado um segundo gráfico para análise. O qual deve apresentar a quantidade de árvores para plantio que permita sequestro de carbono necessário para absorver o carbono gerado pelo processo logístico intrínseco a operação das empilhadeiras.

Com essa análise, é possível perceber os benefícios ambientais da adoção de um ou outro modelo. Sendo essa avaliação fundamental para que as empresas possam tomar decisões mais conscientes e responsáveis em relação ao meio ambiente.

#### 4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou a metodologia proposta que será utilizada para desenvolver o estudo de caso. Inicialmente, foram definidos os dados de entrada necessários para, em seguida, realizar análises sobre o consumo atual de combustível e a demanda de movimentação logística da empresa. Também foram realizados cálculos de custos com combustível e O&M, bem como de geração de gases poluentes. Ademais, foram detalhadas as análises de dispêndios para diferentes cenários, considerando tanto o impacto econômico quanto o aspecto ambiental envolvido na tomada de decisão. Mediante a aplicação de tal metodologia, possibilita-se uma análise ampla, que considera diversos aspectos relevantes, fornecendo subsídio para auxiliar a embasar uma tomada de decisão sobre a adoção ou não de um determinado modelo de empilhadeira. Além disso, também explicou-se a forma de abordagem para prospectar o potencial de utilização das empilhadeiras para transacionar energia.

## 5 ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA DE METALURGIA DA REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Esse capítulo estrutura a análise da viabilidade da substituição de modelos a combustão por equivalentes elétricos mediante a aplicação da metodologia abordada no capítulo anterior. Isso dado o cenário de uma metalúrgica gaúcha localizada na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul, a qual opta por não se identificar diretamente.

Sendo que para contextualização, cabe citar que se trata uma empresa de produção de diversas peças metálicas nos segmentos agrícola, rodoviário, automotivo e de construção. Outrossim, a mesma conta com mais de 3000 colaboradores, tais informações já demonstram que a demanda por movimentação logística é elevada. Haja vista a natureza da metalurgia em tais segmentos e o porte elevado da empresa.

### 5.1 ESTUDO DE CASO – DADOS DE ENTRADA

Para a realização da análise, é necessário um conjunto de dados que compreende tanto informações sobre o contexto da empresa quanto dados intrínsecos aos modelos de empilhadeiras em questão, conforme abordado na seção 4.1

#### 5.1.1 Estudo de caso – dados relativos ao contexto da empresa

Os dados relativos à empresa foram fornecidos por diferentes setores, tais como logística, expedição, engenharia corporativa e P&D. Por sua vez, as informações sobre os modelos foram obtidas a partir de uma cotação realizada com duas empresas prestadoras de serviço em janeiro de 2023. Uma das empresas já é a fornecedora atual de soluções logísticas.

Além disso, para garantir a melhor opção financeira, considerou-se o modelo mais atrativo e foram cotados tanto a aquisição quanto o *leasing* dos equipamentos. No modelo de locação, ambas as empresas prestadoras oferecem um serviço completo de logística, incluindo a manutenção das empilhadeiras, carregadores e baterias adicionais de *pitstop* para modelos com chumbo ácido. Esse pacote de serviços permite que a empresa contratante tenha todas as suas necessidades de movimentação logística associadas às empilhadeiras atendidas.

Para a análise dos modelos de empilhadeiras, serão considerados apenas os modelos de GLP, chumbo ácido e íons de lítio, conforme opção da



empresa. Como o modelo atual é o GLP, caso haja viabilidade, a empresa pode optar por migrar para modelos elétricos. Não se justifica, portanto, o esforço comercial para a cotação de modelos a diesel ou gasolina. Quanto ao contexto da empresa, apresenta-se a Tabela 6, a qual foi elaborada mediante dados fornecidos pela organização.

Tabela 6: Estudo de caso – dados quanto ao contexto da empresa

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Período de trabalho diário:	16 h/dia
Dias úteis de trabalho anual:	250 dias
Valor médio do gás:	5,75 R\$/kg
Valor médio da energia ponta:	255,61 R\$/kWh
Valor médio de energia fora ponta:	255,61 R\$/kWh
Valor médio da TUSD ponta:	780,45 R\$/kWh
Valor médio da TUSD fora ponta:	88,86 R\$/kWh
Número de empilhadeiras consideradas:	18 unidades
Período total da análise:	5 anos
Salário base:	R\$ 1.650,00

Fonte: (Dados fornecidos pela empresa, 2023).

É importante ressaltar que a empilhadeira de modelo GLP que está sendo cotada é a mesma que vem sendo utilizada pela empresa, sendo este uma possibilidade de renovação do contrato. De acordo com dados levantados pelo setor de expedição, cada empilhadeira consome em média dois cilindros de P20 por dia. Essa informação é relevante para avaliar os custos de O&M das empilhadeiras movidas a GLP. Outrossim, a empresa faz uso do software de gestão empresarial SAP, pelo qual computa todos seus gastos com manutenção com as empilhadeiras do modelo em análise, constando o valor médio de R\$ 7,00 por hora.

Outro dado que é válido ser feito um destaque é o do valor de energia por kWh. Veja, mediante os contratos de energia há diferentes valores para uso do sistema de distribuição e da energia de fato, inclusive a empresa possui contratos com empresas diferentes para cada. Ademais, o valor pago varia conforme a ponta ou fora ponta. Todavia, para tal análise considera-se que a gestão logística da empresa opta por não realizar a carga das baterias durante o horário de ponta. Tendo portanto como custo médio de energia ( $\delta$ kWh) em reais por quilowatt hora, a soma do valor médio da energia fora ponta e da TUSD fora ponta, ou seja: 0,35 R\$/kWh.

É importante destacar que o estudo se restringe especificamente a 18 empilhadeiras contrabalanceadas de 2,5 toneladas. Pois esse é o número de

empilhadeiras contrabalanceadas que a empresa possui em *leasing* e prospecta possibilidade de mudança.

### 5.1.2 Estudo de caso – dados relativos ao modelo da empilhadeira

Mediante cotação realizada obtém-se os seguintes dados, apresentado na Tabela 7, quanto ao modelo de GLP.

Tabela 7: Estudo de caso – dados quanto ao modelo de GLP

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Modelo:	HYSTER H50XT
Capacidade	2500 kg
Consumo médio de GLP:	2,5 kg/hora
Valor de locação mensal:	R\$ 5.735,00
Valor de aquisição:	R\$ 190.000,00

Fonte: (Cotação de mercado promovida pela empresa, 2023).

Já para chumbo ácido apresenta-se a Tabela 8.

Tabela 8: Estudo de caso – dados quanto ao modelo de Pb-acid

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Modelo:	HYSTER J2.5UT
Capacidade:	2500 kg
Parâmetro de tensão da bateria:	48 V
Parâmetro de carga elétrica da bateria:	600 Ah
Consumo médio de energia:	6,13 kWh/hora
Valor de locação mensal:	R\$ 7.995,90
Valor de aquisição:	R\$ 320.000,00

Fonte: (Cotação de mercado promovida pela empresa, 2023).

Por fim, para íons de lítio apresenta-se a Tabela 9.

Tabela 9: Estudo de caso – dados quanto ao modelo de LiPo

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Modelo:	EFG 425 G115 500DZ
Capacidade:	2500 kg
Parâmetro de tensão da bateria:	80 V
Parâmetro de carga elétrica da bateria:	592 Ah
Consumo médio de energia:	8,90 kWh/hora
Valor de locação mensal:	R\$ 17.200,00
Valor de aquisição:	R\$ 577.763,34

Fonte: (Cotação de mercado promovida pela empresa, 2023).

Com tais dados levantados, pode-se dar sequência as próximas fases.

## 5.2 ESTUDO DE CASO – ANÁLISE DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Para realizar a análise, utilizou-se como dado de entrada um levantamento interno da empresa, fornecido pelo setor de expedição, o qual aferiu a média de consumo como sendo de 2,5 quilogramas de GLP por hora rodada de empilhadeira

## 5.3 ESTUDO DE CASO – ANÁLISE DE CUSTO COM COMBUSTÍVEL, ENERGIA E O&M

A análise tem como objetivo identificar os gastos relacionados ao combustível, no caso de modelos a combustão, e aos custos de energia, no caso de baterias de chumbo-ácido ou íons de lítio, bem como os custos de operação e manutenção.

### 5.3.1 Estudo de caso – custos com combustível

Considerando que o consumo médio de GLP é de 2.5 kg/hora. Além disso, se apresenta o dado de custo do GLP como R\$5,75/kg. Possibilitando-se a aplicação da Equação 24:

$$\delta_{cht} = 2.5 \text{ kg/hora} * (\text{R}\$5,75/\text{kg}) = \text{R}\$14,38/\text{h} \quad (24)$$

Onde:

$\delta_{cht}$  = Dispendio de combustível por hora trabalhada (R\$/h).

Assim, determina-se o custo de combustível por hora trabalhada. Sendo nesse caso o de R\$14,38.

### 5.3.2 Estudo de caso – custos com energia

O custo de energia para chumbo ácido pode ser obtido por:

$$E_{\text{Eht(Pb-acid)}} = \frac{(6,13 \frac{\text{kWh}}{\text{h}} * 0,35 \frac{\text{R}\$}{\text{kWh}} * 1,05)}{0,92} = \text{R}\$2,41/\text{h} \quad (25)$$

Onde:

$E_{\text{Eht(Pb-acid)}}$  = Custo com energia por hora trabalhada para Pb-acid (R\$/h).

Já para íons de lítio tem-se que:

$$E_{\text{Eht(LiPo)}} = \frac{(8,90 \frac{\text{kWh}}{\text{h}} * 0,35 \frac{\text{R\$}}{\text{kWh}} * 1,05)}{0,92} = \text{R\$}3,50/\text{h} \quad (26)$$

Onde:

$E_{\text{Eht(LiPo)}}$  = Custo com energia por hora trabalhada para LiPo (R\$/h).

### 5.3.3 Estudo de caso – custos com O&M

Para determinação do dispêndio horário com operador calcula-se:

$$\delta_{ho} = \frac{(\text{R\$}1.650 + \text{R\$}132 + \text{R\$}132 + \text{R\$}0,99) + \text{R\$}13,00 * \text{R\$}550,00}{220\text{h} * 11} = \text{R\$}11,04/\text{h} \quad (27)$$

Onde:

$\delta_{ho}$  = Dispêndio horário com operador (R\$/h),

Enquanto o dispêndio horário de manutenção foi informado pelo setor de logística da empresa analisada como sendo de R\$7,00/h. Já para modelos elétricos calcula-se:

$$\delta_{ho} = \text{R\$}7,00 * (1 - 0,375) = \text{R\$}4,38/\text{h} \quad (28)$$

Onde:

$\delta_{Mme}$  = Dispêndio com manutenção para modelos elétricos (R\$/h).

De modo que se constata o valor de R\$ 4,38 por hora com gastos de manutenção para modelos elétricos.

Assim, obtém-se os valores relevantes para análise de O&M relacionada a operação das empilhadeiras.

## 5.4 ESTUDO DE CASO – ANÁLISE DE CUSTOS ENTRE CENÁRIOS

Nesta fase, será efetuada uma análise comparativa dos custos concernentes aos cenários, mediante uma ponderação da estruturação dos dispêndios dispostos entre o capital, o consumo energético e os custos de O&M.

### 5.4.1 Estudo de caso - cenário de *leasing*

Considerando primeiro uma única empilhadeira e o cenário de *leasing*, multiplica-se o custo da locação pelo número de meses do contrato:

$$\delta_{L_{(1u-T)(GLP)}} = (\text{R\$}5.735,00)/\text{mês} * (12 * 5 \text{ anos}) = \text{R\$}344.100,00 \quad (29)$$

$$\delta_{L_{(1u-T)(Pb-acid)}} = (\text{R\$}7.999,90)/\text{mês} * (12 * 5 \text{ anos}) = \text{R\$}479.754,00 \quad (30)$$

$$\delta_{L(1u-T)(LiPo)} = (R\$17.200,00)/\text{mês} * (12 * 5 \text{ anos}) = R\$1.032.000,00 \quad (31)$$

Onde:

$\delta_{L(1u-T)(GLP)}$  = Dispêndio com *leasing* para uma unidade de GLP no período total da análise (R\$),

$\delta_{L(1u-T)(Pb-acid)}$  = Dispêndio com *leasing* para uma unidade de Pb-acid no período total da análise (R\$),

$\delta_{L(1u-T)(LiPo)}$  = Dispêndio com *leasing* para uma unidade de LiPo no período total da análise (R\$).

Na sequência o gasto com combustível/energia foi obtido adequando os custos horários para o período de contrato:

$$\delta_{C(1u-T)(GLP)} = (R\$14,38)/h * 16h * 250 * 5 = R\$287.500,00 \quad (32)$$

$$\delta_{E(1u-T)(Pb-acid)} = (R\$2,41)/h * 16h * 250 * 5 = R\$48.199,59 \quad (33)$$

$$\delta_{E(1u-T)(LiPo)} = (R\$3,50)/h * 16h * 250 * 5 = R\$69.979,83 \quad (34)$$

Onde:

$\delta_{C(1u-T)(GLP)}$  = Dispêndio com combustível para uma unidade de GLP no período total da análise (R\$),

$\delta_{E(1u-T)(Pb-acid)}$  = Dispêndio com energia para uma unidade de Pb-acid no período total da análise (R\$),

$\delta_{E(1u-T)(LiPo)}$  = Dispêndio com energia para uma unidade de LiPo no período total da análise (R\$).

Repetiu-se o processo para O&M:

$$\delta_{O\&M_{L(1u-T)(GLP)}} = (R\$11,04)/h * 16h * 250 * 5 = R\$220.818,18 \quad (35)$$

$$\delta_{O\&M_{L(1u-T)(Pb-acid)}} = (R\$11,04)/h * 16h * 250 * 5 = R\$220.818,18 \quad (36)$$

$$\delta_{O\&M_{L(1u-T)(LiPo)}} = (R\$11,04)/h * 16h * 250 * 5 = R\$220.818,18 \quad (37)$$

Onde:

$\delta_{O\&M_{L(1u-Tt)(GLP)}}$  = Dispêndio com operação e manutenção no cenário de *leasing* para uma unidade de GLP no período total da análise (R\$),

$\delta_{O\&M_{L(1u-Tt)(Pb-acid)}}$  = Dispêndio com operação e manutenção no cenário de *leasing* para uma unidade de Pb-acid no período total da análise (R\$),

$\delta_{O\&M_{L(1u-Tt)(LiPo)}}$  = Dispêndio com operação e manutenção no cenário de *leasing* para uma unidade de LiPo no período total da análise (R\$).

Através de tais dados, apresenta-se a Tabela 10.

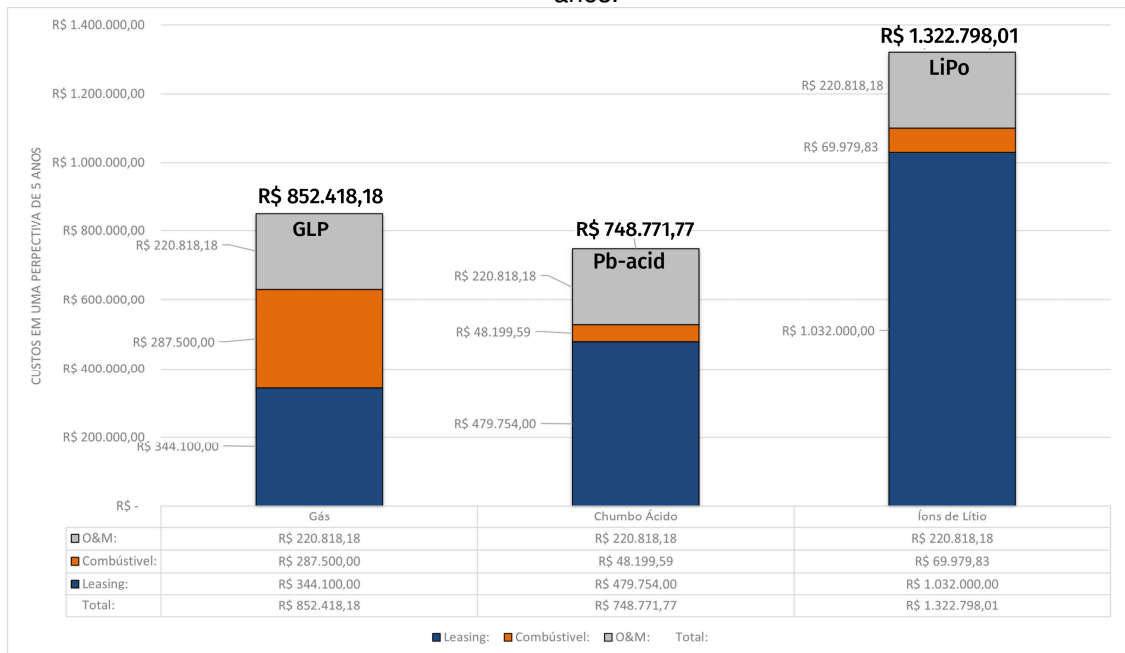
Tabela 10: Estudo de caso - dados quanto ao custo com uma unidade em 5 anos na modalidade de *leasing*.

	<b>GLP (<i>Leasing</i>)</b>	<b>Pb-acid (<i>Leasing</i>)</b>	<b>LiPo (<i>Leasing</i>)</b>
Capital	R\$ 344.100,00	R\$ 479.754,00	R\$ 1.032.000,00
Combustível/Energia	R\$ 287.500,00	R\$ 48.199,59	R\$ 69.979,83
O&M	R\$ 220.818,18	R\$ 220.818,18	R\$ 220.818,18
<b>Total</b>	<b>R\$ 852.418,18</b>	<b>R\$ 748.771,77</b>	<b>R\$ 1.322.798,01</b>

Fonte: (Autor, 2023).

Por meio dela, organiza-se os valores de capital, combustível/energia, O&M e ainda os totais relacionados a cada um dos modelos. Ou seja, gás liquefeito de petróleo, chumbo ácido e íons de lítio. Suplementar a isso, apresenta-se o resultado mediante a Figura 7.

Figura 7: Comparação de custos para *leasing* de uma empilhadeira de 2,5 toneladas no período de 5 anos.



Fonte: (Autor, 2023).

Assim, fica claro que o custo total de LiPo é muito superior ao dos demais modelos. Entretanto, ao comparar-se GLP e Pb-acid nota-se que apesar do dispêndio de capital (em azul) ser superior nos modelos de chumbo ácido, a economia relacionada a troca de combustível para eletricidade (em laranja) compensa o cenário, performando um custo total inferior ao modelo de combustão.

### 5.4.2 Estudo de caso - cenário de aquisição

Mudando a perspectiva para aquisição, reapresenta-se o custo com capital:

$$\delta_{A(1u-Tt)(GLP)} = \text{R\$ } 190.000,00 \quad (38)$$

$$\delta_{A(1u-Tt)(Pb-acid)} = \text{R\$ } 320.000,00 \quad (39)$$

$$\delta_{A(1u-Tt)(LiPo)} = \text{R\$ } 190.000,18 \quad (40)$$

Onde:

$\delta_{A(1u-Tt)(GLP)}$  = Dispêndio de aquisição de uma empilhadeira de GLP (R\$),

$\delta_{A(1u-Tt)(Pb-acid)}$  = Dispêndio de aquisição de uma empilhadeira de Pb-acid (R\$),

$\delta_{A(1u-Tt)(LiPo)}$  = Dispêndio de aquisição de uma empilhadeira de LiPo (R\$),

Os custos com combustível e energia não se alteram, todavia de O&M sim, conforme evidencia-se abaixo:

$$\delta_{O\&M_{A(1u-T)(GLP)}} = (\text{R\$}11,04 + \text{R\$}7,00)/h * 16h * 250 * 5 = \text{R\$}360.800,00 \quad (41)$$

$$\delta_{O\&M_{A(1u-T)(Pb-acid)}} = (\text{R\$}11,04 + \text{R\$}7,00)/h * 16h * 250 * 5 = \text{R\$}360.800,00 \quad (42)$$

$$\delta_{O\&M_{A(1u-T)(LiPo)}} = (\text{R\$}11,04 + \text{R\$}7,00)/h * 16h * 250 * 5 = \text{R\$}360.800,00 \quad (43)$$

Onde:

$\delta_{O\&M_{A(1u-T)(GLP)}}$  = Dispêndio com operação e manutenção no cenário de aquisição para uma unidade de GLP no período total da análise (R\$),

$\delta_{O\&M_{A(1u-T)(Pb-acid)}}$  = Dispêndio com operação e manutenção no cenário de aquisição para uma unidade de Pb-acid no período total da análise (R\$),

$\delta_{O\&M_{A(1u-T)(LiPo)}}$  = Dispêndio com operação e manutenção no cenário de aquisição para uma unidade de LiPo no período total da análise (R\$).

Mediante esses dados, gera-se a Tabela 11.

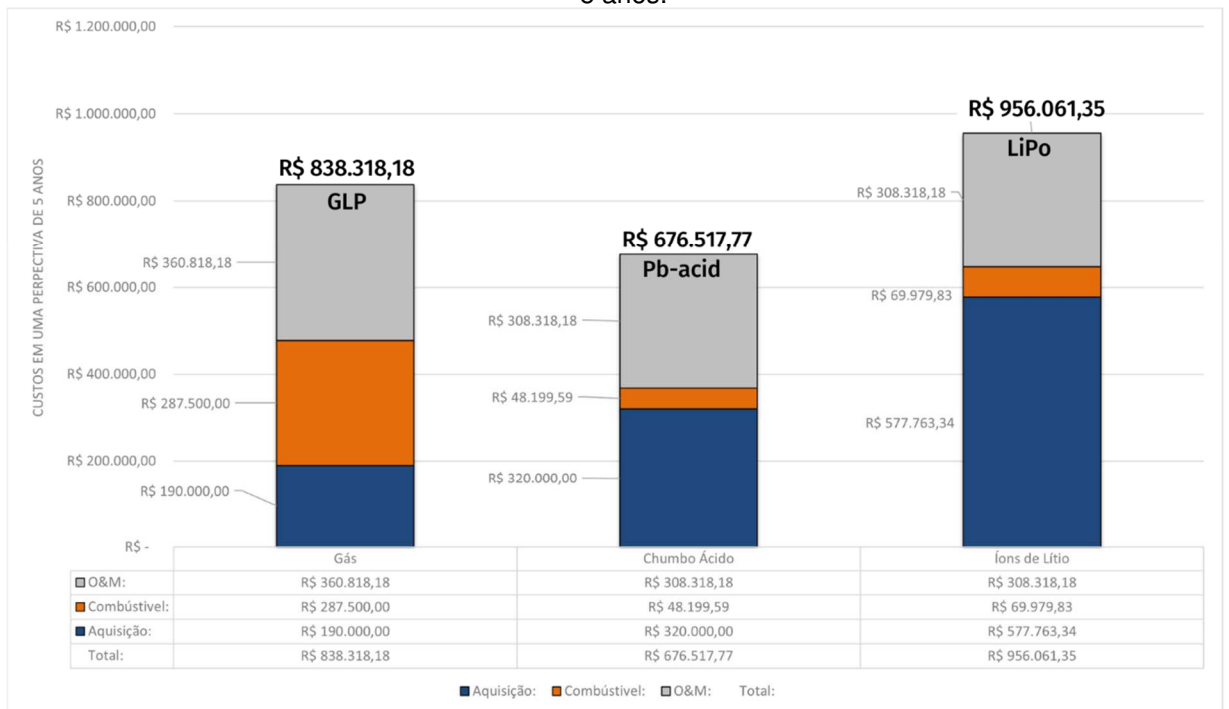
Tabela 11: Estudo de caso - dados quanto ao custo com uma unidade em 5 anos na modalidade de aquisição.

	<b>GLP (Aquisição)</b>	<b>Pb-acid (Leasing)</b>	<b>LiPo (Leasing)</b>
Capital	R\$ 190.000,00	R\$ 320.000,00	R\$ 577.763,34
Combustível/Energia	R\$ 287.500,00	R\$ 48.199,59	R\$ 69.979,83
O&M	R\$ 360.818,18	R\$ 308.318,18	R\$ 308.318,18
<b>Total</b>	<b>R\$ 838.318,18</b>	<b>R\$ 676.517,77</b>	<b>R\$ 956.061,35</b>

Fonte: (Autor, 2023).

Na qual apresenta-se os valores de capital, combustível/energia e O&M, bem como totais relacionados a cada um dos modelos. Novamente, gera-se uma imagem, no caso a Figura 8.

Figura 8: Comparação de custos para aquisição de uma empilhadeira de 2,5 toneladas no período de 5 anos.



Fonte: (Autor, 2023).

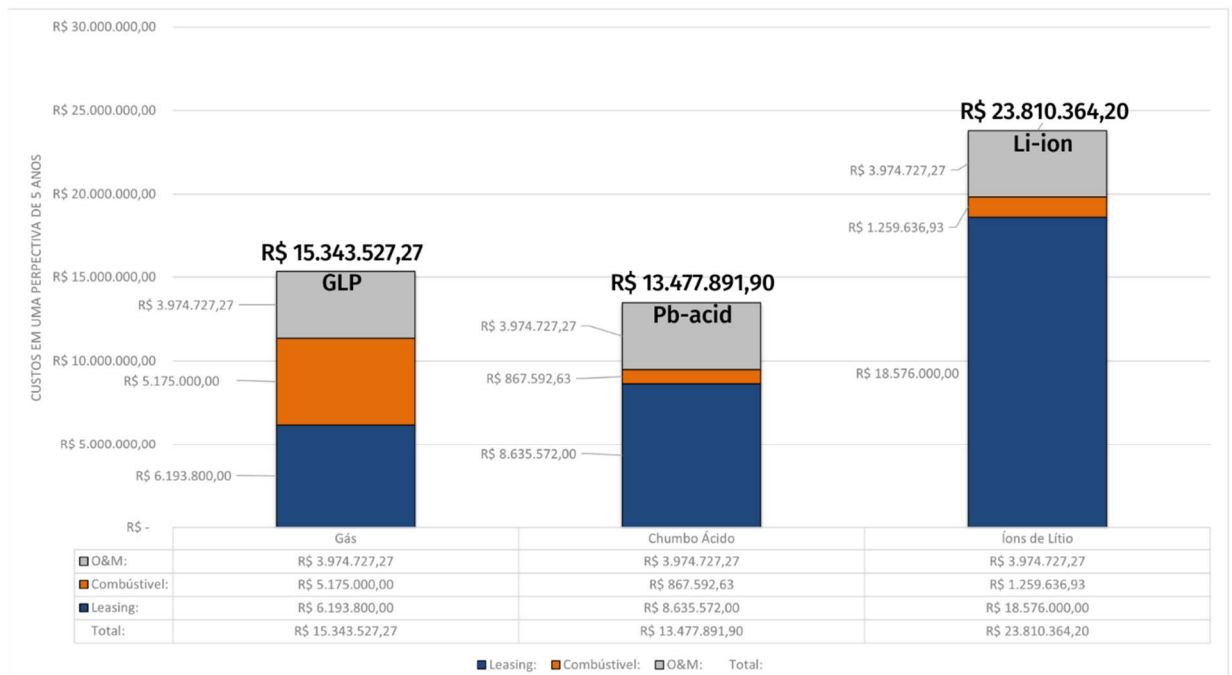
Nesse contexto, a diferença de LiPo para GLP decai consideravelmente em relação ao cenário de *leasing*, todavia permanece mais caro o modelo baseado em íons de lítio. Enquanto Pb-acid se mantém como a opção com melhor desempenho haja vista a economia quanto à redução de dispêndio com combustível e em menor escala com O&M (em cinza), compensando o maior custo com capital.



### 5.4.3 Estudo de caso – comparação entre cenários

Com a análise de locação e aquisição de uma empilhadeira pode-se verificar a dinâmica de variação dos valores e as respectivas fórmulas utilizadas. Na sequência, é interessante corrigir a análise para as 18 empilhadeiras consideradas na análise. Chegando-se a Figura 9 e a Figura 10.

Figura 9: Comparação de custos para *leasing* de 18 empilhadeiras de 2,5 toneladas no período de 5 anos.

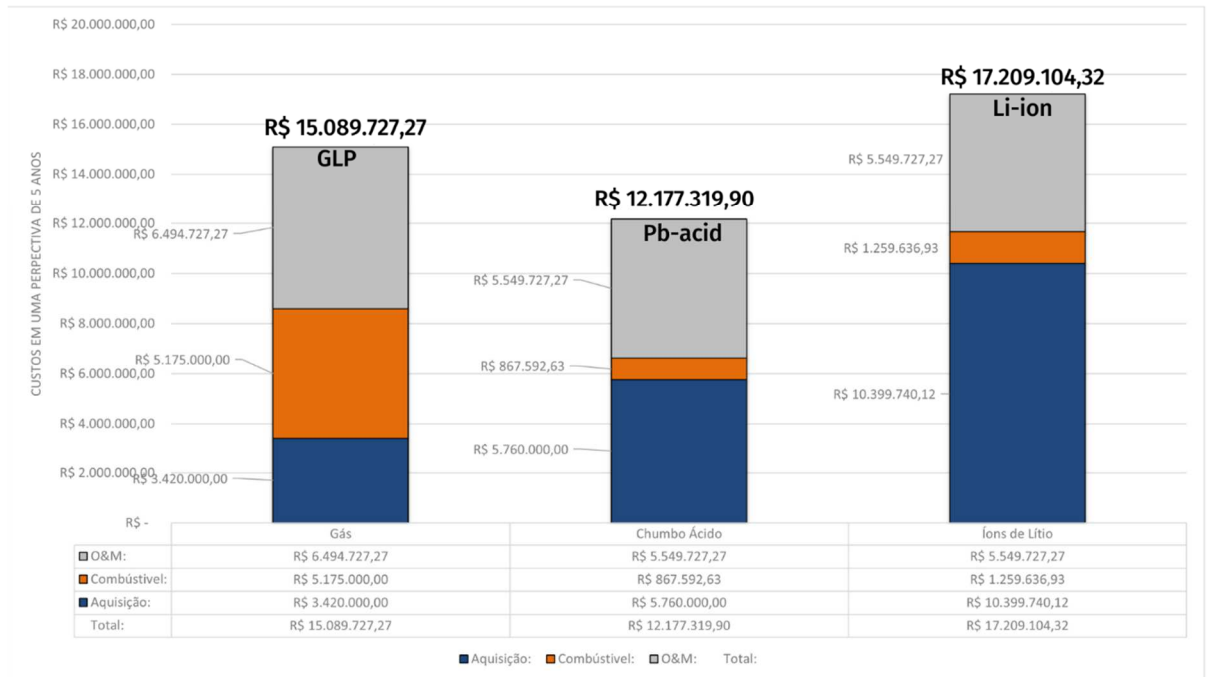


Fonte: (Autor, 2023).

Por meio da Figura 9 nota-se que a dinâmica é a mesma que no caso de uma empilhadeira, mas obtém-se as comparações com os valores absolutos. Nesse sentido, no caso de locação tem-se que para GLP um custo de R\$ 3.974.727,27 com O&M, R\$ 5.175.000,00 com combustível e R\$ 6.193.800,00 com leasing totalizando R\$ 15.343.517,27. Para Pb-acid tem-se um custo de R\$ 3.974.727,27 com O&M, R\$ 867.592,63 com energia e R\$ 8.635.572,00 com leasing totalizando R\$ 13.477.981,90. Já para LiPo tem-se um custo de R\$ 3.974.727,27 com O&M, R\$ 1.259.636,93 com combustível e R\$ 18.576.000,00 com leasing totalizando R\$ 23.810.638,20.

De forma similar, por meio da Figura 10, também se percebe que dinâmica se repete para 18 empilhadeiras assim como para uma, mas obtém-se as comparações com os valores absolutos para o cenário de aquisição.

Figura 10: Comparação de custos para aquisição de 18 empilhadeiras de 2,5 toneladas no período de 5 anos.

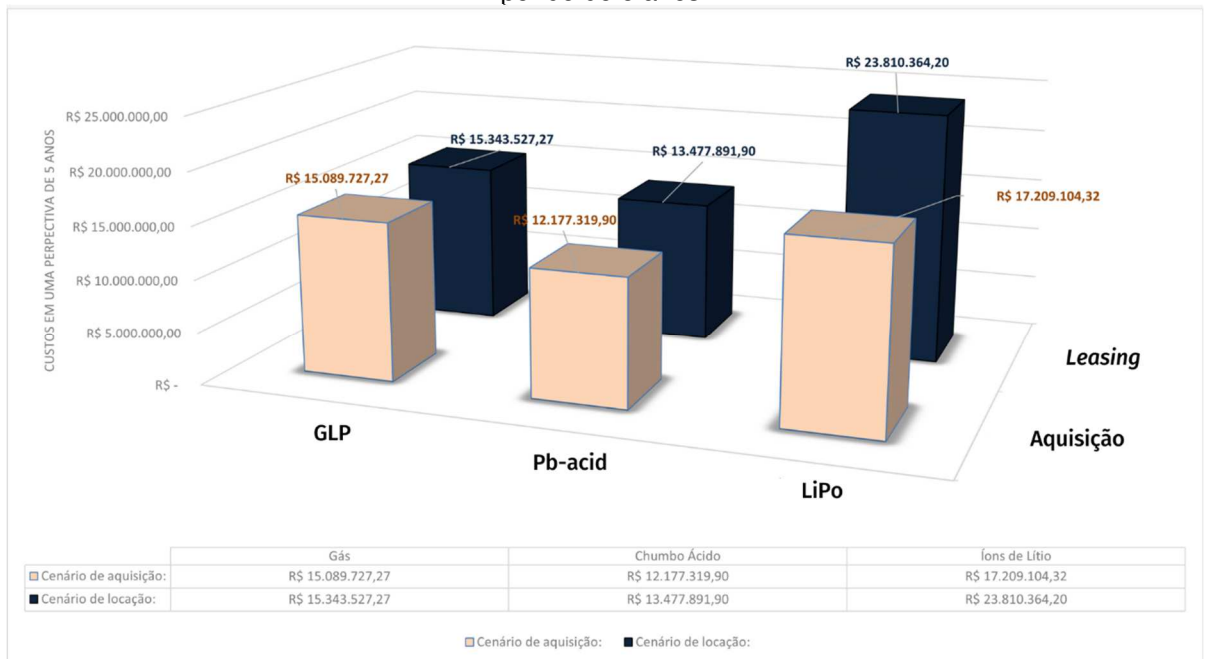


Fonte: (Autor, 2023).

Nesse sentido, para GLP um custo de R\$ 3.420.000,00 com *leasing*, R\$ 5.175.000,00 com combustível e R\$ 6.494.727,27 com O&M totalizando R\$ 15.089.727,27. Para Pb-acid tem-se um custo de R\$ 5.549.727,27 com O&M, R\$ 867.592,63 com energia e R\$ 5.760.000,00 com *leasing* totalizando R\$ 12.177.319,908. Já para LiPo tem-se um custo de R\$ 5.549.727,27 com O&M, R\$ 1.259.636,93 com combustível e R\$ 10.399.740,12 com *leasing* totalizando R\$ 17.209.104,32.

Mediante tais dados no contexto de *leasing* e no de aquisição apresenta-se a Figura 11. Pela qual pode-se comparar os cenários lado a lado, bem como os modelos de fornecimento de combustível/energia, no caso, gás liquefeito de petróleo, chumbo ácido e íons de lítio.

Figura 11: Comparação de custos para *leasing* ou aquisição de 18 empilhadeiras de 2,5 toneladas no período de 5 anos.



Fonte: (Autor, 2023).

Assim, observa-se que optar pelo cenário de aquisição resulta em um custo total inferior. Além disso, fica claro que modelos de LiPo resultam em um custo total demasiado superior a GLP. Todavia, os modelos elétricos de Pb-acid performam um custo total consideravelmente inferior, demonstrando que a economia de combustível devido a utilização da energia como forma energética resulta em um valor final mais atrativo que a combustão, quando trabalhado com modelos de chumbo ácido.

## 5.5 ESTUDO DE CASO – ANÁLISE ECONÔMICA

Será realizada uma análise comparativa dos gastos entre os cenários de aquisição e locação das empilhadeiras. Para tal, será considerado os investimentos iniciais, os custos ao longo do tempo e irá ser determinado o período de *payback*, quanto tempo o investimento leva para se pagar, e o ROI, que representa o índice de retorno do investimento.

No cenário de aquisição, levou-se em conta os seguintes fatores:

- Investimento inicial: considera-se o investimento inicial no ano 0, de acordo com os valores de entrada. Sendo os custos de aquisição multiplicados pelo número de empilhadeiras consideradas.
- Custos ao longo do tempo: Nos anos seguintes, os gastos são calculados utilizando como base os valores absolutos. Para isso, é

descontado o ano inicial e dividido pelo número de anos da análise. Esse processo é realizado para os diferentes modelos disponíveis.

Já no cenário de locação, é adotado um processo semelhante, com as seguintes considerações quanto as diferenças para o modelo de aquisição:

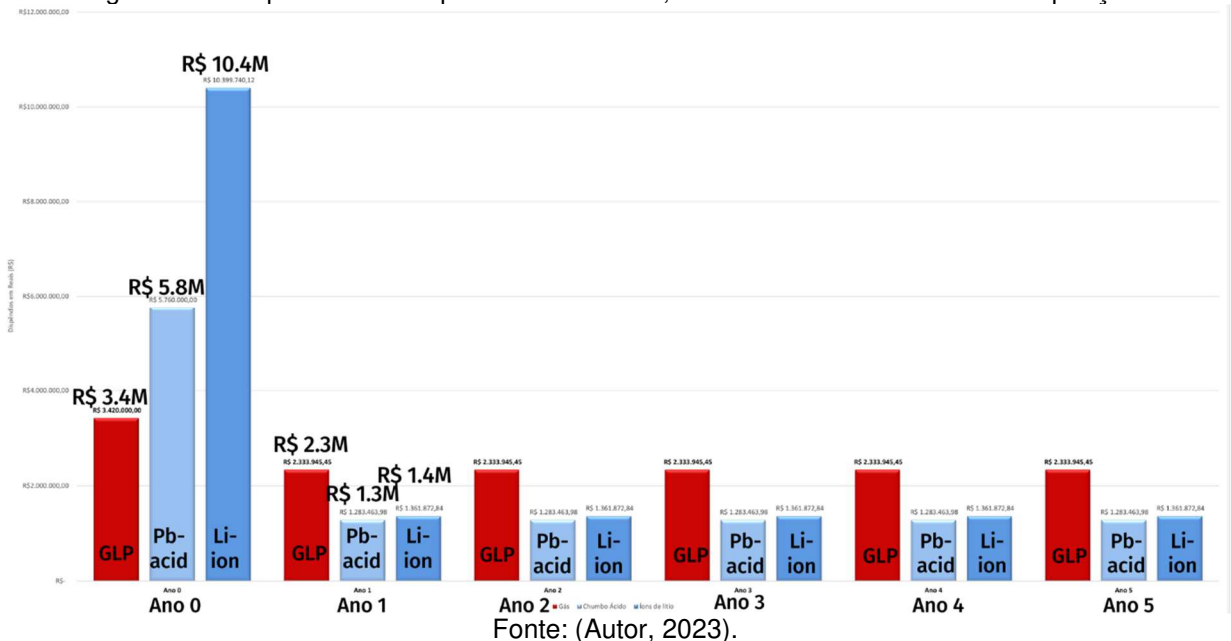
- Investimento inicial: No ano 0, o custo de aquisição é removido.
- Custos ao longo do tempo: Durante todo o período, são adicionados aos custos absolutos os dispêndios com *leasing*.

Com base nos dados obtidos, será calculado o período de *payback* tanto para o cenário de aquisição quanto para o de *leasing*.

O investimento inicial representa o valor total investido no projeto no ano 0, enquanto o fluxo de caixa anual é a quantia que o projeto gera ou economiza a cada ano, subtraída dos custos do projeto. O *payback* permitirá estipular a quantidade de anos necessários para o retorno do investimento.

Com tais considerações postas, apresenta-se a Figura 12, na qual tem-se o comparativo de dispêndios entre GLP, Pb-acid e LiPo no cenário de aquisição.

Figura 12: Comparativo de dispêndios entre GLP, Pb-acid e LiPo no cenário de aquisição.



Os valores apresentados indicam os dispêndios no ano 0 e nos anos subsequentes, do ano 1 ao ano 5.

No ano 0, os dispêndios para cada tipo de empilhadeira são os seguintes:

- GLP: R\$ 3.452.000,00
- Pb-acid: R\$ 5.760.000,00

- LiPo: R\$ 10.399.740,12

Esses valores representam os custos de aquisição de cada tipo de empilhadeira no início do projeto.

Nos anos seguintes, do ano 1 ao ano 5, os dispêndios se repetem com os seguintes valores:

- GLP: R\$ 2.333.945,45
- Pb-acid: R\$ 1.282.463,98
- LiPo: R\$ 1.361.872,84

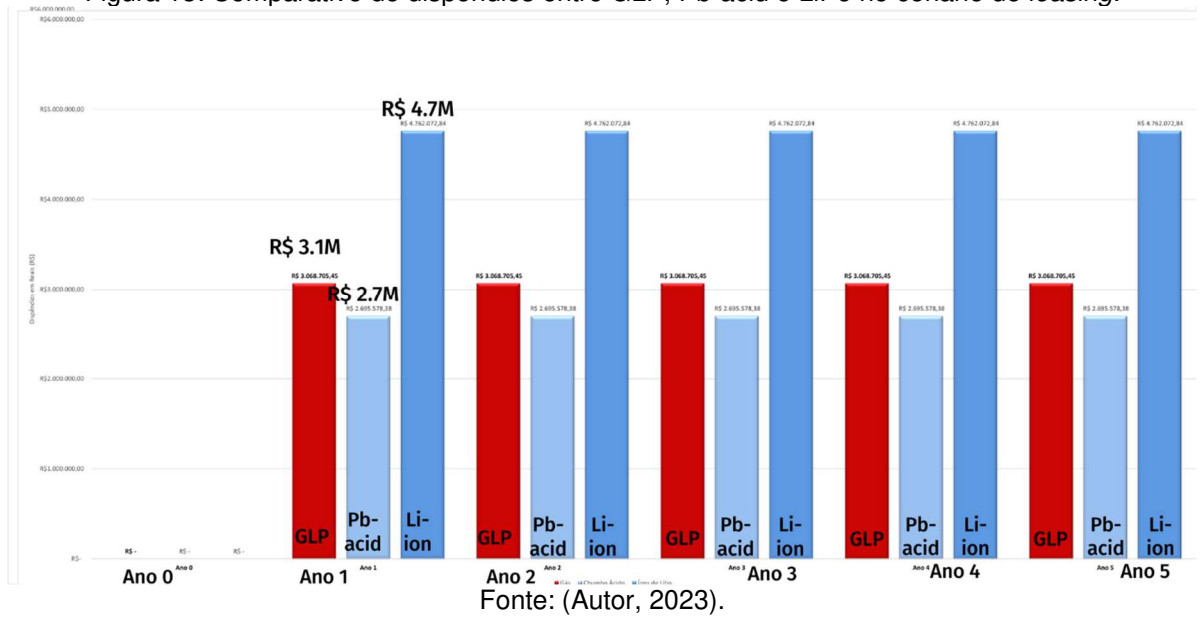
Tais valores indicam os custos anuais de combustível ou energia, manutenção e operação relacionados a cada tipo de empilhadeira.

Com base nessas informações, pode-se observar que, no cenário de aquisição, os dispêndios totais ao longo do tempo para cada tipo de empilhadeira são os seguintes:

- GLP: R\$ 15.089.727,27
- Pb-acid: R\$ 12.177.319,90
- LiPo: R\$ 17.209.104,32

Esses valores representam os custos totais de aquisição e operação das empilhadeiras em um período de cinco anos. Considerando a soma dos dispêndios, pode-se concluir que a empilhadeira movida a Pb-acid apresenta o menor custo total, seguida pela empilhadeira GLP e, por fim, a empilhadeira LiPo, que tem o maior custo total.

No segundo gráfico, apresentado na Figura 13, que é o comparativo de dispêndios entre GLP, Pb-acid e LiPo no cenário de *leasing*, os valores no ano 0 para cada tipo de empilhadeira são todos iguais a zero R\$ 0,00. Isso deriva do fato que no cenário de *leasing* não há um investimento inicial de aquisição das empilhadeiras, pois elas são alugadas em vez de compradas.

Figura 13: Comparativo de dispêndios entre GLP, Pb-acid e LiPo no cenário de *leasing*.

Nos anos seguintes, do ano 1 ao ano 5, os dispêndios se repetem com os seguintes valores:

- GLP: R\$ 3.068.705,45
- Pb-acid: R\$ 2.695.578,38
- LiPo: R\$ 4.762.072,84

Na comparação entre GLP, Pb-acid e LiPo no cenário de locação, considerando a soma dos dispêndios ao longo do tempo, e levando-se em conta os valores nos anos 1 a 5 que se repetem, tem-se o custo de:

- GLP: R\$ 15.343.527,27
- Pb-acid: R\$ 13.477.891,90
- LiPo: R\$ 23.810.364,20

Esses valores representam os custos totais de locação das empilhadeiras em um período de cinco anos, considerando a soma dos dispêndios anuais. Ao analisar, pode-se concluir que a empilhadeira movida a Pb-acid apresenta o menor custo total de locação ao longo do tempo, seguida pela empilhadeira GLP e, por fim, a empilhadeira LiPo, que tem o maior custo total de locação.

Analisando, nos cenários de aquisição e *leasing* de chumbo ácido, tendo como referência os cenários de GLP, calcula-se o ROI pela Equação 44 e Equação 45.

$$ROI_{A(Pb-acid)} = \frac{R\$ 15.121.727,25 - R\$ 12.172.319,90}{R\$ 12.172.319,90} * 100 = 24,23\% \quad (44)$$

$$ROI_{L(Pb-acid)} = \frac{R\$ 15.343.527,25 - R\$ 13.477.891,9}{R\$ 13.477.891,9} * 100 = 13,84\% \quad (45)$$

Onde:

$ROI_{A(Pb-acid)}$  = Índice de retorno do investimento no cenário de aquisição de Pb-acid,

$ROI_{L(Pb-acid)}$  = Índice de retorno do investimento no cenário de *leasing* de Pb-acid.

Já, nos cenários de aquisição e *leasing* de íons de lítio, tendo como referência os cenários de GLP, calcula-se o ROI pela Equação 46 e Equação 47.

$$ROI_{A(LiPo)} = \frac{R\$ 15.089.727,25 - R\$ 17.209.104,32}{R\$ 17.209.104,32} * 100 = -12,31\% \quad (46)$$

$$ROI_{L(LiPo)} = \frac{R\$ 15.343.527,25 - R\$ 23.810.364,2}{R\$ 23.810.364,2} * 100 = -35,55\% \quad (47)$$

Onde:

$ROI_{A(LiPo)}$ : Índice de retorno do investimento no cenário de aquisição de LiPo,

$ROI_{L(LiPo)}$ : Índice de retorno do investimento no cenário de *leasing* de Pb-acid.

Mediante a indicação do ROI, tem-se que nos cenários de chumbo ácido há um retorno positivo do investimento, enquanto que nos cenários de íons de lítio o retorno do investimento é negativo.

Com base ainda na Figura 12 e na Figura 13, é possível extrair informações relevantes sobre o tempo de retorno de investimento para os modelos de empilhadeiras elétricas em comparação com o modelo a combustão.

Nesse sentido, primeiro apresenta-se a Figura 14, pela qual compara-se a diferença entre optar pelo cenário de Pb-acid ao invés de GLP, o que impacta em um maior investimento inicial, mas que reduz o dispêndio anual, resultando em um retorno de R\$ 2.912.407,37 em 5 anos.

Figura 14: *Payback* para aquisição de 18 empilhadeiras de 2,5 toneladas entre GLP e Pb-acid no cenário de aquisição.



Fonte: (Autor, 2023).

Para calcular o *payback* nesse cenário aplica-se:

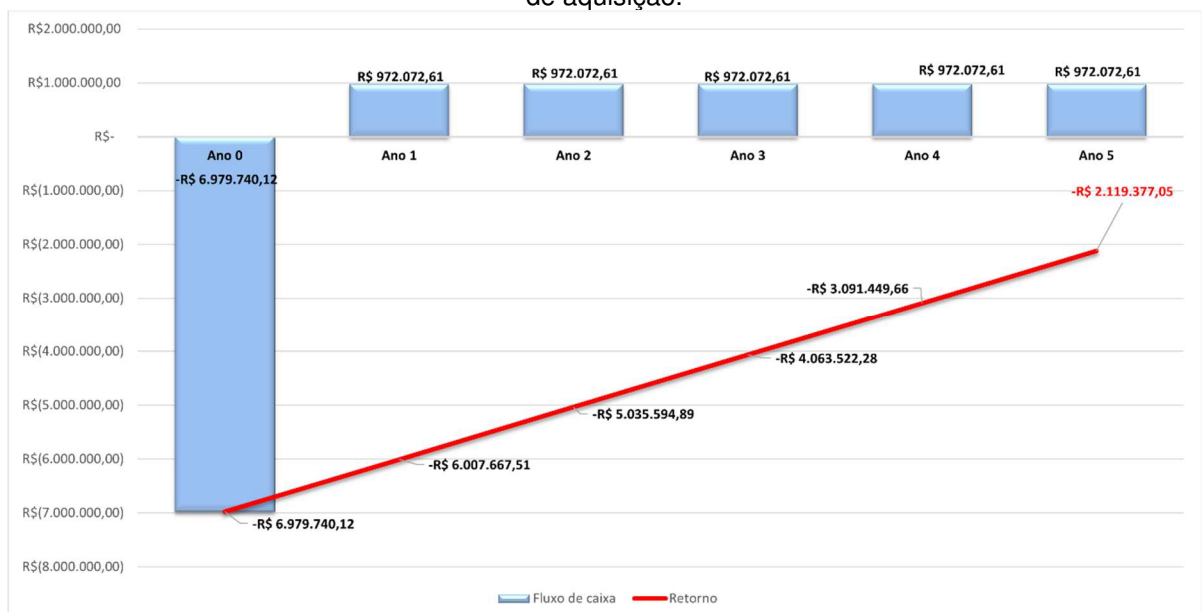
$$\text{Payback}_{A(\text{Pb-acid})} = \frac{\text{R}\$2.340.000,00}{\text{R}\$1.050.481,47} = 2,23 \text{ anos} \quad (48)$$

Onde:

$\text{Payback}_{A(\text{Pb-acid})}$  = Tempo de retorno para o cenário de aquisição de Pb-acid.  
Ou seja, que o *payback* nesse cenário se dá em 2,23 anos.

Mantendo a comparação de aquisição, mas alterando a análise para GLP e LiPo tem-se o resultado da Figura 15.

Figura 15: *Payback* para aquisição de 18 empilhadeiras de 2,5 toneladas entre GLP e LiPo no cenário de aquisição.



Fonte: (Autor, 2023).

Por meio desse gráfico, nota-se que o investimento inicial para LiPo é



muito significativo, mas que o fluxo anual não é alto o suficiente para compensar, de modo que ao final de 5 anos se tem um prejuízo de R\$ 2.119.377,05. O que é evidenciado pelo cálculo do *payback*:

$$Payback_{A(LiPo)} = \frac{R\$6.979.740,12}{R\$972.072,61} = 7,18 \text{ anos} \quad (49)$$

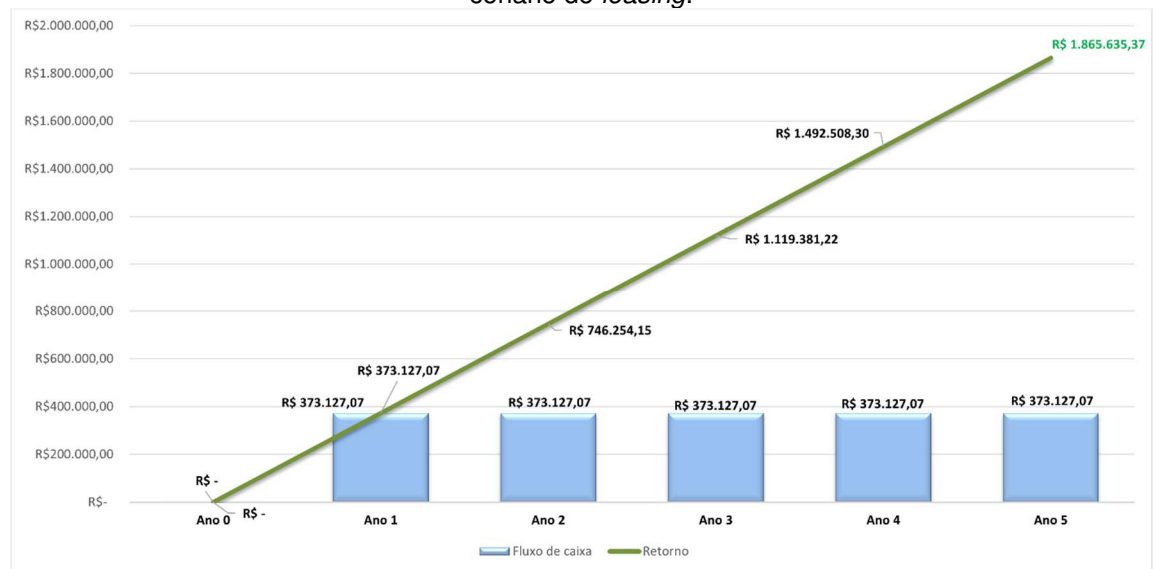
Onde:

$Payback_{A(LiPo)}$  = Tempo de retorno para o cenário de aquisição de LiPo.

Nota-se a necessidade 7,18 anos para ter-se o retorno do investimento, estando inclusive fora do período total em análise.

Na sequência, o próximo gráfico a ser analisado está apresentado na Figura 16. Sendo referente a análise entre GLP e Pb-acid no cenário de *leasing*.

Figura 16: *Payback* para aquisição de 18 empilhadeiras de 2,5 toneladas entre GLP e Pb-acid no cenário de *leasing*.



Fonte: (Autor, 2023).

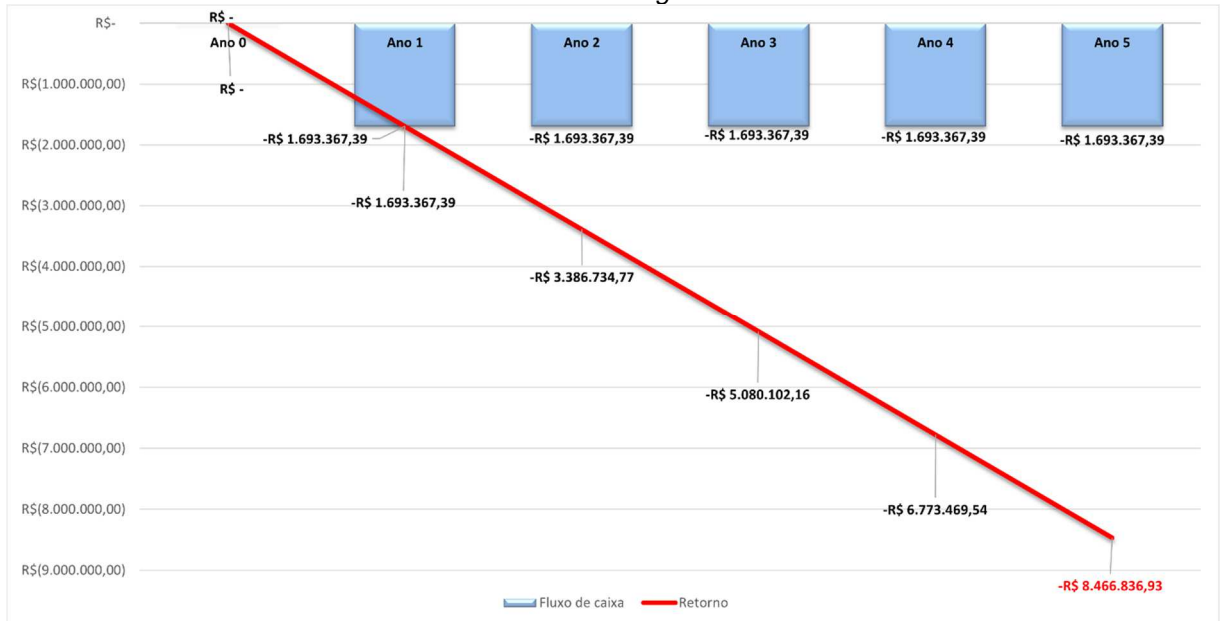
$$Payback_{L(Pb-acid)} = \frac{R\$0,00}{R\$1.865.635,37} = 0 \text{ anos} \quad (50)$$

Onde:

$Payback_{L(Pb-acid)}$  = Tempo de retorno para o cenário de *leasing* de Pb-acid. Ou seja, um *payback* em que se tem retorno basicamente instantâneo.

Um cenário distinto ocorre ao analisar-se a Figura 17, que trata sobre a comparação para retorno entre GLP e LiPo no cenário de *leasing*.

Figura 17: *Payback* para aquisição de 18 empilhadeiras de 2,5 toneladas entre GLP e LiPo no cenário de *leasing*.



Fonte: (Autor, 2023).

Na análise, embora não haja investimento inicial, o retorno anual é negativo, resultando em um déficit de R\$ 8.466.836,93 ao final dos 5 anos.

Portanto, considerando tanto o cenário de aquisição como o de locação, a empilhadeira movida a Pb-acid se destaca como a melhor opção em termos de custos, enquanto a opção de LiPo tem performance negativa.

## 5.6 ESTUDO DE CASO – QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>

Nessa análise, cabe pontuar que na empresa avaliada a energia é proveniente exclusivamente de fontes renováveis conforme certificação.

Um primeiro passo para calcular as emissões do modelo de GLP é encontrar o consumo de combustível total:

$$\sigma_{c(\text{GLP})} = 18 \times 40 \text{ kg} \times (5 \times 250) = 900.000 \text{ kg} \quad (51)$$

Onde:

$$\sigma_{c(\text{GLP})} = \text{Consumo de combustível (kg)}.$$

Nesse caso, determina-se que o consumo de combustível equivale a 900.000 quilogramas de GLP considerando as 18 empilhadeiras analisados no período de 5 anos.

Depois, calcula-se a energia associada a esse consumo de combustível:

$$\text{Energia} = 900.000 \text{ kg} \times 46.6 \text{ MJ/kg} = 41.940.000 \text{ MJ} \quad (52)$$

Onde:

E = Energia (MJ).

Totalizando 41.940.000 MJ de energia.

Para na sequência, calcular o CO<sub>2</sub>:

$$\text{CO}_2\text{_{eq}} = \frac{41.940.000 \text{ MJ}}{10} * \frac{63.100 \text{ kg}}{\text{TJ}} = 2.646.414 \text{ kg} \quad (53)$$

Onde:

CO<sub>2</sub>\_eq = Dióxido de carbono equivalente (kg).

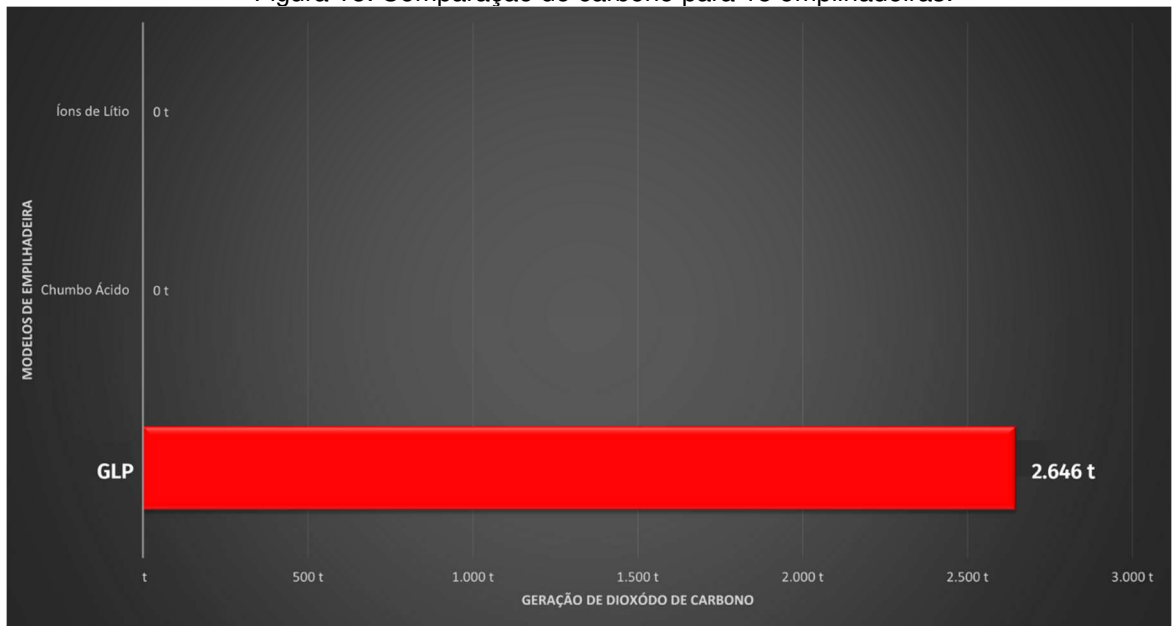
Ou seja, 2,646.41 toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas no total da operação.

Já no caso de modelos elétricos, é importante destacar que a empresa utiliza exclusivamente energia elétrica proveniente de fontes renováveis, como energia eólica, solar, de biomassa, PCH (pequenas centrais hidrelétricas) e CGH (centrais geradores hidrelétricas). Conforme contrato de energia relacionado a incentivo do governo federal para energia renovável. Como resultado, a emissão de CO<sub>2</sub> é considerada nula, o que significa que não há emissão líquida de dióxido de carbono na atmosfera decorrente do consumo de eletricidade para abastecer as empilhadeiras elétricas.

## 5.7 ESTUDO DE CASO – ANÁLISE DO IMPACTO AMBIENTAL

Para além da avaliação dos custos inerentes à *leasing* ou compra de empilhadeiras, é imperativo considerar o impacto ecológico decorrente dessas decisões. Assim, baseando-se nos cálculos da emissão de dióxido de carbono da seção 5.6 elabora-se a Figura 18.

Figura 18: Comparação de carbono para 18 empilhadeiras.



Fonte: (Autor, 2023).

Nela, tem-se a relação de toneladas de carbono geradas para modelos de GLP, Pb- acid e LiPo. De modo que se percebe que nas versões elétricas não há emissão, uma vez que nessa análise toda a energia elétrica da empresa é de fonte renovável. Enquanto na versão a combustão tem-se associado 2.644 toneladas de CO<sub>2</sub>, onde nota-se uma colossal discrepância entre os cenários no que se refere a agressão ambiental.

Outrossim, calcula-se o número de árvores associadas ao volume de carbono gerado:

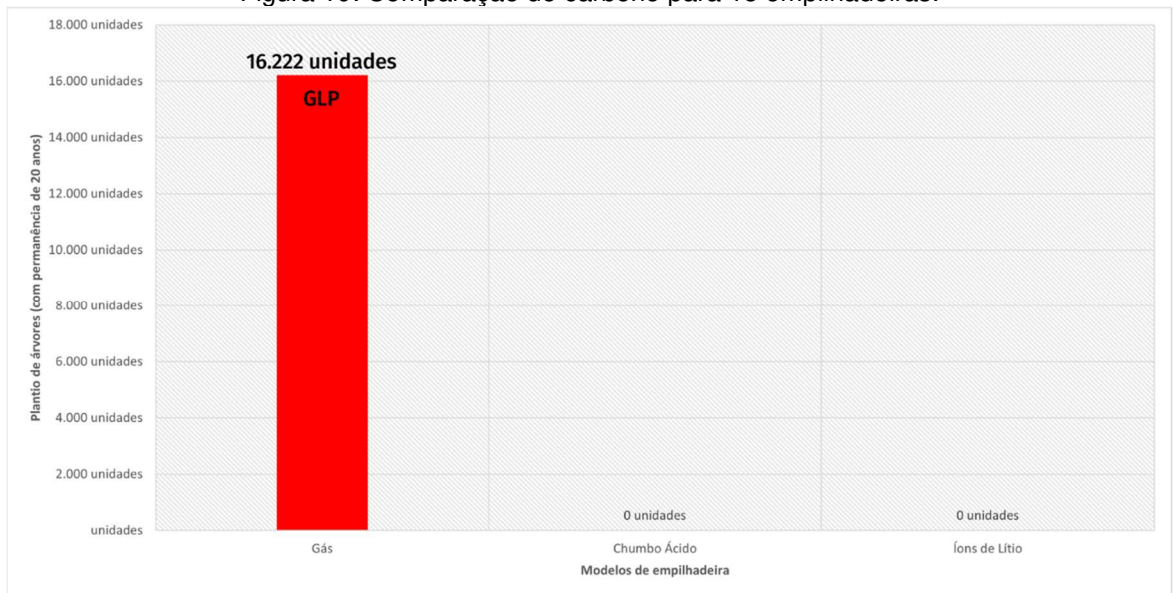
$$\Lambda = \frac{2.646.414kg}{163.14kg} = 16.221 \text{ unidades} \quad (54)$$

Onde:

$\Lambda$  = Árvores (unidades).

De modo que se conclui que para realizar a captura de carbono associada à operação total das 18 empilhadeiras no período de 5 anos, faz-se necessário o plantio de 16.221 árvores, conforme calculado na Equação 53, considerando o bioma da mata atlântica, as quais necessitam de 20 anos de crescimento para absorver o CO<sub>2</sub> associado à operação das empilhadeiras. Assim, é interessante apresentar a Figura 19.

Figura 19: Comparação de carbono para 18 empilhadeiras.



Fonte: (Autor, 2023).

Por meio dela, pode-se comparar a quantidade de árvores necessárias para o sequestro do carbono associado à emissão das 18 empilhadeiras em operação no período de 5 anos. Totalizando 16.222 unidades considerando o bioma da mata atlântica quando analisado o modelo de gás liquefeito de petróleo, ao passo que para modelos elétricos não há esse impacto. Tal análise é útil pois é capaz de evidenciar melhor a magnitude de geração de gases de efeito estufa que são gerados mediante a escolha por modelos baseados em combustível fóssil. Necessitando plantar uma pequena floresta para absorver o carbono associado, enquanto em modelos elétricos, tal dano é evitado.

## 5.8 ESTUDO DE CASO – CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Mediante a análise realizada através da aplicação da metodologia proposta, determina-se que optar pelo modelo de chumbo ácido é a melhor decisão no que tange a questão econômica, e ainda desempenha um resultado direto na redução da emissão de gases poluentes muito significativo. Enquanto migrar para íons de lítio se mostrou como uma decisão com impacto econômico negativo, em que se aumentam os custos comparados ao modelo baseado em gás liquefeito de petróleo, apesar dos ganhos ambientais.

Optar pelo cenário de aquisição de empilhadeiras de chumbo ácido resulta em uma redução de custo total de R\$ 2.912.407,37 enquanto no cenário de *leasing* a economia é de R\$ 1.865.635,37, portanto inferior. Todavia com um *payback* mais ágil, praticamente instantâneo por resultar em uma

redução nos dispêndios com combustível e O&M sem a necessidade de um investimento inicial, já que dispensa a aquisição das empilhadeiras.

A metodologia da análise busca fornecer tais dados, de modo a munir os responsáveis pela tomada de decisão com uma ferramenta capaz de calcular tais cenários de forma transparente e com base no rigor científico característico de uma dissertação de mestrado.

## 6 ANÁLISE DO USO DE EMPILHADEIRAS ELÉTRICAS PARA TRANSACIONAR ENERGIA

Este capítulo explora a transação energética pela técnica *Vehicle-to-Industry*, discutindo seus aspectos centrais, tais como conceito, benefícios, infraestrutura necessária e desafios inerentes. Ademais, realizar-se-á uma análise acerca do potencial de economia desta aplicação.

No capítulo 3, os conceitos de transacionamento de energia via veículos elétricos foram revisados, com ênfase no modelo V2B. A razão para tal foco é que o V2B representa o cenário mais alinhado a essa proposta de transacionar energia utilizando empilhadeiras elétricas em um ambiente industrial. Enquanto o V2G envolve transações energéticas diretamente com a rede elétrica (SOLANKE et al., 2020), e o V2H trata de um cenário doméstico (ZHAO; ARAVINTHAN, 2013). O V2B, por outro lado, aborda o transacionamento de energia em instalações que são mais complexas e maiores do que as residenciais, e que envolvem um número mais elevado de veículos elétricos conectados (CORREIA, 2022).

Todavia, a transação de energia em um ambiente industrial também se difere do modelo V2B, apesar de mais próximo. O principal motivo é que uma rede industrial é intrinsecamente mais complexa, envolvendo múltiplos elementos conectados, muitos dos quais são cargas não lineares (DIAS, 2002). Um exemplo é o acionamento de um motor por um inversor de frequência, que introduz harmônicos (OLIVEIRA, 2013) e demais danos a qualidade de energia. Devido a estas particularidades, é justificável a criação de uma nomenclatura específica para este contexto.

O termo mais intuitivo para descrever essa forma de transacionamento energético seria V2I. No entanto, este termo já é utilizado no contexto de comunicação entre veículos e a infraestrutura de trânsito e rede elétrica (DEY et al., 2016), e não se relaciona diretamente com transações energéticas. Por não tratar diretamente de transacionamento, o termo V2I não foi discutido no capítulo 3. Com essa ressalva, opta-se por utilizar o termo V2Ind, uma abreviação em inglês para *Vehicle-to-Industry*, ao longo deste documento para especificar o conceito de transacionamento de energia em ambientes industriais.

### 6.1 CONCEITUAÇÃO E BENEFÍCIOS

A estratégia proposta se concentra no reaproveitamento intencional das baterias de empilhadeiras elétricas, canalizando-as como uma fonte de energia auxiliar para as operações elétricas industriais. Este método, estruturado com atenção meticulosa, vem a ser uma ferramenta para a administração do consumo de energia, auxiliando de maneira significativa na atenuação de picos de demanda, que culminam em penalidades consideráveis devido à superação dos limites predeterminados de consumo.

O V2Ind se destaca como um recurso valioso, especialmente durante os períodos de horário de ponta, servindo como um reservatório de energia útil que pode atenuar os custos associados a essas tarifas elevadas, fomentando uma administração energética mais sustentável e consciente (GUIMARÃES, 2021).

Outrossim, esta iniciativa oferece benefícios significativos para a rede elétrica. A redistribuição mais uniforme da demanda de energia pode contribuir para a estabilização da rede, evitando sobrecargas que possam resultar em falhas e interrupções (DANG et al., 2019). É importante destacar que os picos de demanda são períodos de elevado consumo e representam diversos desafios para a rede elétrica. Primariamente, existe um risco ampliado de sobrecarregar a infraestrutura atual, acelerando seu desgaste e potencialmente levando a falhas críticas. Além disso, a qualidade da energia pode ser comprometida, gerando flutuações de tensão ou interrupções breves, que podem danificar equipamentos sensíveis. Essas oscilações podem implicar em custos operacionais e de manutenção mais elevados (KIRSCHEN; STRBAC, 2018).

Outrossim, há a promoção ao fomento do aproveitamento de fontes renováveis de energia, atuando como um suporte significativo para a sustentabilidade corporativa. Este sistema permite que a energia renovável gerada seja armazenada, possibilitando seu uso estratégico em momentos mais propícios, de acordo com as necessidades operacionais da empresa. No contexto de tarifas energéticas variáveis, essa abordagem facilita uma gestão energética mais eficiente e econômica, na qual a empresa pode optar por consumir a energia armazenada em períodos onde as tarifas estão mais altas, minimizando assim os custos relacionados ao consumo de energia (FARUQUI; SERGICI, 2010).

Outro dos benefícios do V2Ind é a resiliência durante interrupções elétricas. Ao utilizar baterias de empilhadeiras elétricas como uma fonte secundária de alimentação, as instalações industriais ganham uma camada adicional de proteção contra interrupções de energia. Isto é especialmente vital



para indústrias e instalações críticas que necessitam de um fornecimento ininterrupto de energia para manter sua eficácia operacional e segurança (SUBRAMANIAM; BILLINTON; WACKER, 1993).

Ademais, esta abordagem favorece uma maior flexibilidade operacional. Ao possuir uma fonte alternativa de energia, é possível adaptar-se a diferentes cenários de consumo de maneira mais ágil e eficiente, facilitando assim a gestão e operação de sistemas industriais. Esta flexibilidade também permite responder de forma mais eficaz a eventuais mudanças no mercado energético, otimizando os custos e a eficiência operacional.

É imperativo mencionar o estímulo à inovação que tal estratégia pode conferir. A implementação de sistemas de armazenamento de energia baseados na reutilização de baterias de empilhadeiras elétricas pode fomentar a inovação na indústria de energia. Esta prática pode incentivar o desenvolvimento de novas tecnologias e soluções para o gerenciamento de energia, propiciando um ambiente fértil para a pesquisa e desenvolvimento em áreas relacionadas ao armazenamento de energia e sustentabilidade.

## 6.2 INFRAESTRUTURA

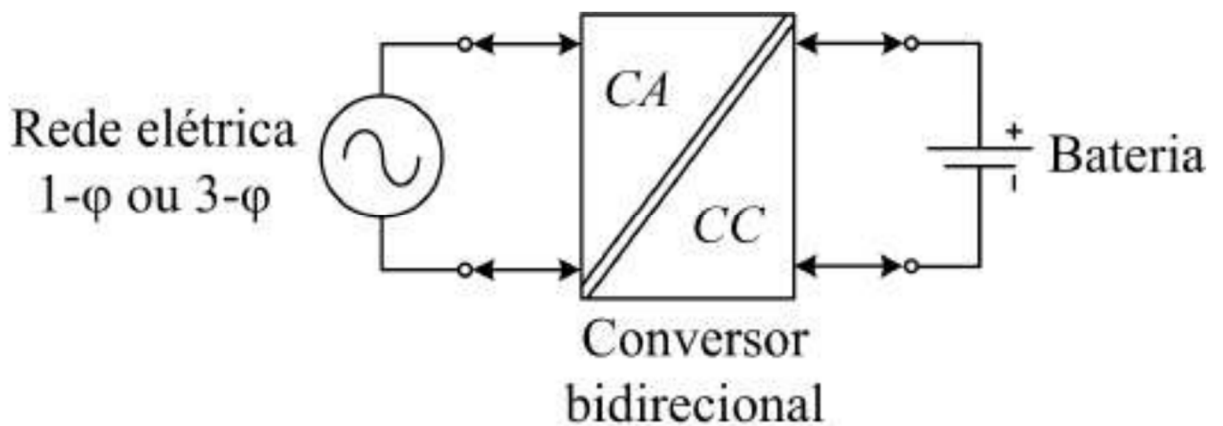
Para concretizar essa estratégia, é indispensável, além de um entendimento aprofundado das dinâmicas energéticas já mencionadas, instituir uma infraestrutura robusta e integrada. Esta infraestrutura deve compreender uma rede de monitoramento sofisticada, capaz de rastrear preferencialmente os níveis energéticos das baterias em tempo real, mas também o consumo instantâneo da empresa e as flutuações tarifárias no mercado de energia. Tal monitoramento exige, por sua vez, uma infraestrutura de comunicação ágil e confiável, que possa facilitar a troca de informações críticas de maneira eficiente e segura.

É imprescindível incluir na infraestrutura um carregador bidirecional inteligente. Este equipamento deve realizar não apenas o processo de carga das baterias, mas também controlar o fornecimento de energia destas para a rede elétrica empresarial. Como as empilhadeiras elétricas não vêm tipicamente com carregadores *on-board*, o carregador em questão será do tipo *off-board* (VARAJÃO, 2012). Sendo que o mesmo necessita possuir funcionalidades avançadas que proporcionem um controle minucioso dos ciclos de carga e descarga, considerando sempre o estado de carga (SoC) da bateria para

prevenir impactos negativos em sua vida útil e eficiência.

Além das capacidades de um carregador unidirecional CA/CC, o mesmo deve estar equipado com um estágio de conversão CC/CA (KAN, 2023), assegurando o correto fluxo energético durante o processos de fornecer energia a instalação industrial. Um diagrama simplificado do carregador bidirecional é apresentado na Figura 20. Em que se evidencia a capacidade do dispositivo de tanto transmitir energia da rede para bateria quanto retornar energia da bateria para a instalação industrial.

Figura 20 – Representação generalizada de um carregador bidirecional de baterias de único estágio

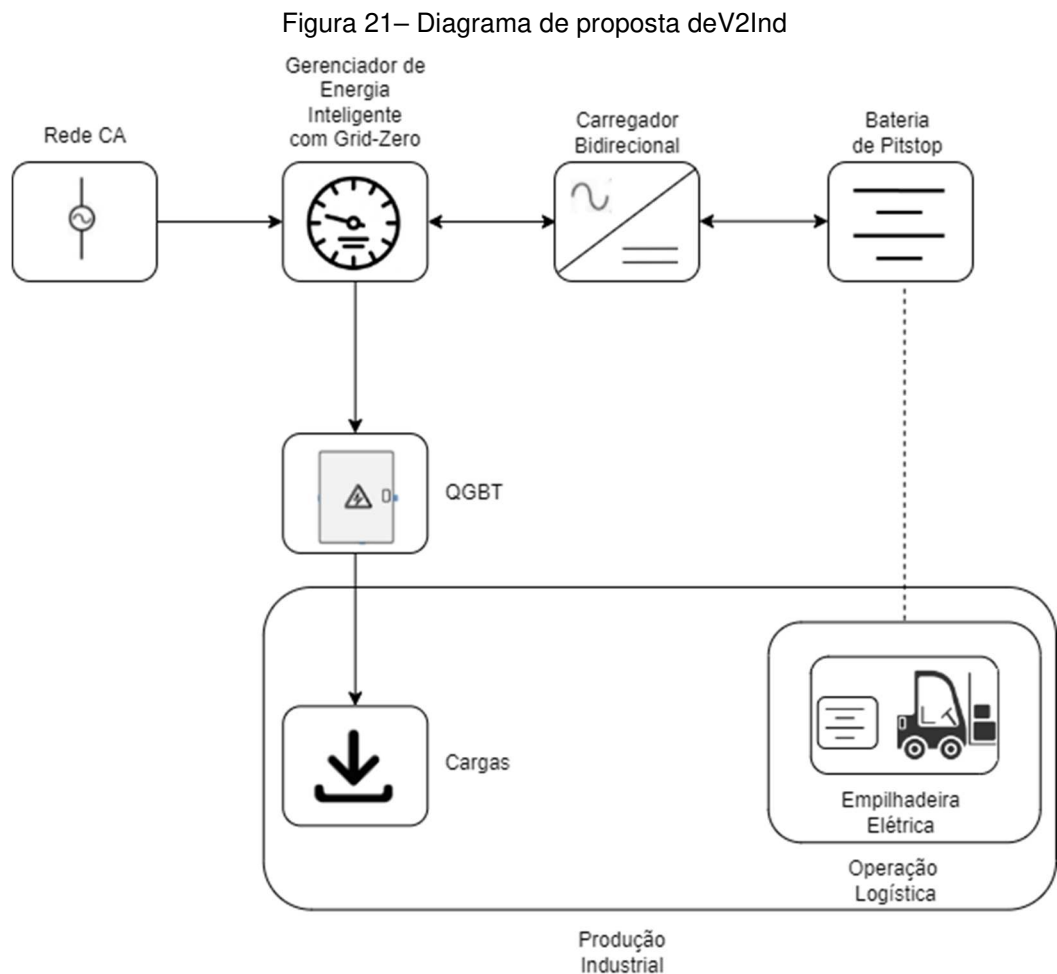


Fonte: Adaptado de (KAN, 2023).

Adicionalmente, é preciso contar com um gerenciador de energia inteligente, equipado com funcionalidade de *grid-zero*, o que facilita o controle da exportação de energia para a rede elétrica pública, permitindo que toda a energia gerada seja canalizada exclusivamente para as cargas locais, evitando assim a injeção de quilowatt-hora excedente na rede. Este dispositivo deve estar posicionado entre a rede pública e o quadro elétrico onde as cargas designadas estão instaladas, gerindo as leituras de tensão e corrente necessárias para que um medidor elétrico processe todas as informações pertinentes. Com base nestas leituras, o gerenciador altera o modo de operação do conversor CC/CA, ajustando a potência conforme a demanda da carga local.

Na Figura 21, demonstra-se uma representação da infraestrutura de V2Ind proposta. Onde as setas representam o fluxo energético, evidenciando a bidirecionalidade na bateria e no carregador que são capazes de tanto receber energia da rede quanto fornecer energia as cargas da instalação industrial. Nesse ínterim, fica claro que a rede elétrica não recebe energia, graças a operação do *grid-zero* presente no gerenciador de energia inteligente. O que é

interessante nessa aplicação pela facilitação burocrática e tributária junto a concessionária de energia. Não obstante, também se destaca que a operação logística associada a produção industrial não fica carente da disponibilidade da empilhadeira elétrica. Haja vista que utiliza-se duas baterias, uma presente na empilhadeira e outra em interface com o carregador bidirecional, sendo carregada no momento oportuno e então trocada pela bateria presente na empilhadeira conforme demonstra a linha tracejada.



Fonte: (Autor, 2023).

### 6.3 DESAFIOS

Uma questão que surge naturalmente, especialmente considerando o papel central que as empilhadeiras desempenham nas operações logísticas industriais, é se a empresa estaria disposta a utilizar suas baterias como um meio para transacionar energia. A resposta para essa pergunta pode estar atrelada ao tipo de empilhadeira em operação.

No caso das empilhadeiras equipadas com baterias de chumbo ácido, observa-se a adoção intrínseca do conceito de pitstop. Isso implica que, ao

adquirir uma empilhadeira, automaticamente se compra duas baterias: uma que é operacionalmente ativa na empilhadeira, e outra que permanece em carregamento, pronta para ser trocada rapidamente quando a primeira se esgota. Este sistema assegura que a operação logística não necessite ser interrompida para a transação de energia, uma vez que há sempre uma bateria disponível na empilhadeira. Suplementar a isso, a bateria que está em processo de carga pode ser utilizada para fornecer energia adicional em situações de picos de demanda, atuando como um mecanismo de mitigação de ultrapassagens energéticas, especialmente durante os horários de pico. No entanto, é importante destacar que essa estratégia requer uma gestão cuidadosa e um planejamento avançado por parte da empresa.

Por outro lado, as empilhadeiras equipadas com baterias de íons de lítio apresentam uma dinâmica distinta. Nesses casos, cada empilhadeira possui apenas uma bateria. A transação de energia, conseqüentemente, requer uma pausa nas operações, tornando a implementação dessa estratégia mais complexa. Ainda assim, é uma abordagem possível para perfis de carga que apresentam picos de demanda em horários específicos e onde é possível centralizar algumas empilhadeiras para atuar na mitigação de excessos de demanda. Cabe ressaltar que essa opção demanda uma gestão energética bastante sofisticada, adaptando-se a contextos mais específicos quando comparada com a aplicação em baterias de chumbo ácido.

Os desafios predominantes nesta iniciativa residem na demanda por uma gestão e percepção energética altamente eficazes por parte da organização. Isso implica na construção de uma estrutura claramente delineada do fluxo produtivo e das necessidades logísticas, a fim de garantir que a utilização das baterias não interfira negativamente na produção.

Ademais, é imperativo conduzir análises meticulosas para verificar se esse procedimento pode, de alguma forma, diminuir a vida útil das baterias. Nesse sentido, torna-se crucial um controle rigoroso dos processos de carga e descarga, para não ultrapassar os limites estabelecidos de corrente e de estado de carga da bateria (PAIXAO et al., 2020). Outro aspecto significativo a ser considerado é a necessidade de investimentos substanciais em infraestrutura, um fator que introduz custos adicionais ao processo. Ademais, por ser uma aplicação disruptiva não se tem ainda normas e regulações específicas bem definidas para guiar a implementação.

## 6.4 ANÁLISE DE POTENCIAL DO V2IND COM DADOS REAIS

Tendo em vista todas as considerações anteriormente expostas, além de destacar qualitativamente as vantagens do V2Ind, é oportuno buscar mensurar quantitativamente o potencial de redução de custo por meio da aplicação.

No presente contexto, recorre-se aos dados concretos coletados ao longo desta pesquisa para avaliar o potencial de retorno financeiro. Esta análise foca primordialmente nos benefícios resultantes da assistência na minimização da ultrapassagem de demanda e na diminuição do consumo durante os horários de pico, visto que constituem a maior parcela econômica de vantagens advindas da implementação. Todavia, é fundamental sublinhar que existem outros aspectos já discutidos na seção dedicada aos benefícios da aplicação.

É importante destacar que, ao avaliar o potencial de redução de custos por meio da técnica de V2Ind, não serão consideradas as perdas inerentes ao processo. Estas perdas podem ocorrer tanto na ineficiência do carregamento da bateria e na conversão CA/CC, quanto em uma potencial diminuição da vida útil da bateria. Realizar uma análise precisa dessas variáveis demandaria uma investigação mais aprofundada sobre este tópico específico. Nesta seção, o foco está em quantificar, com base nos dados disponíveis, o potencial de economia, desconsiderando as perdas e os investimentos necessários em infraestrutura.

### 6.4.1 Economia por minimizar a multa de ultrapassagem de demanda

A fórmula básica para calcular a multa por ultrapassagem de demanda pode ser apresentada como:

$$\delta_{M_{ud}} = (D_R - D_C) * t_U \quad (55)$$

Onde:

$\delta_{M_{ud}}$  = Dispêndio com multa por ultrapassagem de demanda (R\$),

$D_R$  = Demanda registrada (kW), que é a maior demanda de potência registrada no período de apuração,

$D_C$  = Demanda contratada (kW), é a quantidade de potência estabelecida no contrato entre o consumidor e a fornecedora de energia,

$t_U$  = Tarifa de ultrapassagem (R\$/kW), é o valor cobrado por kW que excede a demanda contratada.

Note que este é um modelo geral e que a estrutura real do cálculo pode variar conforme a distribuidora local.

A demanda contratada da empresa é de 4900kW, enquanto a maior demanda registrada no conjunto de dados do último ano fornecido pela empresa é de 4993kW. Já a tarifa de ultrapassagem da distribuidora em questão é de 51,50 R\$/kW. Assim, substituindo os valores na Equação 55 tem-se que:

$$\delta_{M_{ud}} = (4993kW - 4900kW) * 51,50R\$/kW = R\$4.789,50 \quad (56)$$

Onde:

$\delta_{M_{ud}}$  = Dispêndio com multa por ultrapassagem de demanda (R\$).

Ou seja, uma multa por ultrapassagem de demanda equivalente a R\$ 4.789,50. Agora considerando as 18 empilhadeiras de chumbo ácido cotadas pela empresa com suas baterias extras para *pitstop*, sendo que cada bateria possui uma potência de 6,13kW. Tem-se uma capacidade de fornecimento de potência de:

$$P_{ec} = n_{ec} * P_{1e} = 18 * 6,13kW = 110,34kW \quad (57)$$

Onde:

$P_{ec}$  = Potência associado ao número de empilhadeiras consideradas (kW),

$n_{ec}$  = Número de empilhadeiras consideradas (unidades),

$P_{1e}$  = Potência de uma empilhadeira (kW).

Por fim, a ultrapassagem de demanda foi de 93 kW, conforme a Equação 55, e a  $P_{ec}$  é de 110,34 kW, conforme a Equação 56. Logo, tem-se que as empilhadeiras consideradas têm capacidade de suprir completamente o pico de demanda, anulando o dispêndio com multa de ultrapassagem e, conseqüentemente, gerando um valor de economia representado por  $S_{ud}$  de R\$ 4.789,50.

#### 6.4.2 Economia por minimizar o consumo durante o horário de ponta

Na análise, ao mapear-se o potencial total pelo uso do V2Ind, considera-se que as 18 baterias de *pitstop* estarão plenamente carregadas para o horário de pico, o que pode ser obtido mediante planejamento prévio da empresa para realizar tal ação. Levando em consideração o horário de ponta das 18h às 21h em dias úteis, tem-se um período de 3h para 22 dias úteis mensais, totalizando

66 horas mensais. Com isso, pode-se calcular a energia que as baterias podem fornecer no horário de ponta em um mês.

$$E_{pec} = P_{ec} * 66h/mês = 110,34kW * 66h/mês = 7,282MWh/mês \quad (58)$$

Onde:

$E_{pec}$  = Energia passível de ser disponibilizada pelas empilhadeiras em horário de ponta no período de um mês (kWh/mês).

No presente contexto, a empresa registra um consumo médio de energia durante o horário de ponta de  $E_p = 183,17$  MWh/mês. Em contraste, o valor de  $E_{pec}$  é de 7,282 MWh/mês, conforme indicado na Equação 26. Assim, embora a técnica V2Ind não seja suficiente para suprir completamente o consumo de energia no horário de ponta, possui potencial para atenuá-lo. Além disso, demonstra-se que nessa aplicação não se necessita fornecer energia das baterias para a rede elétrica pública, haja vista que há demanda por consumo local superior à capacidade de fornecimento de energia das baterias.

No que concerne aos custos energéticos, o valor da energia é uniforme tanto na ponta quanto fora dela, sendo de  $C_e = 255,61$  R\$/MWh. No entanto, as taxas de uso do sistema de distribuição variam, com um valor de  $T_{fp} = 88,86$  R\$/MWh fora de ponta e  $T_p = 780,45$  R\$/MWh na ponta.

Assim, tem-se que a economia por fazer uso do V2Ind durante o horário de ponta, desde de que seja feita uma organização para drenar toda a potência disponível, pode ser calculada da seguinte forma:

$$S_{Ep} = (C_e + T_p) * E_{pec} - (C_e + T_{fp}) * E_{pec} \quad (59)$$

Onde:

$S_{Ep}$  = Economia proveniente de aplicar o V2Ind durante o horário de ponta (R\$).

$C_e$  = Custo de energia (R\$/MWh),

$T_p$  = Taxa de uso do sistema de distribuição durante o horário de ponta (R\$/MWh),

$E_{pec}$  = Energia passível de ser disponibilizada pelas empilhadeiras em horário de ponta no período de um mês (MWh/mês),

$T_{fp}$  = Taxa de uso do sistema de distribuição durante o horário de fora de ponta (R\$/MWh).

Isto é na diferença entre não consumir a energia proveniente da rede durante o horário de ponta mas drenar essa energia durante o período de fora de ponta. O que pode ser simplificado para:

$$S_{Ep} = (T_p - T_{fp}) * Epec \quad (60)$$

Substituindo os valores:

$$S_{Ep} = (780,45R\$/MWh - 88,86R\$/MWh) * 7,282MWh/mês = 5.036,15R\$/mês \quad (61)$$

Determina-se uma economia de R\$ 5.036,15 por mês para essa aplicação. Relacionada ao uso do V2Ind para minimizar o consumo durante o horário de ponta.

#### 6.4.3 Economia total pelo uso de V2Ind

A análise apresentou duas vias principais pelas quais o uso da técnica V2Ind pode promover economias substanciais em uma operação industrial: minimizando multas por ultrapassagem de demanda e reduzindo os custos energéticos durante os horários de ponta. Para avaliar a economia total proporcionada pelo uso da tecnologia V2Ind, é necessário somar as economias mensais derivadas de ambos os aspectos analisados.

Primeiramente, identificou-se uma economia mensal de R\$ 4.789,50, resultante de evitar multas por ultrapassagem de demanda. Complementarmente, foi destacada uma economia mensal de R\$ 5.036,15, vinculada à minimização do consumo de energia no horário de ponta.

Portanto, a economia total mensal pode ser calculada como:

$$S_{V2Ind} = S_{ud} + S_{Ep} \quad (62)$$

Onde:

$S_{V2Ind}$  = Economia total mensal proporcionada pelo uso de V2Ind (R\$/mês),

$S_{ud}$  = Economia mensal por evitar multas de ultrapassagem de demanda (R\$/mês),

$S_{Ep}$  = Economia proveniente de aplicar o V2Ind durante o horário de ponta (R\$/mês).



Substituindo os valores já calculados:

$$S_{V2Ind} = 4.789,50R\$/mês + 5.036,15R\$/mês = 9.825,65R\$/mês \quad (63)$$

Através desta análise, nota-se que o uso de V2Ind pode proporcionar uma economia significativa para a empresa, nesse caso de R\$ 9.825,65 por mês. Isso indica que a aplicação desta técnica não só auxilia na gestão energética mais eficiente, mas também apresenta um potencial de impacto econômico positivo quantitativo.

Adicionalmente, é importante destacar que este estudo centrou-se quantitativamente em apenas duas das potenciais vias de economia que o uso de V2Ind pode proporcionar. A inclusão de outras variáveis e análises mais aprofundadas sobre os benefícios associados poderiam revelar um quadro ainda mais promissor para a adoção desta tecnologia.

## 6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Ao concluir este capítulo, demonstra-se que a implementação de técnicas V2Ind apresentam um potencial significativo na gestão de demanda energética em ambientes industriais. A análise quantitativa realizada revela uma oportunidade para economia de custos.

No entanto, é vital considerar as limitações da análise presente e a necessidade de pesquisas futuras mais detalhadas que possam avaliar integralmente todos os aspectos relacionados a esta implementação, incluindo a análise da degradação da bateria e os custos iniciais de infraestrutura e implementação.

A implementação do V2Ind não apenas promove benefícios econômicos, mas também aponta para uma gestão energética mais sustentável e responsável, evidenciando a capacidade dessa técnica em promover a modernização e a sustentabilidade nas operações industriais.

## 7 CONCLUSÃO

Nesse trabalho, desenvolveu-se uma metodologia que permite uma análise entre modelos de empilhadeiras à combustão e suas contrapartes elétricas. Uma das barreiras significativas para a implementação reside na dificuldade da percepção de que o alto custo inicial tem capacidade de ser amortizado devido à eficiência dos modelos elétricos, reduzindo os custos totais.

Posteriormente, a metodologia proposta foi ilustrada através da aplicação em um estudo de caso, avaliando os custos entre os modelos e considerando as opções de compra ou *leasing*, levando em conta as despesas de operação e manutenção e o consumo energético. Além disso, realizou-se uma análise do impacto ambiental, destacando a redução significativa na emissão de CO<sub>2</sub> quando comparado aos modelos tradicionais.

Os resultados do estudo de caso indicaram que a adoção de empilhadeiras elétricas de chumbo-ácido em um cenário de *leasing* pode resultar em uma redução substancial de custos, sem a necessidade de uma oneração no CAPEX, uma vez que não apresenta um investimento inicial, oferecendo um retorno sobre o investimento praticamente imediato para a empresa em estudo. Considerando as 18 empilhadeiras analisadas ao longo de um período de 5 anos, estima-se uma economia de R\$ 1.865.635,37, além da diminuição de 2.646 toneladas de emissões de dióxido de carbono equivalente.

Além disso, investigou-se o potencial de economia através do uso das empilhadeiras elétricas para transações energéticas com a infraestrutura industrial existente. Esta análise demonstrou a capacidade da técnica de V2Ind em mitigar o consumo durante os horários de pico e evitar ultrapassagens de demanda.

Por fim, é importante mencionar que a empresa objeto deste estudo de caso decidiu fazer a transição de suas empilhadeiras à combustão para modelos elétricos, migrando de equipamentos movidos por GLP para elétricos de chumbo ácido. Esta transição está ocorrendo de forma gradual, sendo implementada à medida que os contratos de *leasing* vencem ou em situações de expansão da frota.

## 7.1 TRABALHOS FUTUROS

Entre os trabalhos que podem ser desenvolvidos, elenca-se:

- Estudo da variação do tempo de retorno em função da utilização horária das empilhadeiras elétricas.
- Inclusão do impacto ambiental considerando as emissões durante o processo de fabricação das empilhadeiras (tanto à combustão quanto elétricas).
- Expandir a análise do potencial de economia do V2Ind além da atenuação de ultrapassagem de demanda e redução de consumo durante o horário de pico. Por exemplo, abordando o impacto positivo na rede.
- Explorar de forma quantitativa o custo de investimento para implementação da infraestrutura do V2Ind.
- Investigar uma possível relação entre o V2Ind e redução de vida útil de baterias.
- Implementação prática do V2Ind para levantamento de dados experimentais e avaliação do desempenho real.

## 7.2 ARTIGOS PUBLICADOS

- COPETTI, D. F. et al. Electric Forklifts: Technological Advancements and Impacts on Energy Transition and Sustainability. **15th Seminar on Power Electronics and Control**, Santa Maria. Anais do SEPOC, 2023.
- COPETTI, D. F. et al. Integration of Electric Vehicles into the Grid: Challenges and Opportunities for a Sustainable Energy System. **15th Seminar on Power Electronics and Control**, Santa Maria. Anais do SEPOC, 2023.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL. Micro e minigeração distribuída—sistema de compensação de energia elétrica. **Temáticos, ANEEL-Cadernos**, v. 2, 2016.
- ANTAS, K. C. Análise sobre sistemas de gerenciamento de baterias. **Universidade Federal de Campina Grande**, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), 2012.
- BOLOGNESI, H. M. Panorama da segunda vida de baterias veiculares e análise da pegada ambiental para uma aplicação em gerenciamento de energia residencial no Brasil. **Universidade Estadual de Campinas**, Dissertação (Mestrado), 2021.
- BUONOMANO, A. Building to vehicle to building concept: A comprehensive parametric and sensitivity analysis for decision making aims. **Applied Energy**, Elsevier, v. 261, p. 114077, 2020.
- CORREIA, C. H. N. P. Mercado multi-agente de eletricidade: comercialização de energia renovável em bolsa e por contratos bilaterais com gestão dinâmica de preço e volume. **Universidade de Lisboa**, Dissertação (Mestrado), 2016.
- CORREIA, L. M. A. Gestão de sistemas V2B e B2V em grandes edifícios. **Universidade de Coimbra**, Dissertação (Mestrado), 2022.
- CORREIA, W. F. M. Proteger: modelo para implementação de sistema de gestão de segurança do trabalho. **Universidade Federal de Pernambuco**, Dissertação (Mestrado), 2007.
- DANG, C. et al. Demand side load management for big industrial energy users under blockchain-based peer-to-peer electricity market. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 10, n. 6, p. 6426–6435, 2019.
- DEY, K. C. et al. Vehicle-to-vehicle (V2V) and vehicle-to-infrastructure (V2I) communication in a heterogeneous wireless network—performance evaluation. **Elsevier**, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 68, p. 168–184, 2016.
- DIAS, G. A. D. Harmônicas em sistemas industriais. **Edipucrs**, 2. ed. rev. e ampl., 2002.
- FARRET, F. A.; SIMÕES, M. G. **Integration of alternative sources of energy**. [S.l.]: Wiley Online Library, 2006. v. 504.
- FARUQUI, A.; SERGICI, S. Household response to dynamic pricing of electricity: a survey of 15 experiments. **Journal of Regulatory Economics**, Springer, v. 38, n. 2, p. 193–225, 2010.
- FIRSTENERGY. **Electric Forklift Facts: Saving and Analysis**. 2023. Acessado em: 07 de fevereiro de 2023. Disponível em: <<http://www.firstenergycorp.com/Electric-Forklift-Fact-Sheet.pdf>>.
- GAETE-MORALES, C. et al. An open tool for creating battery-electric vehicle time series from empirical data, emobpy. **Scientific data**, Nature Publishing Group UK London, v. 8, n. 1, p. 152, 2021.
- GAINES, L. L.; ELGOWAINY, A.; WANG, M. Q. Full fuel-cycle comparison of forklift propulsion systems. **Argonne National Lab**, 2008.
- GOLDENSTEIN, M.; AZEVEDO, R. L. S. d. Combustíveis alternativos e inovações no setor automotivo: será o fim da "era do petróleo"? **BNDES Setorial**, n. 23, p. 235–267, 2006.

INSTITUTE, E. P. R. **Forklift: Cost Comparison Calculator**. 2023. Acessado em: 07 de fevereiro de 2023. Disponível em: <[http://www.epri.com/forklift\\_cost\\_comparison\\_calculator](http://www.epri.com/forklift_cost_comparison_calculator)>.

IQBAL SHEERAZ, A. X. M. U. J. S. S. A. u. M. Z. H. U. R. M. F. S.; ABDELBAKY, M. A. V2g strategy for primary frequency control of an industrial microgrid considering the charging station operator. **Electronics**, MDPI, v. 9, n. 4, p. 549, 2020.

JUNIOR, I. C. L. Análise comparativa de emissões atmosféricas em terminais de contêineres ludmila guimarães ribeiro. **XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transportes da ANPET**, 2015.

JÚNIOR, D. J. d. B.; GOMES, V. E. d. O.; BORK, C. A. S. Escolha de uma empilhadeira baseada em critérios sustentáveis. **Revista E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial**, v. 8, n. 2, p. 59–70, 2015.

JÚNIOR, L. C. P. C. Análise comparativa da substituição de motores a combustão por motores elétricos no setor de transportes. **Universidade Federal Rural do Semiárido**, Dissertação (Mestrado), 2021.

KAN, R. F. V. Conversor ca-cc trifásico bidirecional e isolado de único estágio para aplicação em carregadores veiculares multifuncionais. **Universidade do Estado de Santa Catarina**, Tese (Doutorado), 2023.

KATO, J. M. Avaliação de desempenho de sistemas logísticos através do seis sigma e balanced scorecard. **Revista Business FAE**, Curitiba, v. 6, n. 2, p. 113–124, 2003.

KAUARK, F. d. S.; MANHÃES, F. C.; MEDEIROS, C. H. Metodologia da pesquisa: um guia prático. Via Litterarum, 2010.

KIRSCHEN, D. S.; STRBAC, G. Fundamentals of power system economics. **John Wiley & Sons LTD**, Springer, 2018.

KWON, Y. et al. Multi-objective optimization of home appliances and electric vehicle considering customers benefits and offsite shared photovoltaic curtailment. **Energies**, MDPI, v. 13, n. 11, p. 2852, 2020. LAMEIRAS, F. L. O hidrogênio como vetor de energia. **Escola Superior da Guerra (Ministério de Defesa do Brasil)**, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), 2019.

LEÃO, A. L. M. de S.; MELLO, S. C. B. de; VIEIRA, R. S. G. O papel da teoria no método de pesquisa em administração. **Revista Organizações em Contexto**, v. 5, n. 10, p. 1–16, 2009.

LINARDI, M. Hidrogênio e células a combustível. **Revista-Economia e Energia**, 2014.

LÉO, R. M.; TELLO-GAMARRA, J. Inovação em serviços: estado da arte e perspectivas futuras. **Suma de Negócios**, v. 8, n. 17, p. 1–10, 2017.

MARTELLI, A. et al. Ação de educação ambiental no reflorestamento de uma nascente e utilizada como medida mitigadora dos gases causadores do efeito estufa. **REVISTA Facul-dades do Saber**, v. 3, n. 05, 2018.

MARTINS, G. C.; MEDEIROS, G. A. de. Aspectos e benefícios da implantação da certificação iso 14001 em empresa do setor de logística na região metropolitana de campinas. **Holos Environment**, v. 11, n. 2, p. 114–125, 2011.

MATTOS, L. B. R. d. A importância do setor de transportes na emissão de gases do efeito estufa: O caso do município do rio de janeiro. **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, Tese (Doutorado), 2001.

MEDEIROS, A. et al. Sistema de gerenciamento de energia elétrica residencial aplicado à recarga do veículo elétrico e transação de energia. **Congresso Brasileiro de Automática**, 2022.

MEGIER, G. R. Transação de energia elétrica peer-to-peer em redes elétricas inteligentes. **Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul**, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), 2020.

Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 11 - Transporte, Movimentação, Armazenagem e Manuseio de Materiais**. [S.l.], 2016. Acesso em: 12 nov. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/arquivos/assuntos/guia-de-inscricao/nr-11.pdf>>.

Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 15 - Atividades e Operações Insalubres**. [S.l.], 2019. Acesso em: 12 nov. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/arquivos/assuntos/guia-de-inscricao/nr-15.pdf>>.

MOHAMED, M. A. A relaxed consensus plus innovation based effective negotiation approach for energy cooperation between smart grid and microgrid. **Energy**, Elsevier, v. 252, 2022.

MORAES, F. G. et al. Um modelo matemático no auxílio da minimização das emissões de CO<sub>2</sub>. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 10, n. 1, 2023.

MORAES, L. L. d. O cenário do hidrogênio verde: uma revisão como suporte ao recente interesse surgido em indústrias e governos na região. **Universidade Federal Rural de Pernambuco**, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), 2022.

NADEEM, F. et al. Comparative review of energy storage systems, their roles, and impact on future power systems. **IEEE access**, IEEE, v. 7, p. 4555–4585, 2018.

OLIVARES, D. E. et al. Trends in microgrid control. **IEEE Transactions on smart grid**, IEEE, v. 5, n. 4, p. 1905–1919, 2014.

OLIVEIRA, W. R. d. Uma análise sobre inversores de frequência e distorções harmônicas e inter-harmônicas. **Universidade de Brasília**, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), 2013.

PAIXAO, B. A. et al. Comparação de vida útil entre bancos de baterias de íon-lítio e chumbo-ácido no contexto da compensação de energia com fotovoltaicos e tarifa branca. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE**, v. 1, n. 1, 2020.

PANDEIA, S.; KUMAR, P. “A theoretical framework on return on investment (ROI) in academic libraries”, **Library Hi Tech News**, Vol. 39, n. 3, 2022

PANG, C.; DUTTA, P.; KEZUNOVIC, M. Benefits of dispersed energy storage for V2B uses in the smart grid. **IEEE Transactions on smart grid**, IEEE, v. 3, n. 1, p. 473–482, 2011.

RODRIGUES, E. C. C. et al. Análise do desempenho operacional do centro de distribuição de um grupo empresarial com atividades atacado e varejo. In: **XVIII Congresso Panamericano de Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística (PANAM 2014)**. Santander, Espanha: [s.n.], 2014.

RODRIGUES, J. E. M. Qualidade de energia: produção descentralizada, desafios e soluções. **Universidade do Porto**, Dissertação (Mestrado), 2017.

SANTOS, M. d. et al. Seleção de uma transpaleteira por meio do método sapevo\_m para uma empresa do setor moveleiro. In: UNIVERSIDADE FEDERAL DE GRÃNDE DOURA- DOS. **II Simpósio Nacional de Engenharia de Produção**. Mato Grosso do Sul, 2019.

SATTARPOUR, T.; NAZARPOUR, D.; GOLSHANNAVAZ, S. A multi-objective hem strategy for smart home energy scheduling: A collaborative approach to support microgrid operation. **Sustainable cities and society**, Elsevier, v. 37, p. 26–33, 2018.

SCHMIDT, N. C. Estudo de caso da perspectiva logística: utilização de uma empilhadeira para movimentação de cargas em uma propriedade rural. **Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul**, Dissertação (Mestrado), 2019.

SILVA, A. L. M. d. Indicadores de desempenho do transporte rodoviário de cargas. **Univer-sidade de São Paulo**, Dissertação (Mestrado), 1999.

SOLANKE, T. U. et al. A review of strategic charging–discharging control of grid-connected electric vehicles. **Journal of Energy Storage**, Elsevier, v. 28, p. 101193, 2020.

SUBRAMANIAM, R.; BILLINTON, R.; WACKER, G. Understanding industrial losses resulting from electric service interruptions. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 29, n. 1, p. 238–244, 1993.

TAN, K. M.; RAMACHANDARAMURTHY, V. K.; YONG, J. Y. Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 53, p. 720–732, 2016.

TERUO, L.; JUNIOR, L. C. G.; OLIVEIRA, J. d. Empilhadeira robótica. **Universidade Tecnológica Federal do Paraná**, Dissertação (Mestrado), 2015.

United Nations Environment Programme (UNEP). **Emissions Gap Report 2023**. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2023>. Acesso em: 22 de dezembro de 2023.

VARAJÃO, D. A. C. P. B. Carregador bidirecional para veículos elétricos baseado em andar de conversão matricial. **Universidade do Porto**, Dissertação (Mestrado), 2012.

VIANNA, S. B.; GARCIA, M. G. P.; SZANIECKI, Y. A. Tesla motors: A introdução dos veículos elétricos nos eua, seu impacto para a economia, bem como suas externalidades. **Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro**, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), 2019.

VOIGT, I. B. Leasing financeiro, leasing operacional e financiamento: estudo sobre uma ótica financeira dos fatores para tomada de decisão do cliente. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), 2022.

WAYCARBON. **Produto 4 Cálculo das Emissões de GEE da Região Metropolitana de Campinas**. Campinas, 2018.

WU, Y. et al. Real-time energy management of photovoltaic-assisted electric vehicle charging station by markov decision process. **Journal of Power Sources**, Elsevier, v. 476, p.228504, 2020.

YANG, Y.; WANG, S. Resilient residential energy management with vehicle-to-home and photovoltaic uncertainty. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 132, p. 107206, 2021.

ZAGRAJEK KRZYSZTOF, J. P. . S. K. G.; WRÓBLEWSKI, K. Framework for the introduction of vehicle-to-grid technology into the polish electricity market. **Energies**, MDPI, v. 14, n. 12, p. 3673, 2021.

ZHAO, L.; ARAVINTHAN, V. Strategies of residential peak shaving with integration of demand response and V2H. In: IEEE. **2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)**. [S.l.], 2013. p. 1–5.

ZUPANČIČ, J.; FILIPIČ, B.; GAMS, M. Genetic-programming-based multi-objective optimization of strategies for home energy-management systems. **Energy**, Elsevier, v. 203, p. 117769, 2020.