



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANTÔNIO JOSÉ NOGUEIRA JÚNIOR

AVALIAÇÃO ECONÔMICA COMPLETA DA SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES
INDUSTRIAIS DA PERSPECTIVA DA ANÁLISE DOS CUSTOS DO CICLO DE VIDA

MOSSORÓ

2024

ANTÔNIO JOSÉ NOGUEIRA JÚNIOR

AVALIAÇÃO ECONÔMICA COMPLETA DA SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES
INDUSTRIAIS DA PERSPECTIVA DA ANÁLISE DOS CUSTOS DO CICLO DE VIDA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Sistemas Elétricos

Orientador: Victor de Paula Brandão Aguiar,
Prof. Dr.

Coorientador: Rogério Diogne de Souza e
Silva, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

N778a Nogueira Júnior, Antônio José.
AVALIAÇÃO ECONÔMICA COMPLETA DA SUBSTITUIÇÃO DE
MOTORES INDUSTRIAIS DA PERSPECTIVA DA ANÁLISE DOS
CUSTOS DO CICLO DE VIDA / Antônio José Nogueira
Júnior. - 2024.
105 f. : il.

Orientador: Victor de Paula Brandão Aguiar.
Coorientador: Rogério Diogne de Souza e Silva.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica, 2024.

1. Motores de Indução Trifásicos (MIT). 2.
Eficiência Energética. 3. Análise de Custos do
Ciclo de Vida (ACCV). 4. Economia Líquida. 5.
Tempo de Serviço. I. Aguiar, Victor de Paula
Brandão, orient. II. de Souza e Silva, Rogério
Diogne, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ANTÔNIO JOSÉ NOGUEIRA JÚNIOR

AVALIAÇÃO ECONÔMICA COMPLETA DA SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES
INDUSTRIAIS DA PERSPECTIVA DA ANÁLISE DOS CUSTOS DO CICLO DE VIDA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Sistemas Elétricos

Defendida em: 25 / 03 /2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 VICTOR DE PAULA BRANDAO AGUIAR
Data: 14/06/2024 11:03:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Victor de Paula Brandão Aguiar, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Documento assinado digitalmente
 ROGERIO DIOGNE DE SOUZA E SILVA
Data: 17/06/2024 16:47:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rogério Diogne de Souza e Silva, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 RICARDO SILVA THE PONTES
Data: 17/06/2024 16:07:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ricardo Silva Thé Pontes, Prof. Dr. (UFC)
Membro Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar expressando minha gratidão a Deus, cuja bondade e provisão tornaram possível cada passo desta jornada. Seu amor e orientação foram fundamentais em todos os momentos.

À minha família, em especial aos meus pais, Antônio José e Maria Lassali, e à minha irmã Alcinda Nathally, meu profundo agradecimento pelo apoio inabalável, incentivo e amor incondicional que me deram ao longo deste percurso. Sem vocês, nada disso seria possível.

À minha companheira, Adla Regina, quero expressar minha gratidão pelo amor, compreensão e apoio incansáveis. Sua presença ao meu lado foi um farol de luz nos momentos mais desafiadores.

Ao meu estimado orientador, Prof. Dr. Victor de Paula Brandão Aguiar, devo um agradecimento especial. Sua paciência, orientação e valiosas contribuições foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Sua dedicação e comprometimento foram inspiradores e me guiaram em cada etapa deste processo.

Também desejo agradecer ao meu coorientador, Prof. Dr. Rogério Diogne de Souza e Silva, por suas contribuições significativas que enriqueceram ainda mais este trabalho.

Aos meus colegas de mestrado, Eliel Tamilo, José Neto, Maria Teresa e Sanderson Aron, expresso minha sincera gratidão pela amizade, apoio mútuo e companheirismo ao longo desta jornada.

Ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da UFERSA por ter proporcionado a possibilidade de chegar a este momento.

A todos os que de alguma forma contribuíram para este trabalho, meu mais profundo obrigado.

RESUMO

A crescente preocupação com as alterações climáticas devido às emissões de gases de efeito estufa (GEE) tem fundamentado esforços globais para redução. As ações de eficiência energética (AEE) e o gerenciamento pelo lado da demanda (GLD) são interessantes em sua utilização mais sustentável e vêm se expandindo ao longo dos anos no setor industrial. Tal setor tem parcela significativa no consumo energético e é um excelente campo para práticas de ações de eficiência energética. A substituição de motores de baixo rendimento por motores de alto rendimento é uma AEE muito comum neste setor. Entretanto, motores de alto rendimento ainda apresentam um elevado custo, tornando necessária uma análise técnico-econômica a fim de determinar a viabilidade da ação. Para isto, a análise de custos de ciclo de vida (ACCV) tem se mostrado uma excelente alternativa para verificação de viabilidade econômica de AEE devido sua metodologia que considera as despesas durante todo o ciclo de vida um projeto ou equipamento, incluindo despesas operacionais e valores residuais, diferenciando-a de outros métodos de análise de viabilidade econômica. Considerando que os investidores, gestores e outras pessoas destas indústrias necessitam de mais informações para tomadas de decisões que envolvem a minimização de custos e a maximização do lucro, o objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para calcular a influência do período de estudo em um processo de substituição de motores elétricos de baixo rendimento por outros de rendimento superior, baseados na vida útil destes equipamentos. Este trabalho mostra também, matematicamente, que o valor residual do motor a ser substituído afeta na viabilidade econômica da substituição, i.e., é necessário precificar o valor que os motores ainda possuem ao término de um tempo de serviço. Para isto, foram utilizados dados de eficiência de motores IR2, IR3, IE2 e IE3, disponíveis pelos fabricantes, dados tarifários e de consumo de energia elétrica na indústria, além de variáveis econômicas consolidadas e conhecidas (taxa de escalada de energia elétrica, taxa de desconto, variação das tarifas de eletricidade etc.). Por meio da simulação, foram explorados quatro cenários de substituição de motores, utilizando o método da economia líquida (ou *net savings*). Foram considerados os tempos de serviço dos motores e variáveis do tempo de estudo na análise de custos de ciclo de vida (ACCV). Verificou-se que, ao fim do período da ACCV, a economia líquida e o valor residual variam de acordo com o tempo de serviço dos motores utilizado na análise e com o tempo do estudo.

Palavras-chave: Motores de Indução Trifásicos (MIT), Eficiência Energética, Tempo de Serviço, Tempo do Estudo, Análise dos Custos do Ciclo de Vida (ACCV), Economia Líquida.

ABSTRACT

The increasing concern about climate change due to greenhouse gas emissions (GHG) has underpinned global efforts for reduction. Energy efficiency actions (EEA) and demand-side management (DSM) are interesting for more sustainable use and have been expanded over the years in the industrial sector. This sector has a significant role in energy consumption and is an excellent field for EEA. The replacement of low-efficiency motors with high-efficiency motors is a very common EEA in this sector. However, high-efficiency motors still have a high cost, making a technical-economic analysis necessary to determine the viability of the action. For this, the Life Cycle Cost Analysis (LCCA) has proven to be an excellent alternative to verify the cost-effectiveness of an EEA, because its methodology that considers expenses throughout the life cycle of a project or equipment, including operating expenses and residual values, differentiating it from other methods of economic analysis. Considering that investors, managers, and other individuals in these industries require more information for decision-making involving cost minimization and profit maximization, the objective of this work is to present a methodology to calculate the influence of the study period in a process of replacing low-efficiency electric motors with higher-efficiency ones, based on the lifespan of these equipment. This work also mathematically shows the residual value that the motor to be replaced affects the economic viability of the replacement, i.e., it is necessary to value that the motors still have at the end of a service time. For this, efficiency data for IR2, IR3, IE2, and IE3 motors, made available by manufacturers, tariff, and electricity consumption data in the industry, as well as consolidated and known economic variables (rate of electricity escalation, discount rate, variation in electricity tariffs, etc.) were used. Through simulation, four motor replacement scenarios were explored using the Net Savings method. The service times of the motors and study time variables were considered in the Life Cycle Cost Analysis (LCCA). It was found that, at the end of the LCCA period, Net Savings and Residual Value vary according to the service time of the motors used in the analysis and the study time.

Keywords: Three Phase Induction Motors, Energy Efficiency, Service Time, Study Time, Life Cycle Cost Analysis (LCCA), Net Savings.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação em relação ao rendimento.....	22
Tabela 2 – Informações técnicas do motor a ser substituído do caso 01.....	55
Tabela 3 – Informações técnicas dos motores para substituição do caso 01.....	56
Tabela 4 – Tempo de serviço dos motores elétricos de indução dos casos 01,02 e 03.	56
Tabela 5 – Informações técnicas do motor a ser substituído do caso 02.....	57
Tabela 6 – Informações técnicas dos motores para substituição do caso 02.....	57
Tabela 7 – Informações técnicas do motor a ser substituído do caso 03.....	58
Tabela 8 – Informações técnicas dos motores para substituição do caso 03.....	58
Tabela 9 – Informações técnicas do motor a ser substituído do caso 04.....	58
Tabela 10 – Informações técnicas do motor a ser substituído do caso 04.....	59
Tabela 11 – Tempo de serviço dos motores elétricos de indução do caso 04.....	59
Tabela 12 - Dados econômicos utilizados para os casos 01, 02 e 03.....	69
Tabela 13 - Dados econômicos utilizados para o caso 04.....	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Período de estudo sem período de planejamento e construção.....	32
Figura 2 – Período de estudo com o período de planejamento e construção.....	32
Figura 3 – Gráfico dos tempos utilizados na ACCV para o caso 4.1.1.....	36
Figura 4 – Gráfico dos tempos utilizados na ACCV para o caso 4.1.2.....	39
Figura 5 – Gráfico dos tempos utilizados na ACCV para o caso 4.2.1.....	41
Figura 6 – Gráfico dos tempos utilizados na ACCV para o caso 4.2.2.....	43
Figura 7 – Gráfico dos tempos utilizados na ACCV para o caso 4.2.3.....	46
Figura 8 – Gráfico dos tempos utilizados na ACCV para o caso 4.3.1.....	48
Figura 9 – Gráfico dos tempos utilizados na ACCV para o caso 4.3.2.....	50
Figura 10 – Gráfico dos tempos utilizados na ACCV para o caso 4.3.2.....	52
Figura 11 – Etapas do simulador técnico-econômico.....	61
Figura 12 – Etapa de leitura de dados.....	63
Figura 13 – Etapa inicial da substituição dos motores.....	64
Figura 14 – Etapa da definição do caso a ser aplicado.....	65
Figura 15 - Etapa de análise econômica.....	67
Figura 16 – <i>Net savings</i> em função do tempo de estudo para o caso 01 e opção de substituição 01.....	70
Figura 17 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 01 e opção de substituição 01.....	71
Figura 18 – <i>Net savings</i> em função do tempo de estudo para o caso 01 e opção de substituição 02.....	72
Figura 19 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 01 e opção de substituição 02.....	73
Figura 20 – <i>Net savings</i> em função do tempo de estudo para o caso 01 e opção de substituição 03.....	74
Figura 21 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 01 e opção de substituição 03.....	74
Figura 22 – <i>Net savings</i> em função do tempo de estudo para o caso 01 e opção de substituição 04.....	75
Figura 23 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 01 e opção de substituição 04.....	76

Figura 24 – <i>Net savings</i> em função do tempo de estudo para o caso 02 e opção de substituição 01.....	77
Figura 25 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 02 e opção de substituição 01.....	78
Figura 26 – <i>Net savings</i> em função do tempo de estudo para o caso 02 e opção de substituição 02.....	79
Figura 27 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 02 e opção de substituição 02.....	79
Figura 28 – <i>Net savings</i> em função do tempo de estudo para o caso 02 e opção de substituição 03.....	80
Figura 29 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 02 e opção de substituição 03.....	81
Figura 30 – <i>Net savings</i> em função do tempo de estudo para o caso 03 e opção de substituição 01.....	82
Figura 31 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 03 e opção de substituição 01.....	82
Figura 32 – <i>Net savings</i> em função do tempo de estudo para o caso 03 e opção de substituição 02.....	83
Figura 33 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 03 e opção de substituição 02.....	84
Figura 34 – <i>Net savings</i> em função do tempo de estudo para o caso 03 e opção de substituição 03.....	85
Figura 35 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 03 e opção de substituição 03.....	85
Figura 36 – <i>Net savings</i> em função do tempo de estudo para o caso 04 e opção de substituição 01.....	86
Figura 37 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 04 e opção de substituição 01.....	87

LISTA DE ABREVIATURAS

- ACCV – Análise de Custos do Ciclo de Vida
- AEE – Ações de Eficiência Energética
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- CE – Custo Energético
- CEMEP - *European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics*
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética
- GEE – Gases de Efeito Estufa
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IE - *International Efficiency*
- IEC – *International Electrotechnical Commission*
- INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
- IPCA - Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
- IR2 – Índice de Rendimento 2
- IR3 – Índice de Rendimento 3
- MDIC - Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços
- MEPS – *Minimum Energy Performance Standards*
- MIT – Motor de Indução Trifásico
- MITRGE – Motores de indução com rotor gaiola de esquilo
- MME – Ministério de Minas e Energia
- NBR – Normas Brasileiras
- PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem
- PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

- CE' – Custo da energia consumida para o caso 4.1.1
- CE'' – Custo da energia consumida para o caso 4.1.2
- CE_1 – Custo da energia consumida para o caso 4.2.1
- CE_2 – Custo da energia consumida para o caso 4.2.2
- CE_3 – Custo da energia consumida para o caso 4.2.3
- CE_4 – Custo da energia consumida para o caso 4.3.1
- CE_5 – Custo da energia consumida para o caso 4.3.2
- CE_6 – Custo da energia consumida para o caso 4.3.3
- C_E – Custo da energia consumida
- C_{Ear} - Custo com energia elétrica do motor de alto rendimento
- C_{Ebr} - Custo com energia elétrica do motor de baixo rendimento
- CI' – Custo do investimento para o caso 4.1.1
- CI'' – Custo do investimento para o caso 4.1.2
- CI_1 – Custo do investimento para o caso 4.2.1
- CI_2 – Custo do investimento para o caso 4.2.2
- CI_3 – Custo do investimento para o caso 4.2.3
- CI_4 – Custo do investimento para o caso 4.3.1
- CI_5 – Custo do investimento para o caso 4.3.2
- CI_6 – Custo do investimento para o caso 4.3.3
- C_I – Custo do investimento
- C_{LCC} – Custo do ciclo de vida
- $C_{O\&M}$ – Custos relacionados a operação e manutenção
- C_{rep} – Custo de reposição de peças
- CR' – Custo residual para o caso 4.1.1
- CR'' – Custo residual para o caso 4.1.2
- CR_1 – Custo residual para o caso 4.2.1
- CR_2 – Custo residual para o caso 4.2.2
- CR_3 – Custo residual para o caso 4.2.3
- CR_4 – Custo residual para o caso 4.3.1
- CR_5 – Custo residual para o caso 4.3.2
- CR_6 – Custo residual para o caso 4.3.3

C_{res} – Custo residual

d – Taxa de desconto

\hat{e} – Taxa de escalada

H – Quantidade de operação por ano

I_{0ar} - Custo de investimento do motor de alto rendimento

I_{0br} - Custo de investimento do motor de baixo rendimento

L – Carregamento do motor

m_{ar} – Tempo de serviço do motor de alto rendimento

m_{br} – Tempo de serviço do motor de baixo rendimento

n_{ciclo} – Tempo do ciclo de vida

$\eta(L)$ – Rendimento do motor

NS – *Net savings*

NS' – *Net savings* para o caso 4.1.1

NS'' – *Net savings* para o caso 4.1.2

NS_1 – *Net savings* para o caso 4.2.1

NS_2 – *Net savings* para o caso 4.2.2

NS_3 – *Net savings* para o caso 4.2.3

NS_4 – *Net savings* para o caso 4.3.1

NS_5 – *Net savings* para o caso 4.3.2

NS_6 – *Net savings* para o caso 4.3.3

P_n – Potência nominal

T – Tarifa de energia elétrica

VPL_{ar} - Valor presente líquido do MIT de alto rendimento

VPL_{ar}' - Valor presente líquido do MIT de alto rendimento para o caso 4.1.1

VPL_{ar}'' - Valor presente líquido do MIT de alto rendimento para o caso 4.1.2

VPL_{ar2} - Valor presente líquido do MIT de alto rendimento para o caso 4.2.2

VPL_{ar3} - Valor presente líquido do MIT de alto rendimento para o caso 4.2.3

VPL_{ar5} - Valor presente líquido do MIT de alto rendimento para o caso 4.3.2

VPL_{ar6} - Valor presente líquido do MIT de alto rendimento para o caso 4.3.3

VPL_{br} - Valor presente líquido do MIT de baixo rendimento

VPL_{br}' - Valor presente líquido do MIT de baixo rendimento para o caso 4.1.1

VPL_{br}'' - Valor presente líquido do MIT de baixo rendimento para o caso 4.1.2

VPL_{br2} - Valor presente líquido do MIT de baixo rendimento para o caso 4.2.2

VPL_{br3} - Valor presente líquido do MIT de baixo rendimento para o caso 4.2.3

VPL_{br5} - Valor presente líquido do MIT de baixo rendimento para o caso 4.3.2

VPL_{br6} - Valor presente líquido do MIT de baixo rendimento para o caso 4.3.3

VPL_{CE} - Valor presente líquido dos custos com energia elétrica

VPL_{CI} - Valor presente do custo de investimento

ΔC_E - Diferença dos custos com energia do motor de baixo rendimento com o de alto rendimento

ΔI_0 - Diferença dos custos de investimento do motor de alto rendimento com o de baixo rendimento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Eficiência energética no Brasil.....	18
1.2	Ações de eficiência energética no setor industrial.....	19
1.3	Eficiência energética em motores de alto rendimento.....	19
1.4	Classificação dos motores trifásicos de indução quanto ao rendimento	20
1.5	Justificativa do trabalho.....	22
1.6	Objetivos gerais e específicos.....	23
2	TÉCNICAS DE SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	25
2.1	Substituição direta.....	26
2.2	Substituição por motores de potência nominal reduzida.....	27
2.3	Substituição por motores com potência nominal maior.....	28
2.4	Técnicas de <i>retrofitting</i>.....	29
2.5	Tecnologias avançadas.....	29
3	ANÁLISE DE CUSTOS DO CICLO DE VIDA	31
3.1	Introdução à análise de custos do ciclo de vida (ACCV).....	31
3.1.1	<i>Períodos utilizados em uma análise de custos do ciclo de vida.....</i>	31
3.1.2	<i>Valor presente.....</i>	32
3.1.3	<i>Taxa de desconto e taxa de escalada.....</i>	33
3.1.4	<i>Fórmula geral dos custos do ciclo de vida (C_{LCC}) aplicado a motores de indução trifásicos.....</i>	34
3.1.5	<i>Net savings ou economia líquida.....</i>	35
4	ANÁLISE DE CUSTOS DE CICLO DE VIDA DA SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES DE BAIXO RENDIMENTO POR MOTORES DE ALTO RENDIMENTO.....	36
4.1	Caso 01 – Tempo de serviços dos MIT diferente do período de estudo....	36
4.1.1	<i>Tempo de serviço do MIT menor que o período de estudo do projeto.....</i>	36
4.1.2	<i>Tempo de serviço do MIT maior que período de estudo do projeto.....</i>	39

4.2	Caso 02 – Tempo de serviço do MIT de alto rendimento menor que o tempo de serviço do MIT de baixo rendimento e diferente do período de estudo do projeto.....	41
4.2.1	<i>Tempo de serviço do MIT de alto de rendimento menor que o tempo de serviço do MIT de baixo rendimento e menor que o período de estudo do projeto.....</i>	41
4.2.2	<i>Tempo de serviço do MIT de alto rendimento menor que o período de estudo do projeto e menor que o tempo de serviço do MIT de baixo rendimento.....</i>	43
4.2.3	<i>Período de estudo do projeto menor que a vida útil do MIT de alto rendimento e menor que a vida útil do MIT de baixo rendimento.....</i>	46
4.3	Caso 03 – Tempo de serviço do MIT de baixo rendimento menor que o tempo de serviço do MIT de alto rendimento e diferente do período de estudo do projeto.....	48
4.3.1	<i>Tempo de serviço do MIT de baixo rendimento menor que o tempo de serviço do MIT de alto rendimento e menor que o período de estudo do projeto.....</i>	49
4.3.2	<i>Tempo de serviço do MIT de baixo rendimento menor que o período de estudo do projeto e menor que o tempo de serviço do MIT de alto rendimento.....</i>	50
4.3.3	<i>Período de estudo do projeto menor que tempo de serviço do MIT de baixo rendimento e menor que o tempo de serviço do MIT de alto rendimento.....</i>	52
5	SIMULAÇÕES – ANÁLISE ECONÔMICA DA SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES POR MOTORES DE MAIOR RENDIMENTO.....	55
5.1	Estudo de caso 01.....	55
5.2	Estudo de caso 02.....	56
5.3	Estudo de caso 03.....	57
5.4	Estudo de caso 04.....	58
5.5	Simulador – Substituição de motores IR2/IE2 por motores IR3/IE3.....	59
5.5.1	<i>Desenvolvimento do software: linguagem e estruturação.....</i>	60

5.5.2	<i>Etapa de leitura e preparação dos dados.....</i>	61
5.5.3	<i>Etapa de substituição dos motores.....</i>	63
5.5.4	<i>Etapa de análise econômica.....</i>	66
5.5.5	<i>Etapa de demonstrações de resultados.....</i>	67
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	69
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	88
7.1	Trabalhos futuros.....	89
	REFERÊNCIAS	91
	APÊNDICE A – CÓDIGO EM PYTHON DO SIMULADOR.....	95
	APÊNDICE B – APÊNDICE B – EXEMPLO DE SAÍDA DOS RESULTADOS EM UM <i>DATAFRAME</i>.....	105

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é essencial para a população e para o desenvolvimento econômico de um país. Esta energia, que é utilizada para fins diversos, é oriunda da natureza e após diversos processos, como a transformação, transporte, distribuição e armazenamento, torna-se disponível para o uso final. No entanto, atualmente, a preocupação dos órgãos responsáveis pelo gerenciamento energético do país não é somente no aumento de produção de energia, mas também no uso racional desta (BRASIL, 2007). Sendo assim, a eficiência energética, de modo geral, é fundamental para a redução do consumo energético, reduzindo custos e ocasionando em redução de impactos ambientais.

1.1 Eficiência energética no brasil

A preocupação com a eficiência energética no Brasil surgiu com a crise petrolífera, na década de 70, quando ficou em evidência que as reservas fósseis não atenderiam a demanda necessária ao longo dos anos e que o uso demasiado causaria prejuízos para o meio ambiente. No entanto, a formalização do termo eficiência energética no Brasil aconteceu em 1982, através do Conserve (Programa de Conservação de Energia do Setor Industrial), criado pelo Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC), que visava promover o desenvolvimento de produtos e processos energeticamente eficientes na indústria. O programa foi extinto após um ano, devido a crises financeiras (BRASIL, 2007).

Em 1984, quando o fornecimento de energia elétrica encontrava-se em um estado crítico, foi criado pelo governo federal o PBE (Programa Brasileiro de Etiquetagem), conduzido pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) e com o objetivo de fornecer informações energéticas sobre equipamentos. Em 2009, o programa foi ampliado para a análise das edificações. Este programa encontra-se em vigor até os dias atuais.

No ano de 1985, foi criado o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), e este foi se desenvolvendo ao longo dos anos e abrangendo alguns subprogramas, entre os quais se destacam o uso de iluminação, equipamentos elétricos e eletrodomésticos mais eficientes. Em conjunto com o Inmetro, foi criado o Selo Procel. Em 1991, foi criado o Selo Conpet, através do Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (Conpet), com ações focadas em eficiência energética nos setores industrial e de transporte comercial (BRASIL, 2023).

Em meados do meio do ano de 2000, foi estabelecido que uma fração da receita operacional líquida das empresas distribuidoras de energia elétrica deve ser dedicada a projetos de eficiência energética, sob a gestão da Agência Nacional de Energia Elétrica (BRASIL, 2000).

No ano seguinte, foi estabelecido os níveis mínimos de eficiência energética para equipamentos no Brasil. Estes foram regulamentados pelo Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética, através de lei que ficou conhecida como Lei da Eficiência Energética (BRASIL, 2001).

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2020), diversas ações de eficiência energética foram fomentadas ao longo dos anos, destacando também as políticas educacionais que têm como objetivo conscientizar a população para o uso racional de energia.

Por fim, cabe destacar a meta de redução de consumo energético em 10% até o ano de 2030 estabelecida pelo Plano Nacional de Eficiência Energética, criado pelo Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2011).

1.2 Ações de eficiência energética no setor industrial

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2021), o setor industrial é responsável por 32,3% do uso final de energia elétrica no Brasil, tornando-o um setor com um potencial enorme para ações de eficiência energética. A força motriz em operação utiliza 68% dessa energia elétrica. No geral, os motores elétricos representam, aproximadamente, 30% do consumo energético do país.

As três principais medidas de eficiência energética são: uso de acionamentos (inversores de frequência, reguladores de tensão); adequação da potência do motor à carga e o uso de motores de alto rendimento.

A aplicação de acionamentos tem uma série de benefícios adicionais à economia de energia, como melhor controle do processo, redução de ruído, redução de manutenções necessárias pelas partidas e paradas mais suaves.

A adequação à carga é outra medida de redução de consumo de energia. Muitos motores encontram-se sobredimensionados, operando em baixo rendimento, ocasionando em desperdício de energia elétrica (BRASIL, 2007).

1.3 Eficiência energética em motores de alto rendimento

Em relação a utilização de motores de alto rendimento, com a adoção de critérios de padronização e etiquetagem desde 1993, os rendimentos nominais dos motores vêm sendo aumentado, ocasionando em redução de energia elétrica. Em 2002, com a Lei de Eficiência Energética já em vigor, o motor elétrico trifásico de indução foi o primeiro equipamento a ter os índices mínimos de desempenho regulamentados (BRASIL, 2002).

Em 2005, através da Portaria Interministerial nº 553/2005 do Ministério de Minas e Energia, foi determinado a obrigatoriedade de níveis mínimos de eficiência para motores de indução trifásicos fabricados a partir de dezembro de 2009 (BRASIL, 2007).

No ano de 2015, foi instituído pela ANEEL o projeto prioritário de incentivo a substituição de motores elétricos no Brasil, por motores mais eficientes e que atendam a regulamentação vigente de padrões mínimos (ANEEL, 2015).

Por fim, em 2017, foi instituída através da portaria nº 1, do Ministério de Minas e Energia, que o nível de rendimento mínimo para Motores de Indução Trifásicos com Rotor Gaiola de Esquilo (MITRGE) comercializados seria a classificação equivalente a IR3. Esta portaria entrou em vigor em agosto de 2019 (BRASIL, 2017). Atualmente, pode-se afirmar que o Brasil passou por uma transição onde o MITRGE assume o índice IR3 (Índice de rendimento 3) como valor mínimo de rendimento permitido em motores produzidos, comercializados e importados no Brasil.

1.4 Classificação dos motores trifásicos de indução quanto ao rendimento

Os motores elétricos de indução desempenham um papel crucial em uma variedade de setores, desde aplicações industriais até residenciais, fornecendo energia para vários tipos de equipamentos. No entanto, a eficiência energética desses motores é fundamental para reduzir o consumo de energia e minimizar o impacto ambiental (BRASIL, 2005). Para orientar consumidores e fabricantes na escolha e produção de motores mais eficientes, normas e classificações foram desenvolvidas em níveis nacional e internacional.

Em 1998, o *European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics* (CEMEP), em conjunto com 36 fabricantes de motores entram em acordo, definindo três níveis de eficiência: EFF1 (alto rendimento), EFF2 (rendimento padrão) e EFF3 (rendimento abaixo do padrão) (COSTA CLETO, 2012).

A norma IEC 60034, publicada pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), é uma série de normas abrangentes que trata de motores elétricos. A parte relevante para a eficiência energética é a IEC 60034-30, que estabelece critérios para determinar o rendimento energético dos motores e define os níveis de eficiência energética, conhecidos como IE (*International Efficiency*). Esta classificação inclui categorias como IE1 (*Standart efficiency*), IE2 (*High efficiency*), IE3 (*Premium efficiency*) e IE4 (*Super Premium efficiency*) (MILHEIRO, 2018).

Dessa forma, de acordo com a IEC, as categorias são definidas da seguinte maneira:

- **Motor de indução padrão:** Projetados para atender aos requisitos mínimos de eficiência, esses motores têm uma eficiência que varia de 60% a 80%, dependendo do tamanho e da aplicação específica.
- **Motor de indução de alto rendimento:** Equipados com componentes e materiais especiais, esses motores são otimizados para condições de carga variável e podem atingir eficiências superiores a 90%, resultando em economia significativa de energia.
- **Motor de indução premium:** Motores equipados com componentes especiais com padrão superior ao de alto rendimento, possibilitando alcançar eficiências entre 92% e 95%.
- **Motor de indução super premium:** Na vanguarda da eficiência energética, esses motores são projetados com tecnologias avançadas e materiais de alta qualidade, alcançando eficiências superiores a 95% e representando o estado da arte em economia de energia.

No Brasil, os motores elétricos são classificados de acordo com o Índice de Rendimento (IR), estabelecido pela Portaria Interministerial nº 553/2005. Esta portaria complementa o cenário regulatório brasileiro ao definir os requisitos de eficiência energética para motores de indução trifásicos.

A classificação IR define cinco níveis de eficiência, do IR1 (menos eficiente) ao IR3 (mais eficiente), proporcionando uma referência adicional para consumidores e fabricantes avaliarem a eficiência energética dos motores elétricos disponíveis no mercado brasileiro. Esses níveis são baseados em critérios de rendimento estabelecidos pela portaria para diferentes faixas de potência e velocidade nominal (BRASIL, 2005).

As normas técnicas NBR 16929 e NBR 17094 complementam o cenário regulatório para motores elétricos. A NBR 16929 estabelece os requisitos de desempenho e eficiência para motores elétricos de indução trifásicos, levando em consideração características como rendimento, torque, potência e temperatura. Enquanto isso, a NBR 17094 especifica os métodos de ensaio para a determinação do rendimento energético dos motores elétricos de indução trifásicos, alinhando-se com as práticas internacionais estabelecidas pela IEC (ABNT, 2013) (ABNT, 2021).

A Tabela 1 fornece um resumo das classificações dos motores de indução quanto ao rendimento.

Tabela 1 – Classificação em relação ao rendimento.

CLASSIFICAÇÃO DOS MOTORES QUANTO AO RENDIMENTO			
Classes	CEMEP	Internacional Efficiency (IE)	Índice de Rendimento (IR)
Below Standard	EFF3	-	-
Standard	EFF2	IE1	IR1
High	EFF1	IE2	IR2
Premium	-	IE3	IR3
Super Premium	-	IE4	-
Ultra Premium	-	-	-

Fonte: Autor com base em (IEC, 2014) e (ABNT, 2013).

1.5 Justificativa do Trabalho

Conforme visto nas seções anteriores, a busca por medidas de eficiência energética no Brasil vem sendo ampliada ao longo dos anos. Dentre estas medidas, pode-se destacar as ações voltadas para os Motores de Indução Trifásicos, que são os maiores responsáveis pelo consumo energético industrial do Brasil. Diante deste cenário, a substituição de motores por outros de mais eficientes, tem se mostrado uma excelente prática, sendo objeto de estudos e fomentado através de ações governamentais.

No entanto, os responsáveis pelos investimentos necessitam de dados precisos, que subsidiem as tomadas de decisões sobre a viabilidade destas ações. Algumas análises técnico-econômicas já foram demonstradas.

No trabalho de Gonçalves Júnior (2021), foi realizado um estudo sobre a substituição de motores menos eficientes por outros de maior eficiência, no qual motores que apresentavam um baixo carregamento eram substituídos por motores de potência nominal menor, elevando o carregamento deste. Esta técnica apresentou-se viável economicamente. Também em seu trabalho, foi demonstrada a importância de estabelecer limites de carregamento, a fim de aumentar o rendimento e tornar a substituição mais viável economicamente.

Roldan Fernandez *et.al* (2019) demonstrou em seu trabalho que substituindo um motor de eficiência menor por outro de eficiência maior, mesmo que por um de potência nominal maior, ainda assim a prática demonstrou-se viável economicamente.

Diante disso, verificou-se a necessidade de ampliar os estudos econômicos destes processos. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é analisar a influência do período de estudo escolhido numa análise de custos de ciclo de vida (ACCV), e como este período se relaciona com o tempo de serviço dos motores no cálculo da viabilidade econômica. Além disso, será encontrado o valor residual presente no processo. Este parâmetro é essencial para os

investidores, pois quantificam o valor presente do ativo, ampliando o portfólio de informações para tomadas de decisões.

1.6 Objetivos Gerais e Específicos

Realizar, de maneira precisa, uma análise sobre a viabilidade e rentabilidade da troca de motores elétricos por motores mais eficientes, através de simulação de cenários, com diferentes períodos de estudo e tempos de serviços dos motores e verificar a influência desta variação nos parâmetros econômicos responsáveis por indicar a viabilidade da ação de eficiência energética.

Para a realização deste objetivo, é necessário executar as seguintes etapas:

- Obtenção dos dados econômicos (tarifa média de energia, taxa de escalada, taxa de desconto);
- Obtenção de dados reais de motores de indução trifásicos (potência nominal, carregamento, rendimento, preços, tempo de serviço);
- Criação de *software* para simulação de cenários;
- Análise técnica da substituição dos motores de menor eficiência por outro de maior eficiência;
- Análise econômica do processo (análise dos custos de ciclo de vida e custo residual);
- Demonstração dos resultados

Para isso, este trabalho será dividido da seguinte maneira:

- Capítulo 2 – Técnicas de substituição de motores de indução trifásicos: esta seção apresenta as principais técnicas utilizadas nas substituições de motores industriais;
- Capítulo 3 – Análise dos custos de ciclo de vida: este capítulo apresenta as equações utilizadas em uma ACCV;
- Capítulo 4 – ACCV aplicada à substituição de motores: este capítulo apresenta a modelagem matemática para diferentes situações de período de estudo e tempo de serviços;
- Capítulo 5 – *Software* para análise econômica: Neste capítulo serão apresentados os estudos de casos e a metodologia utilizada para implementação do programa;

- Capítulo 6 – Resultados e discussões: Aqui serão demonstrados os resultados e realizadas as devidas análises;
- Capítulo 7 – Considerações finais: Por fim, é apresentada a conclusão do trabalho, as sugestões para trabalhos futuros e publicações aceitas.

2 TÉCNICAS DE SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Os motores de indução trifásicos são uma das principais cargas nos sistemas elétricos, representando mais de 65% do consumo no Brasil. Eles foram um elemento crucial para o aumento da produtividade durante a segunda revolução industrial no final do século XIX na Europa e nos Estados Unidos. Estes motores são amplamente utilizados devido à sua resistência, acessibilidade e versatilidade na aplicação.

Além disso, operam com base no princípio da indução eletromagnética, sendo alimentados por um sistema de energia elétrica trifásico. Quando uma corrente elétrica passa através de um condutor, ela gera um campo magnético ao redor dele. Em uma máquina elementar de indução trifásica, se correntes senoidais, trifásicas, simétricas e equilibradas, estiverem fluindo em um enrolamento trifásico, simétrico e equilibrado, um campo magnético girante de intensidade constante será produzido. Este enrolamento trifásico consiste em três enrolamentos monofásicos e idênticos espaçados de 120° elétricos entre si ao redor da superfície da máquina e conectados em Y ou Delta.

Os motores de indução trifásicos são constituídos por duas partes principais: o rotor e o estator. O estator é a parte fixa do motor e contém o enrolamento trifásico alimentado pela fonte trifásica. As correntes nestas bobinas criam o campo magnético rotativo. O rotor é a parte móvel do motor, e através das correntes induzidas neste, há o aparecimento de conjugado, o rotor gira e tende a se alinhar com o campo magnético do estator. (CHAPMAN, 2013).

Existem dois tipos principais de motores de indução trifásicos: o motor de indução com rotor tipo gaiola de esquilo e o motor de indução com rotor bobinado. O motor de indução com rotor tipo gaiola de esquilo é o tipo mais comum de motor de indução e é chamado assim devido à aparência de sua estrutura de rotor, com barras enviesadas curto-circuitadas pelos anéis de curto. É manufatura simples, robusto e requer pouca manutenção. O motor de indução com rotor bobinado tem seu rotor composto por bobinas, semelhantes ao enrolamento trifásico do estator e, que são conectadas a anéis deslizantes e escovas. Embora seja mais complicado em sua construção e manutenção, oferece maior controle sobre a velocidade e o torque do motor. Entretanto, atualmente com o uso de inversores de frequência, tal variação de velocidade é comum em motores com rotor gaiola de esquilo, sendo mais restrita a utilização de motores com rotor bobinado para a variação de velocidade (UMANS, 2014).

O MIT apresenta algumas vantagens, dentre as quais pode-se destacar a durabilidade, pois devido à sua construção simples, estes motores têm uma longa vida útil e são capazes de operar em ambientes adversos; têm manutenção reduzida, especialmente os motores de gaiola

de esquilo, que têm menos peças móveis e não possuem escovas; possuem altos rendimentos, especialmente os modelos modernos que apresentam rendimentos superiores aos 92%; e por fim um menor uso de material, reduzindo seu tamanho e peso. (ROCHA, 2023).

Neste contexto, devido a sua alta aplicabilidade, a substituição de motores por outros de maior rendimento é uma estratégia promissora para melhorar a eficiência energética. No entanto, essa decisão deve ser baseada em uma análise cuidadosa dos custos e benefícios associados.

Este capítulo discutirá algumas técnicas de substituição de motores de indução trifásicos para melhoria da eficiência energética, incluindo a substituição direta, a substituição por motores de potência menor ou maior, técnicas de *retrofitting* e a implementação de tecnologias avançadas.

2.1 Substituição direta

A substituição direta de motores por modelos de maior rendimento é uma estratégia essencial para aprimorar a eficiência energética na indústria. Esta técnica envolve a substituição de motores antigos e menos eficientes por modelos mais modernos e econômicos, sem a necessidade de grandes alterações na infraestrutura existente. Uma das principais vantagens desta abordagem é a sua simplicidade e praticidade, uma vez que os novos motores apresentam características semelhantes, como potência e carregamento, geralmente realizando apenas a alteração do rendimento.

A eficiência energética é uma preocupação crescente para as indústrias, impulsionada tanto por imperativos ambientais quanto por questões econômicas. Motores de baixo rendimento tendem a consumir mais energia e podem representar uma parcela significativa dos custos operacionais de uma empresa. Nesse contexto, a substituição direta desses motores por modelos de maior rendimento pode resultar em economias substanciais de energia e custos.

No entanto, é importante destacar que a substituição direta de motores também pode exigir um investimento inicial significativo, uma vez que os motores de maior rendimento geralmente são mais caros do que seus equivalentes de baixo rendimento. No entanto, esse custo de investimento é muitas vezes diluído ao longo do tempo devido às economias de energia proporcionadas pelos novos motores (FORTES, 2019).

Além dos benefícios imediatos em termos de eficiência e economia de energia, a substituição direta de motores também pode contribuir para metas mais amplas de sustentabilidade e responsabilidade ambiental. Ao reduzir o consumo de energia e as emissões de carbono associadas às operações industriais, as empresas podem demonstrar seu

compromisso com a proteção do meio ambiente e com a busca por práticas de produção mais sustentáveis.

Em resumo, a técnica de substituição direta de motores por modelos de maior rendimento é uma estratégia eficaz e acessível para melhorar a eficiência energética e reduzir os custos operacionais na indústria. Ao adotar essa abordagem, as empresas podem obter benefícios tangíveis em termos de economia de energia, produtividade e sustentabilidade, posicionando-se de forma competitiva em um mercado cada vez mais consciente da importância da eficiência energética (SALAZAR, 2021).

2.2 Substituição por motores de potência nominal reduzida

A técnica de substituição por motores de potência menor, porém de maior rendimento, representa uma estratégia inovadora e econômica para aprimorar a eficiência energética na indústria. Ao contrário da substituição direta, na qual motores de mesma potência são substituídos, essa abordagem envolve a substituição de motores de maior potência por modelos mais eficientes com uma potência nominal menor.

Uma das principais vantagens dessa técnica é a redução no consumo de energia, com o aumento do carregamento do motor. Isso ocorre porque os motores de maior rendimento são projetados para maximizar a curva de rendimento, permitindo que operem com carga reduzida sem comprometer o desempenho. No entanto, é importante ressaltar que essa técnica é viável apenas se o motor de maior potência não estiver operando em sua capacidade máxima, o que impossibilitaria a redução da potência nominal sem prejudicar as operações industriais (GONÇALVES JÚNIOR, 2019).

Além disso, há uma vantagem financeira adicional ao optar por motores de potência menor. Por exemplo, ao substituir um motor de baixo rendimento de 50 cv, seria mais oneroso trocá-lo por outro de alto rendimento também de 50 cv (ANDRADE, 2017). No entanto, ao escolher um motor de 40 cv de alto rendimento, é possível obter economias significativas tanto no investimento inicial quanto nos custos operacionais a longo prazo. Essa abordagem proporciona uma solução econômica e sustentável para melhorar a eficiência energética nas operações industriais.

Os estudos de Lima *et al.* (2019) e de Gonçalves Júnior (2021) estudaram esta técnica e demonstraram resultados satisfatórios de substituições de motores por outros de potência reduzida, mas com maior rendimento.

Em resumo, a substituição por motores de potência reduzida, mas com maior rendimento oferece uma maneira eficaz de reduzir o consumo de energia e os custos operacionais na indústria.

2.3 Substituição por motores com potência nominal maior

A técnica de substituição por motores com potência nominal maior que o original, apesar de ser totalmente incomum, também pode ser uma estratégia viável para melhorar a eficiência energética na indústria. Ao substituir motores em operação por modelos de maior potência nominal, é possível alcançar melhorias no desempenho e na eficiência operacional.

Uma das principais vantagens dessa abordagem é o aumento da capacidade de carga dos motores se necessário, permitindo que operem em condições de maior exigência sem comprometer a eficiência energética. Isso é especialmente relevante em aplicações industriais que demandam tal aplicação, como operações de processamento pesado e movimentação de cargas.

Além disso, motores de potência maior podem oferecer uma reserva de capacidade adicional, o que pode ser vantajoso em situações que ocorrem picos de demanda de energia. Essa capacidade adicional pode ajudar a evitar sobrecargas nos sistemas elétricos e garantir uma operação mais estável e confiável.

No entanto, a substituição por motores de potência maior também apresenta algumas desvantagens. Em primeiro lugar, o investimento inicial pode ser mais elevado, uma vez que motores de maior potência tendem a ser mais caros (ANDRADE, 2017). Além disso, é importante garantir que a infraestrutura elétrica existente seja capaz de suportar a nova carga, o que pode exigir investimentos adicionais em melhorias na rede elétrica.

Outra consideração importante é a eficiência energética dos motores de potência nominal maior em carregamentos parciais. Embora esses motores sejam projetados para operar de forma eficiente em uma ampla faixa de carga, é importante verificar se eles mantêm um bom rendimento mesmo em condições de carregamento reduzido (SOLA, 2015).

Apesar dessas considerações, a substituição por motores de potência nominal maior pode ser uma opção atraente em muitas situações industriais, especialmente quando há necessidade de aumentar a capacidade de carga e melhorar a eficiência energética. Estudos como os de Roldan Fernandez (2019) e Lima *et al.* (2021). demonstraram os benefícios dessa abordagem em termos de desempenho operacional e economia de energia. Em resumo, a substituição por motores de potência nominal maior pode ser uma estratégia eficaz para melhorar a eficiência energética e melhorar a produtividade na indústria.

2.4 Técnicas de *retrofitting*

O retrofit de motores de indução trifásicos emerge como uma estratégia essencial para elevar a eficiência e o desempenho dos motores por meio de modificações específicas em seus componentes. Esta técnica visa não apenas melhorar a eficiência energética, mas também prolongar a vida útil dos motores, reduzir custos operacionais e minimizar o impacto ambiental.

Uma das abordagens principais no *retrofitting* de motores é a modificação do enrolamento do estator, uma parte fundamental para o funcionamento eficiente do motor. Essa modificação pode envolver uma série de ajustes, como a alteração do material magnético das lâminas do estator para reduzir perdas por histerese e por correntes de Foucault. Além disso, a introdução de novos tipos de enrolamento, como os enrolamentos Y- Δ em série e Y- Δ em paralelo, pode melhorar o desempenho do motor em diferentes condições de carga e velocidade (MISIR et al., 2017). Aguiar (2018), em seu trabalho, demonstrou a possibilidade de aumentar a classe de rendimento dos motores através de técnicas de *retrofitting*.

Em resumo, o *retrofitting* de motores de indução trifásicos é uma técnica poderosa para aumentar a eficiência e o rendimento dos motores existentes. Ao realizar modificações cuidadosamente planejadas, é possível obter melhorias significativas no desempenho, economia de energia e sustentabilidade ambiental, contribuindo assim para a melhoria nos processos industriais e para a redução do consumo de recursos naturais (AGUIAR et al., 2018; TARGINO et al., 2022).

2.5 Tecnologias avançadas

A implementação de tecnologias avançadas no contexto da substituição de motores representa um passo significativo em direção a um desempenho mais eficiente e sustentável nas operações industriais. Essas tecnologias abrangem um amplo conjunto de inovações projetadas para otimizar o funcionamento dos motores e maximizar sua eficiência energética.

Uma das principais abordagens nesse sentido é a adoção de motores de ímãs permanentes, que utilizam ímãs de alta potência em vez de barras de alumínio no rotor. Essa tecnologia permite uma operação mais eficiente e confiável dos motores, resultando em menor consumo de energia e maior durabilidade.

No entanto, apesar dessas vantagens, a tecnologia apresenta como desvantagem o custo relativamente elevado, além da necessidade do uso de inversor de frequência para a partida (SIGUIMOTO, 2008).

Os sistemas de acionamento de frequência variável (VFDs) também desempenham um papel importante na implementação de tecnologias avançadas. Esses sistemas controlam a

velocidade do motor ajustando a frequência da energia elétrica fornecida, o que permite uma operação mais eficiente e precisa em uma variedade de condições de carga (UMANS, 2014).

Além disso, as tecnologias de controle inteligente, como sistemas de automação avançados e algoritmos de otimização, estão se tornando cada vez mais comuns na indústria. Esses sistemas podem ajustar automaticamente o funcionamento do motor com base em fatores como demanda de carga, condições ambientais e padrões de uso, maximizando assim a eficiência operacional (SCARMIN, 2011).

Em suma, a implementação de tecnologias avançadas na substituição de motores representa uma abordagem holística para melhorar a eficiência energética, reduzir os custos operacionais e promover práticas industriais mais sustentáveis. Essas tecnologias oferecem benefícios significativos em termos de desempenho, confiabilidade e sustentabilidade, ajudando as empresas a alcançarem seus objetivos de eficiência energética e redução de custos.

3 ANÁLISE DE CUSTOS DO CICLO DE VIDA (ACCV)

Este capítulo destina-se a explorar os conceitos fundamentais da análise de custos do ciclo de vida (ACCV) no contexto da substituição de motores na indústria. Esta análise visa compreender os custos associados à vida útil completa de um motor, desde sua aquisição até sua desativação, incluindo os custos operacionais e de manutenção. Apresentaremos os principais conceitos e metodologias por trás da ACCV, fornecendo uma base sólida para o que será abordado no próximo capítulo.

3.1 Introdução à análise de custos do ciclo de vida (ACCV)

Análise de custos do ciclo de vida (ACCV) é um método de avaliação econômica que engloba todos os custos presentes, tornando-o uma ferramenta eficiente para a análise de viabilidade de ações de engenharia.

A ACCV fornece resultados excelentes em ações de eficiência energética, pois através da análise dos custos presentes na situação atual em comparação com os custos após alternativas mais eficientes, pode-se verificar qual situação é a mais rentável (FULLER; PETERSEN, 2022).

3.1.1 Períodos utilizados em uma análise de custos do ciclo de vida

O estudo de viabilidade econômica através da ACCV é realizado através de determinados períodos. Estes períodos são conhecidos como Período de Estudo ou Tempo de Estudo e Período de Serviço ou Tempo de Serviço.

O Tempo de Estudo é o tempo total do estudo de viabilidade do projeto, ou seja, o período em que se deseja analisar economicamente determinada ação de engenharia.

O Tempo de Serviço é o tempo em que a ação de engenharia se encontra em atividade. Pode-se levar em consideração o período de planejamento ou construção, no entanto, normalmente considera-se o Tempo de Serviço coincidente do Tempo de Estudo (FULLER; PETERSEN, 2022).

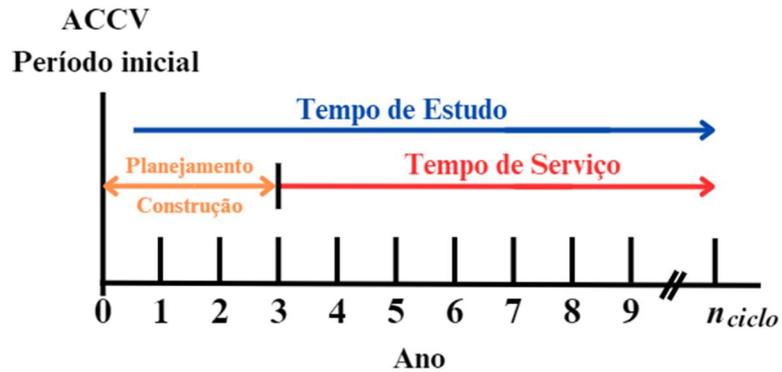
As Figuras 1 e 2 apresentam fluxos de caixa de opções de engenharia ou ações de eficiência energética presente na ACCV com os períodos citados anteriormente, em destaque.

Figura 1 – Período de estudo sem período de planejamento e construção.



Fonte: Adaptado de Fuller e Petersen (2022).

Figura 2 – Período de estudo com o período de planejamento e construção.



Fonte: Adaptado de Fuller e Petersen (2022).

3.1.2 Valor Presente

O valor presente (VP) é o valor atual do dinheiro que o investidor espera da renda futura e é calculado como a soma dos retornos futuros do investimento descontados a um nível especificado de expectativa de taxa de retorno ou desconto (SHOU, 2022).

Segundo Fuller e Petersen (2022), o valor presente é classificado de acordo como o fluxo de caixa é realizado. Este pode ser classificado de três maneiras: Valor Presente Único (VPU); Valor Presente Uniforme (VPU_u) e Valor Presente Uniforme Modificado por Taxa de Escalada (VPUM).

O Valor Presente Único, também conhecido como Valor Presente Líquido, é usado para calcular o valor presente de um montante futuro de dinheiro que ocorre no final de um ano, a uma taxa de desconto. Este é definido na equação (3.1).

$$VPU = \frac{F_t}{(1 + d)^t}, \quad (3.1)$$

onde F_t é o valor único de caixa, d é a taxa de desconto e t é o instante de tempo no qual ocorre o fluxo de caixa em anos.

O Valor Presente Uniforme ou Valor Presente Líquido Uniforme é definido na equação (3.2). Este é usado para calcular o valor presente de uma série de obrigações, que se repetem anualmente através de um período de anos, com uma taxa de desconto conhecida.

$$VPU_u = A_0 \cdot \sum_{t=1}^n \frac{1}{(1 + d)^t} = A_0 \cdot \frac{(1 + d)^n - 1}{d(1 + d)^n}, \quad (3.2)$$

onde A_0 é o custo que ocorre anualmente, n é o período em anos e t é cada ano em que ocorre o fluxo de caixa do período.

O Valor Presente Uniforme Modificado por Taxa de Escalada ou Valor Presente Líquido Uniforme Modificado por Taxa de Escalada é usado para calcular o valor presente de obrigações que recorrem anualmente através de uma taxa de escalada constante. Este é o caso em que se aplica aos custos energéticos, especialmente a energia elétrica. A equação (3.3) mostra a expressão do Valor Presente Uniforme Modificado por Taxa de Escalada.

$$VPUM = \sum_{t=1}^n A_0 \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t = A_0 \cdot \frac{(1 + \hat{e})}{(d - \hat{e})} \left[1 - \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^n \right], \quad (3.3)$$

onde A_0 representa o custo do período, \hat{e} é taxa constante de escalada, d é a taxa de desconto e n é o período em anos.

3.1.3 Taxa de desconto e taxa de escalada

A taxa de escalada representa o quanto o custo de um item sobe acima da inflação durante o período de estudo do projeto. Entretanto, custos relacionados à energia elétrica, no Brasil, apresentam um comportamento diferenciado dos demais custos, muito em consequência da variação dos preços das tarifas de forma não correlacionada da taxa de inflação, obedecendo, entre outros fatores, à variação dos preços das commodities do setor de energia (GONÇALVES JÚNIOR, 2021).

A taxa de desconto é utilizada para descontar os fluxos de caixa futuros para o valor presente, tendo papel importante na ACCV para verificar todos os custos durante o período de estudo e apresentar os resultados em valor presente (FULLER; PETERSEN, 2022).

3.1.4 Fórmula geral dos Custos de Ciclo de Vida (C_{LCC}) aplicado a Motores de Indução Trifásicos

Conforme Andrade (2017), o custo do ciclo de vida de um motor de indução trifásico pode ser visualizado na equação (3.4).

$$C_{LCC} = C_I + C_E + C_{O\&M} + C_{rep} - C_{res}, \quad (3.4)$$

onde C_I é o custo do investimento em valor presente, C_E é o custo da energia consumida em valor presente, $C_{O\&M}$ é o custo relacionados a operação e manutenção em valor presente, C_{rep} é o custo relacionado a reposição de peças em valor presente e C_{res} é o custo residual em valor presente ao final do ciclo de vida.

O custo da energia elétrica (CE) é o valor utilizado para alimentar um motor de indução trifásico, conforme descrito na equação (3.5).

$$C_E = \frac{0,736 \cdot P_n \cdot L \cdot T \cdot H}{\eta(L)}, \quad (3.5)$$

onde P_n é a potência nominal do equipamento em cv, L é o carregamento do motor em pu, T é a tarifa de energia elétrica em R\$/kWh, H é a quantidade de horas de operação por ano do motor e $\eta(L)$ é o rendimento do motor em função do carregamento utilizado (AGUIAR, 2018).

Utilizando as equações (3.3) e (3.5), define-se na equação (3.6) o valor presente líquido dos custos com energia elétrica.

$$VPL_{CE} = \sum_{t=1}^n C_E \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \quad (3.6)$$

Para encontrar o valor presente do custo de investimento, por não ser recorrente, utiliza-se a equação (3.1). No caso de substituição de motores, como o investimento da compra do motor e a instalação é inferior a 30 dias, o período considerado para esse investimento é igual a 0 ($t = 0$). Assim, a equação (3.7) mostra o valor presente do custo de investimento de um motor trifásico de indução.

$$VPL_{CI} = \frac{C_I}{(1 + d)^t} \quad (3.7)$$

Os demais custos citados na equação (3.4) serão desconsiderados neste trabalho. A única exceção será o Custo Residual, que será calculado através de método demonstrado na próxima seção. Isto é válido pelo fato de que os custos de manutenção e de reposições de peças serão considerados iguais em ambos os motores, de baixo e de alto rendimento, o que resultará em impacto nulo na análise de viabilidade econômica.

3.1.5 *Net savings* ou economia líquida

Com o mesmo conjunto de dados de entrada e suposições necessários para uma ACCV de dois ou mais projetos alternativos - custos presentes e futuros, uma taxa de desconto e um período de estudo - é possível calcular medidas suplementares de desempenho econômico para essas mesmas alternativas.

O *net savings* ou economia líquida, que é uma medida suplementar de desempenho econômico, é calculado pela diferença entre os custos do ciclo de vida do caso base com os custos do ciclo de vida do caso alternativo (FULLER; PETERSEN, 2022). Neste trabalho, o caso base será os motores de baixo rendimento, e o caso alternativo os motores de alto rendimento. Como os custos são calculados através de um período de estudo, estes serão considerados em valor presente.

Portanto, define-se o *net savings* para o caso de substituição de motores na equação (3.8).

$$N_s = VPL_{br} - VPL_{ar} \quad (3.8)$$

onde, VPL_{br} é o valor presente líquido do MIT de baixo rendimento e VPL_{ar} é o valor presente líquido do MIT de alto rendimento.

4 ANÁLISE DE CUSTOS DE CICLO DE VIDA DA SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES DE BAIXO RENDIMENTO POR MOTORES DE ALTO RENDIMENTO

A presente seção irá abordar a aplicação da análise de custos de ciclo de vida em substituições de motores de baixa eficiência por motores de alta eficiência. Para a realização dessas substituições, serão considerados alguns critérios. A princípio, será considerado que o tempo de serviço de ambos os motores é igual, porém ambos diferentes do período de estudo do projeto. Em seguida, será considerado que o tempo de serviço do motor de baixa eficiência é diferente do motor de alta eficiência, e ambos são diferentes do período de estudo do projeto. O método utilizado será o da economia líquida, também conhecido como *net savings*.

4.1 Caso 01 – Tempo de serviços dos MIT diferente do período de estudo

O primeiro caso a ser estudado será o caso em que o tempo de serviço do motor de baixo rendimento é igual do tempo de serviço do motor de alto rendimento, e ambos são diferentes do período de estudo do projeto. Esta seção será subdivida em duas subseções que serão demonstradas em seguida.

4.1.1 Tempos de serviços dos MIT menor que o período de estudo do projeto

Nesta situação específica, ilustrada na Figura 3, foi considerado como caso base (CB), os motores de baixo rendimento. O caso alternativo (CA) foi indicado como os motores de alto rendimento.

Figura 3 – Gráfico dos tempos utilizados na ACCV para o caso 4.1.1



Fonte: Autor, 2024

Desta forma, de acordo com a equação (3.6) e a equação (3.7), o VPL para o motor de baixo rendimento, considerando o tempo de serviço do MIT diferente do tempo utilizado no ciclo de vida do projeto ($m_{br} < n_{ciclo}$), é definido por:

$$VPL_{br}' = \sum_{t=1}^{m_{br}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + I_{0br} + \sum_{m_{br}+1}^{n_{ciclo}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + I_{0br} \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^{m_{br}} + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{2 * m_{br}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right], \quad (4.1)$$

onde CE_{br} é o custo com energia elétrica do motor de baixo rendimento, I_{0br} é o custo de investimento do motor de baixo rendimento.

O VPL para o motor de alto rendimento, considerando o tempo de vida útil do MIT diferente do tempo utilizado no ciclo de vida do projeto ($m_{ar} < n_{ciclo}$), é definido por:

$$VPL_{ar}' = \sum_{t=1}^{m_{ar}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + I_{0a} + \sum_{m_{ar}+1}^{n_{ciclo}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + I_{0a} \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^{m_{ar}} + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{2 * m_{ar}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right], \quad (4.2)$$

onde, CE_{ar} é o custo com energia elétrica do motor de alto rendimento, I_{0ar} é o custo de investimento do motor de alto rendimento.

Aplicando a equação (4.1) e (4.2) na equação (3.8), e considerando que o motor de baixo rendimento apresenta o mesmo tempo de serviço do motor de alto rendimento ($m_{br} = m_{ar} = m$), tem-se que o *net savings* é definido por:

$$NS' = \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(C_{Ebr} - C_{Ear}) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + (I_{0br} - I_{0ar}) + (I_{0br} - I_{0ar}) \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^m + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{2 * m} \left[(C_{Ebr} - C_{Ear}) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right], \quad (4.3)$$

Considerando que,

$$\Delta C_E = C_{Ebr} - C_{Ear} \quad (4.4)$$

$$\Delta I_0 = I_{0ar} - I_{0br} \quad (4.5)$$

A equação (4.3) pode ser redefinida da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} NS' = & \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] - (\Delta I_0) - (\Delta I_0) \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^m \\ & + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{2 * m} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \end{aligned} \quad (4.6)$$

Desta maneira, pode-se perceber que a fórmula do *net savings*, para este caso específico, pode ser dividida em três partes, a saber:

$$CE' = \sum_{t=1}^m \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + \sum_{m+1}^{n_{ciclo}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \quad (4.7)$$

$$CI' = (\Delta I_0) + (\Delta I_0) \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^m \quad (4.8)$$

$$CR' = \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{2 * m} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \quad (4.9)$$

Onde CE' é a diferença entre os custos energéticos do motor de baixo rendimento e de alto rendimento durante o período do ciclo de vida do estudo, CI' é a diferença entre o custo para implementação de motores de alto rendimento e o custo para implementação de motores de baixo rendimento e CR' é a diferença entre os custos energéticos do motor de baixo rendimento e de alto rendimento fora do período do ciclo de vida do estudo, que aqui chamaremos de custo residual ativo.

As equações foram dimensionadas para o caso específico em que o tempo de serviço dos motores é maior do que a metade do ciclo de vida do projeto, ocasionando em um

investimento inicial e outro intermediário, de forma que durante todo o ciclo de vida de estudo, a planta de motores trabalhou de maneira ininterrupta. Entretanto, podemos definir a equação (4.7) de maneira generalizada:

$$CE' = \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \quad (4.10)$$

Por fim, baseado na equação geral da ACCV encontrada em Fuller e Petersen (2022), pode-se definir a equação (3.6) da seguinte forma:

$$NS' = CE' - (CI' - CR') \quad (4.11)$$

4.1.2 Tempo de serviço dos MIT maior que período de estudo do projeto

Nesta seção, daremos continuidade ao desenvolvimento das equações para diferentes casos. A Figura 4 ilustra a situação específica deste caso, proporcionando uma visualização clara do contexto em que as equações estão sendo aplicadas.

Figura 4 – Gráfico dos tempos utilizados na ACCV para o caso 4.1.2



Fonte: Autor, 2024

Utilizando o mesmo critério da situação anterior, no qual foi considerado como CB, os motores de baixo rendimento, já CA foi indicado como os motores de alto rendimento e de acordo com a equação (3.6) e a equação (3.7), o VPL para o motor de baixo rendimento, considerando o tempo de vida útil do MIT diferente do tempo utilizado no ciclo de vida do projeto ($n_{ciclo} < m_{br}$), é definido por:

$$VPL''_{br} = \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + I_{0br} + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m_{br}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \quad (4.12)$$

O VPL para o motor de alto rendimento, considerando o tempo de vida útil do MIT diferente do tempo utilizado no ciclo de vida do projeto ($n_{ciclo} < m_{ar}$), é definido por:

$$VPL''_{ar} = \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + I_{0ar} + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m_{ar}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \quad (4.13)$$

Aplicando a equação (4.12) e (4.13) na equação (3.8), e considerando que o motor de baixo rendimento apresenta o mesmo tempo de vida útil do motor de alto rendimento ($m_{br} = m_{ar} = m'$), tem-se:

$$\begin{aligned} NS'' = & \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(C_{Ebr} - C_{Ear}) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + (I_{0b} - I_{0ar}) \\ & + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m'} \left[(C_{Ebr} - C_{Ear}) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \end{aligned} \quad (4.14)$$

Utilizando as equações (4.4) e (4.5), a equação (4.14) pode ser redefinida da seguinte maneira:

$$NS'' = \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] - (\Delta I_0) + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m'} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \quad (4.15)$$

Desta maneira, pode-se perceber que a fórmula do *net savings*, para este caso específico, pode ser dividida em três partes, a saber:

$$CE'' = \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \quad (4.16)$$

$$CI'' = \Delta I_0 \quad (4.17)$$

$$CR'' = \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m'} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \quad (4.18)$$

Onde CE'' é a diferença entre os custos energéticos do motor de baixo rendimento e de alto rendimento durante o período do ciclo de vida do estudo, CI'' é a diferença entre o custo para implementação de motores de alto rendimento e o custo para implementação de motores de baixo rendimento e CR'' é o custo residual ativo.

Por fim, utilizando o mesmo critério utilizado na equação (4.11), pode-se definir a equação (4.15) da seguinte forma:

$$NS'' = CE'' - (CI'' - CR'') \quad (4.19)$$

4.2 Caso 02 – Tempo de serviço do MIT de alto rendimento menor que o tempo de serviço do MIT de baixo rendimento e diferente do período de estudo do projeto

Nesta seção, será apresentado o caso em que o tempo de serviço do motor de baixo rendimento é maior do tempo de serviço do motor de alto rendimento, e ambos são diferentes do período de estudo do projeto. Esta seção será subdividida em três subseções que serão apresentadas a seguir.

4.2.1 Tempo de serviço do MIT de alto de rendimento menor que o tempo de serviço do MIT de baixo rendimento e menor que o período de estudo do projeto

Para este caso, conforme mostrando na Figura 5, utilizando os mesmos critérios das seções anteriores.

Figura 5 – Gráfico dos tempos utilizados na ACCV para o caso 4.2.1



Fonte: Autor, 2024

Desta forma, de acordo com a equação (3.6) e a equação (3.7), o VPL para o motor de baixo rendimento e de alto rendimento, considerando o tempo de serviço do MIT diferente do período de estudo utilizado no ciclo de vida do projeto ($m_{br} \neq m_{ar} \neq n_{ciclo}$), foram definidos através das equações (4.1) e (4.2).

Aplicando a equação (4.1) e (4.2) na equação (3.8), e considerando que o motor de baixo rendimento apresenta um tempo de serviço maior do que o motor de alto rendimento ($n_{ciclo} < m_{ar} < m_{br}$), tem-se:

$$\begin{aligned}
 NS_1 = & \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(C_{Ebr} - C_{Ear}) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + (I_{0br} - I_{0ar}) + (I_{0b}) \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^{m_{br}} - \\
 & (I_{0a}) \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^{m_{ar}} + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{2 * m_{ar}} \left[(C_{Ebr} - C_{Ear}) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \\
 & + \sum_{t=2 * m_{ar} + 1}^{2 * m_{br}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right]
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

Utilizando as equações (4.4) e (4.5), a equação (4.20) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
 NS_1 = & \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] - (\Delta I_0) + (I_{0br}) \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^{m_{br}} \\
 & - (I_{0ar}) \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^{m_{ar}} + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{2 * m_{ar}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \\
 & + \sum_{t=2 * m_{ar} + 1}^{2 * m_{br}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right]
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

Desta maneira, pode-se perceber que a fórmula do *net savings*, para este caso específico, pode ser dividida em três partes, a saber:

$$CE_1 = \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \tag{4.22}$$

$$CI_1 = (\Delta I_0) - (I_{0br}) \cdot \left(\frac{1}{1+d}\right)^{m_{br}} + (I_{0ar}) \cdot \left(\frac{1}{1+d}\right)^{m_{ar}} \quad (4.23)$$

$$CR_1 = \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{2 \cdot m_{ar}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1+\hat{e}}{1+d}\right)^t \right] + \sum_{t=2 \cdot m_{ar}+1}^{2 \cdot m_{br}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1+\hat{e}}{1+d}\right)^t \right] \quad (4.24)$$

Onde CE_1 é a diferença entre os custos energéticos do motor de baixo rendimento e de alto rendimento durante o período do ciclo de vida do estudo, CI_1 é a diferença entre o custo para implementação de motores de alto rendimento e o custo para implementação de motores de baixo rendimento e CR_1 é o custo residual ativo.

As equações foram dimensionadas para o caso específico em que o tempo de serviço dos motores é maior do que a metade do período de estudo do projeto, ocasionando em um investimento inicial e outro intermediário, de forma que durante todo o ciclo de vida de estudo, a planta de motores trabalhou de maneira ininterrupta.

A equação (4.21) pode ser apresentada a este caso, com os respectivos valores de CE_1 , CI_1 e CR_1 .

$$NS_1 = CE_1 - (CI_1 - CR_1) \quad (4.25)$$

4.2.2 Tempo de serviço do MIT de alto rendimento menor que o período de estudo do projeto e menor que o tempo de serviço do MIT de baixo rendimento

Nesta situação, apresentada na Figura 6, foi considerado como CB, os motores de baixo rendimento. O CA foi indicado como os motores de alto rendimento.

Figura 6 – Gráfico dos tempos utilizados na ACCV para o caso 4.2.2



Fonte: Autor, 2024

Desta forma, de acordo com a equação (3.6) e a equação (3.7), o VPL para o motor de baixo rendimento, considerando o tempo de serviço do MIT diferente do tempo utilizado no período de estudo do projeto ($m_{ar} < n_{ciclo} < m_{br}$), é definido por:

$$\begin{aligned}
 VPL_{br2} = & \sum_{t=1}^{m_{ar}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + I_{obr} + \sum_{t=m_{ar}+1}^{n_{ciclo}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \\
 & + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m_{br}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right]
 \end{aligned} \tag{4.26}$$

O VPL para o motor de alto rendimento, considerando o tempo de serviço do MIT diferente do tempo utilizado no período de estudo ($m_{ar} < n_{ciclo} < m_{br}$), é definido por:

$$\begin{aligned}
 VPL_{ar2} = & \sum_{t=1}^{m_{ar}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + I_{oar} + \sum_{t=m_{ar}+1}^{n_{ciclo}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + \\
 & I_{oar} \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^{m_{ar}} + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{2 * m_{ar}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right]
 \end{aligned} \tag{4.27}$$

Aplicando a equação (4.26) e (4.27) na equação (3.8), e considerando que o motor de baixo rendimento apresenta um tempo de serviço maior do que o motor de alto rendimento ($m_{ar} < m_{br}$), tem-se:

$$\begin{aligned}
 NS_2 = & \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(C_{Ebr} - C_{Ear}) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + (I_{obr} - I_{oar}) - (I_{oar}) \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^{m_{ar}} \\
 & + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m_{br}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] - \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{2 * m_{ar}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right]
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

Utilizando as equações (4.4) e (4.5), a equação (4.28) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
NS_2 = & \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] - (\Delta I_0) - (I_{0a}) \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^{m_{ar}} \\
& + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m_{br}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \\
& - \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{2 * m_{ar}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right]
\end{aligned} \tag{4.29}$$

Desta maneira, pode-se perceber que a fórmula do *net savings*, para este caso específico, pode ser dividida em três partes, a saber:

$$CE_2 = \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \tag{4.30}$$

$$CI_2 = (\Delta I_0) + (I_{0ar}) \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^{m_{ar}} \tag{4.31}$$

$$CR_2 = \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m_{br}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] - \sum_{t=m_{br}+1}^{2 * m_{ar}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \tag{4.32}$$

Onde CE_2 é semelhante a equação (4.22), CI_2 é a diferença entre o custo para implementação de motores de alto rendimento e o custo para implementação de motores de baixo rendimento e CR_2 é o custo residual ativo.

As equações foram dimensionadas para o caso específico em que o tempo de serviço do motor de alto rendimento é maior do que a metade do tempo de serviço do motor de baixo rendimento, ocasionando em um investimento inicial e outro intermediário, de forma que durante todo o ciclo de vida de estudo, a planta de motores trabalhou de maneira ininterrupta. Caso esta condição não seja atendida, as equações acima serão modificadas.

Por fim, equação semelhante a (4.25) pode ser aplicada a este caso, com os respectivos valores de CE_2 , CI_2 e CR_2 .

4.2.3 Período de estudo do projeto menor que o tempo de serviço do MIT de alto rendimento e menor que o tempo de serviço do MIT de baixo rendimento

Utilizando o mesmo critério das seções anteriores, foi considerado como CB, os motores de baixo rendimento. O CA foi indicado como os motores de alto rendimento. A Figura 7 representa este caso a ser abordado.

Figura 7 – Gráfico dos tempos utilizados na ACCV para o caso 4.2.3



Fonte: Autor, 2024

Portanto, de acordo com a equação (3.6) e a equação (3.7), o VPL para o motor de baixo rendimento, considerando o tempo serviço do MIT diferente do tempo utilizado no período de estudo do projeto ($n_{ciclo} < m_{br}$), é definido por:

$$VPL_{br3} = \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + I_{obr} + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m_{br}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \quad (4.33)$$

O VPL para o motor de alto rendimento, considerando o tempo de vida útil do MIT diferente do tempo utilizado no ciclo de vida do projeto ($n_{ciclo} < m_{ar}$), é definido por:

$$VPL_{ar3} = \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + I_{oar} + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m_{ar}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \quad (4.34)$$

Aplicando a equação (4.33) e (4.34) na equação (3.8), e considerando que o motor de baixo rendimento apresenta um tempo de serviço maior do que o motor de alto rendimento ($n_{ciclo} < m_{br}$), tem-se:

$$\begin{aligned}
NS_3 = & \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(C_{Ebr} - C_{Ear}) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + (I_{0br} - I_{0ar}) \\
& + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m_{ar}} \left[(C_{Ebr} - C_{Ear}) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \\
& + \sum_{t=m_{ar}+1}^{m_{br}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right]
\end{aligned} \tag{4.35}$$

Utilizando as equações (4.4) e (4.5), a equação (4.35) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
NS_3 = & \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] - (\Delta I_0) + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m_{ar}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \\
& + \sum_{t=m_{ar}+1}^{m_{br}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right]
\end{aligned} \tag{4.36}$$

Desta maneira, pode-se perceber que a fórmula do *net savings*, para este caso específico, pode ser dividida em três partes, a saber:

$$CE_3 = \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \tag{4.37}$$

$$CI_3 = (\Delta I_0) \tag{4.38}$$

$$CR_3 = \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m_{ar}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + \sum_{t=m_{ar}+1}^{m_{br}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \tag{4.39}$$

Onde CE_3 é a diferença entre os custos energéticos do motor de baixo rendimento e de alto rendimento durante o período do ciclo de vida do estudo, CI_3 é a diferença entre o custo para implementação de motores de alto rendimento e o custo para implementação de motores de baixo rendimento e CR_3 é o custo residual ativo.

Por fim, a equação (4.25) pode ser aplicada a este caso, com os respectivos valores de CE_3 , CI_3 e CR_3 .

4.3 Caso 03 – Tempo de serviço do MIT de baixo rendimento menor que o tempo de serviço do MIT de alto rendimento e diferente do período de estudo do projeto

Nesta seção, será apresentado o caso em que o tempo de serviço do motor de baixo rendimento é menor do tempo de serviço do motor de alto rendimento, e ambos são diferentes do período de estudo do projeto. Esta seção será subdividida em três subseções que serão apresentadas adiante.

4.3.1 Tempo de serviço do MIT de baixo rendimento menor que o tempo de serviço do MIT de alto rendimento e menor que o período de estudo do projeto

Neste caso, visualizado na Figura 8, será considerado o caso em que o tempo de serviço do motor de alto rendimento é maior do que o motor de baixo rendimento ($m_{br} < m_{ar}$).

Figura 8 – Gráfico dos tempos utilizados na ACCV para o caso 4.3.1



Fonte: Autor, 2024

Aplicando a mesma metodologia, no qual aplica-se a equação (4.1) e (4.2) na equação (3.8), e considerando que o motor de baixo rendimento apresenta um tempo de serviço menor do que o motor de alto rendimento, tem-se:

$$\begin{aligned}
NS_4 = & \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(C_{Ebr} - C_{Ear}) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + (I_{obr} - I_{oar}) + (I_{obr}) \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^{m_{br}} - \\
& (I_{oar}) \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^{m_{ar}} + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{2 * m_{br}} \left[(C_{Ebr} - C_{Ear}) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \\
& - \sum_{t=2 * m_{br}+1}^{2 * m_{ar}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right]
\end{aligned} \tag{4.40}$$

Utilizando as equações (4.4) e (4.5), a equação (4.40) pode ser definida da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
NS_4 = & \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] - (\Delta I_0) + (I_{obr}) \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^{m_{br}} - (I_{oar}) \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^{m_{ar}} \\
& + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{2 * m_{br}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \\
& - \sum_{t=2 * m_{br}+1}^{2 * m_{ar}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right]
\end{aligned} \tag{4.41}$$

Desta forma, pode-se perceber que a fórmula do *net savings*, para este caso específico, pode ser dividida em três partes, a saber:

$$CE_4 = \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \tag{4.42}$$

$$CI_4 = (\Delta I_0) - (I_{obr}) \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^{m_{br}} + (I_{oar}) \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^{m_{ar}} \tag{4.43}$$

$$CR_4 = \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{2 * m_{br}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] - \sum_{t=2 * m_{br}+1}^{2 * m_{ar}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \tag{4.44}$$

Onde CE_4 é a diferença entre os custos energéticos do motor de baixo rendimento e de alto rendimento durante o período do ciclo de vida do estudo, CI_4 é a diferença entre o custo

para implementação de motores de alto rendimento e o custo para implementação de motores de baixo rendimento e CR_4 é o custo residual ativo.

As equações foram dimensionadas para o caso específico em que o tempo de serviço dos motores é maior do que a metade do ciclo de vida do projeto, ocasionando em um investimento inicial e outro intermediário, de forma que durante todo o ciclo de vida de estudo, a planta de motores trabalhou de maneira ininterrupta.

Por fim, a equação (4.25) pode ser aplicada a este caso, com os respectivos valores de CE_4 , CI_4 e CR_4 .

4.3.2 Tempo de serviço do MIT de baixo rendimento menor que o período de estudo do projeto e menor que o tempo de serviço do MIT de alto rendimento

Para esta situação específica, apresentada na Figura 9, foi considerado como CB, os motores de baixo rendimento. O CA foi indicado como os motores de alto rendimento.

Figura 9 – Gráfico dos tempos utilizados na ACCV para o caso 4.3.2



Fonte: Autor, 2024

Sendo assim, de acordo com a equação (3.6) e a equação (3.7), o Valor Presente Líquido para o motor de baixo rendimento, considerando o tempo de vida útil do MIT diferente do tempo utilizado no ciclo de vida do projeto ($m_{br} < n_{ciclo}$), é definido por:

$$\begin{aligned}
 VPL_{br} = & \sum_{t=1}^{m_{br}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + I_{obr} + \sum_{t=m_{br}+1}^{n_{ciclo}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + I_{obr} \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^{m_{br}} \\
 & + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{2 * m_{br}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right]
 \end{aligned} \tag{4.45}$$

O VPL para o motor de alto rendimento, considerando o tempo de serviço do MIT diferente do período utilizado no ciclo de vida do projeto ($m_{ar} > n_{ciclo}$), é definido por:

$$VPL_{ar5} = \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + I_{0ar} + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m_{ar}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \quad (4.46)$$

Aplicando a equação (4.45) e (4.46) na equação (3.8), e considerando que o motor de baixo rendimento apresenta um tempo de serviço menor do que o motor de alto rendimento ($m_{br} < m_{ar}$), tem-se:

$$\begin{aligned} NS_5 = & \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(C_{Ebr} - C_{Ear}) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + (I_{0br} - I_{0a}) + (I_{0br}) \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^{m_{br}} \\ & + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{2 * m_{br}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \\ & - \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m_{ar}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \end{aligned} \quad (4.47)$$

Utilizando as equações (4.4) e (4.5), a equação (4.47) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} NS_5 = & \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] - (\Delta I_0) + (I_{0br}) \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^{m_{br}} \\ & + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{2 * m_{br}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \\ & - \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m_{ar}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \end{aligned} \quad (4.48)$$

Desta maneira, pode-se perceber que a fórmula do *net savings*, para este caso específico, pode ser dividida em três partes, a saber:

$$CE_5 = \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \quad (4.49)$$

$$CI_5 = (\Delta I_0) - (I_{0br}) \cdot \left(\frac{1}{1 + d} \right)^{m_{br}} \quad (4.50)$$

$$CR_5 = \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{2 * m_{br}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] - \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m_{ar}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \quad (4.51)$$

Onde CE_5 é a diferença entre os custos energéticos do motor de baixo rendimento e de alto rendimento durante o período do ciclo de vida do estudo, CI_5 é a diferença entre o custo para implementação de motores de alto rendimento e o custo para implementação de motores de baixo rendimento e CR_5 é o custo residual ativo.

Por fim, a equação (4.25) pode ser aplicada a este caso, com os respectivos valores de CE_5 , CI_5 e CR_5 .

4.3.3 Período de estudo do projeto menor que tempo de serviço do MIT de baixo rendimento e menor que o tempo de serviço do MIT de alto rendimento

No caso apresentado na Figura 10, os motores de baixo rendimento foram designados como CB, enquanto os motores de alto rendimento foram indicados como CA.

Figura 10 – Gráfico dos tempos utilizados na ACCV para o caso 4.3.2



Fonte: Autor, 2024

Portanto, de acordo com a equação (3.6) e a equação (3.7), o VPL para o motor de baixo rendimento, considerando o tempo de serviço do MIT diferente do tempo utilizado no ciclo de vida do projeto ($n_{ciclo} < m_{br}$), é definido por:

$$VPL_{br6} = \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + I_{obr} + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m_{br}} \left[C_{Ebr} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \quad (4.52)$$

O VPL para o motor de alto rendimento, considerando o tempo de serviço do MIT diferente do tempo utilizado no ciclo de vida do projeto ($n_{ciclo} < m_{ar}$), é definido por:

$$VPL_{ar6} = \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + I_{oa} + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m_{ar}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \quad (4.53)$$

Aplicando a equação (4.52) e (4.53) na equação (3.8), e considerando que o motor de baixo rendimento apresenta um tempo de serviço maior do que o motor de alto rendimento ($m_{br} < m_{ar}$), tem-se:

$$\begin{aligned} NS_6 = & \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(C_{Ebr} - C_{Ear}) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] + (I_{ob} - I_{oar}) \\ & + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m_{br}} \left[(C_{Ebr} - C_{Ear}) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \\ & - \sum_{t=m_{br}+1}^{m_{ar}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \end{aligned} \quad (4.54)$$

Utilizando as equações (4.4) e (4.5), a equação (4.54) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} NS_6 = & \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] - (\Delta I_0) + \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m_{br}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \\ & - \sum_{t=m_{ar}+1}^{m_{br}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \end{aligned} \quad (4.55)$$

Desta maneira, pode-se perceber que a fórmula do *net savings*, para este caso específico, pode ser dividida em três partes, a saber:

$$CE_6 = \sum_{t=1}^{n_{ciclo}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \quad (4.56)$$

$$CI_6 = (\Delta I_0) \quad (4.57)$$

$$CR_6 = \sum_{t=n_{ciclo}+1}^{m_{br}} \left[(\Delta C_E) \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] - \sum_{t=m_{br}+1}^{m_{ar}} \left[C_{Ear} \cdot \left(\frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] \quad (3.58)$$

Onde CE_6 é a diferença entre os custos energéticos do motor de baixo rendimento e de alto rendimento durante o período do ciclo de vida do estudo, CI_6 é a diferença entre o custo para implementação de motores de alto rendimento e o custo para implementação de motores de baixo rendimento e CR_6 é o custo residual ativo.

Por fim, a equação (4.25) pode ser aplicada a este caso, com os respectivos valores de CE_6 , CI_6 e CR_6 .

5 SIMULAÇÕES – ANÁLISE ECONÔMICA DA SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES

O presente capítulo tem como objetivo detalhar a metodologia empregada na implementação do *software* destinado à análise técnica e econômica de substituição de motores por outros de maior rendimento. A estrutura desta seção será delineada da seguinte forma: primeiramente, serão apresentados quatro estudos de casos de substituição de motores, oferecendo uma visão abrangente das diferentes situações analisadas.

Em seguida, será exposto o desenvolvimento do *software*, o qual se baseará nos dados provenientes dos mencionados estudos de caso. Este *software* será projetado para considerar variáveis como o tempo de serviço dos motores em uso e diversos tempos de estudo, visando determinar a viabilidade econômica de cada substituição proposta. Ademais, o *software* será capaz de calcular o valor residual do processo, oferecendo uma análise completa e precisa dos impactos financeiros e técnicos das substituições de motores.

Este enfoque integrado entre estudos de casos e desenvolvimento de *software* proporcionará uma abordagem robusta e sistemática para avaliar a eficácia e a rentabilidade das substituições de motores, fornecendo *insights* valiosos para tomadas de decisão informadas no âmbito da otimização energética e econômica.

5.1 Estudo de caso 01 – Substituição do MIT do tipo IR2 de 50 cv por opções do tipo IR3

O primeiro estudo de caso abordado neste trabalho se baseia nos dados fornecidos no estudo conduzido por Lima et al. (2020), que investigou uma planta industrial de uma indústria salineira presente na cidade de Mossoró, estado do Rio Grande do Norte. O estudo teve como foco a avaliação econômica da substituição de motores de indução trifásicos por outros com maior rendimento. No contexto deste estudo, foi avaliada a viabilidade da substituição de um motor de 50 cv por motores de maior eficiência. A Tabela 2 apresenta os dados referentes ao motor que será substituído, com a adição do preço deste motor que foi obtido no trabalho de Andrade (2017), levando em conta taxas de câmbio e a inflação até os dias atuais.

Tabela 2 – Informações técnicas do motor a ser substituído do caso 01

Tipo do Motor	Potência do Motor (cv)	Tempo de Serviço do Motor (anos)	Corrente I (A)	Carregamento (pu)	Rendimento (%)	Preço do Motor (U\$)
Indução Trifásico IR2 / 4 pólos	50	25	37,96	0,481	91,05%	3383,74

Fonte: Autor com base em Lima et al., 2020 e Andrade, 2017.

O estudo apresentou três opções de motores IR3 para substituir o motor de 50 cv mencionado, a saber: motores de 50 cv, 40 cv, 30 cv e 25 cv. Essas opções estão detalhadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Informações técnicas dos motores para substituição do caso 01

Tipo do Motor	Potência do Motor (cv)	Tempo de Serviço do Motor (anos)	Corrente I (A)	Carregamento (pu)	Rendimento (%)	Preço do Motor (U\$)
Indução Trifásico IR3 / 4 pólos	50	25	36,46	0,424	92,40%	3992,81
Indução Trifásico IR3 / 4 pólos	40	20	34,09	0,531	92,70%	3601,46
Indução Trifásico IR3 / 4 pólos	30	20	31,22	0,707	92,60%	2853,98
Indução Trifásico IR3 / 4 pólos	25	20	30,01	0,849	92,90%	2053,48

Fonte: Autor com base em Lima et al., 2020 e Andrade, 2017.

Para este caso e para os estudos de casos 02 e 03, os tempos de serviço dos motores utilizados serão baseados na Tabela 4.

Tabela 4 – Tempo de serviço dos motores elétricos de indução dos casos 01, 02 e 03

Vida Útil (Anos)	Tempo Médio de Operação de Motores Elétricos			
	10	20	25	25
Potência	0,1 CV / 10 CV	10 CV / 40 CV	40 CV / 100 CV	100 CV / 300 CV

Fonte: Autor com base em Gonçalves Júnior, 2019.

5.2 Estudo de caso 02 – Substituição do MIT do tipo IR2 de 40 cv por opções do tipo IR3

O segundo estudo de caso explorado neste trabalho também se baseia nos dados fornecidos no estudo conduzido por Lima et al. (2020). Neste estudo, o motor a ser substituído é um motor IR2 de 40 cv. A Tabela 5 apresenta os dados referentes ao motor que será substituído neste segundo estudo de caso.

Tabela 5 – Informações técnicas do motor a ser substituído do caso 02

Tipo do Motor	Potência do Motor (cv)	Tempo de Serviço do Motor (anos)	Corrente I (A)	Carregamento (pu)	Rendimento (%)	Preço do Motor (U\$)
Indução Trifásico IR2 / 4 pólos	40	20	41,42	0,686	91,95%	3052,09

Fonte: Autor com base em Lima et al., 2020 e Andrade, 2017.

Da mesma forma que no primeiro estudo de caso, foram apresentadas três opções de motores IR3 para substituir o motor IR2 de 40 cv mencionado. Estas opções são detalhadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Informações técnicas dos motores para substituição do caso 02

Tipo do Motor	Potência do Motor (cv)	Tempo de Serviço do Motor (anos)	Corrente I (A)	Carregamento (pu)	Rendimento (%)	Preço do Motor (U\$)
Indução Trifásico IR3 / 4 pólos	50	25	42,32	0,549	93,34%	3992,81
Indução Trifásico IR3 / 4 pólos	40	20	40,56	0,686	93,29%	3601,46
Indução Trifásico IR3 / 4 pólos	30	20	38,40	0,915	92,80%	2853,98

Fonte: Autor com base em Lima et al., 2020 e Andrade, 2017.

5.3 Estudo de caso 03 – Substituição do MIT do tipo IR2 de 30 cv por opções do tipo IR3

O terceiro estudo de caso abordado neste trabalho também se fundamenta nos dados fornecidos no estudo realizado por Lima et al. (2020), que examinou uma planta industrial de uma indústria salineira real. Diferenciando-se dos estudos anteriores, neste caso, o motor IR2 a ser substituído é de 30 cv. Para proporcionar uma visualização detalhada dos dados relevantes, apresentamos os detalhes do motor IR2 de 30 cv a ser substituído na Tabela 7.

Em consonância com os estudos precedentes, Lima et al. ofereceram diversas opções de motores IR3 para a substituição do motor IR2 de 30 cv. As especificações destas opções estão elencadas na Tabela 8.

Tabela 7 – Informações técnicas do motor a ser substituído do caso 03

Tipo do Motor	Potência do Motor (cv)	Tempo de Serviço do Motor (anos)	Corrente I (A)	Carregamento (pu)	Rendimento (%)	Preço do Motor (U\$)
Indução Trifásico IR2 / 4 pólos	30	20	31,51	0,704	91,66%	2283,18

Fonte: Autor com base em Lima et al., 2020 e Andrade, 2017.

Tabela 8 – Informações técnicas dos motores para substituição do caso 03

Tipo do Motor	Potência do Motor (cv)	Tempo de Serviço do Motor (anos)	Corrente I (A)	Carregamento (pu)	Rendimento (%)	Preço do Motor (U\$)
Indução Trifásico IR3 / 4 pólos	40	20	33,99	0,528	92,68%	3601,46
Indução Trifásico IR3 / 4 pólos	30	20	31,12	0,704	92,63%	2853,98
Indução Trifásico IR3 / 4 pólos	25	20	29,90	0,845	92,91%	2053,48

Fonte: Autor com base em Lima et al., 2020 e Andrade, 2017.

5.4 Estudo de Caso 04 – Substituição do MIT do tipo IE2 de 40 cv por do tipo IE3

O quarto estudo de caso apresentado neste trabalho se apoia nos dados fornecidos no estudo conduzido por Roldan Fernandez *et al.* (2019), que investigou um ambiente industrial semelhante. No escopo desta pesquisa, o enfoque principal de Roldan Fernandez *et al.* (2019) foi a avaliação da substituição de um Motor de Indução Trifásico (MIT) de 40 cv, com classificação IE2, por um modelo mais eficiente, especificamente um motor IE3 de 60 cv.

Tabela 9 – Informações técnicas do motor a ser substituído do caso 04

Tipo do Motor	Potência do Motor (cv)	Tempo de Serviço do Motor (anos)	Corrente I (A)	Carregamento (pu)	Rendimento (%)	Preço do Motor (U\$)
Indução Trifásico IE2 / 4 pólos	40	15	-	0,923	91,04%	3275,92

Fonte: Autor com base em Roldan Fernandez *et al.*, 2019.

Diferentemente dos estudos anteriores, neste caso, a opção de substituição é única, consistindo em um motor IE3 de 60 cv. Os detalhes deste motor estão listados na Tabela 10.

Tabela 10 – Informações técnicas do motor a ser substituído do caso 04

Tipo do Motor	Potência do Motor (cv)	Tempo de Serviço do Motor (anos)	Corrente I (A)	Carregamento (pu)	Rendimento (%)	Preço do Motor (U\$)
Indução Trifásico IE3 / 4 pólos	60	15	-	0,616	95,72%	4986,96

Fonte: Autor com base em Roldan Fernandez *et al.*, 2019.

Os tempos de serviço dos motores para este estudo de caso é mostrado na tabela 11. Estes dados foram apresentados no trabalho de Roldan Fernandes *et al.* (2019).

Tabela 11 – Tempo de serviço dos motores elétricos de indução do caso 04

	Tempo Médio de Operação de Motores Elétricos			
Vida Útil (Anos)	10	12	15	20
Potência	0,1 CV / 1,5 CV	1,5 CV / 15 CV	15 CV / 150 CV	150 CV / 500 CV

Fonte: Autor com base em Roldan Fernandez *et al.*, 2019.

Estes quatro estudos de casos foram escolhidos para possibilitar a análise de diversas situações de substituições de motores, possibilitando a aplicação das equações demonstradas nos capítulos anteriores.

5.5 Simulador – Substituição de motores IR2/IE2 por motores IR3/IE3

Prosseguindo a partir dos estudos de caso detalhados anteriormente, o próximo passo desta pesquisa envolve a implementação de um *software* dedicado à análise econômica e técnica da substituição de motores por modelos mais eficientes. Para isso, serão utilizados os dados coletados nos estudos de caso, levando em consideração o tempo de serviço dos motores e variando o período de estudo, a fim de aplicar as equações demonstradas nos capítulos 03 e 04 deste trabalho.

A aplicação das equações descritas nos tópicos citados permitirá uma avaliação detalhada dos aspectos econômicos envolvidos nas substituições propostas. Com base nos dados reais dos motores, nos parâmetros de tempo de serviço e tempos de estudo, o *software* será capaz de calcular os custos e benefícios associados a cada cenário de substituição.

Nos próximos tópicos deste capítulo, será abordada a estrutura do *software*, detalhando não apenas sua arquitetura e funcionalidades, mas também a metodologia adotada para sua implementação. Cada etapa do processo será explorada, desde a coleta e preparação dos dados dos estudos de caso até a implementação dos algoritmos de análise econômica. Esse enfoque minucioso permitirá a compreensão não apenas do funcionamento prático do *software*, mas também dos fundamentos teóricos que o sustentam, proporcionando uma visão abrangente de sua utilidade e aplicabilidade em cenários industriais.

5.5.1 Desenvolvimento do *software*: linguagem e estruturação

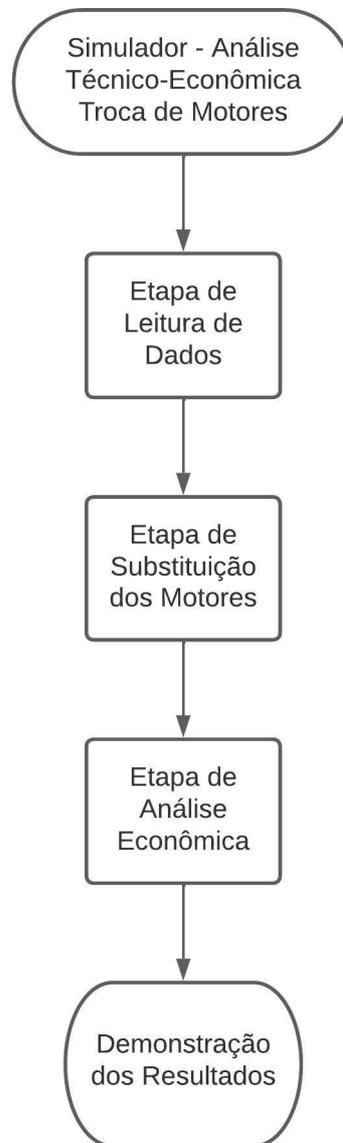
No desenvolvimento do *software*, optou-se pela linguagem de programação **Python** devido à sua versatilidade e ampla gama de bibliotecas disponíveis, o que facilita a manipulação e análise de dados. Utilizando os dados obtidos nos estudos de casos previamente citados, foi criada uma planilha que serviu como ponto de partida para a análise econômica.

A partir da planilha, foram desenvolvidos algoritmos para a leitura dos dados e a implementação da lógica necessária para a análise econômica. Essa lógica foi construída com base nos conceitos discutidos nos capítulos 3 e 4 deste trabalho, abrangendo aspectos como o cálculo de custos de energia, custos de investimento, custo residual e indicadores de viabilidade econômica, como a economia líquida, conhecido por *net savings*.

Para visualizar a estrutura do *software* de forma mais clara, foi elaborada a Figura 11 que demonstra os passos básicos do processo. Essa figura ilustrativa oferece uma visão geral da organização do *software* e dos principais componentes envolvidos em sua implementação, incluindo a entrada de dados, processamento de informações e saída de resultados.

Cada etapa do processo de desenvolvimento do *software* será especificada nos próximos tópicos. Serão abordados detalhes sobre a leitura e preparação dos dados dos estudos de caso, a implementação dos algoritmos de análise econômica, bem como a demonstração e interpretação dos resultados obtidos.

Figura 11 – Etapas do simulador técnico-econômico



Fonte: Autor, 2024

5.5.2 Etapa de leitura e preparação dos dados

O primeiro passo no processo de desenvolvimento do *software* consiste em realizar a leitura dos dados provenientes dos estudos de casos mencionados anteriormente. Para isso, foi empregada uma função específica do Python, conhecida como *read_excel()* da biblioteca *pandas*. Essa função possibilita a leitura dos dados contidos nas tabelas dos estudos de casos e sua organização em uma estrutura de dados chamada *DataFrame*.

Cada linha do *DataFrame* corresponde a um conjunto de informações sobre um motor específico, conforme demonstrado nos tópicos relativos aos estudos de casos. Para manipular esses dados de forma eficiente, foi utilizado o método *iloc[]* do *DataFrame*, o qual permite acessar os dados por meio de índices de linha e coluna.

Atribuindo cada linha do *DataFrame* a um objeto denominado "motor", o *software* consegue representar individualmente cada conjunto de informações relacionadas aos motores analisados. Além disso, cada objeto "motor" foi nomeado com o respectivo índice a fim de organizar os dados de forma clara e sistematizada. Por exemplo, o objeto referente ao estudo de caso 1 foi nomeado como "**motor_1**", e para cada opção de troca de motor dentro desse estudo de caso, foram utilizados os nomes "**motor_1_1**", "**motor_1_2**", e assim por diante.

Esse processo facilita a manipulação e análise dos dados ao longo do processo de desenvolvimento do *software*, preparando-os para as etapas subsequentes de análise econômica e geração de resultados.

Além da leitura dos dados dos motores, o programa também realiza a leitura dos tempos de serviço associados a cada motor. Esses dados são fundamentais para a análise econômica, pois permitem considerar o desgaste e a vida útil dos motores ao longo do tempo.

Assim como os dados dos motores, os tempos de serviço são lidos e organizados em um *DataFrame*. Nos três primeiros casos, os tempos de serviço são baseados no trabalho de Andrade (2017), que fornece informações precisas sobre a vida útil dos motores nos estudos de casos presentes em seu trabalho. Essa abordagem garante que os cálculos de viabilidade econômica sejam realizados com base em dados confiáveis e relevantes para o contexto industrial.

Para o estudo de caso 04, os tempos de serviço foram baseados no trabalho de Roldan Fernandez (2019). Essa fonte oferece informações sobre a vida útil dos motores em um contexto específico, permitindo uma análise mais precisa e personalizada para esse cenário em particular.

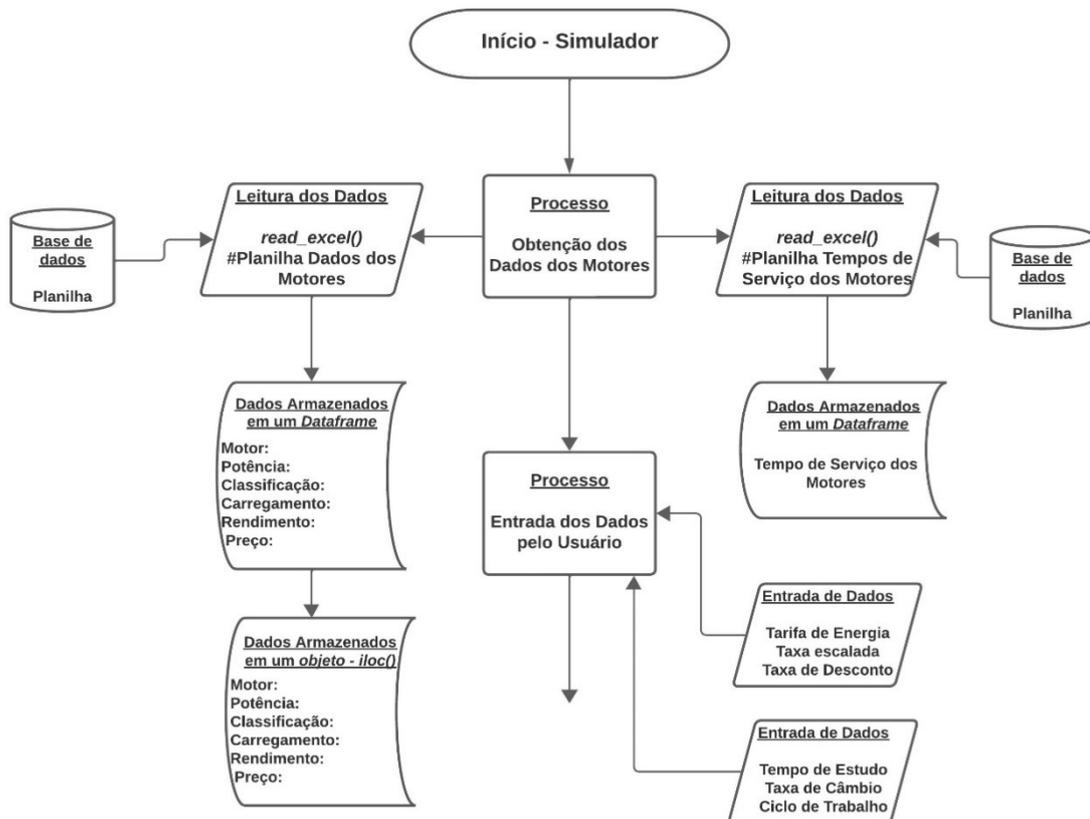
A leitura dos tempos de serviço dos motores, em conjunto com os dados destes, são dados essenciais para a análise econômica da substituição de motores por outros de maior rendimento.

Após a fase anterior de coleta e organização dos dados, avançou-se para a interação com o usuário do *software*. Nessa etapa, foram solicitadas informações adicionais para a análise dos custos associados à substituição dos motores de indução trifásicos.

Foram solicitadas ao usuário informações importantes para uma análise econômica abrangente. Isso incluiu o ciclo de trabalho dos motores, o tempo de estudo, os valores de

câmbio do dólar americano e do euro em relação ao real, a tarifa média de energia elétrica, bem como as taxas de escalada e de desconto. A Figura 12 resume a etapa de leitura de dados.

Figura 12 – Etapa de leitura de dados



Fonte: Autor, 2024.

Esses dados são fundamentais para compreender os custos ao longo do ciclo de vida da substituição dos motores. Por exemplo, o ciclo de trabalho dos motores influencia diretamente o consumo de energia e, portanto, os custos operacionais. Da mesma forma, as taxas de câmbio e a tarifa de energia elétrica afetam os custos de aquisição e operação dos motores.

Ao reunir essas informações, foi possível criar um cenário detalhado para a análise econômica da substituição dos motores. A próxima seção irá apresentar o processo de substituição dos motores utilizado na simulação neste trabalho.

5.5.3 Etapa de substituição dos motores

A etapa de substituição dos motores é conduzida com base na função criada *net_savings()*, a qual aceita como entrada dois objetos distintos: o motor de baixo rendimento e o motor de alto rendimento. Após análise desses objetos, a função dá início ao processo de

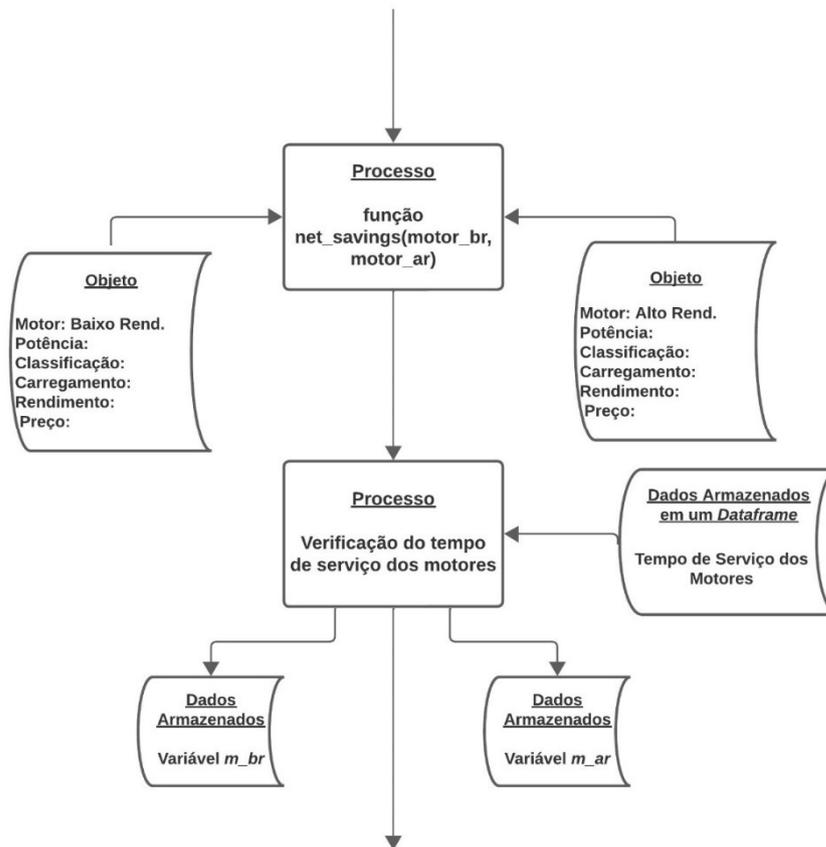
comparação e análise, visando determinar os potenciais ganhos econômicos decorrentes da substituição.

No estágio inicial da execução da função, realiza-se a leitura da potência dos motores. A partir dessa informação, são então examinados os tempos de serviço correspondentes aos motores em questão. Esses dados essenciais são extraídos de um *DataFrame* previamente construído com base nos registros contidos na planilha de dados, conforme detalhado anteriormente, e armazenados em variáveis. Essa abordagem, embasada em dados coletados nos estudos de caso, proporciona uma avaliação da vida útil dos motores, o que por sua vez, assegura uma análise dos custos associados ao longo do período de operação.

Vale ressaltar que a obtenção do tempo de serviço dos motores é importante para o propósito da dissertação. Isso se deve ao fato de que as equações elaboradas no capítulo 4, destinadas ao cálculo de viabilidade econômica, consideram tanto o tempo de serviço quanto o tempo de estudo. Portanto, essa etapa desempenha um papel fundamental na garantia da precisão e relevância dos resultados obtidos na análise econômica das substituições.

Esta etapa inicial do processo de substituição dos motores é mostrada na Figura 13.

Figura 13 – Etapa inicial da substituição dos motores

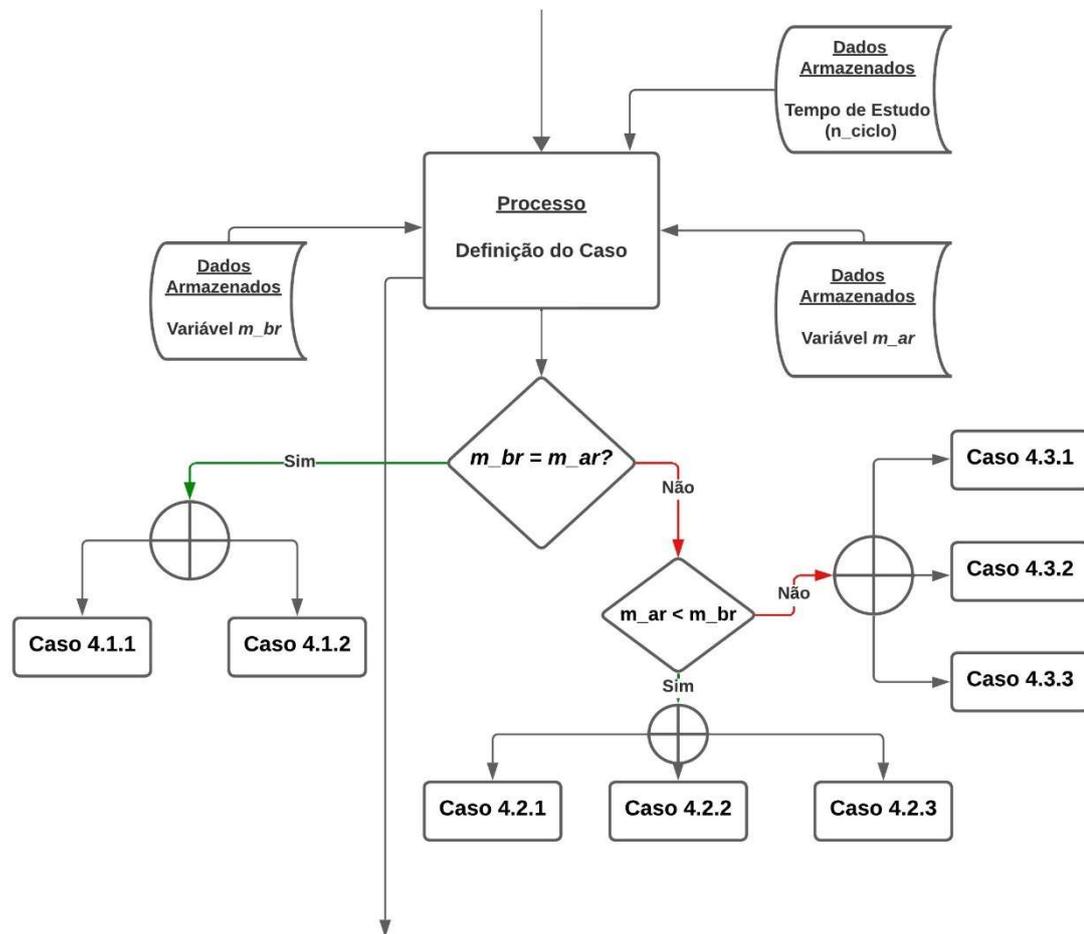


Fonte: Autor, 2024.

Após esta fase inicial, na qual todos os dados necessários para a análise de custos de ciclo de vida estão disponíveis, o cálculo de *net savings* é iniciado.

Durante essa análise, verifica-se em qual cenário, conforme descrito no capítulo 4, a substituição planejada se enquadra. Por exemplo, são avaliados se os tempos de serviço dos motores são idênticos ou distintos, e se são superiores ou inferiores ao tempo de estudo. Para lidar com essas diferentes situações, o *software* foi estruturado com o uso de condicionais, permitindo a aplicação das equações correspondentes a cada caso. A estruturação desta etapa é mostrada na Figura 14.

Figura 14 – Etapa da definição do caso e aplicação



Fonte: Autor, 2024.

Por fim, após a aplicação das equações pertinentes a cada situação identificada, o *software* realiza o cálculo do custo energético, do custo de investimento e do custo residual.

Esses valores são então armazenados em um *Dataframe*, permitindo uma organização estruturada e acessível dos resultados obtidos ao longo do processo de análise.

5.5.4 Etapa de análise econômica

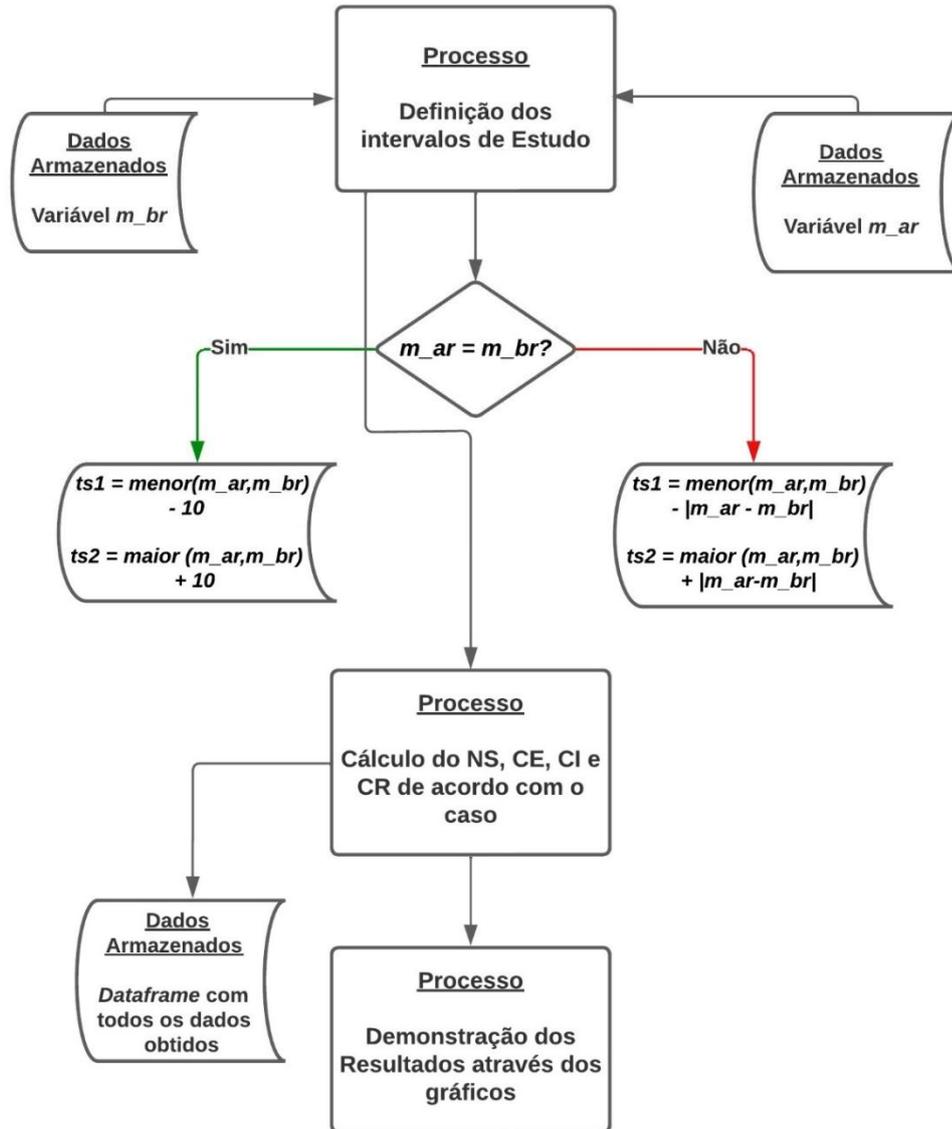
A próxima etapa do processo consiste na análise econômica, na qual será demonstrada a metodologia de cálculo para aplicação das equações apresentadas nos capítulos 3 e 4. Para enriquecer a análise, foi definido realizar o cálculo do *net savings* a partir de uma variação no tempo de estudo e obtenção dos valores correspondentes.

No *software*, foi implementado um laço computacional para a aplicação de diferentes tempos de estudo na ACCV, calculando o custo da energia elétrica (CE), custo de investimento (CI), custo residual (CR) e *net savings* (NS) para um intervalo de valores de tempo de estudo. O intervalo de tempos de estudo foi definido da seguinte maneira:

1. Verificou-se os tempos de serviço dos motores, representados por **m_br** e **m_ar**, que são o tempo de serviço do motor de baixo rendimento e o tempo de serviço do motor de alto rendimento, respectivamente.
2. Calculou-se o módulo da diferença entre esses dois tempos.
3. Se os tempos de serviço são diferentes:
 - O intervalo inferior da varredura (**ts1**) foi definido como o menor entre **m_br** e **m_ar** subtraído do módulo encontrado.
 - O intervalo superior da varredura (**ts2**) foi definido como o maior entre **m_br** e **m_ar** somado ao módulo encontrado.
4. Se os tempos de serviço são iguais:
 - O intervalo inferior da varredura (**ts1**) foi definido como o menor entre **m_br** e **m_ar** subtraído de 10.
 - O intervalo superior da varredura (**ts2**) foi definido como o maior entre **m_br** e **m_ar** somado a 10.

Essa abordagem permite explorar uma variedade de cenários e determinar a sensibilidade dos resultados em relação aos diferentes tempos de estudo, proporcionando uma análise mais abrangente da viabilidade econômica da substituição dos motores. A Figura 15 apresenta, por meio de um fluxograma, o processo de análise econômica.

Figura 15 - Etapa de Análise Econômica



Fonte: Autor, 2024.

5.5.5 Etapa de Demonstrações de Resultados

Por fim, na etapa de demonstração dos resultados, os dados obtidos durante a substituição dos motores foram organizados para uma análise clara e abrangente. Inicialmente, os dados foram armazenados em variáveis do programa e estruturados em um *Dataframe*, com categorias distintas para cada aspecto relevante do processo.

As variáveis incluídas neste *Dataframe* foram selecionadas para abranger todos os aspectos essenciais da substituição dos motores:

- **t (tempo de estudo - n_ciclo)**: indica o período considerado para a análise, refletindo o ciclo de vida dos motores e o impacto da substituição ao longo do tempo.
- **Custo energético (CE)**: representa os custos associados ao consumo de energia durante o período de estudo, levando em consideração a eficiência dos novos motores.
- **Custo de investimento (CI)**: reflete os gastos iniciais necessários para implementar a substituição dos motores, incluindo custos de aquisição e instalação.
- **Custo residual (CR)**: representa o custo residual oriundo da análise proposta, isto é, como a diferença entre tempos de serviço afeta o valor residual da substituição. Chamado aqui de custo residual natural.
- **Net savings (NS)**: representa os ganhos financeiros obtidos com a substituição dos motores, calculados a partir da diferença entre os benefícios (economia de energia e redução de custos operacionais) e os custos (investimento inicial e valor residual).

Para uma análise mais aprofundada, porém objetiva dos resultados, foram gerados dois gráficos representativos. O primeiro gráfico ilustra o *net savings* em função do tempo de estudo (**n_ciclo**), permitindo uma visualização clara da evolução dos ganhos financeiros ao longo do período analisado. Já o segundo gráfico apresenta o Custo Residual em relação ao tempo de estudo, oferecendo informações sobre a potencial valor que os motores apresentam ao fim daquele ciclo.

Esses gráficos proporcionaram uma compreensão visual objetiva da variação do *net savings* e do custo residual conforme o tempo de estudo avança, facilitando uma análise detalhada dos resultados e uma avaliação abrangente da viabilidade econômica na substituição dos motores.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No capítulo atual, serão apresentados os resultados dos estudos de caso, os quais foram conduzidos aplicando a metodologia previamente descrita. Conforme mencionado na subseção 5.5.2, os usuários do *software* precisam fornecer dados essenciais para a análise, incluindo o ciclo de trabalho dos motores, o tempo de estudo, os valores de câmbio do dólar americano e do euro em relação ao real, a tarifa média de energia elétrica, bem como as taxas de escalada e de desconto.

Para todos os estudos de caso, o ciclo de trabalho dos motores foi definido em 4000 horas, considerando a utilização de meio turno diário. O tempo de estudo foi determinado conforme descrito anteriormente. Os valores do dólar americano e do euro em relação ao real foram estabelecidos em 5 reais por dólar e 5,38 reais por euro, respectivamente.

Além disso, serão apresentadas tabelas específicas para cada estudo de caso com a tarifa média de energia elétrica, bem como as taxas de escalada e de desconto. Para os estudos de caso 01, 02 e 03, a Tabela 12 consolidará esses dados.

Tabela 12 - Dados econômicos utilizados para os casos 01, 02 e 03.

DADOS ECONÔMICOS		
Taxa de Escalada, Região Nordeste, Classe Industrial (%)	Taxa de Desconto (%)	Tarifa Média (R\$ / kWh)
2,35%	12,00%	0,45608

Fonte: Autor com base em Gonçalves Júnior, 2021.

Já para o estudo de caso 04, a Tabela 13 conterá essas informações de acordo com as particularidades desse caso específico. Estas tabelas foram obtidas nos estudos de Gonçalves Junior (2021) e Roldan Fernandez *et al.* (2019), respectivamente.

Tabela 13 - Dados econômicos utilizados para o Caso 04.

DADOS ECONÔMICOS		
Taxa de Escalada (%)	Taxa de Desconto (%)	Tarifa Média (R\$ / kWh)
2,91%	5,00%	0,80

Fonte: Autor com base em Roldan Fernandez, 2019.

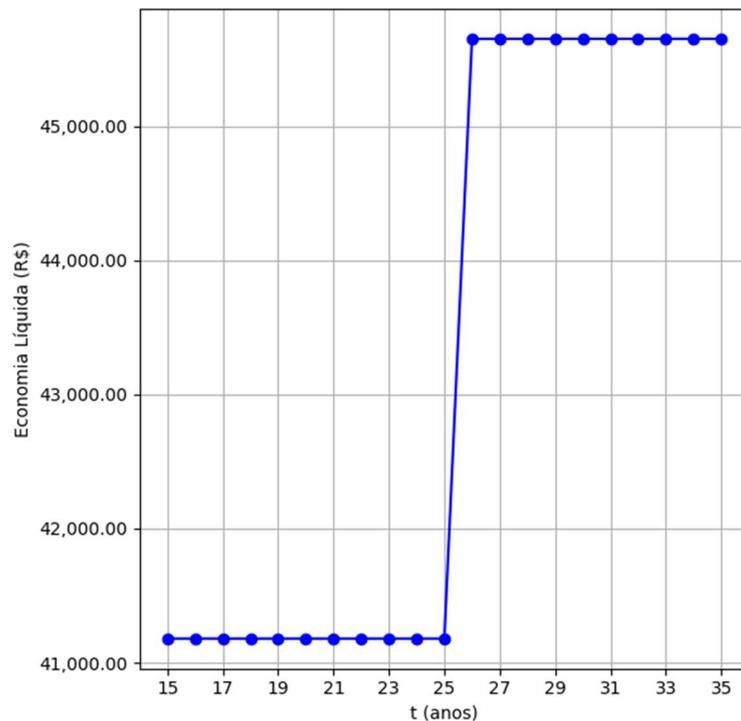
Em seguida, serão apresentados os resultados dos quatro estudos de casos discutidos no capítulo anterior. Serão exibidos os gráficos do *net savings* (NS) e do custo residual (CR), ambos em função do tempo de estudo (*n_ciclo*). Os gráficos foram gerados de acordo com a metodologia descrita no capítulo 5.

- **Caso 01/MIT IR2 50 cv - Opção de substituição 01/MIT IR3 50 cv**

A Figura 16 apresenta o gráfico correspondente à economia líquida na substituição de um MIT IR2 de 50 cv por outro MIT IR3 de 50 cv. Observa-se que a substituição é viável, e nota-se também que o tempo de estudo tem pouca influência no *net savings*. Isso ocorre porque, nesse caso, o tempo de serviço do motor de baixo rendimento é igual ao tempo de serviço do motor de alto rendimento. Apenas um aumento no *net savings* é percebido após o início do segundo ciclo de motores, uma vez que a vida útil dos motores é esgotada em 25 anos.

Figura 16 – *Net savings* em função do tempo de estudo para o caso 01 e opção de substituição

01

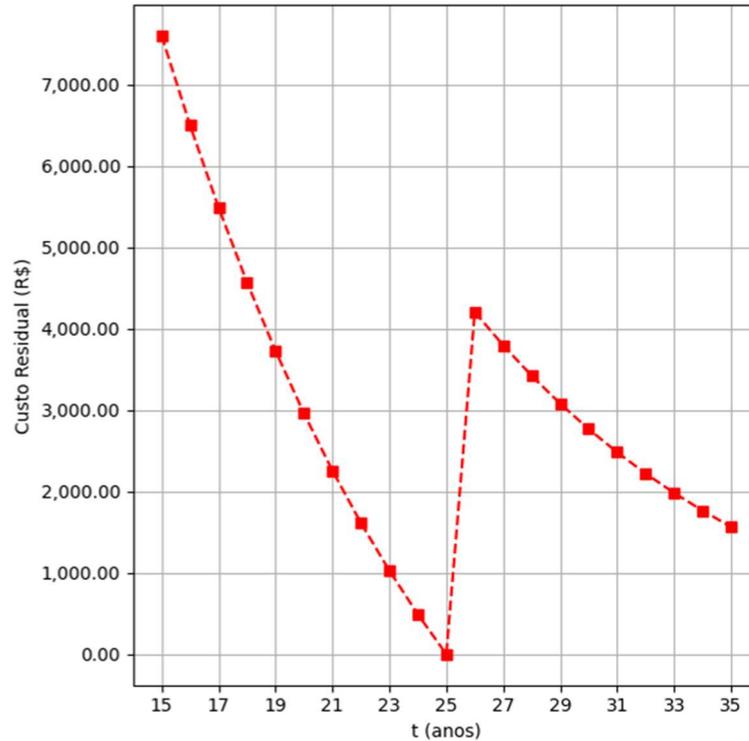


Fonte: Autor, 2024.

Em relação ao custo residual, conforme mostrado na Figura 17, observa-se que para este caso o CR se comporta de maneira decrescente ao longo dos anos, chegando ao valor nulo no fim da vida útil do motor, que, para este caso, é de 25 anos. Após o início do segundo ciclo,

nota-se que o valor residual aumenta novamente e segue decrescendo até o fim da vida útil do motor mais uma vez.

Figura 17 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 01 e opção de substituição 01



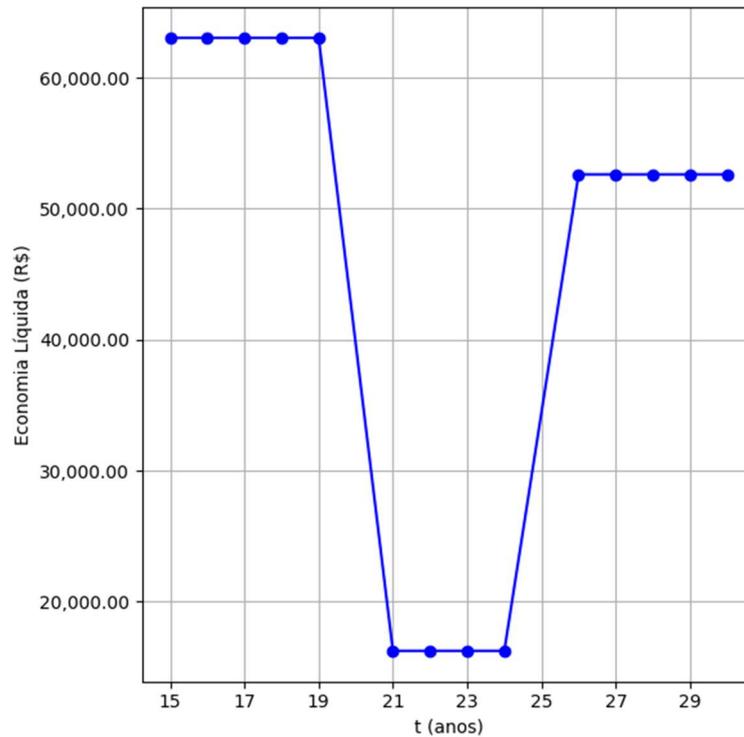
Fonte: Autor, 2024.

- **Caso 01/MIT IR2 50 cv - opção de substituição 02/MIT IR3 40 cv**

Na segunda opção de substituição do motor de IR2 de 50 cv, conforme mostrado na Figura 18, percebe-se uma maior influência do tempo de estudo no cálculo da economia líquida. O motor de baixo rendimento apresenta um tempo de serviço de 25 anos, maior do que o tempo de serviço do motor de alto rendimento, que é de 20 anos.

Sendo assim, de acordo com os resultados demonstrados, o período mais viável é o de 20 anos, pois, a partir do ano 21, o *NS* é reduzido, sendo elevado novamente apenas no período de 25 anos. Dessa forma, nota-se que o período de 21 a 24 anos é crítico para esta opção. Apesar de ainda apresentar uma economia líquida positiva, há uma perda de ganho, pois, no ano 21, torna-se necessário implementar um segundo motor de alto rendimento, afetando negativamente o ganho de economia líquida.

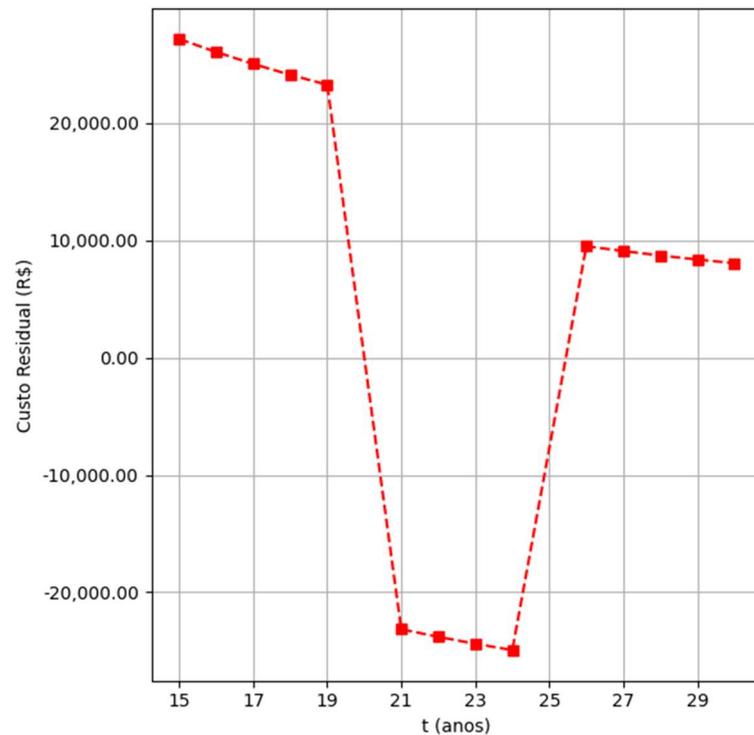
Figura 18 – *Net savings* em função do tempo de estudo para o caso 01 e opção de substituição 02



Fonte: Autor, 2024.

O custo residual, conforme ilustrado na Figura 19, segue o padrão apresentado pelo gráfico do *net savings*. Para os períodos de estudo até 20 anos, o custo residual é positivo e atinge os maiores valores possíveis, acima de 20 mil reais. No entanto, é importante observar que, durante o período de 21 a 24 anos, o custo residual é negativo, indicando que neste intervalo de tempo haveria uma desvalorização total do ativo. Dessa forma, não é recomendável realizar o período de estudo nesse intervalo, pois haveria uma perda no potencial de revenda dos motores, caso o uso fosse interrompido. Para períodos de estudo acima de 25 anos, o custo residual apresenta valores em torno de 10 mil reais, menores do que nos períodos inferiores a 20 anos.

Figura 19 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 01 e opção de substituição 02

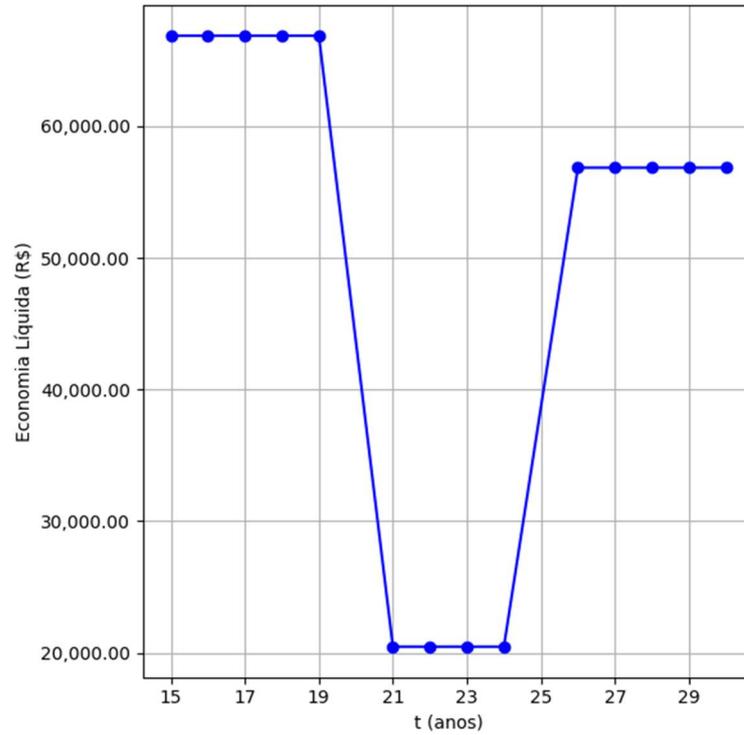


Fonte: Autor, 2024.

- **Caso 01/MIT IR2 50 cv - Opção de substituição 03/MIT IR3 30 cv**

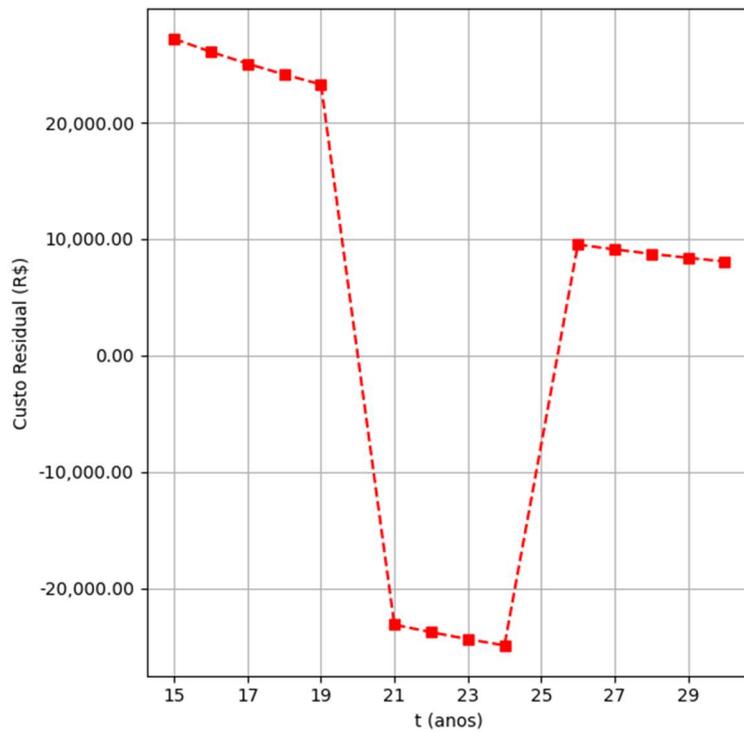
Dando continuidade à análise, examinamos agora a opção de substituição 03 para o motor IR2 de 50 cv, utilizando um motor IR3 de 30 cv. Ao observar o gráfico na Figura 20, nota-se um comportamento semelhante ao do caso anterior, devido às características dos tempos de serviço dos motores serem iguais. Até o ano 20 e do ano 26 até o 30, o *NS* fica em torno de 60 mil reais, enquanto que entre os anos 21 e 23 os valores estão em torno de 20 mil reais. Portanto, é recomendável evitar períodos de estudo entre os anos 21 e 23 para estas avaliações. Isso pode ser atribuído a dois fatores principais: o custo de investimento de um motor de 30 cv é mais baixo do que o de um motor de 50 cv, e o carregamento do motor nesta situação pode estar mais adequado para uma potência de 30 cv. O custo de investimento afeta diretamente o cálculo do *net savings*, enquanto o carregamento influencia o cálculo do custo energético.

Figura 20 – *Net savings* em função do tempo de estudo para o caso 01 e opção de substituição 03



Fonte: Autor, 2024.

Figura 21 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 01 e opção de substituição 03



Fonte: Autor, 2024.

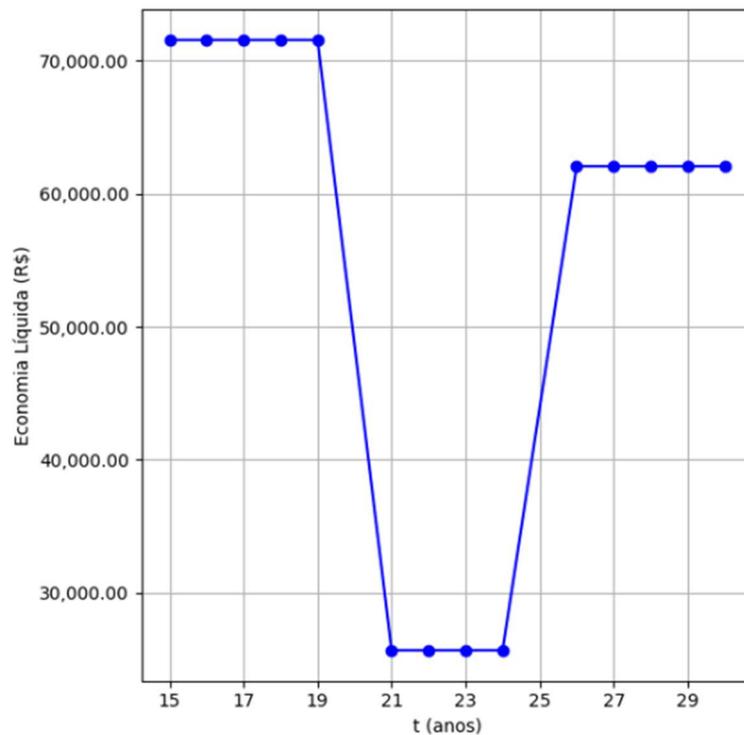
Já o custo residual, apresentado na Figura 21, demonstra um comportamento idêntico ao caso anterior, uma vez que os tempos de serviço são idênticos, resultando no mesmo valor.

- **Caso 01/MIT IR2 50 cv - Opção de substituição 04/MIT IR3 25 cv**

Analisando agora a opção de substituição 04 para o motor IR2 de 50 cv, utilizando um motor IR3 de 25 cv, observamos uma situação semelhante aos casos anteriores. Os padrões de valores são semelhantes, com a diferença de um *net savings* ligeiramente maior. Esse aumento pode ser atribuído às características específicas do motor de 25 cv, como um custo de investimento ainda mais baixo e uma possível adequação do carregamento do motor para essa potência menor.

Figura 22 – *Net savings* em função do tempo de estudo para o caso 01 e opção de substituição

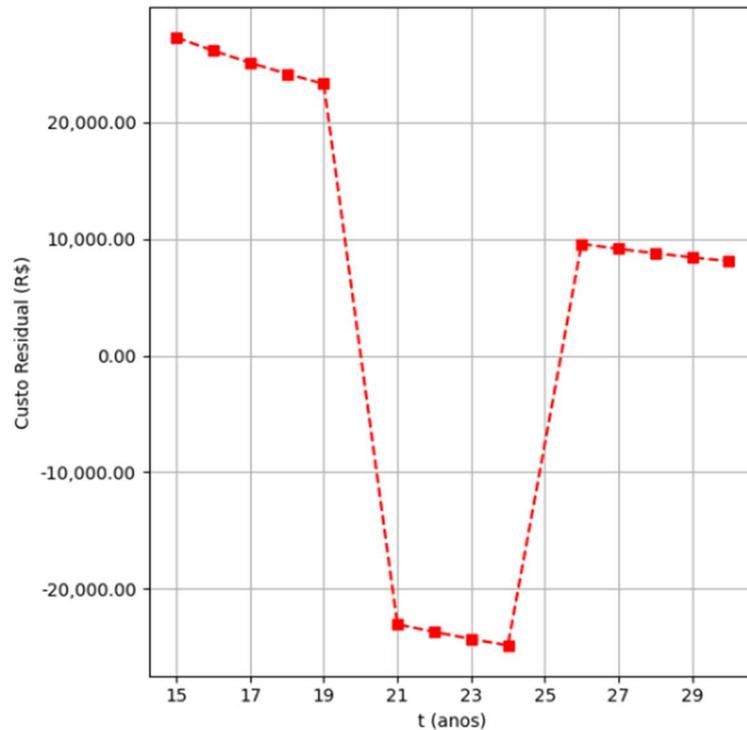
04



Fonte: Autor, 2023.

Esta opção de substituição apresentou o maior *net savings* possível para o caso 01, com aproximadamente 70 mil reais para períodos inferiores a 20 anos e em torno de 60 mil reais para períodos superiores a 25 anos. Portanto, recomenda-se optar por um período inferior a 20 anos devido ao maior valor de *NS* encontrado.

Figura 23 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 01 e opção de substituição 04



Fonte: Autor, 2023.

Assim como nos casos anteriores, o custo residual para a opção de substituição 04, que envolve a substituição de um motor IR2 de 50 cv por um motor IR3 de 25 cv, apresenta um comportamento similar. Os tempos de serviço idênticos dos motores resultam em valores de custo residual praticamente iguais, como evidenciado na Figura 23. É importante ressaltar que o custo residual foi positivo para dois intervalos de períodos e negativo para um intervalo. Conforme já mencionado, o intervalo onde o custo residual apresenta-se negativo deve ser evitado.

- **Caso 02/MIT IR2 40 cv - Opção de substituição 01/MIT IR3 50 cv**

Dando continuidade à análise, passamos agora ao estudo de caso 02, que aborda a substituição de um motor MIT IR2 de 40 cv por diferentes opções, conforme detalhado na subseção 5.2. A primeira alternativa considerada consiste na substituição por um motor MIT IR3 de 50 cv. Este cenário marca a primeira vez neste estudo em que o motor de alto rendimento tem uma potência maior do que o motor de baixo rendimento.

A Figura 24 apresenta os resultados dessa troca. Inicialmente, é perceptível que o padrão de resultados difere dos casos anteriores já analisados neste capítulo. Uma análise detalhada do

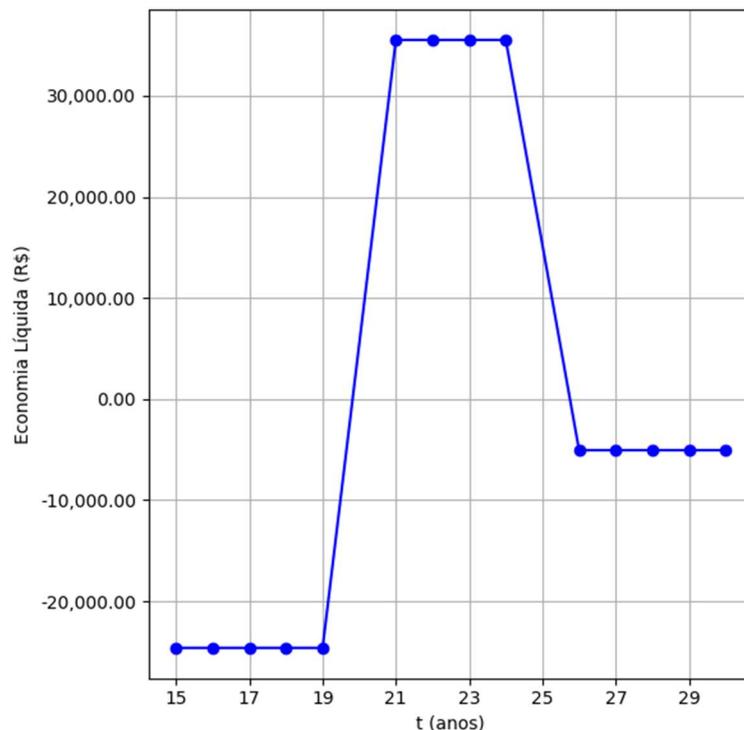
gráfico revela que a troca é vantajosa apenas para períodos em que o tempo de estudo está dentro do intervalo entre o tempo de serviço do motor de baixo rendimento e o tempo de serviço do motor de alto rendimento.

Nessa faixa específica, o *net savings* apresenta resultados positivos, e, portanto, viáveis economicamente. Isso se deve ao fato de que, no período de 20 anos, a vida útil do motor de baixo rendimento termina, exigindo a implementação de um segundo motor. Por outro lado, o motor de alto rendimento continua operando por mais cinco anos, até atingir o final de sua vida útil no período de 25 anos. Portanto, durante esse intervalo mencionado, apenas um motor de alto rendimento é utilizado, em contraste com os dois motores de baixo rendimento necessários nos diversos casos 01 anteriores.

Além dos fatores citados, existe a possibilidade da faixa de carregamento não está adequada para o motor de 50cv, além do alto custo de investimento deste motor.

Figura 24 – *Net savings* em função do tempo de estudo para o caso 02 e opção de substituição

01

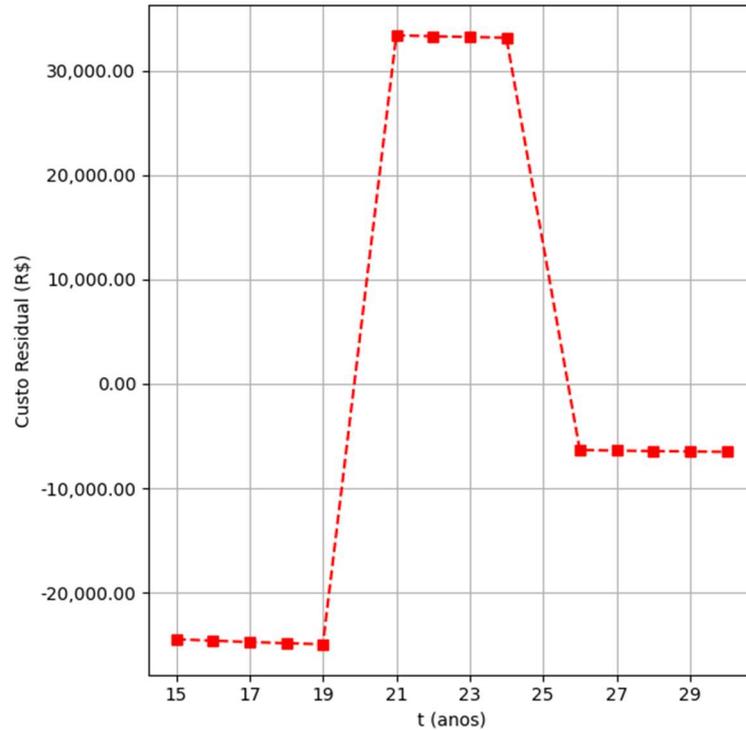


Fonte: Autor, 2024.

Observa-se uma tendência no custo residual, conforme evidenciado na Figura 25. Exceto durante o período em que o *NS* é viável, o custo residual é negativo, indicando um potencial prejuízo para o implementador da ação de eficiência energética. É interessante notar

que o valor do custo residual é praticamente igual ao *NS* nos períodos de viabilidade. Isso implica que, durante esses períodos, o lucro obtido através da redução do consumo energético é máximo e o custo residual também.

Figura 25 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 02 e opção de substituição 01

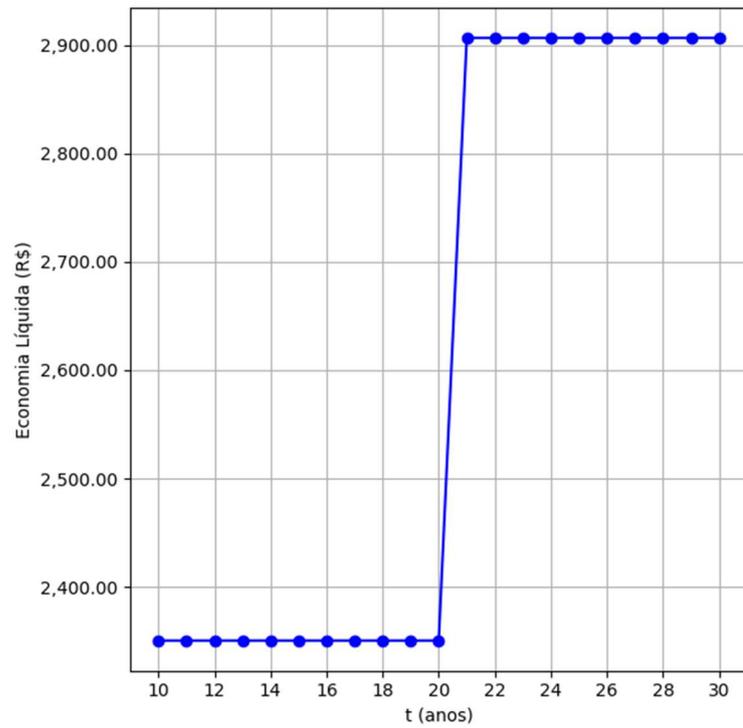


Fonte: Autor, 2024.

- **Caso 02/MIT IR2 40 cv - Opção de substituição 02/MIT IR3 40 cv**

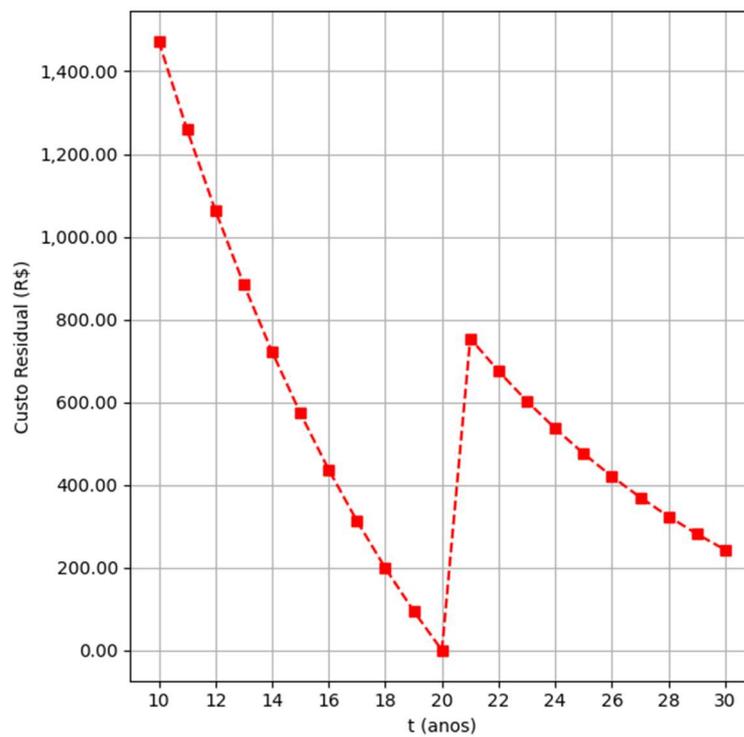
Prosseguindo com a análise para a opção 02 do caso 02, que envolve a substituição por motores de igual potência, observa-se um padrão gráfico já conhecido na Figura 26. O padrão é caracterizado por tempos de serviço dos motores iguais. Neste caso específico, nota-se que a economia líquida é positiva, indicando a viabilidade da substituição. Além disso, é possível identificar um degrau no período 20, que corresponde ao tempo de serviço do motor de 40 cv.

Figura 26 – *Net savings* em função do tempo de estudo para o caso 02 e opção de substituição 02



Fonte: Autor, 2024.

Figura 27 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 02 e opção de substituição 02



Fonte: Autor, 2024.

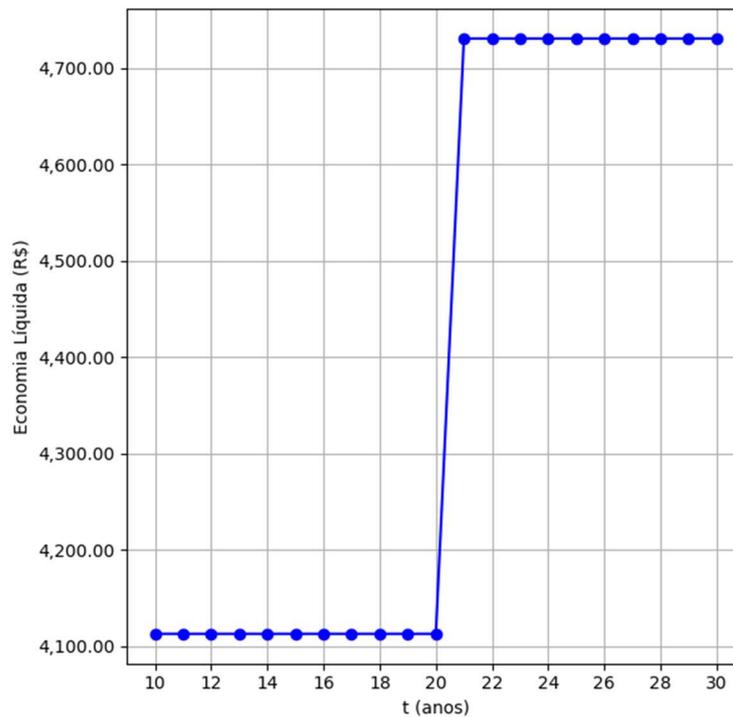
Assim como o *NS*, o *CR* também segue um padrão semelhante aos casos anteriores em que o tempo de serviço dos motores são iguais. A Figura 27 apresenta o gráfico do custo residual em função do tempo de estudo para a segunda opção de substituição no estudo de caso 02. Observa-se que o comportamento de *CR* acompanha o padrão esperado, com variações de acordo com o tempo de estudo e o tempo de serviço dos motores.

- **Caso 02/MIT IR2 40 cv - Opção de substituição 03/MIT IR3 30 cv**

Similar ao caso anterior, na opção 03 temos uma situação em que os tempos de serviço dos motores são iguais, ambos com duração de 20 anos. Na Figura 28, observa-se que o *NS* apresenta um valor maior em comparação à opção anterior. Isso ocorre devido ao ajuste do carregamento em conjunto com o menor custo do motor de 30 cv em comparação ao motor de 40 cv.

Figura 28 – *Net savings* em função do tempo de estudo para o caso 02 e opção de substituição

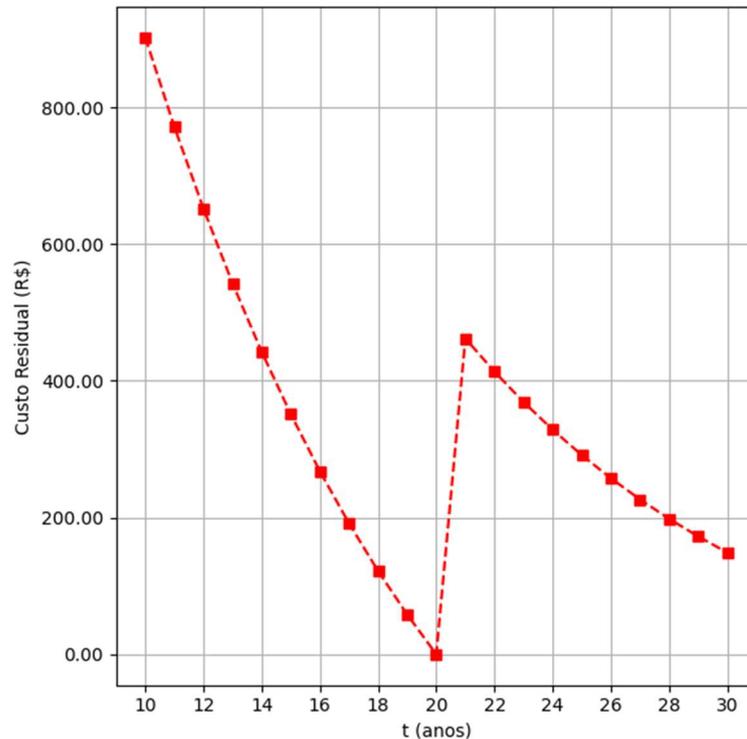
03



Fonte: Autor, 2024.

Em relação ao *CR*, conforme mostrado na Figura 29, o comportamento também é semelhante, porém, os valores são diferentes do caso anterior. Como a opção anterior envolvia um motor de 40 cv e, nesta situação, o motor é de 30 cv, há uma diferença nos valores do *CR*.

Figura 29 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 02 e opção de substituição 03

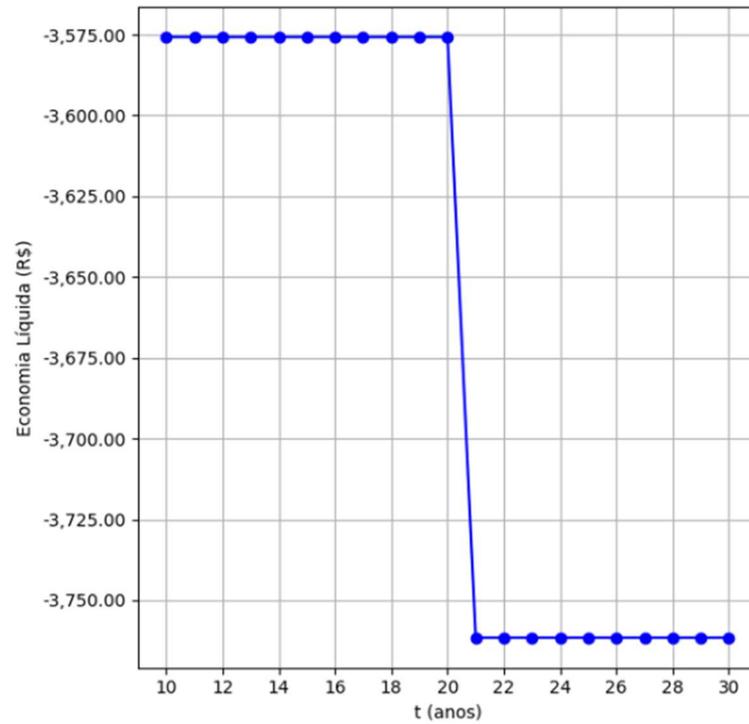


Fonte: Autor, 2024.

- **Caso 03/MIT IR2 30 cv - Opção de substituição 01/MIT IR3 40 cv**

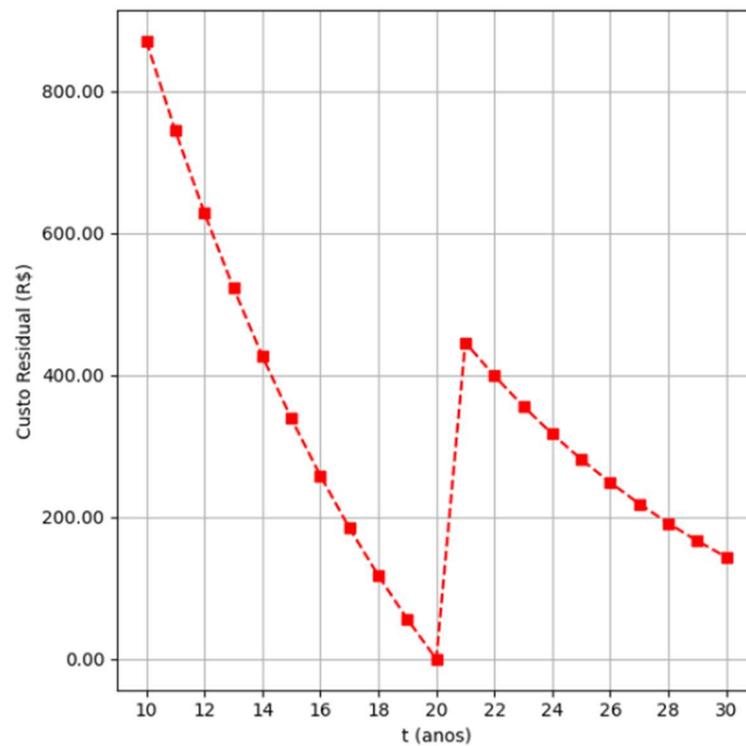
Analisando o último caso, a primeira opção apresenta um padrão de resultado inédito. Durante todo o intervalo de análise, pode-se observar que o *NS* é negativo, o que torna a substituição inviável em termos financeiros. O fato de o carregamento do motor de 30 cv estar relativamente baixo implica na inviabilidade de aumento da potência nominal do motor. Outra observação importante é a forma do padrão gráfico, que mostra um pequeno degrau negativo, ou seja, no início do segundo ciclo com novo motor, no período 30, o *NS* se torna ainda mais negativo.

Figura 30 – *Net savings* em função do tempo de estudo para o caso 03 e opção de substituição 01



Fonte: Autor, 2024.

Figura 31 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 03 e opção de substituição 01



Fonte: Autor, 2024.

Ao analisar a Figura 31, percebe-se que o custo residual é positivo. Isso significa que há um valor residual ao final do período do ciclo de vida dos motores. No entanto, esse valor não contribui para tornar o projeto viável, uma vez que o custo energético, em conjunto com o custo residual, não é suficiente maior que o custo de investimento.

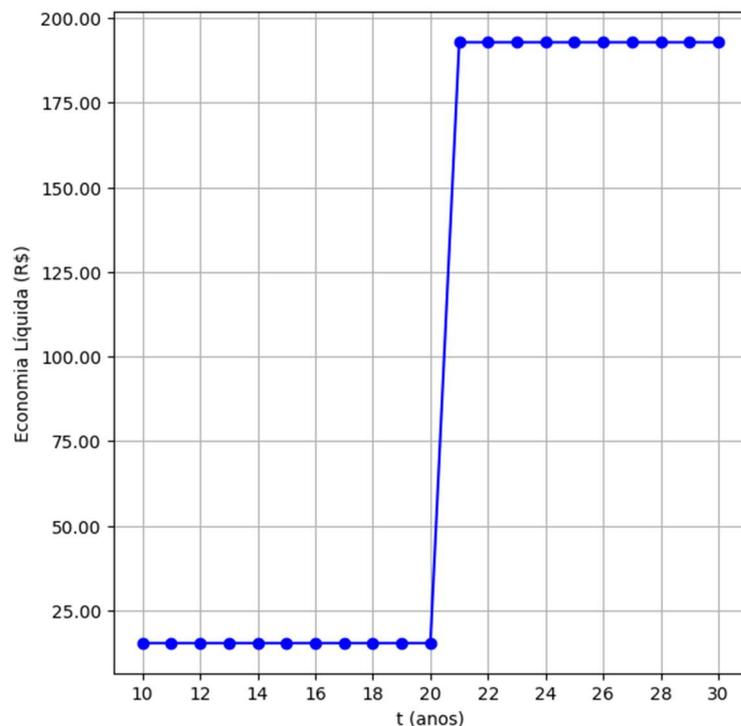
- **Caso 03/MIT IR2 30 cv - Opção de substituição 02/MIT IR3 30 cv**

Na Figura 32, observa-se o padrão de gráfico típico para motores de potências iguais. Nesta situação específica, é possível notar que este projeto está no limite da viabilidade. O *net savings* é positivo, porém baixo. Ao contrário do caso anterior, neste cenário, o custo energético em conjunto com o custo residual é maior do que o custo de investimento, indicando uma possível viabilidade financeira do projeto.

Já o *CR*, visualizado na Figura 33, é exatamente igual ao caso anterior, contribuindo positivamente ao cálculo da economia líquida.

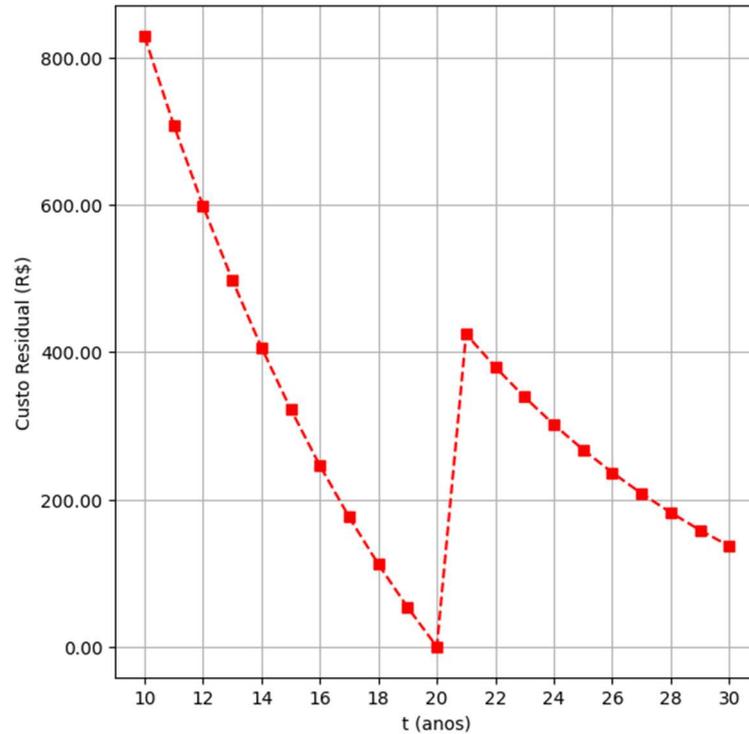
Figura 32 – *Net savings* em função do tempo de estudo para o caso 03 e opção de substituição

02



Fonte: Autor, 2024.

Figura 33 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 03 e opção de substituição 02

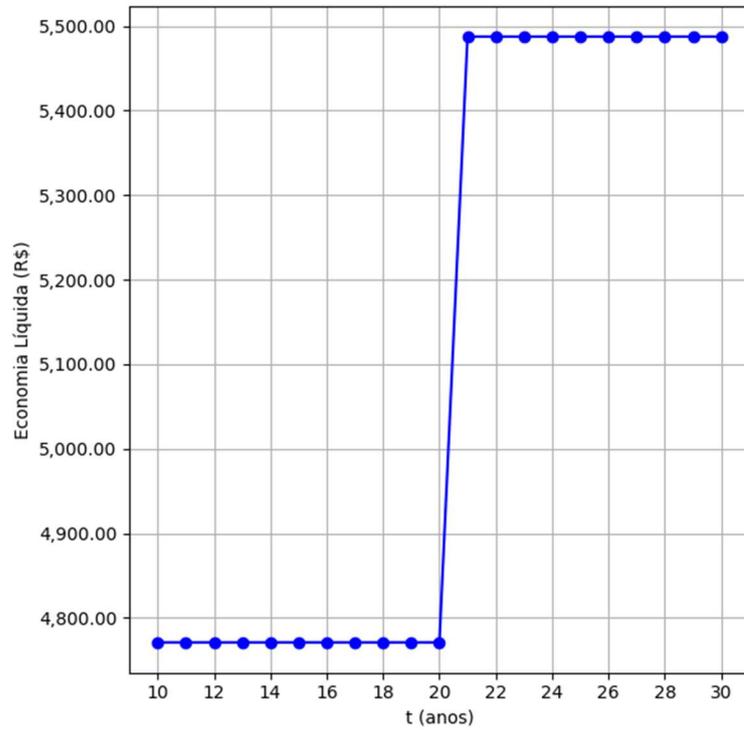


Fonte: Autor, 2024.

- **Caso 03/MIT IR2 30 cv - Opção de substituição 03/MIT IR3 25 cv**

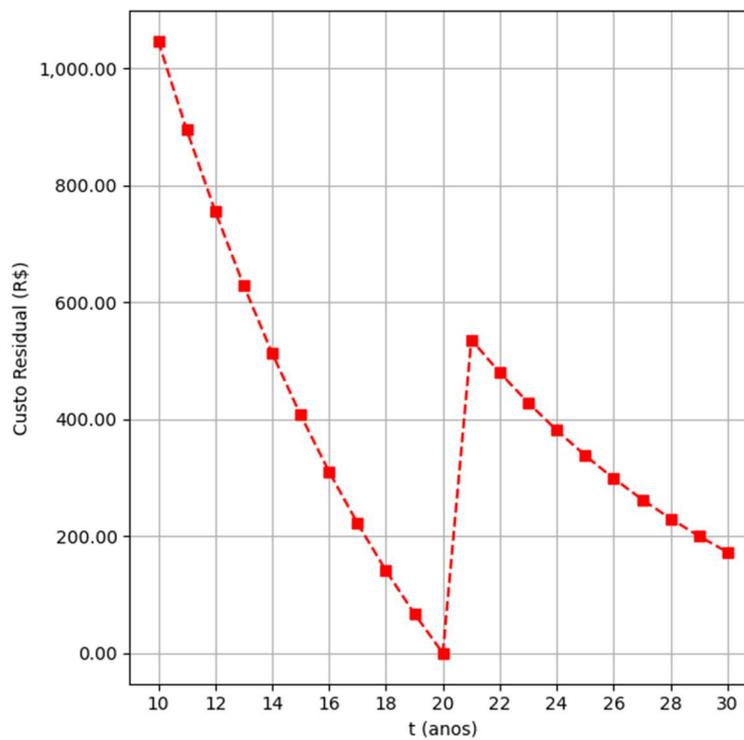
Por fim, para este caso, foi analisada a substituição por um motor IR3 de 25 cv em detrimento do motor IR2 de 30 cv. Diferentemente dos outros casos, esta opção apresentou uma ótima rentabilidade, com valores em torno dos 5 mil reais. Isso se deve a três fatores favoráveis: adequação de carregamento, custo de investimento menor e baixa influência do tempo de estudo no caso, visto que os tempos de serviço dos motores são iguais. O gráfico é mostrado na Figura 34.

Figura 34 – *Net savings* em função do tempo de estudo para o caso 03 e opção de substituição 03



Fonte: Autor, 2024.

Figura 35 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 03 e opção de substituição 03



Fonte: Autor, 2024.

O custo residual, como evidenciado na figura 35, apresenta o comportamento padrão para motores com tempos de serviço iguais. No entanto, a diferença em relação aos casos anteriores está no valor, que é maior, contribuindo positivamente para o cálculo da economia líquida total.

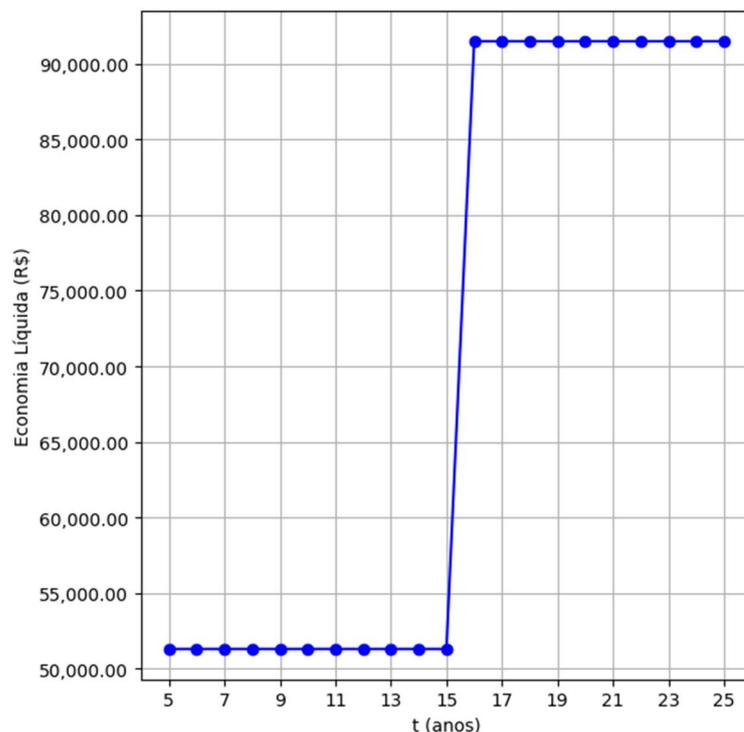
- **Caso 04/MIT IE2 40 cv - Opção de substituição 01/MIT IE3 60 cv**

O último estudo de caso analisa a substituição de um motor IE2 de 40 cv por um motor IE3 de 60 cv, conforme investigado por Roldan Fernandez *et al.* (2019). Apesar da considerável diferença de potência, essa opção se mostra viável, como demonstrado na Figura 36. É importante ressaltar que os dados de entrada são distintos, uma vez que os motores são diferentes dos casos anteriores apresentados neste estudo.

O valor significativamente superior observado nesse caso é influenciado pela tarifa mais alta e pela taxa de desconto menor, mas principalmente pela alta eficiência do motor utilizado, que atinge 95,72%, conforme detalhado na seção 5.4. A influência do rendimento fica evidente ao iniciar o segundo ciclo de utilização dos motores, a partir do ano 16. A introdução de um segundo motor durante o período de estudo potencializa ainda mais os ganhos.

Figura 36 – *Net savings* em função do tempo de estudo para o caso 04 e opção de substituição

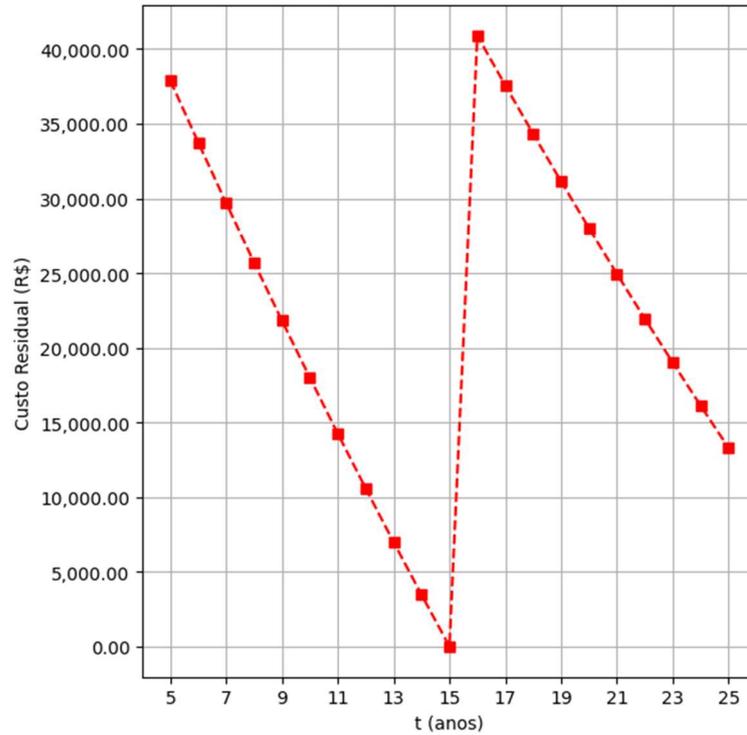
01



Fonte: Autor, 2024.

Por último, vale ressaltar que os tempos de serviço foram considerados iguais, com base nos dados coletados no estudo citado.

Figura 37 – Custo residual em função do tempo de estudo para o caso 04 e opção de substituição 01



Fonte: Autor, 2024.

Para concluir, é possível observar no custo residual para esta situação. Destaca-se uma diferença significativa em relação às outras situações, o que se deve às características distintas dos motores envolvidos. Nota-se também que, durante o segundo ciclo, o valor residual máximo alcançado é consideravelmente maior do que nos casos anteriores. Isso é atribuído à grande disparidade entre os dois motores, onde o consumo energético do motor de alto rendimento, com seu maior rendimento, contribui significativamente para esse aumento no custo residual. Além disso, a taxa de desconto menor contribui para essas diferenças nos decaimentos das curvas.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após uma análise detalhada com foco nas ações de eficiência energética relacionadas a motores, no Brasil, este estudo se concentrou na análise da substituição de motores em operação por outros de maior rendimento. Inicialmente, foram apresentadas as equações da ferramenta de análise econômica que serviram como base para a modelagem matemática da substituição de motores.

A modelagem matemática desenvolvida considerou a possibilidade de utilização de motores com diferentes tempos de serviço, abrangendo diversas situações possíveis. Essas situações foram organizadas em casos que contemplam todas as possibilidades, como tempos de serviço do motor de baixo rendimento maiores, iguais ou menores do que os do motor de alto rendimento, incluindo casos em que os tempos de serviço são iguais ou diferentes do tempo de estudo.

Em seguida, foram apresentados quatro estudos de caso, cada um com uma variedade de motores que se enquadram nas diferentes situações dimensionadas. É importante ressaltar que os dados dos estudos de caso foram obtidos de trabalhos já publicados e presentes no estado da arte do tema, o que confere validade e relevância aos resultados apresentados.

No estudo de caso 01, que trata da substituição de um motor de 50 cv do tipo IR2 com um tempo de serviço de 25 anos por opções do tipo IR3, pôde-se perceber que em situações em que os tempos de serviço são diferentes, ocorre a existência de um intervalo de período de estudo onde os resultados tornam-se indesejáveis. Isso foi observado nas opções de substituições 02, 03 e 04, pois o tempo de serviço dos motores utilizados, 40 cv, 30 cv e 25 cv, respectivamente, é igual a 20 anos. Nas três opções, o período entre 21 e 24 anos apresenta um custo residual negativo, afetando negativamente o *net savings* e demonstrando um potencial de revenda baixo. Em contraste, os intervalos inferiores a 21 anos e superiores a 24 anos apresentaram excelentes resultados, tornando os períodos de estudo desejáveis para este caso.

No segundo estudo de caso, que consiste na substituição de um motor de 40 cv do tipo IR2 com tempo de serviço de 20 anos por opções do tipo IR3, verificou-se que na opção de substituição 01, onde a escolha é por um motor de 50 cv com tempo de serviço de 25 anos, o *NS* apresentou-se viável apenas no intervalo entre 21 e 24 anos. Nos demais períodos de estudo analisados, a substituição mostrou-se economicamente inviável.

O último estudo de caso abordado foi a substituição de um MIT IE2 de 40 cv por um IE3 de 60 cv. Este caso demonstrou um excelente resultado em termos de *net savings* e de custo residual para os períodos de estudo abordados. Após o período 15, este resultado tornou-se

ainda melhor. Neste estudo, o tempo de serviço de ambos os motores foi considerado igual a 15 anos.

Os resultados obtidos demonstram claramente que tanto o tempo de estudo quanto o tempo de serviço dos motores influenciam significativamente na economia líquida e no valor do custo residual da ação de eficiência energética, corroborando com os resultados que foram apresentados no trabalho de Nogueira *et al.* (2023). Foi possível observar, através dos gráficos obtidos, que em determinadas situações existem intervalos de tempos de estudo que o projeto é viável, enquanto em outros intervalos esta viabilidade deixa de existir. Desta forma, o investidor, projetista ou responsável pela ação deve ficar atento para não apenas substituir um motor por outro de maior rendimento, mas também verificar qual período de estudo é o mais correto para realizar uma avaliação econômica rigorosa, para que não haja um julgamento incorreto no emprego de capital na ação de eficiência energética.

Além disso, é importante mencionar que o custo residual possibilita precificar os valores ao final do processo, fornecendo uma visão clara do retorno do investimento. Importante também citar que variações nos tempos de serviço e no tempo de estudo influenciam positivamente ou negativamente o valor de CR. Isso é fundamental para uma análise abrangente e precisa do processo de substituição de motores.

Em suma, este estudo proporcionou resultados esclarecedores e demonstrou que além do rendimento, fatores como carregamento, tempo de serviço e período na ACCV são importantes para viabilizar um projeto de eficiência energética com substituições de motores. Espera-se que os resultados apresentados incentivem futuras pesquisas e aplicações práticas no campo da eficiência energética industrial em sistemas motrizes.

7.1 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

O trabalho desenvolvido permite a seleção de alguns pontos para estudos e aplicações subsequentes. Assim, são apresentadas como propostas para trabalhos futuros:

- **Análise da Degradação dos Motores ao Longo do Tempo:** Realizar uma análise detalhada da degradação dos motores ao longo do tempo para entender como isso influencia a sua eficiência e vida útil. Isso pode incluir a avaliação do desgaste mecânico, perdas de eficiência e custos de manutenção ao longo do ciclo de vida dos motores.
- **Ampliar a Variedade de Tipologias de Motores:** Investigar a viabilidade econômica da substituição de motores, considerando outras tipologias além dos motores de indução. Isso poderia incluir motores síncronos de ímãs permanentes, ou até mesmo

tecnologias emergentes como motores de relutância chaveada ou motores síncronos de relutância.

- **Avaliar o Valor Residual em Outras Ações de Eficiência Energética:** Investigar o conceito de valor residual em outras ações de eficiência energética além da substituição de motores.
- **Avaliação das Substituições no Conceito de Economia Circular:** Expandir a análise a partir do *retrofitting* do motor com o objetivo de reaproveitamento de materiais e não utilizando novas peças e equipamentos.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 16926-1 Máquinas elétricas girantes - Reparo, revisão, recuperação ou modificação. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2021.
- ABNT. NBR 17094-1 Máquinas Elétricas Girantes-Motores de Indução Parte 1: Trifásicos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2013.
- AGUIAR, Victor de Paula Brandão. **Avaliação técnico-econômica do aumento do rendimento em motores de indução trifásicos de baixa potência após rebobinagem**. 2018. 109 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- AGUIAR, V. P. B.; PONTES, R. S. T.; FERREIRA, F. J. T. E. **Technical and economic evaluation of efficiency improvement after rewinding in low-power induction motors: A brazilian case**. *Energies*, v. 11, n. 7, 2018.
- ANDRADE, C. T. C.; PONTES, R. S. T. **Economic analysis of Brazilian policies for energy efficient electric motors**. *Energy Policy*, v. 106, p. 315–325, 2017.
- ANDRADE, Cássio Tessandro de Castro. **Uma Abordagem Determinística com Análise de Incerteza para a Viabilidade de Programas de Eficiência Energética**. 2017. 192 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2021: Ano base 2020**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>> – Acesso em: 20 mar. 2023.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030** / Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, 2007.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2050** / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, 2020. Brasília: MME/EPE, 2020.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plataforma Quem é Quem da Eficiência Energética no Brasil**. 2023. Disponível em <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/spe/quem-e-quem#>. Acesso em 20 de março de 2023.
- BRASIL. Lei nº 10.297, de 17 de outubro de 2001. **Lei de Eficiência Energética**. Brasília, 17 out. 2001. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2001/lei-10295-17-outubro-2001-408176-norma-pl.html>. Acesso em: 21 de março 2023.
- BRASIL. Decreto nº 4.508, de 11 de dezembro de 2002. **Decreto da Regulamentação dos níveis mínimos de eficiência de motores elétricos trifásicos de indução no Brasil**. Brasília, 11 dez. 2002. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/d4508.htm Acesso em: 21 de março 2023.
- BRASIL. Ministério De Minas e Energia - MME. **Plano Nacional de Eficiência Energética**. Brasília, 2011.

BRASIL. Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000. **Lei de Eficiência Energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica.** Brasília, 24 jul. 2000. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19991.htm. Acesso em: 20 de março de 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Ministério da Ciência e Tecnologia e Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. **Portaria Interministerial No. 553, 8 de Dezembro de 2005 - Programa de Metas Motores Elétricos de Indução Trifásicos.** Brasília, Distrito Federal, 2005. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/acao-a-informacao/legislacao/portarias-interministeriais/portaria-mme-mct-mdic-n-553-2005.pdf>

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Chamada nº 002/2015 Projeto Prioritário de Eficiência Energética: Promovendo a eficiência energética no segmento de força motriz.** Brasília, Distrito Federal, 2015. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/programa-eficiencia-energetica>>

BRASIL Ministério de Minas e Energia, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações e Ministério do Comércio Exterior e Serviços. **Portaria Interministerial No. 1, 29 de Junho de 2017 - Programa de Metas Motores Elétricos de Indução Trifásicos.** Brasília, Distrito Federal, 2017. Disponível em: < <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cgiee/arquivos/portarias/2017-portaria-interministerial-mme-mctic-mdic-n-1-2017-motores-eletricos-trifasicos.pdf>>

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** 5ª Ed., São Paulo: McGraw-Hill, 2013.

CINTRA, L. M. et al. **Avaliação econômica da substituição de motor elétrico por motores de maior rendimento para sistemas de irrigação (pivô central).** XLBVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA. Maceió, 2017.

COSTA CLETO, A. C. da. **Motores Elétricos de Alto Rendimento.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.

FORTES, M. Z. et al. **Análise do impacto econômico no setor industrial com a utilização de motores de alto rendimento.** Revista Brasileira de Energia, v. 25, n. 3, 2019. Disponível em: < <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/issue/view/56> > Acesso em: 25 fev. 2024.

FULLER, S. K.; PETERSEN, S. R. **Life-Cycle Costing Manual for the Federal Energy Management Program.** NIST Handbook 135. 2022 edition.

GONÇALVES JÚNIOR, Adriano Araújo. **Avaliação Técnico-econômica da Troca de Motores em Parques Fabris de Médio Porte: Simulação de Cenários em Regiões Distintas do Brasil.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2021.

IEC 60034-30. **Rotating electrical machines – Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code),** 2014.

LIMA, Kelly C. D. et al. **Avaliação Técnico-Econômica da Troca de Motores Industriais pela Análise do Carregamento e Cálculo da Economia Líquida em uma Indústria Salineira.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 8., 2020, Santo André. Anais [...]. Santo André: Ufab, 2020. v. 1, p. 1-6.

MILHEIRO, J. F. N. **Ferramentas de Apoio à Decisão na Eficiência Energética: Motores de Alto Rendimento e Variação Eletrônica de Velocidade.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Nova de Lisboa. Curso de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, 2018.

MISIR, O.; RAZIEE, S. M.; HAMMOUCHE, N.; KLAUS, C.; KLUGE, R.; PONICK, B. **Prediction of losses and efficiency for three-phase induction machines equipped with combined star-delta windings.** IEEE Transactions on Industry Applications, v. 53, n. 4, p. 3579–3587, July 2017. ISSN 0093-9994.

NOGUEIRA, A. J. et al., "Avaliação do Valor Residual, Economia Líquida e Tempo de Estudo na Substituição de Motores Industriais," 2023 15th IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON), São Bernardo do Campo, Brazil, 2023, pp. 1262-1268, doi: 10.1109/INDUSCON58041.2023.10374638.

ROCHA, Jéssica Taveira da; et al. **Motores de indução trifásicos para operações industriais.** Brazilian Journal of Production Engineering, [S. l.], v. 9, n. 4, p. 278–289, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/42440>.

ROLDAN FERNANDEZ, J.M. et al. **Techno-economic optimal power rating of induction motors.** Applied Energy, Elsevier, v. 240, p. 1031 – 1048, 15 abr. 2019. Disponível em: <[Techno-economic optimal power rating of induction motors - ScienceDirect](#)> Acesso em: 30 mar. 2023.

SALAZAR, M. **Decomposição do consumo de energia na indústria brasileira: efeitos do aumento de atividade entre 1970 – 2019.** Revista Brasileira de Energia, v. 27, n. 1, 2021. Disponível em: < <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/issue/view/62> > Acesso em: 25 fev. 2024.

SCARMIN, Alcir. **Otimização da eficiência energética no acionamento de motores de indução utilizando técnicas de controle adaptativo em tempo discreto.** 2011. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2011.

SIGUIMOTO, C. M. **Projeto e análises de motores síncronos de ímãs permanentes internos com otimização do torque.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Elétrica, 2008.

SOLA, A. V. H. et al. **Melhoria da eficiência energética em sistemas motrizes industriais.** Production, v. 25, n. 3, p. 498-509, jul./set. 2015. Disponível em: <[SciELO - Brasil - Melhoria da eficiência energética em sistemas motrizes industriais Melhoria da eficiência energética em sistemas motrizes industriais](#)> Acesso em: 25 fev. 2024.

SHOU, T. **A Literature Review on the Net Present Value (NPV).** Proceedings of the 2nd International Conference on Enterprise Management and Economic Development (ICEMED 2022). Disponível em: <<https://www.atlantis-press.com/article/125975449.pdf>>. Acesso em: 09 mar. 2023.

TARGINO, E. F.; FREITAS, A. A.; AGUIAR, V. P. B.; MOURA, A. A. F.; ROCHA, E. P. **Impacto dos enrolamentos especiais no rendimento de motores industriais de baixa potência para alcançar o superpremium.** In: XXVIII Seminário de Iniciação Científica da UFERSA, 2022, Mossoró/RN. XXVIII Seminário de Iniciação Científica da UFERSA, 2022.

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. 708 p.

APÊNDICE A – CÓDIGO EM PYTHON DO SIMULADOR

ETAPA DE LEITURA DOS DADOS

```

import pandas as pd

#LEITURA DOS MOTORES A SEREM SUBSTITUIDOS
#Caminho do arquivo
caminho_arquivo = 'C:/Users/junio/OneDrive/Área de Trabalho/Software
Mestrado/Dados.xlsx'

#nome da planilha
nome_planilha = 'Motores Planta Industrial'

# Defina as colunas que deseja ler
colunas_para_ler = ['A','G']

# Use a função read_excel para ler apenas as colunas e linhas especificadas
df1 = pd.read_excel(caminho_arquivo, sheet_name=nome_planilha, skiprows=2)

# Imprima o DataFrame resultante
print(df1)

#Atribuindo os dados a um objeto motor
motor_1 = df1.iloc[0]
motor_2 = df1.iloc[1]
motor_3 = df1.iloc[2]
motor_4 = df1.iloc[3]

#LEITURA DAS OPÇÕES DE MOTORES PARA SUBSTITUIÇÃO DO MIT 01
#Caminho do arquivo
caminho_arquivo = 'C:/Users/junio/OneDrive/Área de Trabalho/Software
Mestrado/Dados.xlsx'

#nome da planilha
nome_planilha = 'Opção para troca 01'

# Defina as colunas que deseja ler
colunas_para_ler = ['A','G']

# Use a função read_excel para ler apenas as colunas e linhas especificadas
df1_1 = pd.read_excel(caminho_arquivo, sheet_name=nome_planilha, skiprows=2)

# Imprima o DataFrame resultante
print(df1_1)

#Atribuindo os dados a um objeto motor
motor_1_1 = df1_1.iloc[0]
motor_1_2 = df1_1.iloc[1]
motor_1_3 = df1_1.iloc[2]

```

```

motor_1_4 = df1_1.iloc[3]

#LEITURA DOS TEMPOS DE SERVIÇOS DOS MOTORES DE INDUÇÃO
#Caminho do arquivo
caminho_arquivo = 'C:/Users/junio/OneDrive/Área de Trabalho/Software
Mestrado/Tempo de Serviço - Motores Trifásicos.xlsx'

#nome da planilha
nome_planilha = 'Planilha2'

# Defina as colunas que deseja ler
colunas_para_ler = ['A','D']

# Use a função read_excel para ler apenas as colunas e linhas especificadas
df_ts = pd.read_excel(caminho_arquivo, sheet_name=nome_planilha, skiprows=2)

# Imprima o DataFrame resultante
print(df_ts)

```

ETAPA SUBSTITUIÇÃO DOS MOTORES

```

def net_savings(motor_br, motor_ar):
    motor_br = motor_br.copy() #Obtenção do tempo de serviço motor 1
    x = motor_br['Pn (cv)']
    tempo_de_servico_motor_br = None # Inicialize com um valor padrão
    for indice, linha in df_ts.iterrows():
        if linha['Início'] <= x <= linha['Fim']:
            tempo_de_servico_motor_br = linha['Tempo de Serviço (anos)']
            break
    if tempo_de_servico_motor_br is not None:
        motor_br['Tempo de Serviço'] = tempo_de_servico_motor_br
    else:
        print("Tempo de serviço não encontrado para motor_br")
    motor_ar = motor_ar.copy() #obtenção do tempo de serviço motor 2
    x = motor_ar['Pn (cv)']
    tempo_de_servico_motor_ar = None # Inicialize com um valor padrão
    for indice, linha in df_ts.iterrows():
        if linha['Início'] <= x <= linha['Fim']:
            tempo_de_servico_motor_ar = linha['Tempo de Serviço (anos)']
            break
    if tempo_de_servico_motor_ar is not None:
        motor_ar['Tempo de Serviço'] = tempo_de_servico_motor_ar
    else:
        print("Tempo de serviço não encontrado para motor_ar")
    def m_br(motor_br): #função tempo de serviço mbr
        tempo_de_servico_motor_br = motor_br['Tempo de Serviço']
        return tempo_de_servico_motor_br
    def m_ar(motor_ar): #função tempo de serviço mar
        tempo_de_servico_motor_ar = motor_ar['Tempo de Serviço']
        return tempo_de_servico_motor_ar

```

```

m_br = m_br(motor_br)
m_ar = m_ar(motor_ar)
#print("Os tempos de serviço são {} e {}".format(m_br,m_ar))
taxa_escalada = 0.0235 #entrada de dados economicos
taxa_desconto = 0.12
valor_dolar = 5
tarifa_media = 0.45608
#tarifa_media = 0.8
#n_ciclo = 22
if m_ar != m_br:
    k = abs(m_ar - m_br)
    ts1 = min(m_br,m_ar) - k
    ts2 = max(m_br,m_ar) + k
    print("ts1 = {}".format(ts1))
    print("ts2 = {}".format(ts2))
else:
    ts1 = m_ar - 10
    ts2 = m_ar + 10
    print("ts1 = {}".format(ts1))
    print("ts2 = {}".format(ts2))
vetor_resultados = []

for n_ciclo in range(ts1,ts2+1):

    #FUNÇÕES PARA O CÁLCULO DO NET SAVINGS
    ce_br = "{:.2f}".format((0.736*motor_br['Pn (cv)']*motor_br['L
(p.u.)']*tarifa_media*4000)/(motor_br['η(%)']/100)) #Cálculo do Consumo Energético
br
    ce_ar = "{:.2f}".format((0.736*motor_ar['Pn (cv)']*motor_ar['L
(p.u.)']*tarifa_media*4000)/(motor_ar['η(%)']/100)) #Cálculo do Consumo Energético
ar

    i0_br = motor_br['Preço (US)']*valor_dolar
    i0_ar = motor_ar['Preço (US)']*valor_dolar
    delta_ce = float(ce_br) - float(ce_ar)
    delta_i0 = float(i0_ar) - float(i0_br)
    #print("CE_br {}".format(ce_br))
    #print("CE_ar {}".format(ce_ar))
    #print("Período de Estudo: {}".format(n_ciclo))
    #print("Delta CE {:.2f}".format(delta_ce))
    #print("Delta I0 {:.2f}".format(delta_i0))

    if m_br == m_ar: #Caso 01
        #print("são iguais")
        m = m_br
        #print("Valor de m {}".format(m))
        if m < n_ciclo: #Caso 3.1.1
            #print("CASO 3.1.1\n")
            caso = 'CASO 3.1.1'
            ce = 0
            ci = 0

```

```

cr = 0
aux = 0
fm = 0
for t in range (1,(n_ciclo+1)):
    fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
    aux = delta_ce*fm
    ce += aux
    #print("t={}, fm={:.4f}, CE={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,ce,aux))
ci = delta_i0 + delta_i0*(1/(1+taxa_desconto))**m
for t in range ((n_ciclo+1),((2*m)+1)):
    fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
    aux = delta_ce*fm
    cr += aux
    #print("t={}, fm={:.4f}, CR={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,cr,aux))
NS = ce - ci + cr
vetor_resultados.append((caso,n_ciclo,ce,ci,cr,NS))
#print("O valor do NS é R${:.2f}.".format(NS))
#print("O valor do Custo Residual é R${:.2f}.".format(cr))
elif m > n_ciclo: #Caso 3.1.2
    #print("CASO 3.1.2\n")
    caso = 'CASO 3.1.2'
    ce = 0
    ci = 0
    cr = 0
    aux = 0
    fm = 0
    for t in range (1,(n_ciclo+1)):
        fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
        aux = delta_ce*fm
        ce += aux
        #print("t={}, fm={:.4f}, CE={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,ce,aux))
    ci = delta_i0
    for t in range ((n_ciclo+1),(m+1)):
        fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
        aux = delta_ce*fm
        cr += aux
        #print("t={}, fm={:.4f}, CR={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,cr,aux))
    NS = ce - ci + cr
    vetor_resultados.append((caso,n_ciclo,ce,ci,cr,NS))
    #print("O valor do NS é R${:.2f}.".format(NS))
    #print("O valor do Custo Residual é R${:.2f}.".format(cr))
else: #CASO PADRÃO
    #print("CASO PADRÃO\n")
    caso = 'CASO PADRÃO'
    ce = 0
    ci = 0
    cr = 0
    aux = 0
    fm = 0
    for t in range (1,(n_ciclo+1)):

```

```

    fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
    aux = delta_ce*fm
    ce += aux
    #print("t={}, fm={:.4f}, CE={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,ce,aux))
    ci = delta_i0
    NS = ce - ci
    vetor_resultados.append((caso,n_ciclo,ce,ci,cr,NS))
    #print("O valor do NS é R${:.2f}.".format(NS))
    #print("O valor do Custo Residual é R${:.2f}.".format(cr))
else: #Caso 02
    #print("São diferentes")
    #print("Tempo de Serviço m_ar: {}".format(m_ar))
    #print("Tempo de Serviço m_br: {}".format(m_br))
    #print("Custo de Investimento i0_ar: R${:.2f}.".format(i0_ar))
    #print("Custo de Investimento i0_br: R${:.2f}.".format(i0_br))
    if m_ar < m_br and m_br < n_ciclo: #3.2.1
        #print("CASO 3.2.1\n")
        caso = 'CASO 3.2.1'
        ce = 0
        ci = 0
        cr = 0
        aux = 0
        fm = 0
        for t in range(1,(n_ciclo+1)):
            fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
            aux = delta_ce*fm
            ce += aux
            #print("t={}, fm={:.4f}, CE={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,ce,aux))
            ci = delta_i0 - i0_br*(1/(1+taxa_desconto))**m_br +
i0_ar*(1/(1+taxa_desconto))**m_ar
            for t in range((n_ciclo+1),((2*m_ar)+1)):
                fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
                aux = delta_ce*fm
                cr += aux
                #print("t={}, fm={:.4f}, CR={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,cr,aux))
            for t in range(((2*m_ar)+1),((2*m_br)+1)):
                fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
                aux = float(ce_br)*fm
                cr += aux
                #print("t={}, fm={:.4f}, CR={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,cr,aux))
            NS = ce - ci + cr
            vetor_resultados.append((caso,n_ciclo,ce,ci,cr,NS))
            #print("O valor do NS é R${:.2f}.".format(NS))
            #print("O valor do Custo Residual é R${:.2f}.".format(cr))
        if m_ar < n_ciclo and n_ciclo < m_br:
            #print("CASO 3.2.2\n")
            caso = 'CASO 3.2.2'
            ce = 0
            ci = 0
            cr = 0

```

```

aux = 0
fm = 0
for t in range (1,(n_ciclo+1)):
    fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
    aux = delta_ce*fm
    ce += aux
    #print("t={}, fm={:.4f}, CE={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,ce,aux))
ci = delta_i0 + i0_ar*(1/(1+taxa_desconto))**m_ar
for t in range ((n_ciclo+1),((m_br)+1)):
    fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
    aux = delta_ce*fm
    cr += aux
    #print("t={}, fm={:.4f}, CR={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,cr,aux))
for t in range (((m_br)+1),((2*m_ar)+1)):
    fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
    aux = float(ce_ar)*fm
    cr -= aux
    #print("t={}, fm={:.4f}, CR={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,cr,aux))
NS = ce - ci + cr
vetor_resultados.append((caso,n_ciclo,ce,ci,cr,NS))
#print("O valor do NS é R${:.2f}.".format(NS))
#print("O valor do Custo Residual é R${:.2f}.".format(cr))
if n_ciclo < m_ar and m_ar < m_br:
    #print("CASO 3.2.3\n")
    caso = 'CASO 3.2.3'
    ce = 0
    ci = 0
    cr = 0
    aux = 0
    fm = 0
    for t in range (1,(n_ciclo+1)):
        fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
        aux = delta_ce*fm
        ce += aux
        #print("t={}, fm={:.4f}, CE={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,ce,aux))
    ci = delta_i0
    for t in range ((n_ciclo+1),((m_ar)+1)):
        fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
        aux = delta_ce*fm
        cr += aux
        #print("t={}, fm={:.4f}, CR={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,cr,aux))
    for t in range (((m_ar)+1),((m_br)+1)):
        fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
        aux = float(ce_br)*fm
        cr += aux
        #print("t={}, fm={:.4f}, CR={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,cr,aux))
    NS = ce - ci + cr
    vetor_resultados.append((caso,n_ciclo,ce,ci,cr,NS))
    #print("O valor do NS é R${:.2f}.".format(NS))
    #print("O valor do Custo Residual é R${:.2f}.".format(cr))

```

```

if m_br < m_ar and m_ar < n_ciclo:
    #print("CASO 3.3.1\n")
    caso = 'CASO 3.3.1'
    ce = 0
    ci = 0
    cr = 0
    aux = 0
    fm = 0
    for t in range (1,(n_ciclo+1)):
        fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
        aux = delta_ce*fm
        ce += aux
        #print("t={}, fm={:.4f}, CE={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,ce,aux))
        ci = delta_i0 - i0_br*(1/(1+taxa_desconto))**m_br +
i0_ar*(1/(1+taxa_desconto))**m_ar
        for t in range ((n_ciclo+1),((2*m_br)+1)):
            fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
            aux = delta_ce*fm
            cr += aux
            #print("t={}, fm={:.4f}, CR={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,cr,aux))
        for t in range (((2*m_br)+1),((2*m_ar)+1)):
            fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
            aux = float(ce_ar)*fm
            cr -= aux
            #print("t={}, fm={:.4f}, CR={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,cr,aux))
        NS = ce - ci + cr
        vetor_resultados.append((caso,n_ciclo,ce,ci,cr,NS))
        #print("O valor do NS é R${:.2f}.".format(NS))
        #print("O valor do Custo Residual é R${:.2f}.".format(cr))
if m_br < n_ciclo and n_ciclo < m_ar:
    #print("CASO 3.3.2\n")
    caso = 'CASO 3.3.2'
    ce = 0
    ci = 0
    cr = 0
    aux = 0
    fm = 0
    for t in range (1,(n_ciclo+1)):
        fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
        aux = delta_ce*fm
        ce += aux
        #print("t={}, fm={:.4f}, CE={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,ce,aux))
    ci = delta_i0 - i0_br*(1/(1+taxa_desconto))**m_br
    for t in range ((n_ciclo+1),((2*m_br)+1)):
        fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
        aux = float(ce_br)*fm
        cr += aux
        #print("t={}, fm={:.4f}, CR={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,cr,aux))
    for t in range ((n_ciclo+1),((m_ar)+1)):
        fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t

```

```

    aux = float(ce_ar)*fm
    cr -= aux
    #print("t={}, fm={:.4f}, CR={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,cr,aux))
    NS = ce - ci + cr
    vetor_resultados.append((caso,n_ciclo,ce,ci,cr,NS))
    #print("O valor do NS é R${:.2f}.".format(NS))
    #print("O valor do Custo Residual é R${:.2f}.".format(cr))
if n_ciclo < m_br and m_br < m_ar:
    #print("CASO 3.3.3\n")
    caso = 'CASO 3.3.3'
    ce = 0
    ci = 0
    cr = 0
    aux = 0
    fm = 0
    for t in range (1,(n_ciclo+1)):
        fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
        aux = delta_ce*fm
        ce += aux
        #print("t={}, fm={:.4f}, CE={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,ce,aux))
    ci = delta_i0
    for t in range ((n_ciclo+1),((m_br)+1)):
        fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
        aux = delta_ce*fm
        cr += aux
        #print("t={}, fm={:.4f}, CR={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,cr,aux))
    for t in range ((m_br+1),((m_ar)+1)):
        fm = ((1+taxa_escalada)/(1+taxa_desconto))**t
        aux = float(ce_ar)*fm
        cr -= aux
        #print("t={}, fm={:.4f}, CR={:.2f}, aux={:.2f}".format(t,fm,cr,aux))
    NS = ce - ci + cr
    vetor_resultados.append((caso,n_ciclo,ce,ci,cr,NS))
    #print("O valor do NS é R${:.2f}.".format(NS))
    #print("O valor do Custo Residual é R${:.2f}.".format(cr))
return vetor_resultados

```

ETAPA DE DEMONSTRAÇÃO DOS RESULTADOS

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

#Convertendo o vetor em uma df
resultados = net_savings(motor_4, motor_4_1)
colunas = ['CASO', 't', 'CE', 'CI', 'CR', 'NS']
df_NS = pd.DataFrame(resultados, columns=colunas)

#Formatando os numeros para duas casas decimais
df_NS[['CE', 'CI', 'CR', 'NS']] = df_NS[['CE', 'CI', 'CR', 'NS']].apply(lambda x:
x.map('{:.2f}'.format))

```

```

#Centralizando
colunas_numericas = ['CE', 'CI', 'CR', 'NS']
styled_df = df_NS.style.set_properties(subset=colunas_numericas, **{'text-align':
'center'})
pd.set_option('display.colheader_justify', 'center')

# Impressão do dataframe
styled_df_df = styled_df.data
print(styled_df_df)

#Plotagem do gráfico
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.ticker as mtick
import numpy as np

# DataFrame de acordo com a coluna 't'
df_NS = df_NS.sort_values(by='t')

# Redefina os índices do DataFrame (índice numérico)
df_NS = df_NS.reset_index(drop=True)

# Extraia as colunas t, NS e CR
t = df_NS['t']
NS = df_NS['NS'].astype(float)
CR = df_NS['CR'].astype(float)

# Crie os gráficos
plt.figure(figsize=(12, 6))

# Gráfico t em função de NS
plt.subplot(1, 2, 1)
plt.plot(t, NS, marker='o', linestyle='-', color='b') # Adiciona marcadores 'o', linha
sólida
plt.title("")
plt.xlabel('t (anos)')
plt.ylabel('Economia Líquida (R$)')
plt.xticks(np.arange(min(t), max(t) + 1, 2)) # Define os intervalos discretos no eixo x
plt.gca().yaxis.set_major_formatter(mtick.StrMethodFormatter('{x:,.2f}')) # Formato de
moeda para o eixo y
plt.grid(True) # Adiciona o grid

# Gráfico t em função de CR
plt.subplot(1, 2, 2)
plt.plot(t, CR, marker='s', linestyle='--', color='r') # Adiciona marcadores 's', linha
tracejada
plt.title("")
plt.xlabel('t (anos)')
plt.ylabel('Custo Residual (R$)')
plt.xticks(np.arange(min(t), max(t) + 1, 2)) # Define os intervalos discretos no eixo x

```

```
plt.gca().yaxis.set_major_formatter(mtick.StrMethodFormatter('{x:.,2f}')) # Formato de  
moeda para o eixo y  
plt.grid(True) # Adiciona o grid  
  
plt.tight_layout()  
plt.show()
```

APÊNDICE B – EXEMPLO DE SAÍDA DOS RESULTADOS EM UM *DATAFRAME*

```
ts1 = 5
ts2 = 25
```

	CASO	t	CE	CI	CR	NS
0	CASO 3.1.2	5	10241.74	8555.20	10686.94	12373.48
1	CASO 3.1.2	6	11792.32	8555.20	9136.36	12373.48
2	CASO 3.1.2	7	13209.30	8555.20	7719.38	12373.48
3	CASO 3.1.2	8	14504.19	8555.20	6424.49	12373.48
4	CASO 3.1.2	9	15687.52	8555.20	5241.16	12373.48
5	CASO 3.1.2	10	16768.88	8555.20	4159.80	12373.48
6	CASO 3.1.2	11	17757.08	8555.20	3171.60	12373.48
7	CASO 3.1.2	12	18660.13	8555.20	2268.55	12373.48
8	CASO 3.1.2	13	19485.38	8555.20	1443.30	12373.48
9	CASO 3.1.2	14	20239.52	8555.20	689.16	12373.48
10	CASO PADRÃO	15	20928.68	8555.20	0.00	12373.48
11	CASO 3.1.1	16	21558.47	10118.20	4787.59	16227.86
12	CASO 3.1.1	17	22133.99	10118.20	4212.07	16227.86
13	CASO 3.1.1	18	22659.92	10118.20	3686.14	16227.86
14	CASO 3.1.1	19	23140.54	10118.20	3205.52	16227.86
15	CASO 3.1.1	20	23579.75	10118.20	2766.31	16227.86
16	CASO 3.1.1	21	23981.12	10118.20	2364.94	16227.86
17	CASO 3.1.1	22	24347.90	10118.20	1998.16	16227.86
18	CASO 3.1.1	23	24683.08	10118.20	1662.98	16227.86
19	CASO 3.1.1	24	24989.39	10118.20	1356.67	16227.86
20	CASO 3.1.1	25	25269.30	10118.20	1076.76	16227.86