



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

Thyago Chrystiann da Silva Lopes

**Aprimoramento de Interface e Desenvolvimento de Novas Ferramentas no Software
ReplaceMOTOR v2.0®**

MOSSORÓ

2026

Thyago Chrystiann da Silva Lopes

**Aprimoramento de Interface e Desenvolvimento de Novas Ferramentas no Software
ReplaceMOTOR v2.0®**

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

Linha de Pesquisa: Sistemas Elétricos

Orientador: Prof. Dr. Victor de Paula Brandão Aguiar

MOSSORÓ

2026

© 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.

S586a Silva Lopes, Thyago Chrystiann da.
Aprimoramento de Interface e Desenvolvimento
de Novas Ferramentas no Software ReplaceMOTOR
v2.0® / Thyago Chrystiann da Silva Lopes. - 2026.
60 f. : il.

Orientador: Victor de Paula Brandão Aguiar.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica, 2026.

1. Motores industriais. 2. Substituição de
motores. 3. Análise dos custos do ciclo de vida.
4. Análise econômica. 5. Software. I. Brandão
Aguiar, Victor de Paula, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) 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.

Thyago Chrystiann da Silva Lopes

**Aprimoramento de Interface e Desenvolvimento de Novas Ferramentas no Software
ReplaceMOTOR v2.0®**

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

Linha de Pesquisa: Sistemas Elétricos

Defendida em: 27 / 02 / 2026.

BANCA EXAMINADORA

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

Adriano Aron Freitas de Moura, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Ednardo Pereira da Rocha, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

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

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer ao meu orientador Dr. Victor de Paula Brandão Aguiar, por sempre me guiar pelos melhores caminhos no mundo acadêmico e também a Eng. Valderlândia Marta Ferreira da Silva pela contribuição com os dados de medições utilizados no estudo de caso.

Além disso, o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e ao PPGEE-UFERSA, que foram indispensáveis para a realização desta pesquisa, bem como pelo incentivo à produção científica e ao desenvolvimento da pós-graduação no país.

RESUMO

O presente trabalho aborda a aplicação da Análise dos Custos do Ciclo de Vida (ACCV) na substituição de motores trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo. Esses motores desempenham um papel essencial, impulsionando o funcionamento das mais variadas máquinas, presentes nas mais diversas indústrias. De maneira intrínseca, esses equipamentos necessitam ser substituídos em razão do desgaste progressivo devido ao uso prolongado. E, para essa atividade, as opções de substituição incluem: a troca de um motor por outro de potência igual ou por outro de potência menor. Adicionalmente, em ambas as alternativas o motor novo deve ser mais eficiente. Além disso, na opção do motor novo com potência reduzida, o carregamento deve ser aumentado em relação ao valor utilizado no motor recém trocado, para assegurar que as atividades a ele relacionadas não sejam comprometidas. Todavia, esse ajuste no valor do carregamento é dispensado na opção do motor novo de mesma potência, o que torna essa alternativa mais simples dentre as que foram apresentadas. Assim, com o intuito de agregar valor técnico e financeiro, e oferecer um suporte mais robusto à gestão dessa atividade, é realizada a aplicação da ACCV, uma técnica de análise econômica que permite determinar a viabilidade dessas alternativas de troca de motores. Para isso, foi utilizado o software *ReplaceMOTOR v2.0®*, que implementa substituição de um conjunto de motores e aplica as etapas da ACCV. Esse método é especialmente favorável no contexto industrial em que os motores são utilizados, onde o custo de manutenção e operação pode ser reduzido significativamente com a melhoria da eficiência desses equipamentos. Por fim, a ACCV se revela uma ferramenta eficaz para fundamentar soluções que promovem a redução de custos, visto que seu uso traduz dados técnicos em valores monetários, possibilitando uma análise técnica sob uma perspectiva financeira.

Palavras-chave: Motores industriais. Substituição de motores. Análise dos custos do ciclo de vida. Análise econômica. Software.

ABSTRACT

This work addresses the application of Life Cycle Cost Analysis (LCCA) in the replacement of three-phase squirrel-cage induction motors. These motors play an essential role in driving the operation of various machines across diverse industries. Over time, these motors inevitably require replacement due to progressive wear from prolonged use. For this task, replacement options include substituting a motor with one of equal power or with a lower-power motor. In both cases, the new motor must be more efficient. Additionally, when opting for a reduced-power motor, the load must be increased relative to the value used in the newly replaced motor to ensure that related activities are not compromised. However, this load adjustment is unnecessary when replacing the motor with one of equal power, making this alternative simpler among the presented options. To add technical and financial value and provide robust support for managing this activity, LCCA, an economic analysis technique, is applied to determine the feasibility of these motor replacement alternatives. For this purpose, the ReplaceMOTOR v2.0® software was used, which implements the replacement of a set of motors and applies the steps of LCCA. This method is particularly favorable in industrial contexts, where maintenance and operational costs can be significantly reduced by improving motor efficiency. Finally, LCCA proves to be an effective tool for supporting cost-reduction solutions, as it translates technical data into monetary values, enabling a technical analysis from a financial perspective.

Keywords: Industrial motors. Motor replacement. Life cycle cost analysis. Economic analysis. Software.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do tempo de estudo e do tempo de serviço.....	20
Figura 2 - Fluxo de caixa do: a) Motor 1 b) Motor 2 c) Ambos os motores.	22
Figura 3 - Comportamento do custo residual nos métodos de depreciação.	26
Figura 4 - Fluxo de caixa conforme o método de Nogueira Júnior.	27
Figura 5 - Fluxo de caixa conforme o método do presente trabalho.	28
Figura 6 - Correção monetária do fluxo de caixa da Figura 5.....	34
Figura 7 - Janela inicial do <i>ReplaceMOTOR v2.0®</i>	40
Figura 8 - Janela das alternativas do <i>ReplaceMOTOR v2.0®</i>	41
Figura 9 - Janela das saídas do <i>ReplaceMOTOR v2.0®</i>	42
Figura 10 - Curva de rendimento obtida por aproximação linear nas regiões de carregamento.	48
Figura 11 - Fluxo de caixa do motor 1.5.	52
Figura 12 - Curva de conjugado e corrente x velocidade.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valor de depreciação no método soma dígitos.....	25
Tabela 2 - Inflação e juros a.a. no Brasil de 1996 a 2024.	29
Tabela 3 - Tarifa média industrial de energia elétrica e taxa de escalada a.a. no Brasil de 1996 a 2024.	31
Tabela 4 - Fatores de correção e dados da Figura 5 e da Figura 6.	37
Tabela 5 - Exemplo de fluxo de caixa de um motor fictício.	38
Tabela 6 - Diferença entre os fluxos de caixa dos motores.	39
Tabela 7 - Colunas do catálogo de motores.....	43
Tabela 8 - Preço do motor em USD e BRL.....	43
Tabela 9 - Vida útil média dos motores em função da sua potência.	44
Tabela 10 - Condições das entradas de usuário.....	44
Tabela 11 - Lista de potências.	45
Tabela 12 - Instantes dos custos durante execução do Algoritmo 2.....	47
Tabela 13 - Chaves de busca do motor similar.....	49
Tabela 14 - Informações do motor TOSHIBA e do motor similar.....	50
Tabela 15 - Dados de entrada do estudo de caso.	50
Tabela 16 - Opções de substituição do motor similar.	51
Tabela 17 - Medidas suplementares das opções alternativas ao motor similar, considerando que esse encontra-se em operação.....	51
Tabela 18 - Coeficientes da interpolação linear da corrente a vazio em função da potência nominal do motor, agrupados pelo número de polos.....	58
Tabela 19 - Dados estratificados do carregamento do motor TOSHIBA.....	59
Tabela 20 - Dados estratificados do carregamento do motor TOSHIBA desconsiderando os efeitos do acionamento.	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MEPS	<i>Minimum Energy Performance Standards</i>
ACCV	Análise dos Custos do Ciclo de Vida
MIT	Motor de Indução Trifásico
NS	<i>Net Savings</i>
SIR	<i>Savings-to-investment Ratio</i>
AIRR	<i>Adjusted Internal Rate of Return</i>
PB	<i>Payback</i>
FC	Fluxo de Caixa
CSV	<i>Comma-separated Values</i>
IR	Índice de Rendimento
USD	Dólares Americanos
BRL	Reais Brasileiros

LISTA DE SÍMBOLOS

L	Carregamento [%]
P_{eixo}	Potência no Eixo [cv]
P_n	Potência Nominal [cv]
<i>antigo</i>	Motor Antigo
<i>novo</i>	Motor Novo
t	Instante de Tempo [ano]
TE	Tempo de Estudo [ano]
TS	Tempo de Serviço [ano]
CCV	Custos do Ciclo de Vida
C_I	Custo de Investimento [\$]
C_E	Custo de Energia [\$]
C_{TROCA}	Custo de Troca [\$]
$C_{O\&M}$	Custo de Operação e Manutenção [\$]
C_R	Custo Residual [\$]
ΔCCV	Diferença entre dois CCV [\$]
B	Opção Base
A	Opção Alternativa
T	Tempo de Operação do Motor [<i>horas/ano</i>]
$\eta(L)$	Rendimento do Motor em Função do Carregamento
<i>Tarifa</i>	Tarifa de Energia Elétrica [$\$/kWh$]
VD	Valor de Depreciação [\$]
VI	Valor Inicial [\$]
VF	Valor Final [\$]
d	Taxa de Desconto [%]
VP	Valor Presente [\$]
VF	Valor Futuro [\$]
I	Taxa Média de Inflação [%]
D	Taxa média de Juros [%]

e	Taxa de Escalada [%]
E	Taxa média de Escalada [%]
VPL	Valor Presente Líquido [\$]
ΔC_I	Diferença entre dois C_I [\$]
ΔC_E	Diferença entre dois C_E [\$]
ΔC_R	Diferença entre dois C_R [\$]
r	Taxa de Reinvestimento [%]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Visão geral do <i>ReplaceMOTOR</i>	13
1.2	Estado da arte.....	14
1.3	Justificativa do trabalho.....	15
1.4	Objetivos do trabalho	15
1.4.1	Objetivo geral	15
1.4.2	Objetivos específicos.....	15
2	SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES.....	16
2.1	Motor de potência igual.....	16
2.2	Motor de potência reduzida	16
3	ANÁLISE DOS CUSTOS DO CICLO DE VIDA.....	19
3.1	Tempo de estudo e tempo de serviço.....	19
3.2	Opção base e opções alternativas	20
3.3	Custos do ciclo de vida.....	20
3.3.1	Custo de investimento	22
3.3.2	Custo de energia	23
3.3.3	Custo residual	23
3.3.3.1	Depreciação linear	24
3.3.3.2	Depreciação soma dígitos.....	24
3.3.3.3	Considerações sobre os métodos de depreciação	25
3.3.4	Interação entre o tempo de estudo e o tempo de serviço.....	26
3.4	O valor do dinheiro no tempo.....	28
3.4.1	Taxa de desconto	29
3.4.2	Taxa de escalada.....	30
3.5	Valor presente líquido	32
3.6	Medidas suplementares.....	34
3.6.1	Economia líquida.....	35
3.6.2	Relação economia-investimento.....	36
3.6.3	Taxa de retorno interna ajustada.....	36

3.6.4	<i>Payback</i> descontado	37
4	ESPECIFICAÇÕES DO SOFTWARE	40
4.1	Interface gráfica	40
4.1.1	Janela inicial	40
4.1.2	Janela das alternativas	41
4.1.3	Janela das saídas	42
4.2	Dados	42
4.2.1	Catálogo	42
4.2.2	Preço	43
4.2.3	Vida útil	43
4.3	Condições dos dados de entrada	44
4.4	Algoritmos	44
4.4.1	Obtenção dos motores com potência reduzida.	45
4.4.2	Interação entre o tempo de estudo e o tempo de serviço	45
4.4.3	Obtenção da curva de rendimento	46
5	ESTUDO DE CASO	49
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
	REFERÊNCIAS	54
	APÊNDICE A - MÉTODO DA LINEARIZAÇÃO	57
	APÊNDICE B - ANÁLISE DO CARREGAMENTO DO MOTOR	59

1 INTRODUÇÃO

A eficiência energética em motores elétricos é de fundamental importância para a redução do consumo energético e para políticas de sustentabilidade, especialmente na indústria, onde esses equipamentos correspondem a uma parcela significativa da energia consumida (MOREIRA, 2017).

Nesse sentido, para orientar as exigências mínimas de desempenho, McCoy e Douglas (2014) descrevem que diversos países e blocos econômicos adotaram os índices mínimos de rendimento ou *Minimum Energy Performance Standards* (MEPS), que definem níveis mínimos de eficiência que motores elétricos devem atingir para serem comercializados.

Assim, a substituição de motores elétricos antigos por modelos mais novos e eficientes é uma das estratégias mais eficazes para adequar a população de motores aos critérios definidos nos MEPS, além de reduzir o consumo de energia ao longo do tempo.

Nesse contexto, o *ReplaceMOTOR v2.0*® surge como ferramenta para impulsionar esse procedimento, que com utilização da Análise dos Custos do Ciclo de Vida (ACCV) permite quantificar de forma objetiva os benefícios econômicos da substituição por motores de alto rendimento (AGUIAR *et al.*, 2024).

1.1 Visão geral do *ReplaceMOTOR*

O *ReplaceMOTOR* é um *software* que aplica a ACCV na substituição de motores de indução trifásicos (MIT). A primeira versão do programa, registrada em Aguiar *et al.* (2024), gera carregamentos aleatórios e utiliza esses valores para calcular o consumo de energia elétrica dos motores informados. Nesse sentido, o programa utiliza dados operacionais de um conjunto de motores como a potência, a quantidade de motores e o tempo de operação, dados econômicos como a tarifa de energia elétrica, a taxa de desconto e a taxa de escalada, além de dados médios diversos de motores como o preço de mercado e o tempo de vida útil, para calcular a economia obtida nas trocas e outras informações que servem como indicadores de viabilidade econômica. Além disso, a ferramenta verifica a redução da potência nominal de motores superdimensionados, permitindo observar os resultados obtidos por meio de uma análise de sensibilidade. Por fim, os dados gerados pela aplicação possuem formato de tabela e podem ser utilizados em rotinas externas para extrair gráficos e comportamentos.

1.2 Estado da arte

A seguir estão descritas as pesquisas que fornecem direcionamentos que influenciam no desenvolvimento do presente trabalho:

- Silva (2017): apesar de não tratar sobre a substituição de motores ou a ACCV, o trabalho fornece diretrizes de como estruturar o presente texto, visto que também consolida informações sobre um tópico específico, a rebobinagem de motores, e fornece melhorias à um software existente, o *BobiSoft*. Portanto, a escolha dos tópicos e as suas respectivas abordagens no presente trabalho são diretamente influenciadas por Silva.
- Andrade e Pontes (2017): dentre os trabalhos utilizados como referência, é o primeiro que utiliza a ACCV para verificar a viabilidade econômica da substituição de motores. Para isso, Andrade e Pontes abordam as políticas brasileiras de eficiência energética para motores elétricos como contexto para avaliar a rentabilidade da execução dessas ações. Adicionalmente, os autores fornecem uma base de dados para trabalhos futuros, com diversas informações sobre MITs.
- Gonçalves Júnior (2021): o trabalho avalia por regiões do Brasil os efeitos da tarifa de energia elétrica nos resultados obtidos com a ACCV, abordando a influência desse fator na viabilidade da troca de motores. Paralelamente, Gonçalves Júnior observa os dados históricos para analisar o comportamento da taxa de escalada da energia elétrica. Por fim, dentre as referências, é o primeiro trabalho a implementar um algoritmo para automatizar o processo.
- Nogueira Júnior (2024): o trabalho aborda a interação do tempo de estudo com o tempo de serviço como fator determinante na ACCV, analisando em vários cenários a influência desses aspectos nos resultados obtidos. Além disso, Nogueira Júnior também propõe um método para calcular o custo residual e implementa um algoritmo de automação dos passos necessários.
- Lopes *et al.* (2024): o trabalho registra um *software* que agrupa o desenvolvimento dos trabalhos mencionados previamente, o *ReplaceMOTOR v1.0®*. Ainda em sua versão inicial, possui suporte à análise de múltiplos motores, verificação da viabilidade técnica da redução de potência de motores superdimensionados, além de sintetizar os passos necessários para aplicar a ACCV na troca de motores.
- See+ (WEG, 2025a): o *software* simula a utilização de motores em diversas situações, tais como na substituição de motores em operação ou na instalação de motores novos. O See+ verifica a viabilidade econômica dessas operações a partir de indicadores que

também são utilizados na ACCV. Apesar de ser direcionado aos produtos da WEG, o See+ fornece ideias de dados, contextos e resultados que podem ser utilizados para agregar valor ao processo.

1.3 Justificativa do trabalho

Diante do exposto, observou-se a oportunidade de sintetizar as pesquisas já concluídas em um único local para fornecer uma visão ampla dos avanços obtidos, além de desenvolver novas rotinas e integrá-las ao *ReplaceMOTOR v2.0*®, tais como ferramentas para visualização de dados e gráficos, maior variedade de informações a serem utilizadas como dados de entrada, dentre outras funcionalidades a serem descritas no decorrer do presente trabalho. Tais acréscimos ao programa atenderiam às demandas mencionadas nos trabalhos pretéritos, agregando aspecto comercial ao *software*.

1.4 Objetivos do trabalho

1.4.1 Objetivo geral

Agrupar os trabalhos anteriores sobre a ACCV em um único texto que serve como ponto de encontro para essas pesquisas e agregar melhorias ao *ReplaceMOTOR v1.0*® contribuindo para uma eventual versão do *software* com caráter comercial.

1.4.2 Objetivos específicos

- Incluir no ambiente computacional existente os efeitos da interação do tempo de estudo com o tempo de serviço;
- Expandir a variedade de MITs suportados pelo programa;
- Adicionar ao *software* ferramentas de visualização de dados e gráficos que auxiliam na utilização da ACCV;
- Registrar o *ReplaceMOTOR v2.0*®, visando utilização comercial.

2 SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES

A Portaria Interministerial nº 1/2017 (MME, 2017) estabeleceu rendimentos nominais mínimos para motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo e definiu datas limite para fabricar, importar e comercializar esses equipamentos conforme os novos rendimentos adotados. Essa ação impulsionou a substituição de motores, que era utilizada majoritariamente para garantir boas condições operacionais de uma indústria devido ao desgaste que os motores sofrem ao longo do tempo, e tornou essa prática uma das principais ações de eficiência energética, visto que utilizar motores novos e mais eficientes no lugar de motores antigos e menos eficientes reduz o consumo de energia elétrica.

Entretanto, trocar motores exige um investimento financeiro elevado referente à aquisição de um motor novo mais eficiente, sendo desejável que essa ação seja justificada com a redução do custo do consumo de energia elétrica, compensando o custo financeiro inicial ao longo do tempo. Por fim, a seguir serão abordados dois métodos de substituição de motores que produzem resultados técnicos e financeiros distintos.

2.1 Motor de potência igual

Um dos métodos utilizados é trocar um motor por outro de mesmas especificações (potência, polos, tensão etc.), operando nas mesmas condições, porém, mais novo e com rendimento maior. Essa é uma técnica simples que pode ser implementada facilmente, pois não exige mudanças significativas na infraestrutura existente.

2.2 Motor de potência reduzida

O outro método abordado é substituir um motor por outro de potência nominal inferior, também mais novo e com rendimento maior, porém, operando com um carregamento maior. Nesse caso, parâmetros como polos e tensão permanecem inalterados. O carregamento L de um motor é definido na Equação (1) como a razão entre a potência no eixo P_{eixo} e a potência nominal P_n , e representa a parcela da potência nominal que é utilizada para realizar trabalho.

$$L = \frac{P_{eixo}}{P_n} \quad (1)$$

Para reduzir a potência nominal é necessário que a potência no eixo seja constante durante a troca do motor antigo para o motor novo, garantindo que as tarefas desempenhadas pelo motor não sejam comprometidas. Para tal, a Equação (2) representa essa condição e permite relacionar o motor antigo com o motor novo por meio da potência no eixo.

$$P_{n_antigo} \cdot L_{antigo} = P_{n_novo} \cdot L_{novo} \quad (2)$$

Reordenando a Equação (2) obtém-se a Equação (3) que define o carregamento do motor novo L_{novo} em função da potência nominal do motor antigo P_{n_antigo} , da potência nominal do motor novo P_{n_novo} e do carregamento do motor antigo L_{antigo} .

$$L_{novo} = \frac{P_{n_antigo}}{P_{n_novo}} \cdot L_{antigo} \quad (3)$$

Na Equação (3), como a potência nominal do motor novo é menor do que a potência nominal do motor antigo, $P_{n_novo} < P_{n_antigo}$, a razão P_{n_antigo}/P_{n_novo} é maior que 1 e, consequentemente, o carregamento do motor novo é maior do que o carregamento do motor antigo, $L_{novo} > L_{antigo}$. Assim, o motor novo opera com um carregamento maior para compensar a redução da potência nominal, assegurando a continuidade das atividades executadas.

Entretanto, esse aumento de carregamento deve respeitar um valor limite. McCoy e Douglass (2014) recomendam um carregamento máximo de 95% para que um motor opere com seu rendimento máximo. Porém, WEG (2025b) afirma que o rendimento sofre poucas alterações na faixa de 75% a 100% do carregamento. Assim, um carregamento de 100% atende ao critério de rendimento máximo tanto quanto um carregamento de 95%. Portanto, é considerado um carregamento máximo de 100% no presente trabalho.

Dessa maneira, como um motor novo não pode operar em situação de sobrecarga, ou seja, $L_{novo} \leq 100\%$, ao combinar essa condição com a Equação (3) é possível definir na Equação (4) uma condição para a redução de potência com base no carregamento do motor antigo L_{antigo} e nas potências nominais, P_{n_novo} e P_{n_antigo} .

$$L_{antigo} \leq \frac{P_{n_novo}}{P_{n_antigo}} \quad (4)$$

Por fim, a redução da potência nominal sempre deve ser verificada, especialmente para motores superdimensionados que operam com um carregamento baixo, pois a sua implementação pode impulsionar a economia financeira com a troca de motores, visto que o preço de um motor é proporcional à sua potência nominal, conforme o levantamento de preços realizado por Andrade e Pontes (2017).

3 ANÁLISE DOS CUSTOS DO CICLO DE VIDA

Além de aspectos técnicos, é fundamental avaliar a viabilidade econômica de um projeto. Para essa finalidade, Kneifel e Webb (2022) apresentam a ACCV, que é uma técnica de análise econômica que consiste em levantar os custos de um projeto durante o seu ciclo de vida, referentes a sua implantação, operação, manutenção e descarte. Nesse sentido, esses dados permitem definir e comparar opções para executar um projeto e fundamentar escolhas na tomada de decisões. De forma geral, para utilizar a ACCV é necessário seguir as seguintes etapas, que serão apresentadas a seguir aplicadas na substituição de motores:

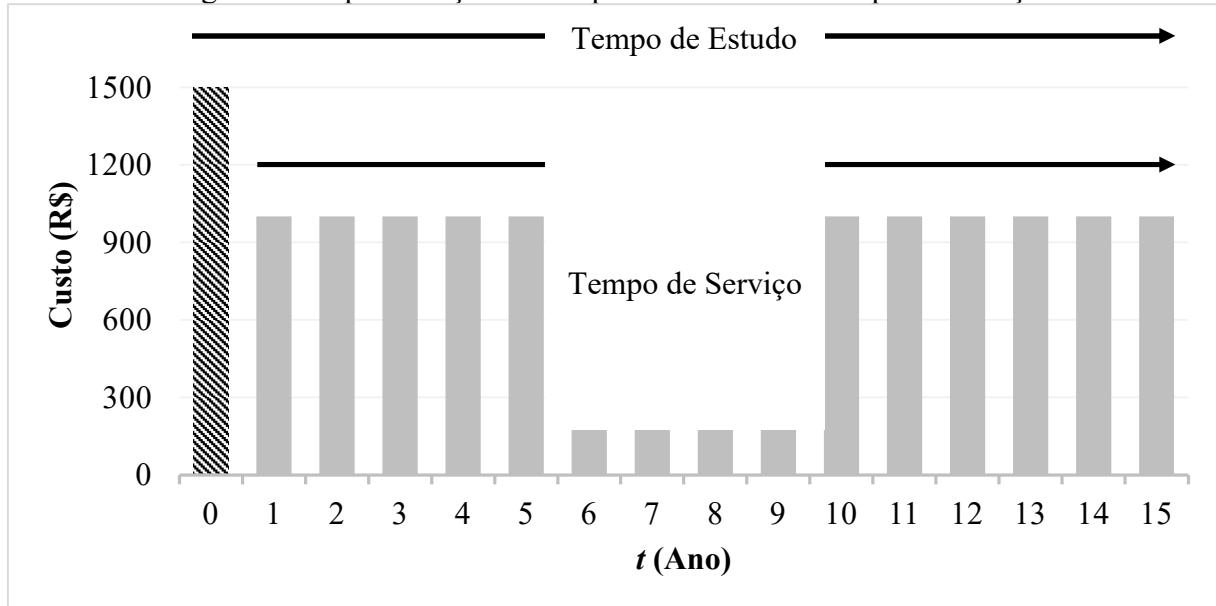
1. Determinar o tempo de estudo e tempo de serviço;
2. Definir as opções de execução;
3. Levantar os custos envolvidos;
4. Efetuar as correções monetárias necessárias;
5. Calcular as medidas suplementares.

3.1 Tempo de estudo e tempo de serviço

Para aplicar a ACCV é necessário determinar o tempo de estudo TE e o tempo de serviço TS . O tempo de estudo é o período considerado para a análise, sendo o limite superior do intervalo que vai desde o instante $t = 0$ até o instante $t = TE$. Na substituição de motores o tempo de serviço de um motor é o tempo esperado que esse equipamento estará em operação, ou seja, a sua vida útil. O instante $t = 0$ é a data base que corresponde ao tempo presente na ACCV, enquanto os demais são instantes futuros em relação a data base.

A Figura 1 apresenta o fluxo de caixa de um motor com vida útil de 15 anos que contém alguns custos que ocorrem em vários instantes t , além disso, especifica quais instantes pertencem ao tempo de estudo e ao tempo de serviço do motor. Na situação apresentada, em $t = 0$ ocorre um custo referente à compra do motor, enquanto os custos que ocorrem nos demais instantes representam as despesas com energia elétrica para manter o motor em funcionamento.

Figura 1 - Representação do tempo de estudo e do tempo de serviço.



Fonte: Autoria própria.

3.2 Opção base e opções alternativas

Também é necessário definir as opções de execução do projeto, que são a opção base e as opções alternativas. A opção base é a referência para ser comparada com as opções alternativas que poderão substituí-la. No contexto da substituição de motores, a opção base normalmente é um motor antigo com rendimento inferior em operação e as opções alternativas são trocá-lo um por um motor novo com rendimento maior e:

1. Mesma potência, assim como detalhado na seção 2.1;
2. Potência reduzida, porém, operando com carregamento maior, conforme a seção 2.2.

Vale ressaltar que em outros contextos a opção base pode ser qualquer motor que se deseje comparar com algumas alternativas, e não necessariamente precisa ser um motor antigo de baixo rendimento em operação. Por exemplo, podem ser selecionados como opção base e opção alternativa dois motores que ainda serão adquiridos para verificar qual deles possui o melhor custo-benefício.

3.3 Custos do ciclo de vida

Outro passo fundamental é levantar os custos do projeto, isso permite que duas opções distintas sejam comparadas. A Equação (5) define os custos do ciclo de vida CCV das opções elencadas na seção 3.2 considerando os custos de: investimento C_I , energia C_E , troca C_{TROCA} ,

operação e manutenção $C_{O\&M}$ e o custo residual C_R . O sinal negativo próximo ao custo residual na Equação (5) será discutido na seção 3.3.3.

$$CCV = C_I + C_E + C_{TROCA} + C_{O\&M} - C_R \quad (5)$$

Uma forma simples de comparar a opção base com uma opção alternativa é realizando a diferença entre os CCV dessas opções¹, tal como na Equação (6).

$$\begin{aligned} \Delta CCV = & (C_{I_B} - C_{I_A}) + (C_{E_B} - C_{E_A}) + (C_{R_A} - C_{R_B}) \\ & + (C_{TROCA_B} - C_{TROCA_A}) + (C_{O\&M_B} - C_{O\&M_A}) \end{aligned} \quad (6)$$

Além disso, como as opções alternativas também são MIT, ou seja, possuem a mesma tecnologia da opção base, Aguiar *et al.* (2022) afirma que o custo de troca da opção base é igual ao custo de troca das opções alternativas durante a comparação entre essas opções. Analogamente, essa afirmação é válida para o custo de operação e manutenção. Assim, ao calcular a diferença entre os CCV de uma opção base e de uma opção alternativa, os custos em questão anulam-se², conforme a Equação (7).

$$\Delta CCV = (C_{I_B} - C_{I_A}) + (C_{E_B} - C_{E_A}) + (C_{R_A} - C_{R_B}) \quad (7)$$

Então, a Equação (5) pode ser reescrita na Equação (8) sem o custo de troca C_{TROCA} e o custo de operação e manutenção $C_{O\&M}$, visto que esses custos não influenciam no cálculo de ΔCCV , assim como demonstrado na Equação (7).

$$CCV = C_I + C_E - C_R \quad (8)$$

¹Maiores detalhes do desenvolvimento da Equação (6):

$$\Delta CCV = CCV_B - CCV_A = C_{I_B} + C_{E_B} + C_{TROCA_B} + C_{O\&M_B} - C_{R_B} - (C_{I_A} + C_{E_A} + C_{TROCA_A} + C_{O\&M_A} - C_{R_A})$$

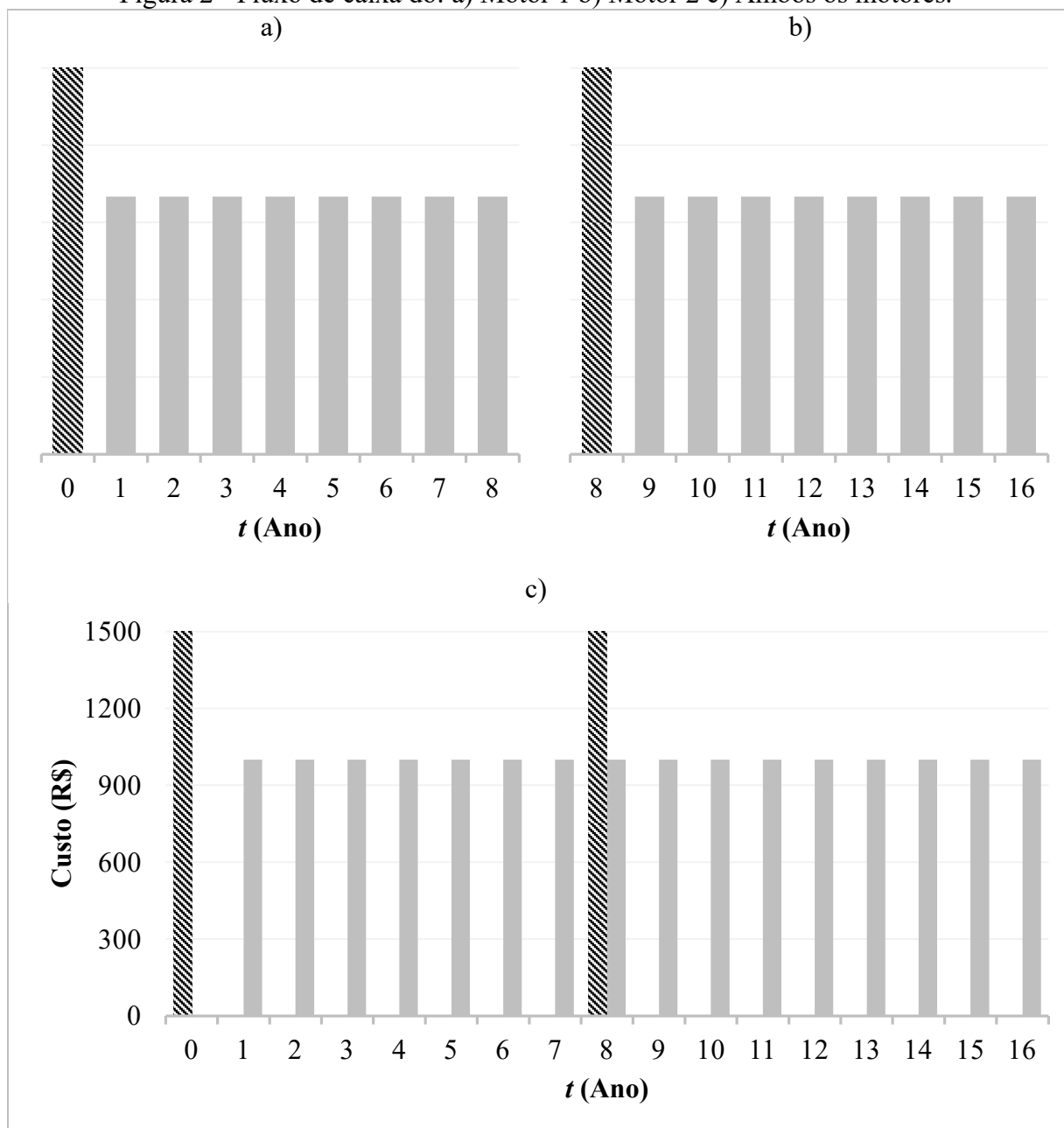
² Maiores detalhes do desenvolvimento da Equação (7):

$$\Delta CCV = (C_{I_B} - C_{I_A}) + (C_{E_B} - C_{E_A}) + (C_{R_A} - C_{R_B}) + \cancel{(C_{TROCA_B} - C_{TROCA_A})} + \cancel{(C_{O\&M_B} - C_{O\&M_A})}$$

3.3.1 Custo de investimento

Trata-se do custo para adquirir um motor novo, que ocorre imediatamente antes do instante inicial do tempo de serviço TS . Em algumas situações mais de um motor pode ser utilizado durante o tempo de estudo, resultando em vários investimentos para obtenção desses motores. Tal situação é apresentada na Figura 2 que dispõe de maneira individual e conjunta do fluxo de caixa de dois motores quaisquer com vida útil de 8 anos, denominados motor 1 e motor 2, considerando um tempo de estudo de 16 anos.

Figura 2 - Fluxo de caixa do: a) Motor 1 b) Motor 2 c) Ambos os motores.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 2a mostra o fluxo de caixa do motor 1, que possui um custo de investimento em $t = 0$ antes de iniciar o seu tempo de serviço. Já a Figura 2b mostra o fluxo de caixa do motor 2, cujo custo de investimento ocorre em $t = 8$, também antes do seu tempo de serviço. O motor 2 é adquirido em virtude do fim da vida útil do motor 1 para garantir a continuidade das atividades desempenhadas durante o tempo de estudo. Por fim, a Figura 2c apresenta um panorama geral do fluxo de caixa de ambos os motores.

3.3.2 Custo de energia

É a despesa com o consumo de energia elétrica para manter o motor em funcionamento, que ocorre em todos os instantes do tempo de serviço TS , sendo definido na Equação (9):

$$C_E = \frac{0,7355 \cdot P_n \cdot L \cdot T}{\eta(L)} \cdot Tarifa, \quad (9)$$

onde 0,7355 é o fator de conversão de cv para kW , P_n é a potência nominal em cv , L é o carregamento, T é o tempo de operação do motor em $horas/ano$, $\eta(L)$ é o rendimento do motor em função do carregamento e $Tarifa$ é a tarifa de energia elétrica em $\$/kWh$.

3.3.3 Custo residual

É o valor financeiro obtido do motor no fim do seu tempo de serviço ou no fim do tempo de estudo. Com o início do tempo de serviço o motor perde valor anualmente devido a depreciação, de modo que ao final da sua vida útil o menor valor que motor possui é o seu preço de revenda para reciclagem, desmanche ou afins.

Com base nessa definição, conclui-se que ao final da vida útil do motor é possível obter um saldo financeiro positivo, razão pela qual o custo residual C_R é negativo na Equação (5), pois normalmente o valor residual não é um custo de fato e sim um benefício. Apesar disso, o custo residual pode representar um custo real devido a despesas para descarte do equipamento.

Por fim, o custo residual pode ser determinado utilizando uma das técnicas de depreciação apresentadas a seguir.

3.3.3.1 Depreciação linear

Nesse método o valor de depreciação VD definido na Equação (10) é um valor constante que é subtraído anualmente do valor inicial VI de modo que ao final do tempo de serviço TS o valor inicial é reduzido até restar o valor final VF .

$$VD = \frac{VI - VF}{TS} \quad (10)$$

Para calcular o custo residual basta reordenar a Equação (10) na Equação (11) isolando o valor final VF .

$$VF = VI - VD \cdot TS \quad (11)$$

Em seguida, é possível generalizar a Equação (11) na Equação (12) para calcular o quanto resta do valor inicial após t anos, que é o custo residual C_R .

$$C_R(t) = VI - VD \cdot t \quad (12)$$

3.3.3.2 Depreciação soma dígitos

Nessa técnica apresentada por Blank e Tarquin (2012) também é considerado um valor de depreciação VD que é subtraído anualmente do valor inicial VI até restar o valor final VF ao final do tempo de serviço TS . Porém, conforme a Equação (12) esse valor de depreciação não é constante, atinge um valor mais elevado nos instantes iniciais do tempo de serviço e é reduzido posteriormente.

$$VD(t) = (VI - VF) \cdot \frac{TS - t + 1}{\frac{TS \cdot (TS + 1)}{2}} \quad (13)$$

A Tabela 1 agrupa a aplicação da Equação (12) em t anos de 1 até o tempo de serviço de 15 anos e mostra a redução gradual do valor de depreciação ao longo dos anos. Adicionalmente, o valor de 120 na Tabela 1 corresponde ao resultado do denominador da

Equação (12), $15 \cdot (15+1)/2 = 120$, que representa a soma dos dígitos de 1 até o tempo de serviço de 15 anos, que também é a soma dos termos de uma progressão aritmética de 1 até 15.

Tabela 1 - Valor de depreciação no método soma dígitos.

t	$VD(t)$
1	$15/120 \cdot (VI - VF)$
2	$14/120 \cdot (VI - VF)$
3	$13/120 \cdot (VI - VF)$
...	...
14	$2/120 \cdot (VI - VF)$
15	$1/120 \cdot (VI - VF)$

Fonte: Autoria própria.

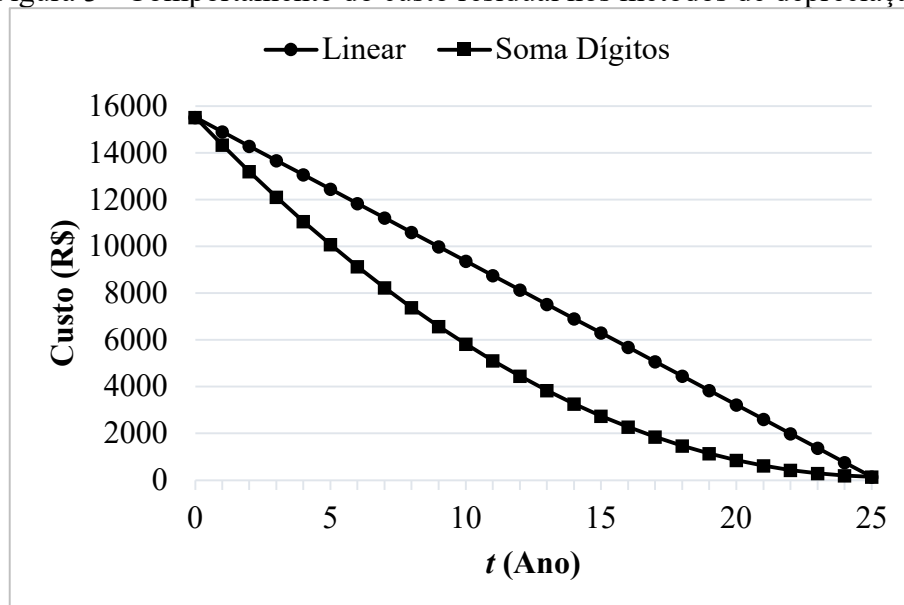
Assim, o quanto resta do valor inicial após t anos, ou seja, o custo residual C_R é definido na Equação (14) de maneira similar à Equação (12). Nesse caso, como o valor de VD não é constante, é necessário realizar a somatória de todas as suas ocorrências.

$$C_R(t) = VI - \sum_{ano=1}^t VD(ano) \quad (14)$$

3.3.3.3 Considerações sobre os métodos de depreciação

É importante salientar que ambos os métodos são válidos para calcular a depreciação e, consequentemente, o custo residual, e que ao final do tempo de serviço as duas técnicas resultam no mesmo valor final. Porém, é preferível utilizar a Depreciação Soma Dígitos pois o seu comportamento reflete mais fielmente a realidade de mercado, onde um ativo sofre uma depreciação mais elevada nos instantes iniciais de utilização. Por fim, o custo residual para os dois métodos apresentados comporta-se de acordo com a Figura 3.

Figura 3 - Comportamento do custo residual nos métodos de depreciação.



Fonte: Autoria própria.

3.3.4 Interação entre o tempo de estudo e o tempo de serviço

Nogueira Júnior (2024) trata a influência da interação do tempo de estudo com o tempo de serviço na determinação do custo residual, onde são abordadas diversas situações em que o tempo de serviço da opção base e da opção alternativa são iguais ou diferentes entre si e são maiores, menores ou iguais ao tempo de estudo.

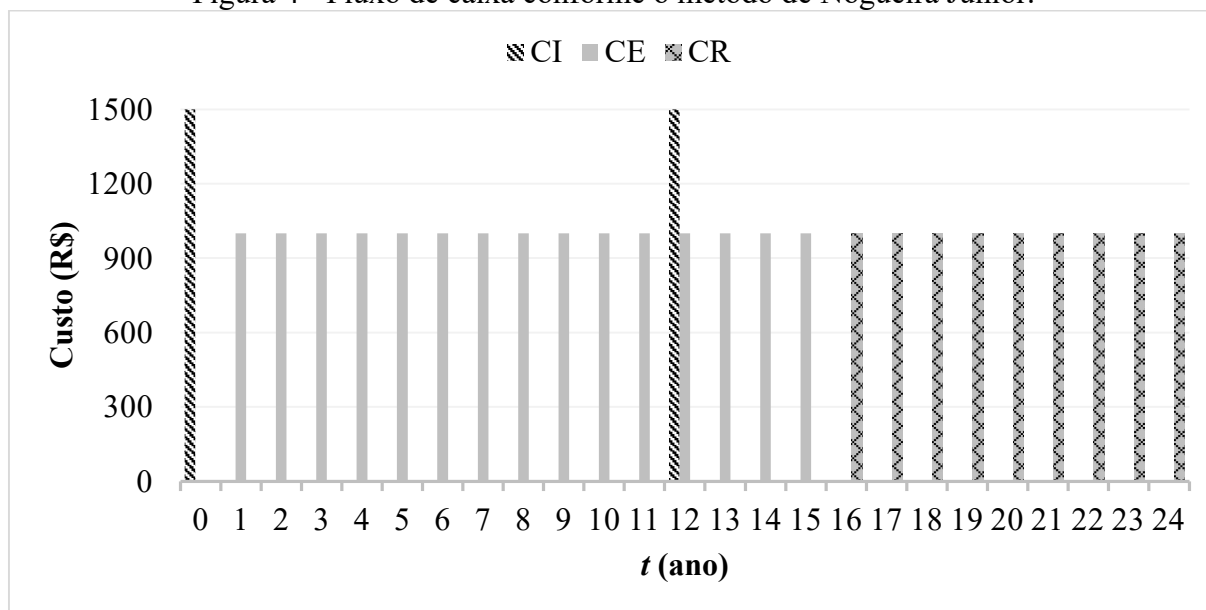
No trabalho de Nogueira Júnior, caso o tempo de serviço de uma opção seja menor que o tempo de estudo, ou seja, a vida útil do motor é menor que o período analisado, enquanto a soma do tempo de serviço dos motores utilizados for menor ou igual ao tempo de estudo, um outro motor de mesmas especificações é adquirido e instalado para substituir o motor anterior tal como apresentado na Figura 2. Nesse processo, a cada motor utilizado ocorre um custo de investimento, os custos de energia ocorrem em todos os instantes do tempo de estudo e o custo residual é definido como todos os custos de energia que ocorrem após o tempo de estudo.

Assim, tomando como exemplo um motor com tempo de serviço de 12 anos e um tempo de estudo de 15 anos, na Figura 4 é possível observar um fluxo de caixa onde:

- O primeiro custo de investimento ocorre no instante imediatamente anterior ao início do tempo de serviço, em $t = 0$;
- Ao final dos 12 anos de vida útil é instalado um novo motor que vai permanecer em funcionamento até o ano 24, ocasionando o segundo custo de investimento em $t = 12$;

- O custo residual corresponde aos custos de energia do ano 16 até o ano 24, que ocorrem após o tempo de estudo;
- Os demais custos de energia que ocorrem no tempo de serviço dos motores e dentro do tempo de estudo representam o custo de energia.

Figura 4 - Fluxo de caixa conforme o método de Nogueira Júnior.



Fonte: Autoria própria.

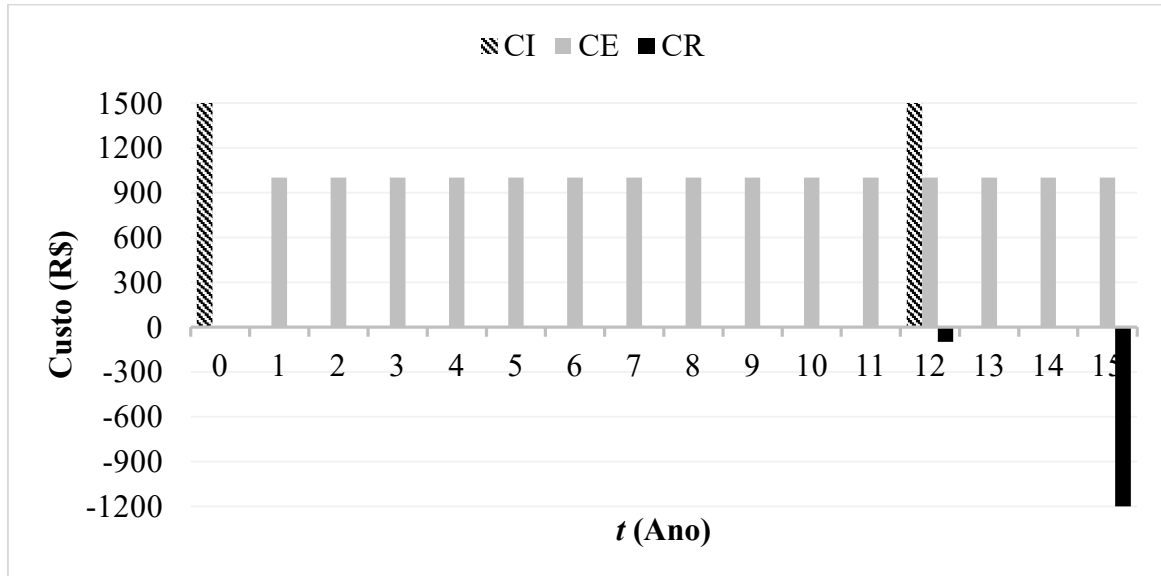
No presente trabalho também é considerada a instalação de outros motores caso o tempo de serviço do motor anterior seja menor que o tempo de estudo. Porém, em contraste ao trabalho de Nogueira Júnior, todas as análises de custos são restritas ao tempo de estudo. Sendo assim, caso o tempo de serviço ultrapasse o tempo de estudo, ocorre o truncamento desse período e o custo residual é calculado utilizando as técnicas de depreciação definidas previamente nas seções 3.3.3.1 e 3.3.3.2, seguindo as diretrizes determinadas por Blank e Tarquin (2012).

Desse modo, para o mesmo exemplo utilizado anteriormente, um motor com tempo de serviço de 12 anos e um tempo de estudo de 15 anos, o fluxo de caixa resultante é apresentado na Figura 5 onde:

- Os custos de investimento ocorrem antes da instalação dos motores utilizados, também em $t = 0$ e $t = 12$;
- Os custos residuais ocorrem em $t = 12$ e $t = 15$, ao final do tempo de serviço do primeiro motor e do tempo de estudo, respectivamente;
- Os custos de energia ocorrem em todos os instantes do tempo de serviço dos motores.

Além disso, é importante salientar que o custo residual em $t = 15$ é mais elevado do que em $t = 12$ pois o segundo motor sofre uma depreciação de apenas 3 anos, enquanto o primeiro motor sofre uma depreciação total, equivalente ao seu tempo de serviço de 12 anos.

Figura 5 - Fluxo de caixa conforme o método do presente trabalho.



Fonte: Autoria própria.

3.4 O valor do dinheiro no tempo

É possível observar na Figura 5 que os custos ocorrem em diversos instantes do tempo de estudo, sendo necessário incluir a influência do tempo em uma análise econômica que envolva esses valores. Assim, Moreira (2017) afirma que para determinar valores monetários ao longo do tempo é necessário considerar os efeitos da inflação e dos riscos relacionados à atividade na qual esses valores são aplicados. Além disso, Kneifel e Webb (2022) dizem que valores financeiros que ocorrem em diferentes instantes no tempo não podem ser comparados sem que estejam corrigidos para uma mesma data. Para essa finalidade, a Equação (15) determina o valor presente VP de um valor futuro VF que ocorre em um instante t corrigido a uma taxa de desconto d .

$$VP(t) = \frac{VF(t)}{(1+d)^t} \quad (15)$$

A Equação (15) expressa matematicamente a regra do valor presente, que diz: “o valor de um real hoje é sempre maior que o valor de um real amanhã” (Moreira, 2017, p. 897). Ou

seja, apesar de terem o mesmo valor nominal, não possuem o mesmo valor real (poder de compra). Dessa forma, para que VP e VF possuam o mesmo poder de compra, VF deve possuir um valor nominal maior do que VP para compensar a perda do valor real.

3.4.1 Taxa de desconto

Kneifel e Webb (2022) afirmam que a taxa de desconto d presente na Equação (15) é determinada a partir da taxa de juros, que inclui expectativas sobre a inflação, o mercado e pode ser entendida como a taxa de retorno mínima exigida para compensar o risco de investir em um determinado projeto. Desse modo, como a inflação e a taxa de juros sofrem alterações ao longo do tempo é necessário observar dados históricos para utilizar esses valores. Assim, em posse dos dados da inflação (IPCA) e da taxa de juros (SELIC) no Brasil de 1996 a 2024, disponíveis em IBGE (2025) e IPEA (2025), respectivamente, foi construída a Tabela 2 que apresenta esses valores ao longo do período analisado.

Ano	Inflação (IPCA)	Juros (SELIC)	Ano	Inflação (IPCA)	Juros (SELIC)
1996	9,56%	27,45%	2011	6,50%	11,62%
1997	5,22%	25,00%	2012	5,84%	8,49%
1998	1,65%	28,99%	2013	5,91%	8,22%
1999	8,94%	25,86%	2014	6,41%	10,91%
2000	5,97%	17,46%	2015	10,67%	13,29%
2001	7,67%	17,34%	2016	6,29%	14,03%
2002	12,53%	19,18%	2017	2,95%	9,98%
2003	9,30%	23,38%	2018	3,75%	6,42%
2004	7,60%	16,25%	2019	4,31%	5,95%
2005	5,69%	19,05%	2020	4,52%	2,76%
2006	3,14%	15,10%	2021	10,06%	4,46%
2007	4,46%	11,85%	2022	5,79%	12,39%
2008	5,90%	12,49%	2023	4,62%	13,04%
2009	4,31%	9,93%	2024	4,83%	10,89%
2010	5,91%	9,79%	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

Para determinar a taxa de desconto é necessário definir a taxa média de inflação I e a taxa média de juros D a partir dos dados da Tabela 2. Para tal, basta realizar uma média aritmética simples desses valores.

$$I = \frac{\sum_{ano=1996}^{2024} IPCA(ano)}{29} = 6,2172\%$$

$$D = \frac{\sum_{ano=1996}^{2024} SELIC(ano)}{29} = 14,1914\%$$

A taxa média de juros D já inclui os efeitos da inflação, que são considerados para determinar a taxa de juros. Desse modo, a Equação (16) deve ser utilizada para definir a taxa média de juros desconsiderando os efeitos da inflação, que é a taxa de desconto d .

$$d = \frac{1+D}{1+I} - 1 \quad (16)$$

Assim, aplicando a Equação (16) obtém-se uma taxa de desconto de 7,5074%.

$$d = \frac{1+0,141914}{1+0,062172} - 1 = 0,075074 = 7,5074\%$$

Adicionalmente, o PNE 2050, publicado pela EPE (2025), define uma taxa de desconto de 8% para ser utilizada em projetos de expansão de energia no setor público, ligeiramente maior que o valor obtido anteriormente. Contudo, o valor de 7,5074% calculado previamente não considera os riscos de investimento relacionados à substituição de motores, o que pode explicar essa diferença. Além disso, Pedro et al. (2022) explica que historicamente já foram considerados os valores de 12% e 10% e que não há um consenso entre as entidades que trabalham na definição desse valor. Diante do exposto, será adotado o valor de 12% no presente trabalho por ser a opção mais conservadora, podendo ser utilizada no setor privado.

3.4.2 Taxa de escalada

Assim como a taxa de desconto, alguns valores monetários também sofrem alterações ao longo do tempo. Nesse sentido, para calcular corretamente o custo de energia é necessário considerar a mudança da tarifa de energia elétrica ao longo do tempo. Esse comportamento pode ser representado por uma taxa média da variação percentual da tarifa de energia, denominada de taxa de escalada e . Dessa forma, seguindo a metodologia apresentada por

Gonçalves Júnior (2021), foram utilizados os dados históricos de consumo e receita de energia elétrica para a classe de consumo industrial no Brasil de 1996 a 2024, disponíveis em ANEEL (2025), para construir a Tabela 3 que dispõe a tarifa média durante o intervalo de análise.

Tabela 3 - Tarifa média industrial de energia elétrica e taxa de escalada a.a. no Brasil de 1996 a 2024.

Ano	Tarifa Média (R\$/MWh)	Taxa de Escalada	Ano	Tarifa Média (R\$/MWh)	Taxa de Escalada
1996	55,41	-	2011	245,54	5,88%
1997	59,65	7,65%	2012	257,33	4,80%
1998	62,16	4,21%	2013	223,19	-13,27%
1999	68,70	10,52%	2014	249,01	11,57%
2000	77,14	12,28%	2015	374,93	50,57%
2001	88,98	15,34%	2016	392,93	4,80%
2002	103,82	16,68%	2017	397,85	1,25%
2003	130,54	25,74%	2018	451,61	13,51%
2004	158,26	21,23%	2019	480,63	6,42%
2005	191,35	20,91%	2020	481,76	0,24%
2006	213,59	11,62%	2021	575,48	19,45%
2007	222,32	4,08%	2022	605,62	5,24%
2008	214,48	-3,52%	2023	612,69	1,17%
2009	228,35	6,46%	2024	669,31	9,24%
2010	231,89	1,55%	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

Analogamente à taxa média de juros D apresentada na seção 3.4.1, a taxa média de escalada E é determinada realizando uma média aritmética simples dos valores da Tabela 3.

$$E = \frac{\sum_{ano=1997}^{2024} Escalada(ano)}{28} = 9,8447\%$$

Além disso, também de forma análoga à taxa de desconto d definida na seção 3.4.1, a taxa de escalada e é determinada utilizando a Equação (17) em função da taxa média de escalada E e da taxa média de inflação I que também foi definida na seção 3.4.1.

$$e = \frac{1+E}{1+I} - 1 \quad (17)$$

Assim, aplicando a Equação (17) obtém-se uma taxa de escalada de 3,4151%.

$$e = \frac{1 + 0,098447}{1 + 0,062172} - 1 = 0,034151 = 3,4151\%$$

Dessa forma, a taxa de escalada considerada no presente trabalho é o valor calculado de aproximadamente 3,42%.

3.5 Valor presente líquido

Após determinar as taxas de correção monetária necessárias, tais como a taxa de desconto e a taxa de escalada, é preciso incluí-las na determinação dos valores presentes dos custos elencados na Equação (8), reescrita logo abaixo:

$$CCV = C_I + C_E - C_R$$

Conforme abordado nas seções 3.3.1 e 3.3.3, que tratam do custo de investimento C_I e do custo residual C_R , respectivamente, esses custos podem ocorrer mais de uma vez no tempo de estudo TE , em instantes irregulares e com valores diferentes, assim como na Figura 5.

O valor presente de cada ocorrência do custo de investimento e do custo residual é determinado pela Equação (15). Além disso, esses valores presentes podem ser somados em um único valor que representa o custo em questão, chamado de valor presente líquido VPL . Assim, com base na Equação (15) a Equação (18) calcula o VPL de valores futuros aperiódicos heterogêneos que ocorrem em um instante t corrigidos a uma taxa de desconto d .

$$VPL = \sum VP(t) = \sum_t \frac{VF(t)}{(1+d)^t} \quad (18)$$

Desse modo, o VPL do custo de investimento e do custo residual é calculado por meio da Equação (19).

$$C_{VPL} = \sum_t \frac{C(t)}{(1+d)^t} \quad (19)$$

Diferentemente do custo de investimento e do custo residual, o custo de energia C_E ocorre em todos os instantes do tempo de serviço TS de maneira periódica e homogênea, conforme detalhado na seção 3.3.2 e representado na Figura 5. Nesse sentido, o custo de energia é periódico pois ocorre repetidamente uma vez por ano durante o tempo de serviço e seus valores são homogêneos pois a Equação (9), uma vez definidos os valores dos seus parâmetros, resulta em um valor constante que não depende de um instante t .

Para determinar os valores presentes das ocorrências do custo de energia, além da taxa de desconto d é necessário considerar a taxa de escalada e em virtude dos reajustes anuais sofridos pela tarifa de energia elétrica. Sendo assim, basta incluir a taxa de escalada na Equação (15) conforme definido em Kneifel e Webb (2022), resultando na Equação (20) que determina o valor presente VP de um valor futuro VF que ocorre em um instante t corrigido a uma taxa de desconto d e a uma taxa de escalada e .

$$VP(t) = \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t \cdot VF(t) \quad (20)$$

Além disso, para calcular o VPL dos valores presentes calculados pela Equação (20) basta realizar a soma desses valores tal como na Equação (18), resultando na Equação (21).

$$VPL = \sum VP(t) = \sum_t \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t \cdot VF(t) \quad (21)$$

Assim, o VPL do custo de energia é calculado por meio da Equação (22).

$$C_{E_VPL} = C_E \cdot \sum_{t=1}^{TE} \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t \quad (22)$$

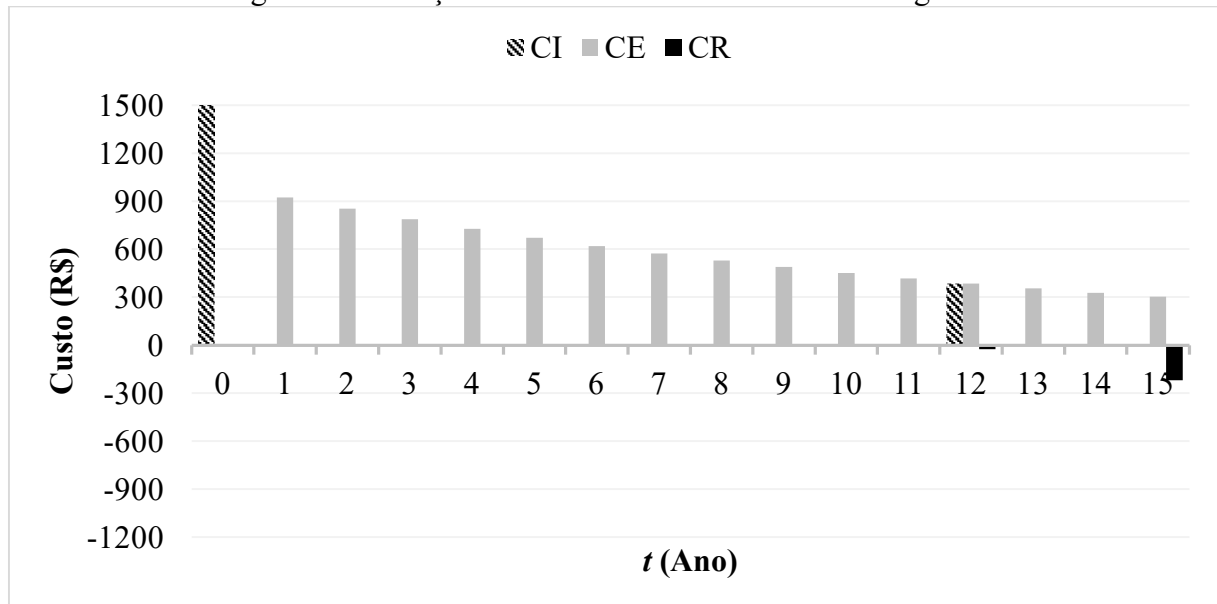
Na Equação (22), o custo de energia C_E pode ser retirado da somatória pois seu valor é constante e não depende de um instante t , além disso, como o custo de energia ocorre do instante $t = 1$ até o fim do tempo de estudo TE , é possível definir um intervalo para a somatória.

Dessa maneira, todos os custos levantados para a substituição de motores podem ser somados para determinar um VPL , e a Equação (8) pode ser reescrita na Equação (23).

$$VPL = \sum_t \frac{C_I(t)}{(1+d)^t} + C_E \cdot \sum_{t=1}^{TE} \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t - \sum_t \frac{C_R(t)}{(1+d)^t} \quad (23)$$

Por fim, a Figura 6 apresenta os custos da Figura 5 com seus valores corrigidos utilizando a taxa de desconto de 12% e a taxa de escalada de 3,42% calculadas previamente nas seções 3.4.1 e 3.4.2, respectivamente. Nessa situação, a Equação (15) é usada para corrigir o custo de investimento e o custo residual e a Equação (20) corrige o custo de energia.

Figura 6 - Correção monetária do fluxo de caixa da Figura 5.



Fonte: Autoria própria.

3.6 Medidas suplementares

Para analisar quais opções possuem maior viabilidade econômica, são utilizadas algumas medidas suplementares que fornecem resultados a partir dos dados obtidos na aplicação da ACCV. Nesse sentido, Kneifel e Webb (2022) apresentam as seguintes métricas econômicas que serão abordadas no presente trabalho: economia líquida ou *net savings* (NS), relação economia-investimento ou *savings-to-investment ratio* (SIR), taxa de retorno interna ajustada ou *adjusted internal rate of return* (AIRR) e *payback* (PB) descontado.

3.6.1 Economia líquida

Consiste na diferença do valor presente líquido entre a opção base B e uma opção alternativa A , conforme a Equação (24). A utilização dessa métrica permite observar quais opções resultam em economia ou despesa, verificando a viabilidade econômica.

$$NS = VPL_B - VPL_A \quad (24)$$

Então, desenvolvendo a Equação (24)³ obtém-se a Equação (25):

$$NS = \Delta C_E - (\Delta C_I - \Delta C_R), \quad (25)$$

$$\text{onde } \Delta C_E = (C_{E-B} - C_{E-A}) \cdot \sum_{t=1}^{TE} \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t, \quad \Delta C_I = \sum_t \frac{C_{I-A}(t)}{(1+d)^t} - \sum_t \frac{C_{I-B}(t)}{(1+d)^t} \text{ e}$$

$$\Delta C_R = \sum_t \frac{C_{R-A}(t)}{(1+d)^t} - \sum_t \frac{C_{R-B}(t)}{(1+d)^t}.$$

Como usualmente a opção alternativa é um motor de rendimento superior com custo de investimento mais elevado e custo de energia inferior do que a opção base, na Equação (25):

- ΔC_E representa a economia com a redução do custo de energia elétrica obtida ao implementar uma opção alternativa;
- ΔC_I representa a despesa ao optar pela opção alternativa. Porém, vale ressaltar que no caso de o motor mais eficiente possuir potência menor do que o motor de menor rendimento, o seu preço pode ser menor, acompanhando a redução de potência;

³ Maiores detalhes sobre o desenvolvimento da Equação (24) até encontrar o resultado apresentado na Equação (25):

$$\begin{aligned} NS &= \sum_t \frac{C_{I-B}(t)}{(1+d)^t} + C_{E-B} \cdot \sum_{t=1}^{TE} \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t - \sum_t \frac{C_{R-B}(t)}{(1+d)^t} - \left[\sum_t \frac{C_{I-A}(t)}{(1+d)^t} + C_{E-A} \cdot \sum_{t=1}^{TE} \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t - \sum_t \frac{C_{R-A}(t)}{(1+d)^t} \right] \\ &= \sum_t \frac{C_{I-B}(t)}{(1+d)^t} - \sum_t \frac{C_{I-A}(t)}{(1+d)^t} + C_{E-B} \cdot \sum_{t=1}^{TE} \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t - C_{E-A} \cdot \sum_{t=1}^{TE} \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t - \sum_t \frac{C_{R-B}(t)}{(1+d)^t} + \sum_t \frac{C_{R-A}(t)}{(1+d)^t} \\ &= (C_{E-B} - C_{E-A}) \cdot \sum_{t=1}^{TE} \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t - \left[\sum_t \frac{C_{I-A}(t)}{(1+d)^t} - \sum_t \frac{C_{I-B}(t)}{(1+d)^t} \right] + \left[\sum_t \frac{C_{R-A}(t)}{(1+d)^t} - \sum_t \frac{C_{R-B}(t)}{(1+d)^t} \right] \\ &= (C_{E-B} - C_{E-A}) \cdot \sum_{t=1}^{TE} \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t - \left\{ \left[\sum_t \frac{C_{I-A}(t)}{(1+d)^t} - \sum_t \frac{C_{I-B}(t)}{(1+d)^t} \right] - \left[\sum_t \frac{C_{R-A}(t)}{(1+d)^t} - \sum_t \frac{C_{R-B}(t)}{(1+d)^t} \right] \right\}. \end{aligned}$$

- ΔC_R pode indicar economia ou despesa dependendo do tempo de estudo escolhido e das ações a serem adotadas para o motor ao final do seu tempo de serviço.

Por fim, interpretando o valor da economia líquida, para $NS > 0$ o projeto é viável, para $NS = 0$ o projeto não possui impacto financeiro e para $NS < 0$ o projeto é inviável.

3.6.2 Relação economia-investimento

É definida como a razão entre as economias e as despesas de uma opção alternativa em relação à uma opção base. Nesse sentido, a relação economia-investimento na Equação (26) utiliza os mesmos termos presentes no cálculo da economia líquida.

$$SIR = \frac{\Delta C_E}{\Delta C_I - \Delta C_R} \quad (26)$$

Desse modo, para uma SIR de 2,61, significa que cada unidade monetária investida resulta em 2,61 unidades monetárias economizadas. Por fim, para $SIR > 1$ o projeto é viável, para $SIR = 1$ o projeto não possui impacto financeiro e para $SIR < 1$ o projeto é inviável.

3.6.3 Taxa de retorno interna ajustada

Conforme Moreira (2017), representa a taxa pela qual um investimento é recuperado, ou seja, é a taxa que iguala as economias com as despesas. Além disso, esse método somente pode ser aplicado ao considerar que todas as economias obtidas são reinvestidas à uma taxa de reinvestimento r durante o período restante do tempo de estudo. Nesse sentido, a formulação é dada pela Equação (27):

$$AIRR = (1 + r) \cdot (SIR)^{\frac{1}{TE}} - 1, \quad (27)$$

onde SIR é a relação economia-investimento calculada na Equação (26) e TE é o tempo de estudo. Adicionalmente, a taxa de reinvestimento r é normalmente a taxa de desconto d .

Por fim, para $AIRR > d$ o projeto é viável, para $AIRR = d$ o projeto não possui impacto financeiro e para $AIRR < d$ o projeto é inviável. Dessa maneira, para uma SIR de 2,61, taxa de reinvestimento/desconto de 12% e tempo de estudo de 15 anos, o cálculo da AIRR é realizado conforme:

$$AIRR = \left(1 + \frac{12}{100}\right) \cdot (2,61)^{\frac{1}{15}} - 1 = 0,1939 = 19,39\%,$$

onde é possível observar que o projeto é viável, visto que $AIRR > d$.

3.6.4 *Payback* descontado

Corresponde ao tempo necessário para que as economias se igualem as despesas, informando em quanto tempo um investimento é recuperado. Além disso, diferente do *payback* simples que considera constantes todos os fluxos de caixa que representam economias, o método atual considera os valores presentes dos fluxos de caixa. Por esse motivo, essa técnica não possui uma fórmula direta que determina o tempo de *payback*, e o seu valor é determinado somando as economias com as despesas ao longo dos anos até que essa soma possua valor nulo.

Para exemplificar, considerando a taxa de desconto de 12% e a taxa de escalada de aproximadamente 3,42% calculadas nas seções 3.4.1 e 3.4.2, respectivamente, a Tabela 4 apresenta os fatores de correção monetária presentes nas Equações (15) e (20), os dados utilizados para criar a Figura 3 e seus valores presentes utilizados para criar a Figura 6

Tabela 4 - Fatores de correção e dados da Figura 5 e da Figura 6.

Ano	$\frac{1}{(1+d)^t}$	$\left(\frac{1+e}{1+d}\right)^t$	C_I	C_E	C_R	C_{I_VP}	C_{E_VP}	C_{R_VP}
0	1	1	1500	0	0	1500	0	0
1	0,8929	0,9234	0	1000	0	0	923,39	0
2	0,7972	0,8527	0	1000	0	0	852,65	0
3	0,7118	0,7873	0	1000	0	0	787,33	0
4	0,6355	0,7270	0	1000	0	0	727,02	0
5	0,5674	0,6713	0	1000	0	0	671,32	0
6	0,5066	0,6199	0	1000	0	0	619,90	0
7	0,4523	0,5724	0	1000	0	0	572,41	0
8	0,4039	0,5286	0	1000	0	0	528,56	0
9	0,3606	0,4881	0	1000	0	0	488,07	0
10	0,3220	0,4507	0	1000	0	0	450,68	0
11	0,2875	0,4162	0	1000	0	0	416,15	0
12	0,2567	0,3843	1500	1000	-100	385,01	384,27	-25,67
13	0,2292	0,3548	0	1000	0	0	354,83	0
14	0,2046	0,3277	0	1000	0	0	327,65	0
15	0,1827	0,3026	0	1000	-1200	0	302,55	-219,24

Fonte: Autoria própria.

Adicionalmente, a Tabela 5 apresenta o fluxo de caixa de um motor fictício que é mais eficiente, porém mais caro do que o motor descrito na Tabela 4.

Tabela 5 - Exemplo de fluxo de caixa de um motor fictício.

Ano	$\frac{1}{(1+d)^t}$	$\left(\frac{1+e}{1+d}\right)^t$	C_I	C_E	C_R	C_{I_VP}	C_{E_VP}	C_{R_VP}
0	1	1	2000	0	0	2000	0	0
1	0,8929	0,9234	0	800	0	0	738,71	0
2	0,7972	0,8527	0	800	0	0	682,12	0
3	0,7118	0,7873	0	800	0	0	629,87	0
4	0,6355	0,7270	0	800	0	0	581,62	0
5	0,5674	0,6713	0	800	0	0	537,06	0
6	0,5066	0,6199	0	800	0	0	495,92	0
7	0,4523	0,5724	0	800	0	0	457,93	0
8	0,4039	0,5286	0	800	0	0	422,85	0
9	0,3606	0,4881	0	800	0	0	390,45	0
10	0,3220	0,4507	0	800	0	0	360,54	0
11	0,2875	0,4162	0	800	0	0	332,92	0
12	0,2567	0,3843	0	800	0	0	307,42	0
13	0,2292	0,3548	0	800	0	0	283,87	0
14	0,2046	0,3277	0	800	0	0	262,12	0
15	0,1827	0,3026	0	800	-100	0	242,04	-18,27

Fonte: Autoria própria.

Então, ao efetuar a diferença entre o fluxo de caixa (FC) dos motores descritos anteriormente, o resultado pode ser observado na Tabela 6, onde estão a diferença dos custos de investimento ΔC_I , energia ΔC_E , residual ΔC_R , a soma comum e a soma acumulada desses custos ao longo dos anos.

Além disso, ao observar a coluna FC acumulado é possível concluir que ao final do terceiro ano as economias já superaram as despesas, ou seja, o investimento já foi recuperado. Entretanto, 3 anos não é o tempo de *payback*, visto que o FC acumulado de 12,68 é o valor ao final do ano 3, ou seja, esse valor torna-se nulo entre 2 e 3 anos. Dessa maneira, calcula-se a parcela do tempo onde o valor de FC soma no ano 3 anula FC acumulado fazendo:

$$\frac{157,47 - 12,68}{157,47} = 0,92 \text{ anos,}$$

Tabela 6 - Diferença entre os fluxos de caixa dos motores.

Ano	ΔC_I	ΔC_E	ΔC_R	FC soma	FC acumulado
0	-500	0	0	-500	-500
1	0	184,68	0	184,68	-315,32
2	0	170,53	0	170,53	-144,79
3	0	157,47	0	157,47	12,68
4	0	145,40	0	145,40	158,08
5	0	134,26	0	134,26	292,35
6	0	123,98	0	123,98	416,32
7	0	114,48	0	114,48	530,81
8	0	105,71	0	105,71	636,52
9	0	97,61	0	97,61	734,13
10	0	90,14	0	90,14	824,27
11	0	83,23	0	83,23	907,50
12	385,01	76,85	-25,67	436,20	1343,70
13	0	70,97	0	70,97	1414,66
14	0	65,53	0	65,53	1480,19
15	0	60,51	-200,97	-140,46	1339,74

Fonte: Autoria própria.

assim, o tempo de *payback* é obtido ao somar esse valor com 2, resultando em 2,92 anos para recuperar o investimento.

Por fim, vale mencionar que se o FC acumulado iniciar com um valor positivo, então o tempo de *payback* é zero, ou seja, a recuperação do investimento é imediata. E se o FC acumulado não alcançar um valor positivo ou nulo até o final do período analisado, então o tempo de *payback* é indeterminado e maior do que o período em questão.

4 ESPECIFICAÇÕES DO SOFTWARE

Na presente seção serão apresentadas características pertinentes relacionadas à concepção do *ReplaceMOTOR v2.0*®, tais como a sua interface gráfica, dados que o programa utiliza, algumas restrições impostas às entradas do usuário e algoritmos de maior destaque no funcionamento do *software*.

4.1 Interface gráfica

O *ReplaceMOTOR v2.0*® foi desenvolvido completamente na linguagem de programação Python e utilizando a biblioteca Tkinter para construir a interface gráfica, disponíveis em Python (2026) e Tkinter (2026), respectivamente. O programa possui 3 janelas principais: a janela inicial, a janela das alternativas e a janela das saídas, apresentadas a seguir.

4.1.1 Janela inicial

Essa janela apresentada na Figura 7 é exibida ao iniciar a aplicação e apresenta as informações mais essenciais para a utilização do programa.

Figura 7 - Janela inicial do *ReplaceMOTOR v2.0*®.

The screenshot displays the initial window of the *ReplaceMOTOR v2.0* software. It features a tabbed interface with 'Entradas', 'Alternativas', and 'Saídas' tabs. The 'Entradas' tab is currently selected, showing input fields for economic data (Tempo de Estudo, Taxa de Desconto, Tarifa de Energia, Taxa de Escalada, Método de Depreciação, Sucata de Motor) and motor data (Entradas: Motores). The 'Alternativas' tab shows a table of motor alternatives with columns for ID, IR, Potência, Polos, Tensão, Carcaça: Tipo, Carcaça: Modelo, Quantidade, and Carg. The 'Saídas' tab shows a table of output data with columns for Ano, B: Investimento, B: Energia, B: Residual, A: Investimento, and A: Ener. The interface also includes a 'Dados do Catálogo' section on the right with various parameters and values. Red circles with numbers 1, 2, 3, and 4 highlight specific areas: 1 points to the 'Entradas' tab, 2 points to the 'Entradas: Motores' section, 3 points to the 'Alternativas' table, and 4 points to the 'Saídas' table.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 7 encontram-se destacados os seguintes campos:

1. Os dados de entrada necessários, informações econômicas e dados dos motores;

2. As alternativas encontradas para substituir a opção base;
3. O fluxo de caixa e as medidas suplementares obtidas ao comparar a opção base com uma opção alternativa;
4. Os dados de catálogo dos motores.

4.1.2 Janela das alternativas

Essa outra janela destacada na Figura 8 apresenta todas as opções alternativas encontradas para os motores informados no campo “Entradas: Motores” da Figura 7. Nessa janela, o usuário pode modificar algumas informações dos motores, tais como o seu preço e a vida útil, que são valores padronizados definidos no software. Além disso, o usuário pode alterar a carga⁴ da opção base, porém, ao realizar esse procedimento as opções alternativas são recalculadas para garantir que a condição estabelecida na Equação (4) seja respeitada.

Figura 8 - Janela das alternativas do *ReplaceMOTOR v2.0*®.

The screenshot shows the 'ReplaceMOTOR v2.0' software interface. At the top, there are buttons for 'Confirmar' and 'Cancelar'. The main window is titled 'Alternativas' and is divided into two panes. The left pane, 'Informações Gerais', displays a list of motor alternatives. The right pane, 'Dados do Catálogo', shows the detailed specifications for the selected motor. The interface is in Portuguese and includes various icons and a status bar at the bottom.

Alternativas				
Informações Gerais				
Qtd.	Polos	Tensão (V)	Operação (h/ano)	
1	4	440	2500	
1	IR	Potência (cv)	Idade (anos)	
	2	50.0	10	
	Carga (%)	Preço (R\$)	Vida útil (anos)	
	29.6	25119.1	25	
	Carcaça: Tipo	Carcaça: Modelo		
	Carcaça Superior	225S/M		
1.1	IR	Potência (cv)	Idade (anos)	
	3	50.0	0	
	Carga (%)	Preço (R\$)	Vida útil (anos)	
	29.6	29640.52	25	
1.2	IR	Potência (cv)	Idade (anos)	
	3	40.0	0	
	Carga (%)	Preço (R\$)	Vida útil (anos)	
	37.0	26735.34	25	
1.3	IR	Potência (cv)	Idade (anos)	
	3	30.0	0	
	Carga (%)	Preço (R\$)	Vida útil (anos)	
	49.33	21186.44	20	

Dados do Catálogo	
Parâmetro	Valor
Ip / In	7.4
Conjugado Inicial (%)	260
Conjugado Máximo (%)	310
Momento de Inércia (kg)	0.41909
Tempo de Rotor Bloqueado	12
Peso (kg)	348.0
Ruído [dB(A)]	71
Fator de Serviço	1.15
Rotação (rpm)	1780
Rendimento 50%	0.925
Rendimento 75%	0.934
Rendimento 100%	0.936
Fator de Potência 50%	0.72
Fator de Potência 75%	0.81
Fator de Potência 100%	0.85
Corrente (A)	61.0
Proteção	IPW55

Fonte: Autoria própria.

⁴ Carregamento.

4.1.3 Janela das saídas

Por fim, o programa ainda contém a janela das saídas representada na Figura 9, que consiste em um visualizador dos arquivos de tabela gerados pelo *software*. Nesse contexto, os campos “Saídas: Alternativas”, “Saídas: Fluxo de Caixa” e “Dados do Catálogo” da Figura 7 apresentam tabelas que podem ser salvas em arquivos do formato *Comma-separated Values* (CSV), e o visualizador contém ferramentas que permitem filtrar os dados desses arquivos.

Figura 9 - Janela das saídas do *ReplaceMOTOR v2.0®*.

ID	IR	Potência	Polos	Tensão	Carcaça: Tipo	Carcaça: Modelo	Quantidade	Carga	Idade	Operação
1.0	2	50.0	4	440	Carcaça Superior	225S/M	1	29.6	0	2500
1.1	3	50.0	4	440	Carcaça Padrão	200L	1	29.6	0	2500
1.2	3	40.0	4	440	Carcaça Padrão	200M	1	37.0	0	2500
1.3	3	30.0	4	440	Carcaça Padrão	180M	1	49.33	0	2500
1.4	3	25.0	4	440	Carcaça Padrão	160L	1	59.2	0	2500
1.5	3	20.0	4	440	Carcaça Padrão	160M	1	74.0	0	2500
1.6	3	15.0	4	440	Carcaça Padrão	132M/L	1	98.67	0	2500

Fonte: Autoria própria.

4.2 Dados

O *ReplaceMOTOR v2.0®* contém algumas informações que representam aspectos construtivos e econômicos dos motores, tais como dados de vida útil, preço e um catálogo com os motores suportados pelo programa.

4.2.1 Catálogo

Os dados do catálogo dos motores consistem de motores disponíveis em WEG (2025c) nas linhas W22 IR2, W22 IR3 Premium e W22 Super Premium (IR4), totalizando 2078 motores distintos. Dessa maneira, a Tabela 7 apresenta as colunas presentes no catálogo indicando se essas são do tipo chave ou valor, onde colunas do tipo chave são utilizadas para determinar unicamente um motor e colunas do tipo valor contém propriedades dos motores.

Tabela 7 - Colunas do catálogo de motores.

Coluna	Tipo	Coluna	Tipo
Índice de Rendimento	Chave	Nível de Ruído (dB(A))	Valor
Potência (cv)	Chave	Fator de Serviço	Valor
Polos	Chave	Rotação Nominal (rpm)	Valor
Tensão (V)	Chave	Rendimento 50%	Valor
Carcaça: Tipo	Chave	Rendimento 75%	Valor
Carcaça: Modelo	Chave	Rendimento 100%	Valor
Ip / In	Valor	Fator de Potência 50%	Valor
Conjugado de Partida (%)	Valor	Fator de Potência 75%	Valor
Conjugado Máximo (%)	Valor	Fator de Potência 100%	Valor
Momento de Inércia (kgm ²)	Valor	Corrente Nominal (A)	Valor
Tempo de Rotor Bloqueado (s)	Valor	Proteção	Valor
Peso (kg)	Valor	-	-

Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Preço

Os dados de preço dos motores foram obtidos em Andrade e Pontes (2017), que em uma pesquisa de mercado obteve esses valores em dólares americanos (USD), e os agrupou por índice de rendimento (IR), potência e polos. Desse modo, visto que os valores são de 2017 e estão em USD, foi necessário realizar uma correção monetária.

Assim, para demonstrar o resultado obtido com esse procedimento, a Tabela 8 apresenta um dos motores cujo preço foi levantado por Andrade e Pontes, com seu valor em USD e em reais brasileiros (BRL) no ano de 2025. Adicionalmente, ao realizar a divisão de 3357,56/452,29 obtém-se o fator 7,42, que foi utilizado para converter os demais preços dos motores utilizados.

Tabela 8 - Preço do motor em USD⁵ e BRL⁶.

IR	Potência (cv)	Polos	Preço USD	Preço BRL
2	5	2	452,29	3357,56

Fonte: Autoria própria.

4.2.3 Vida útil

Os dados de vida útil dos motores também são provenientes de Andrade e Pontes (2017), que agrupa essas informações por faixa de potência, conforme descrito na Tabela 9.

⁵ Dólar americano

⁶ Real brasileiro

Tabela 9 - Vida útil média dos motores em função da sua potência.

Potência (cv)	Vida útil
[1, 10]	15
(10, 40]	20
(40, 100]	25
(100, 300]	25

Fonte: Autoria própria.

4.3 Condições dos dados de entrada

Para o pleno funcionamento do *ReplaceMOTOR v2.0®*, todos os dados que são informados pelo usuário são verificados para garantir que representem fielmente a realidade e que sejam devidamente utilizados pelo programa. Assim, na Tabela 10 encontram-se as condições de todos os parâmetros que podem ser informados pelo usuário. Além disso, todos os parâmetros do tipo chave da Tabela 7 são escolhidos pelo usuário a partir de listas com valores pré-definidos, sem possibilidade de informar valores inválidos.

Tabela 10 - Condições das entradas de usuário.

Parâmetro	Condição	Parâmetro	Condição
Tempo de estudo (anos)	$1 \leq \text{valor} \leq 40$	Qtd ⁷ . Motores	$\text{valor} \geq 1$
Tarifa de energia (R\$/kWh)	$\text{valor} > 0$	Carga (%)	$0 < \text{valor} \leq 100$
Taxa de desconto (%)	$\text{valor} > 0$	Idade (anos)	$\text{valor} \geq 0$
Taxa de escalada (%)	$\text{valor} \geq 0$	Operação (h/ano)	$1 \leq \text{valor} \leq 8760$
Sucata de motor (R\$/kg)	$\text{valor} \geq 0$	Preço (R\$)	$\text{valor} \geq 0$
-	-	Vida útil (anos)	$\text{valor} \geq 0$

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 10 o valor máximo de 40 anos segue a recomendação de Kneifel e Webb (2022) e o valor máximo de 8760 corresponde a um motor operando 24 h/dia por 360 dias.

4.4 Algoritmos

Dentre os diversos algoritmos que constituem o *ReplaceMOTOR v2.0®*, algumas rotinas representam papéis fundamentais no seu funcionamento, que são a redução da potência dos motores, a determinação dos instantes dos custos e a obtenção da curva de rendimento por meio de interpolação linear nas regiões de carregamento, todas apresentadas a seguir, assim como o fluxo de execução geral do *software*.

⁷ Quantidade

4.4.1 Obtenção dos motores com potência reduzida.

A redução da potência dos motores envolve verificar se existe algum motor com potência menor disponível e se o carregamento desse motor atende ao critério da Equação (4)⁸ onde P_{n_antigo} e L_{antigo} são a potência e o carregamento da opção base, que é o motor antigo a ser substituído, e P_{n_novo} é a potência da opção alternativa, que é o motor novo com potência reduzida.

Nesse sentido, na Tabela 11 encontram-se todas as potências disponíveis no catálogo de motores e seus respectivos índices identificadores.

Tabela 11 - Lista de potências.

Índice	Potência (cv)	Índice	Potência (cv)
0	1	12	25
1	1,5	13	30
2	2	14	40
3	3	15	50
4	4	16	60
5	5	17	75
6	6	18	100
7	7,5	19	125
8	10	20	150
9	12,5	21	175
10	15	22	200
11	20	23	250

Fonte: Autoria própria.

Por fim, o processo ocorre conforme definido no Algoritmo 1.

4.4.2 Interação entre o tempo de estudo e o tempo de serviço

O fluxo de caixa apresentado na Figura 5 é obtido seguindo o procedimento descrito no Algoritmo 2. Conforme explicado na seção 3.3.4, o *ReplaceMOTOR v2.0*[®] utiliza o tempo de estudo TE e o tempo de serviço TS do motor para definir em quais instantes ocorrem cada um dos custos considerados.

⁸ Relembrando a equação (4): $L_{antigo} \leq \frac{P_{n_novo}}{P_{n_antigo}}$

Algoritmo 1 - Redução da potência dos motores.

```

1: // Recuperando o índice do motor na lista de potências.
2:  $i_{antigo} = \text{LISTA\_POTENCIAS.indice}(P_{n\_antigo})$ 
3: // Definindo o índice do motor com potência imediatamente menor.
4:  $i_{novo} = i_{antigo} - 1$ 
5: // Obtendo as potências e os carregamentos dos motores com potência reduzida.
6: enquanto  $i_{novo} > -1$  faça
7:    $P_{n\_novo} = \text{LISTA\_POTENCIAS.potencia}(i_{novo})$ 
8:   se  $L_{antigo} \leq \frac{P_{n\_novo}}{P_{n\_antigo}}$  então
9:      $L_{novo} = \frac{P_{n\_antigo}}{P_{n\_novo}} \cdot L_{antigo}$ 
10:     $i_{novo} = i_{novo} - 1$ 
11:   senão
12:      $P_{n\_novo} = P_{n\_antigo}$  // Não foi possível reduzir a potência.
13:   fim enquanto // Encerra o laço enquanto.
14: fim se
15: fim enquanto

```

Adicionalmente, para exemplificar o funcionamento do Algoritmo 2 a Tabela 12 apresenta a evolução dos instantes ao longo da execução do método, indicando o estado das variáveis em determinadas linhas do algoritmo. Para tal, é utilizado o mesmo exemplo da Figura 5, um motor com tempo de serviço de 12 anos e um tempo de estudo de 15 anos.

4.4.3 Obtenção da curva de rendimento

O rendimento é calculado utilizando as informações provenientes do catálogo de motores. Nesse sentido, o catálogo contém os valores dos rendimentos em função do carregamento para os valores de 50%, 75% e 100% de carregamento. Devido à falta de valores de rendimento para carregamentos próximo à 0%, no presente trabalho é definido que o rendimento é nulo para um carregamento de 0%. Essa consideração garante que toda a faixa de carregamento, no intervalo [0%, 100%], seja devidamente trabalhada.

Algoritmo 2 - Determinação dos instantes dos custos.

```

1: // Criando vetores dos instantes dos custos de investimento, residual e energia.
2:  $IC_I = [0]$  // Sempre ocorre em  $t = 0$ .
3:  $IC_R = [ ]$ 
4:  $IC_E = [ ]$ 
5: // Calculando os instantes do custo de investimento.
6:  $TS_{aux} = TS$  // Variável auxiliar.
7: enquanto  $TS_{aux} < TE$  faça
8:    $IC_I.anexar(TS_{aux})$ 
9:    $TS_{aux} = TS_{aux} + TS$ 
10: fim enquanto
11: // Calculando os instantes do custo residual.
12:  $IC_R = IC_I[1:]$  // Copiando os instantes do  $IC_I$ , exceto o primeiro.
13:  $IC_R.anexar(TE)$  // Sempre ocorre em  $t = TE$ .
14: // Calculando os instantes do custo de energia.
15: para  $ano = 1, \dots, TE$  faça
16:    $IC_E.anexar(ano)$  // Ocorre em todos os instantes do tempo de estudo.
17: fim para

```

Tabela 12 - Instantes dos custos durante execução do Algoritmo 2.

Linha	IC_I	IC_R	IC_E
4:	[0]	[]	[]
10:	[0,12]	[]	[]
12:	[0,12]	[12]	[]
13:	[0,12]	[12,15]	[]
17:	[0,12]	[12,15]	[1,2,...,14,15]

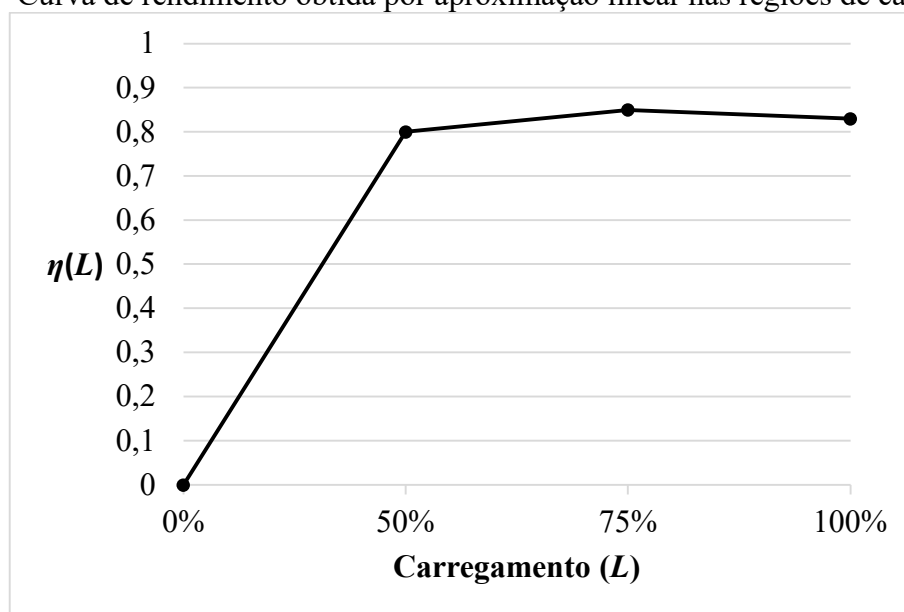
Fonte: Autoria própria.

Desse modo, são definidas 3 regiões para os seguintes intervalos de carregamento: [0%, 50%], (50%, 75%] e (75% 100%], e para cada uma dessas regiões é realizada uma interpolação linear utilizando a Equação (28), cujo resultado é uma equação que representa o rendimento do motor $\eta(L)$ em função do carregamento L na região considerada.

$$\eta(L) = y_0 + (y_1 - y_0) \cdot \frac{L - x_0}{x_1 - x_0}, \quad (28)$$

onde x_i e y_i são as coordenadas dos pontos (x_0, y_0) e (x_1, y_1) utilizados para realizar a interpolação linear. E, tomando como exemplo a região de intervalo (50%, 75%], os pontos definidos são $(50\%, \eta_{50})$ e $(75\%, \eta_{75})$, onde η_L é o rendimento do motor no carregamento L , obtido no catálogo. Por fim, a Figura 10 apresenta uma curva de rendimento em função do carregamento obtida com a aplicação da interpolação linear nas 3 regiões de carregamento.

Figura 10 - Curva de rendimento obtida por aproximação linear nas regiões de carregamento.



Fonte: Autoria própria.

5 ESTUDO DE CASO

O equipamento abordado no estudo de caso trata-se de um motor que devido a condições de deterioração da placa do motor e ausência de informações detalhadas, o modelo do equipamento não pôde ser determinado com exatidão. Contudo, com base nas informações disponíveis: fabricante TOSHIBA, potência de 50 cv, tensão de 575 V e corrente de 46 A, foi realizada uma pesquisa no catálogo do fabricante e foi adotado o modelo 0504SDSC42A-P, disponível em Toshiba (2026).

O carregamento do motor foi analisado utilizando o método de linearização detalhado no Apêndice A, onde constatou-se que o motor operava com um carregamento médio de 28,42%, conforme descrito no Apêndice B. Esse valor é considerado baixo, visto que de acordo com Viana *et al.* (2021) um carregamento recomendado para o funcionamento de um motor deve estar próximo ou acima de 75%. Com isso, devido ao baixo carregamento de operação foi concluído que o motor analisado estava superdimensionado para a atividade que desempenhava, podendo ser substituído por um motor de potência inferior.

Adicionalmente, o motor estudado não está presente no catálogo de motores suportados pelo *ReplaceMOTOR v2.0®*, visto que não é fabricado pela WEG. Entretanto, é possível considerar um motor similar presente no catálogo que possui as chaves de busca listadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Chaves de busca do motor similar.

Chave	Valor
Índice de Rendimento	2
Potência	50
Polos	4
Tensão	380/660
Carcaça: Tipo	Carcaça Superior
Carcaça: Modelo	225S/M

Fonte: Autoria própria.

Dessa maneira, na Tabela 14 encontram-se as informações determinantes para a análise do motor TOSHIBA e do motor semelhante.

Tabela 14 - Informações do motor TOSHIBA e do motor similar.

Parâmetro	TOSHIBA	Similar
Potência (cv)	50	50
Polos	4	4
Tensão (V)	575	380/660
Rotação (rpm)	1777	1780
Rendimento (%)	94,5	93,6
Fator de Potência	0,855	0,85
Corrente (A)	46	70,6/40,7
Peso (kg)	304,8	348

Fonte: Autoria própria.

Assim, visto a semelhança entre os parâmetros de ambos os motores, é possível concluir que a utilização de um motor similar ao original pode gerar resultados fidedignos e proporcionar análises confiáveis. Diante do exposto, observa-se a oportunidade de aplicar o *ReplaceMOTOR v2.0*® para expandir o estudo econômico iniciado, bem como validar o desenvolvimento teórico apresentado ao longo desse trabalho.

Por conseguinte, os demais dados de entrada necessários para a análise estão dispostos na Tabela 15, onde o parâmetro sucata de motor é utilizado para determinar o custo residual por meio de um dos métodos de depreciação apresentados. Nesse sentido, o valor final após a depreciação equivale ao valor da sucata de motor multiplicado pelo peso do motor.

Tabela 15 - Dados de entrada do estudo de caso.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Tempo de Estudo (anos)	25	Método de Depreciação	Soma Dígitos
Tarifa de Energia (R\$ / kWh)	0,4	Sucata de Motor (R\$ / kg)	2,5
Taxa de Desconto (%)	12	Carga ⁹ (%)	28,42
Taxa de Escalada (%)	3,42	Operação (h / ano)	2500

Fonte: Autoria própria.

Ao verificar as opções alternativas disponíveis, foram encontrados os motores presentes na Tabela 16, onde o motor de ID 1 é o motor similar definido na Tabela 14, a opção base, IR2, enquanto os demais motores são as opções alternativas de rendimento superior, IR3. Vale ressaltar que o *ReplaceMOTOR v2.0*® identificou o motor de 15 cv como opção viável de substituição, porém, o carregamento para essa opção se encontra próximo do limite aceitável.

⁹ Carregamento.

Tabela 16 - Opções de substituição do motor similar.

ID	Potência (cv)	Carga (%)	Preço (R\$)	Vida Útil (anos)	Rotação (rpm)	Rendimento (%)	Fator de Potência	Corrente (A)	Peso (kg)
1	50	28,42	25119,1	25	1780	93,6	0,85	70,6/40,7	348
1.1	50	28,42	29640,52	25	1775	94,5	0,84	70,9/40,8	266
1.2	40	35,53	26735,34	25	1780	94,1	0,84	57,7/33,2	241
1.3	30	47,37	21186,44	20	1770	93,6	0,81	44,1/25,4	184
1.4	25	56,84	15243,95	20	1770	93,6	0,81	37,1/21,3	166
1.5	20	71,05	13113,34	20	1770	93	0,81	30,2/17,4	138
1.6	15	94,73	9038,15	20	1760	92,4	0,83	21,8/12,5	85,5

Fonte: Autoria própria.

Em sequência, a análise econômica realizada pelo *ReplaceMOTOR v2.0*® pode ser observada por meio das medidas suplementares da Tabela 17, que indicam a viabilidade econômica de cada um desses motores. Na situação considerada a opção base se encontra em funcionamento e a análise é feita visando substituir o motor em operação. Dessa maneira, o preço do motor base no início do tempo de estudo, em $t = 0$, é definido como nulo pois o motor base já estava em operação, não sendo necessário realizar um novo custo de investimento para adquirir o equipamento. Para as demais aquisições desse mesmo motor, em $t > 0$, o seu preço original é considerado visto que um custo ocorre para obter o motor.

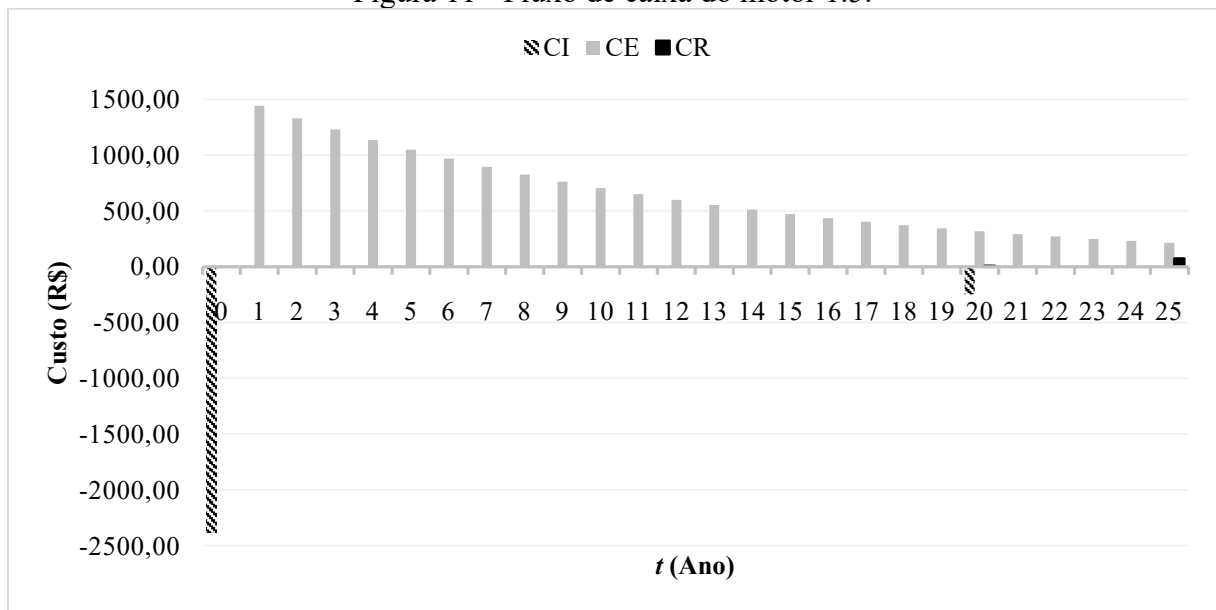
Tabela 17 - Medidas suplementares das opções alternativas ao motor similar, considerando que esse encontra-se em operação.

ID	Potência (cv)	NS (R\$)	SIR	AIRR (%)	Payback (anos)
1.1	50	-26350,42	0,11	2,54	+ 25
1.2	40	16406,54	1,61	14,15	9,62
1.3	30	60779,14	3,68	17,99	3,11
1.4	25	73293,33	5,49	19,89	1,99
1.5	20	75307,94	6,36	20,6	1,71
1.6	15	79252,97	9,17	22,38	1,16

Fonte: Autoria própria.

Além disso, a Figura 11 apresenta o fluxo de caixa da comparação entre a opção base e a opção 1.5, de 20 cv, que dentre os motores disponíveis apresenta a faixa de carregamento que mais se aproxima do valor recomendado. Por fim, é possível observar que como o tempo de estudo é de 25 anos e o tempo de serviço do motor 1.5 é de 20 anos, no ano 20 é necessário adquirir um novo motor idêntico ao motor 1.5, resultando em um novo custo de investimento e custos residuais.

Figura 11 - Fluxo de caixa do motor 1.5.



Fonte: Autoria própria.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O *ReplaceMOTOR v2.0*® permite escolher dentre mais de 2000 motores listados no catálogo e acessar suas informações como rendimento, fator de potência, peso e outros dados de placa. Nesse contexto, apesar do catálogo ser composto exclusivamente de motores da WEG, essa marca é a maior fabricante de motores utilizados no Brasil, e isso garante que o funcionamento do *software* envolva motores amplamente utilizados na indústria.

Adicionalmente, o uso da ACCV como método de avaliação econômica permite considerar vários custos associados à operação desses equipamentos. Nesse sentido, a utilização de preços reais de motores aproxima a definição do custo de investimento à realidade de mercado, e a definição apresentada do custo residual tem como objetivo incluir aspectos financeiros presentes após o fim da utilização dos motores.

Outro ponto elencado no texto é a interação entre o tempo de estudo e o tempo de serviço, que dita em quais instantes os custos devem ser calculados a partir de características dos próprios motores. E, para a correção monetária nesses instantes são observados dados históricos de inflação, juros e variação de tarifa de energia para a correta conversão de valores

Além disso, a utilização de medidas suplementares de avaliação econômica amplamente empregadas no mercado, como a economia líquida e a taxa de retorno interno ajustada, ampliam o escopo da análise sobre a substituição de motores, possibilitando uma visão econômica sobre a atividade, indo além de aspectos técnicos.

Ainda sobre parâmetros técnicos, a utilização do carregamento dos motores na análise aumenta o potencial de economia na troca de motores, pois é um parâmetro determinante para verificar a viabilidade técnica da redução de potência, e como motores com potência menor usualmente são mais baratos, os ganhos econômicos são impulsionados.

Quanto ao estudo de caso, a grande quantidade de dados disponíveis no catálogo de motores possibilita realizar a consideração de utilizar um motor similar e ainda assim obter resultados confiáveis, e que diante dos resultados observados é possível concluir que a análise realizada no *ReplaceMOTOR v2.0*® realmente expande os estudos previamente iniciados, que utilizaram apenas o consumo de energia elétrica como métrica principal para classificar o desempenho dos motores estudados.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, V. P. B. et al. Economic Analysis of Retrofitting Electric Motors with a Rewinding Process to Partial Loads. 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), p. 1–8, 9 out. 2022.

AGUIAR, V. P. B.; LOPES, T. C. S.; GONÇALVES JÚNIOR, A. A.; e FILHO, M. H. M. ***ReplaceMOTOR v1.0***. Titular: Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Número do pedido: BR5120240003878. Depósito: 8 fev. 2024. Concessão: 20 fev. 2024. Disponível em: <https://busca.inpi.gov.br/pePI/jsp/programas/ProgramaSearchBasico.jsp>. Acesso em: 29 out. 2024.

ANDRADE, C. T. C., PONTES, R. S. T.. **Economic analysis of Brazilian policies for energy efficient electric motors**. 2017. Energy Policy, 106, 315-325.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Tarifas e Informações Econômico-Financeiras**. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/tarifas-e-informacoes-economico-financeiras>. Acesso em: 24 fev. 2025.

BLANK, L. T.; TARQUIN, A. J. **Engineering economy**. New York: Mcgraw-Hill, 2012.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Plano Nacional de Energia 2050**. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em: 24 fev. 2025.

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.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA)**. Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo.html?=&t=series-historicas>. Acesso em: 24 fev. 2025.

IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada). **Taxa de juros nominal - Overnight / Selic**. Disponível em: <http://www.ipeadata.gov.br/exibeserie.aspx?serid=38402>. Acesso em: 24 fev. 2025.

KNEIFEL, J. D., WEBB, D.. **Life cycle costing manual for the federal energy management program**. 2022. Disponível em: <https://www.nist.gov/publications/life-cycle-costing-manual-federal-energy-management-program-0>. Acesso em: 24 fev. 2025.

LOPES, T. C. S., COSTA, M. V. S., AGUIAR, V. P. B., PONTES, R. S. T.. **ACCV Aplicada na Substituição de Motores Industriais: ReplaceMOTOR v1.0**. 2024. XXV Congresso Brasileiro de Automática.

MCCOY, G. A. e DOUGLASS, J. G.. **Premium efficiency motor selection and application guide – a handbook for industry**. 2014. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/1220835>. Acesso em: 24 fev. 2025.

MME (Ministério de Minas e Energia). **Portaria Interministerial N° 1, de 29 de Junho de 2017**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/aceso-a-informacao/legislacao/portarias-interministeriais/portaria-mme-mcti-mdic-n-1-2017.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2025.

MOREIRA, José Roberto Simões (org.). **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. Colaboração de Alberto Hernandez Neto. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 994 p., il. ISBN 978-85-216-3377-8.

NOGUEIRA JÚNIOR, Antônio José. **Avaliação Econômica Completa da Substituição de Motores Industriais da Perspectiva da Análise dos Custos do Ciclo de Vida**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2024.

PEDRO DAVID; PAMELLA SANGY; SIMONE BRANDÃO; SAULO RIBEIRO SILVA; GUSTAVO HAYDT. **Efeitos da taxa de desconto do custo futuro na operação e na expansão do sistema brasileiro**. 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-458/topico-666/GPL_0315.pdf. Acesso em: 15 ago. 2024.

PYTHON. **Welcome to Python.org**. Disponível em: <https://www.python.org/>. Acesso em: 27/01/2026.

SILVA A. M.. **Interface Improvement and Development of New Tools in the BobiSoft Software**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Coimbra, 2017.

TKINTER. **tkinter - Python interface to Tcl/Tk**.

Disponível em: <https://docs.python.org/3/library/tkinter.html>. Acesso em: 27/01/2026.

TOSHIBA. **0504SDSC42A-P**. Disponível em: <https://toshiba.com/tic/wp-content/uploads/0504SDSC42A-P.pdf>. Acesso em: 24/01/2026.

VIANA, A. N. C.; BORTONI, E. C.; NOGUEIRA, F. J. H.; HADDAD, J.; Nogueira, L. A. H.; VENTURINI, O. J.; YAMACHITA, R. A.. **Eficiência Energética: Fundamento e Aplicações** ISBN 978-65-00-32387-0. 2. ed. Rio de Janeiro: Neoenergia, 2021. v. 1. 420p.

WEG. **SEE+**. Disponível em: <https://www.weg.net/seeplus/calculator>. Acesso em: 23 mar. 2025a.

WEG. **W22**. Disponível em:

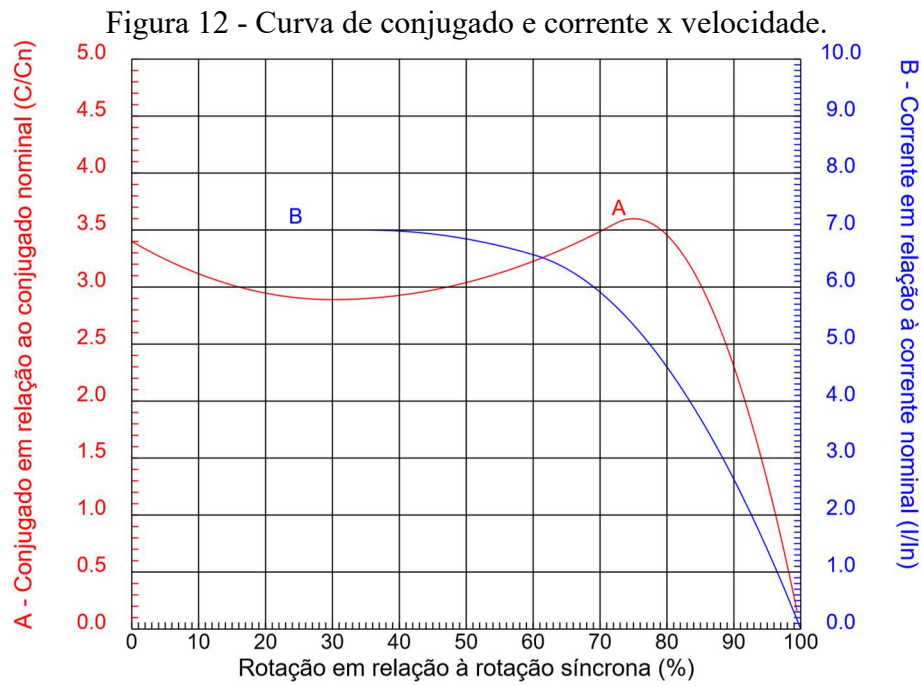
<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h9e/h49/WEG-w22-motor-eletrico-trifasico-50023622-brochure-portuguese-.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2025b.

WEG. **Seleção de Motores Elétricos**. Disponível em:

https://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp. Acesso em: 25 mar. 2025c.

APÊNDICE A - MÉTODO DA LINEARIZAÇÃO

O método da linearização apresentado em Viana *et al.* (2021) é utilizado para avaliar o carregamento de um motor em condições reais de operação, sua aplicação parte do fato de que na região de operação do motor alguns parâmetros como o conjugado e a corrente possuem comportamento aproximadamente linear conforme a curva na Figura 12.



Fonte: Adaptado de Weg (2025c).

Assim, o conjugado M se relaciona com a velocidade N por meio da Equação (A.1):

$$M_t = \frac{M_n}{N_n} \cdot \left(\frac{N_s - N_t}{N_s - N_n} \right), \quad (\text{A.1})$$

onde o sufixo t representa uma grandeza de trabalho (em condições reais de operação), n indica que a grandeza é nominal e s corresponde a uma grandeza síncrona.

Já a corrente I se relaciona com a velocidade N conforme a Equação (A.2):

$$N_t = N_s - \left(\frac{I_t - I_0}{I_n - I_0} \right) \cdot (N_s - N_n), \quad (\text{A.2})$$

onde I_0 é a corrente a vazio do motor.

Na Equação (A.2) a corrente de trabalho I_t deve ser medida com o motor em operação e a corrente a vazio I_0 é determinada na Equação (A.3):

$$I_0 (\%) = (A_0 - B_0 \cdot \ln(P_n)) \cdot I_n, \quad (\text{A.3})$$

onde A_0 e B_0 são os coeficientes da interpolação linear da corrente a vazio em função da potência nominal do motor, obtidos a partir de dados de fabricantes. Adicionalmente, os valores dos coeficientes variam com a quantidade de polos, representados na Tabela 18.

Tabela 18 - Coeficientes da interpolação linear da corrente a vazio em função da potência nominal do motor, agrupados pelo número de polos.

Polos	A_0	B_0
2	56,855	-6,866
4	67,484	-7,49
6	72,11	-7,413
8	77,463	-7,145

Fonte: Viana *et al.* (2021)

Com isso, após determinar o conjugado de trabalho M_t é possível determinar a potência de trabalho P_t utilizando a Equação (A.4).

$$P_t = M_t \cdot N_t \quad (\text{A.4})$$

Por fim, o carregamento do motor é definido na Equação (A.5).

$$L = \frac{P_t}{P_n} \quad (\text{A.5})$$

APÊNDICE B - ANÁLISE DO CARREGAMENTO DO MOTOR

O valor de 28,42% do carregamento utilizado no estudo de caso foi obtido previamente à utilização do *ReplaceMOTOR v2.0*® após executar etapas de medição e pré-processamento. Inicialmente a corrente de cada uma das 3 fases do motor foi medida em 3279 instantes de tempo distintos e a média desses valores em cada instante foi utilizada como o parâmetro I_t da Equação (A.2). Além disso, os dados medidos estão disponíveis para consulta em <https://github.com/tcs196/analise-carregamento-toshiba>. Por conseguinte, após utilizar o método da linearização detalhado no Apêndice A, os dados foram agrupados em regiões de carregamento, conforme a Tabela 19.

Tabela 19 - Dados estratificados do carregamento do motor TOSHIBA.

Região	Frequência	Frequência (%)	$L_{média}$ (%)	$P_{t_média}$ (cv)	$P_{t_ponderada}$ (cv)
0% - 10%	465	14,18%	3,87%	1,94	0,27
10% - 20%	33	1,01%	15,01%	7,50	0,08
20% - 30%	1205	36,75%	25,09%	12,55	4,61
30% - 40%	869	26,50%	34,67%	17,33	4,59
40% - 50%	321	9,79%	43,76%	21,88	2,14
50% - 60%	98	2,99%	54,28%	27,14	0,81
60% - 70%	59	1,80%	64,14%	32,07	0,58
70% - 80%	34	1,04%	74,77%	37,39	0,39
80% - 90%	25	0,76%	85,31%	42,65	0,33
90% - 100%	19	0,58%	94,38%	47,19	0,27
100% - 120%	46	1,40%	110,66%	55,33	0,78
>120%	105	3,20%	511,27%	255,64	8,19

Fonte: Autoria própria.

Assim, a potência de trabalho P_t do motor foi determinada ao efetuar a soma dos valores da coluna $P_{t_ponderada}$, resultando em 23,03 cv. Então, o carregamento L foi definido por meio da Equação (A.5).

$$L = \frac{P_t}{P_n} = \frac{23,03}{50} = 46,03\%$$

Entretanto, analisando a Tabela 19 foi possível notar uma quantidade considerável de carregamentos na região maior que 120%, esse comportamento é explicado pela partida direta

utilizada no acionamento do motor que gera picos de carregamento nos instantes iniciais de operação do equipamento.

Com isso, tornou-se necessário excluir os efeitos do acionamento do motor nos dados estratificados em uma etapa de pré-processamento, para tal as ocorrências na região $> 120\%$ foram desconsideradas e subtraídas nas regiões de carregamento imediatamente anteriores na tentativa de amenizar os efeitos da partida do motor. Nesse sentido, optou-se por não apenas desconsiderar esses dados na região $> 120\%$, mas também por subtraí-los das regiões anteriores, pois o pico de carregamento inicial também aumenta a incidência de valores nas regiões de 80% a 120% da Tabela 19. Assim, os novos dados sem os efeitos de acionamento foram representados na Tabela 20.

Tabela 20 - Dados estratificados do carregamento do motor TOSHIBA desconsiderando os efeitos do acionamento.

Região	Frequência	Frequência (%)	$L_{média}$ (%)	$P_{t_média}$ (cv)	$P_{t_ponderada}$ (cv)
0% - 10%	465	15,15%	3,87%	1,94	0,29
10% - 20%	33	1,08%	15,01%	7,50	0,08
20% - 30%	1205	39,26%	25,09%	12,55	4,93
30% - 40%	869	28,32%	34,67%	17,33	4,91
40% - 50%	321	10,46%	43,76%	21,88	2,29
50% - 60%	98	3,19%	54,28%	27,14	0,87
60% - 70%	59	1,92%	64,14%	32,07	0,62
70% - 80%	19	0,62%	74,77%	37,39	0,23

Fonte: Autoria própria.

Por fim, a nova potência de trabalho P_t possui valor de 14,21 cv e o novo carregamento L é de 28,42%.