

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIENCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

IAPONYRA DE ARAÚJO LEONCIO

**ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA
DA SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS
EM UMA INSTALAÇÃO INDUSTRIAL DE MODO
A REDUZIR O DESPERDÍCIO DE ENERGIA**

João Monlevade

2021

IAPONYRA DE ARAÚJO LEONCIO

**ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA
DA SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS
EM UMA INSTALAÇÃO INDUSTRIAL DE MODO
A REDUZIR O DESPÉRDICIO DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Professor Dr. Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho

João Monlevade

2021

L582e Leôncio, Iaponyra de Araújo

Estudo da viabilidade econômica da substituição de motores elétricos em uma instalação industrial de modo a reduzir o desperdício de energia. [Manuscrito] / Iaponyra de Araújo Leôncio. - 2021.

86 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho.
Monografia (curso de graduação em Engenharia Elétrica)
Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia de Elétrica.

1. Energia elétrica - Consumo. 2. Energia elétrica - Desperdício (Economia). 3. Motores elétricos. 4. Sistemas de energia elétrica - Economia. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU 621.31

Catálogo: bibjmv.sisbin@ufop.edu.br



FOLHA DE APROVAÇÃO

Iaponyra de Araújo Leôncio

Estudo da viabilidade econômica da substituição de motores elétricos em uma instalação industrial de modo a reduzir o desperdício de energia

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista

Aprovada em 21 de outubro de 2021

Membros da banca

Dr. Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Aurélio Luiz Magalhães Coelho - Universidade Federal de Itajubá
Dr. Welbert Alves Rodrigues - Universidade Federal de Ouro Preto

Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 25/10/2021



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/10/2021, às 12:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0236645** e o código CRC **66FD12E3**.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, que por bondade me concede saúde, força e me sustenta quando me falta fé.

Aos meus pais Antônio e Helena, em especial a minha querida mãe que esteve sempre ao meu lado, me apoiando em todas as minhas decisões.

Ao meu orientador Professor Dr. Francisco Abrantes Couy Baracho, que com maestria me direcionou durante este trabalho.

Aos amigos que a vida me presenteou nesta jornada acadêmica, e em especial a minha amiga Christiane. E por fim, ao meu namorado Paulo, por todo amor e compreensão.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caso sobre a viabilidade da substituição de motores de baixa eficiência por motores de alta eficiência em uma empresa mineradora. A força motriz consome cerca de 70% da energia elétrica dos parques industriais, o que torna importante os estudos sobre técnicas para reduzir a quantidade de energia consumida por esses equipamentos. Há diversas melhorias no âmbito da eficiência energética que podem ser aplicadas de forma a reduzir este consumo. Sendo assim, são propostas técnicas como: o redimensionamento da potência do motor, a substituição direta. E, por fim, a análise de viabilidade de troca dos motores em estudo. O modelo econômico foi implementado no *software* Excel e analisou-se que a técnica de redimensionamento de potência é mais vantajosa. E a partir desta técnica, verificou-se uma economia energética significativa com a troca dos oito motores e boa rentabilidade.

Palavras-chave: Motores Elétricos. Eficiência Energética. Consumo de Energia Elétrica. Análise Econômico-Financeira.

ABSTRACT

This paper presents a case study on the feasibility of replacing low efficiency motors with high efficiency motors in a mining company. The motive force consumes about 70% of the electrical energy in industrial parks, which makes it important to study techniques to reduce the amount of energy consumed by this equipment. There are several improvements in energy efficiency that can be applied in order to reduce this consumption. Thus, techniques are proposed such as: the resizing of motor power, direct replacement. And, finally, the analysis of the feasibility of exchanging the motors under study. The economic model was implemented in Excel software and it was analyzed that the power resizing technique is more advantageous. Based on this technique, a significant energy saving was verified with the replacement of the eight motors and good profitability.

Keywords: Electric Motors. Energy Efficiency. Electric Energy Consumption. Economic-Financial Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Balanço Energético Nacional (BEN) 2020	13
Figura 2 - Divisão dos motores elétricos em CC e CA	21
Figura 3 - Corte longitudinal motor de indução trifásico tipo gaiola de esquilo.....	23
Figura 4 – Rotor de um motor de indução trifásico tipo rotor bobinado.....	24
Figura 5 – Comparação entre rendimentos de motores padrão e de alto rendimento de 2 pólos	34
Figura 6 – Comparação entre rendimentos de motores padrão e de alto rendimento de 4 pólos	34
Figura 7 – Eficiência energética de motores padrão e de alta eficiência de 4 pólos.....	35
Figura 8 – Fluxograma lógico para obtenção dos dados do motor atual.....	39
Figura 9 – Fluxograma lógico para obtenção dos dados do motor proposto	42
Figura 10 – Fluxograma lógico para obtenção dos dados do motor proposto	46
Figura 11 – Demanda do motor antigo para carregamento de 50% e 75%.....	50
Figura 12 – Torque do motor antigo para carregamento de 50% e 75%	51
Figura 13 – Consumo anual de energia elétrica dos motores antigos com carregamento de 50%.....	51
Figura 14 – Consumo anual de energia elétrica dos motores propostos com carregamento de 50%	52
Figura 15 - Consumo anual de energia elétrica dos motores antigos com carregamento de 75%.....	53
Figura 16 - Consumo anual de energia elétrica dos motores propostos com carregamento de acima 75%.....	53

Figura 17 – Carregamento proposto para motores redimensionadas que operavam com 50% da capacidade	54
Figura 18 – Carregamento proposto para motores redimensionadas que operavam com 75% da capacidade	54
Figura 19 – Redimensionamento da potência nominal do motor elétrico para acionar uma carga específica para o 1° caso	55
Figura 20 – Economia após substituir o motor ineficiente.....	56
Figura 21 – Redimensionamento da potência nominal do motor elétrico para acionar uma carga específica para o 2° caso	56
Figura 22 – Economia (R\$) com o motor proposto operando entre 75,88% a 77,89% do carregamento	58
Figura 23 – Economia (R\$) com o motor proposto operando entre 91,23% a 96,76% do carregamento	58
Figura 24 – Consumo de energia dos motores substituídos de forma direta.....	59
Figura 25 – Demanda economizada utilizando o método de redimensionamento de potência	60
Figura 26 – Demanda economizada utilizando o método de redimensionamento de potência	61
Figura 27 – Economia no consumo energético ao trocar os motores antigos pelos motores propostos utilizando o método de redimensionamento de potência	62
Figura 28 – Economia no consumo energético ao trocar os motores antigos pelos motores propostos utilizando o método de substituição direta	62

Figura 29 – Economia (R\$) com o motor proposto operando com 50% do carregamento e utilizando a substituição direta.....63

Figura 30 – Relação entre VPL e TIR67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classe de isolamento: temperatura ambiente de 40°C	25
Tabela 2 – Temperatura admissível do ponto quente	26
Tabela 3 – Descrição técnica resumida dos motores de baixa eficiência	36
Tabela 4 – Modelo implementado para o motor antigo com %carga de 50% e 75%.....	48
Tabela 5 – Modelo implementado para o motor proposto com %carga ajustado.....	49
Tabela 6 – Dados do motor antigo com carregamento de 50%	79
Tabela 7 – Dados do motor antigo com carregamento de 75%	80
Tabela 8 – Dados dos motores propostos que operavam com carregamento de 50%..	81
Tabela 9 – Dados dos motores propostos que operavam com carregamento de 75%..	82
Tabela 10 – Dados dos motores propostos que operavam com carregamento de 50% Substituição direta.....	61
Tabela 11 – Consumo de energia dos motores propostos	64
Tabela 12 – Custo por motor	65
Tabela 13 – Custo total do projeto incluindo a mão de obra.....	65
Tabela 14 – Consumo de energia dos motores propostos	66
Tabela 15 - Economia obtida ao substituir os motores ineficientes por motores de alta eficiência.....	66
Tabela 16 – Análise econômica da viabilidade de troca de motores.....	68
Tabela 17 – Descrição técnica completa dos motores de baixa eficiência	77

LISTA DE SÍMBOLOS

1. Símbolos usados em expressões matemáticas

Símbolo	Significado	Unidade
A	Unidade de corrente	Ampere
kV	Unidade de tensão: QuiloVolt	Volt
kW	Unidade de potência: QuiloWatt	Watt
n_{sinc}	Velocidade síncrona	RPM
Nm	Newton metro	Nm
P	Número de polos	-
RPM	Rotação Por Minuto	RPM
W	Unidade de potência	Watt

LISTA DE ABREVIATURAS

ABRAMAN	Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CV	Cavalo Vapor
e_{ind}	Tensão induzida
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
HP	Horse Power
IR1	Índice de Rendimento mínimo de 90,2%
IR2	Índice de Rendimento mínimo de 93,9%
IR3	Índice de Rendimento <i>Standart Premium</i> de 95,1%
IR4	Índice de Rendimento <i>Super Premium</i> de 96,0%
IR5	Índice de Rendimento padrão de 95,5%
MIT	Motor de Indução Trifásico
MME	Ministério de Minas e Energia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	12
1.2 Justificativa.....	13
1.3 Revisão bibliográfica.....	14
1.4 Estrutura do trabalho	20
2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE MOTORES ELÉTRICOS.....	21
2.1 Motores de corrente alternada.....	22
2.1.1 Motores de indução trifásicos.....	22
2.1.2 Motores assíncronos trifásicos com rotor em gaiola	23
2.1.3 Motores assíncronos trifásicos com rotor bobinado	23
2.2 Influência da temperatura na vida útil do motor.....	24
2.2.1 Classe de isolamento	24
2.2.2 Altitude de operação.....	26
2.3 Manutenção em motores.....	26
2.3.1 Manutenção corretiva	27
2.3.2 Manutenção preventiva	28
2.4 Dimensionamento do motor..	28
2.5 Técnicas de análise financeira...	29
2.5.1 Valor Presente Líquido	30
2.5.2 Payback.....	31
2.5.3 Taxa Interna de Retorno.....	32
3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	33
4 METODOLOGIA	37
4.1 Coleta dos dados técnicos	37
4.2 Redimensionamento da potência do motor	38
4.2.1 Motor atual	38
4.2.2 Motor a ser indicado para a substituição	42
4.3 Substituição direta.....	44
4.3.1 Motor atual..	44

4.3.2 Motor a ser indicado	45
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1 Caso 1: Redimensionamento	59
5.2 Caso 2: Substituição direta.....	63
5.3 Análise da viabilidade econômica	64
6 CONCLUSÕES	69
6.1 Proposta para trabalhos futuros	69
REFERÊNCIAS.....	71
ANEXO I	77

1 INTRODUÇÃO

A busca por práticas mais eficientes no âmbito de geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica, intensificaram-se nas últimas duas décadas, uma vez que permitem a redução dos gases que causam o efeito estufa (SOLA & MOTA, 2015). Além disso, é fato que processos mais eficientes permitem a redução do consumo de energia, mantendo a qualidade do processo (MME, 2007). No entanto, para melhorar a eficiência energética, a evolução da tecnologia, bem como o processo gerencial são fundamentais (WEC, 2010).

O relatório apresentado pelo Balanço Energético Nacional BEN(2020) estima que o setor industrial consome cerca de 30,4% de toda a energia elétrica produzida no Brasil. Desta parcela, cerca de 70% é consumida pela força motriz nos parques industriais. Portanto, devido ao consumo elevado de energia elétrica, há diversas melhorias que podem ser implementadas no setor elétrico de modo a reduzir este consumo.

Os motores elétricos, possuem diversas aplicações na indústria, como por exemplo em compressores, bombas de ar, bombas de vácuo, além de serem a força motriz de diversas máquinas (SAIDUR, 2010). Há diversas oportunidades quando se trata em melhorar a eficiência energética dos motores elétricos, como a substituição de motores de baixa eficiência, por meio de análise econômica e técnica. A fim de promover a eficiência energética no setor industrial, ANEEL incentiva a substituição de motores elétricos de baixa eficiência por meio do Programa de Eficiência Energética desde 2015 (ANEEL, 2017). A CEMIG também lançou um programa para o estímulo em eficiência energética por meio de uma bonificação. O programa consiste em cobrir até 40% do valor na aquisição do novo motor, porém, a potência total do conjunto de motores a serem substituídos não poderiam ultrapassar a 2000 CV, sendo que este valor foi estipulado no edital da empresa. O intuito do programa é proporcionar um bônus ao cliente, de modo a estimular a substituição dos motores elétricos antigos e ineficientes por motores de maior eficiência (CEMIG,2017).

A evolução tecnológica ao longo do tempo permitiu aumentar o rendimento dos motores elétricos, e conseqüentemente, a eficiência, uma vez que os primeiros motores eram robustos, pesados e com custo elevado (GARCIA, 2003). Esta mudança pode ser constatada ao analisarmos a fabricação destas máquinas, dado

que a forma construtiva foi reduzida pelo fato de usarem menos ferro, menos cobre e melhorarem a técnica de construção, tornando a aquisição de novos motores mais acessível.

Neste contexto, diversos autores retratam que ao melhorar a eficiência desses motores, obtém-se um retorno financeiro atrativo, uma economia significativa em energia, como também tornam a empresa mais competitiva no mercado (SILVA M. A., et al. 2009). Além dos ganhos diretos relacionados à eficiência energética, destacam-se também os ganhos indiretos. Ao adquirir um motor *Premium* (rendimento acima de 95,1%), o mesmo executará a atividade do motor IR1 (Índice de Rendimento mínimo de 90,2%) e/ou IR2 (Índice de Rendimento mínimo de 93,9%), porém solicitando uma demanda reduzida de energia e uma temperatura de operação menor, além de aumentar a confiabilidade e a vida útil do motor (PROCEL, 2016).

O foco deste trabalho é estudar a viabilidade econômica da troca dos motores de baixa eficiência, com tempo de operação superior a 25 anos e potência acima de 258 kW. A principal motivação para a escolha desta faixa de potência, deve-se ao estudo escasso, bem como os motores do estudo de caso contempla motores com potência acima deste valor. Espera-se um aumento da eficiência energética global do sistema e uma economia expressiva de energia. Como consequência, obter um retorno financeiro atrativo e a empresa mineradora se tornar mais competitiva no mercado a partir das trocas feitas.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é estudar a viabilidade econômica da substituição de motores elétricos de baixo rendimento de uma empresa mineradora por motores de alto rendimento de modo a reduzir o desperdício de energia.

Para atingir o objetivo geral, foram elegidos os seguintes objetivos específicos:

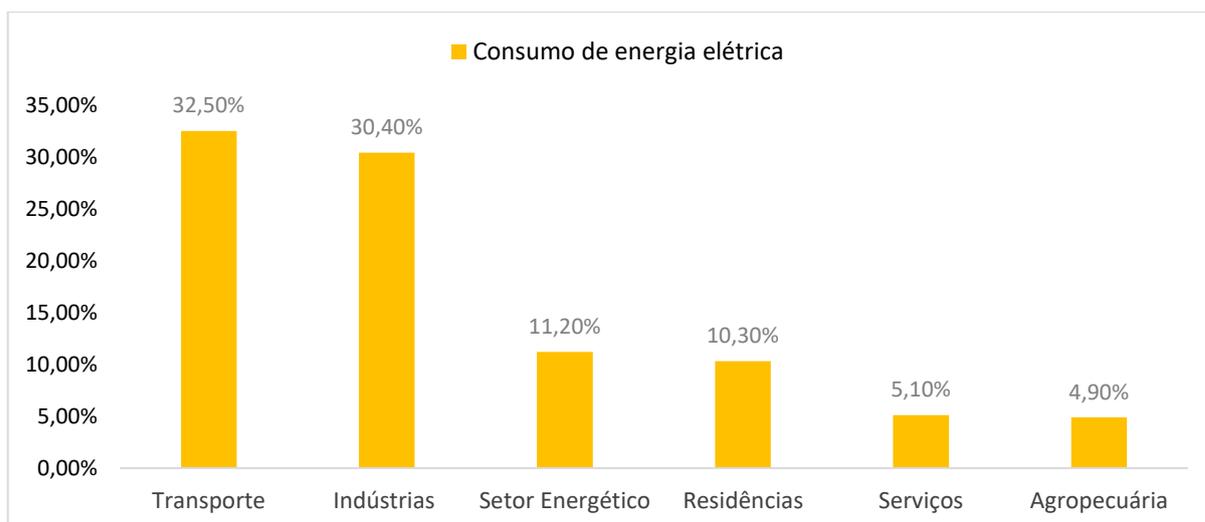
- a) Estudar técnicas de análise financeira;
- b) Levantar os dados técnicos em campo dos motores que estão presentes no pátio da empresa mineradora em estudo: 258, 294, 441, 589 e 669 kW;
- c) Implementar o método de redimensionamento de potência;
- d) Implementar o método de substituição direta de motores elétricos;

- e) Calcular o VPL e *payback*;
- f) Analisar a viabilidade econômica ao substituir motores de baixa eficiência.

1.2 Justificativa

Os motores elétricos consomem cerca de dois terços da energia elétrica na indústria (BEN, 2020). Sendo assim, efetuar uma análise energética dos motores elétricos acerca da viabilidade de sua substituição, torna-se indispensável (Szyszka & Américo, 2004). A Figura 1 apresenta o balanço referente ao ano de 2020, onde se pode observar que a indústria é o segundo maior consumidor de energia elétrica no Brasil.

Figura 1 – Balanço Energético Nacional



Fonte: Adaptado de BEN (2020).

Os motores elétricos podem apresentar ineficiência devido a diversos fatores, como por exemplo manutenção inadequada, superdimensionamento, acoplamento motor-carga e a utilização de motores de baixa eficiência (Moreira, 2000).

No estudo desenvolvido por Freitas, Bispo, & Delaiba (2008) a substituição das máquinas foi feita em função de uma análise econômica dos Motores de Indução Trifásicos (MIT) usando informações técnicas tais como: a curva característica, fator de potência, corrente, escorregamento e o rendimento. O estudo mostrou que pode-se readequar o dimensionamento do motor, e conseqüentemente tornar o sistema mais produtivo, reduzindo os gastos com energia. Além disso, o estudo de Correia &

Rodrigues (2017) mostrou que a substituição de máquinas em uma fábrica de óleo teve retorno financeiro atrativo através da economia significativa em energia, sem contar a melhora da competitividade da empresa no mercado.

O estudo acerca da substituição de motores elétricos ineficientes e com potência acima de 258 kW é escasso, pois uma parcela significativa da literatura limita o estudo até 13,6 kW. Tal fato se deve a alta comercialização dentro desta faixa de potência (SILVA M. A., 2009). Souza e Calili (2019) abordam que 55,69% dos motores elétricos trifásicos vendidos no Brasil em 2016 estão contidos na faixa de potência entre 0,73 kW – 7,35 kW. Entretanto, 13,78% dos motores vendidos contemplam a faixa e 8,09 – 221,38 kW, justificando assim a necessidade de desdobrar um estudo acerca desses motores de potência elevada. Para este estudo de caso, a empresa mineradora possui motores com a partir desta faixa de potência, tal fato fomenta o estudo.

Neste contexto, esta monografia pretende desenvolver a análise econômica da substituição de oito motores de potência elevada (acima de 258 kW), a partir de um estudo de caso em uma empresa mineradora dotada de tais motores. Dessa forma, busca-se vantagens como a redução na fatura de energia (consumo e demanda), o retorno atrativo e um investimento razoável e ganho de competitividade de mercado.

1.3 Revisão bibliográfica

Os trabalhos apresentados a seguir, abordam o estudo de eficiência energética aplicado a motores elétricos e os ganhos obtidos com a implantação.

Fernandes et al. (2009) apresenta o funcionamento e o desempenho de motores de indução trifásicos por meio de curvas com características elétricas e mecânicas. Além de abordar a viabilidade econômica ao aplicar técnicas de eficiência no funcionamento destas máquinas. Todavia, no estudo de caso apresentado foram utilizados motores de indução trifásicos com potência de 20 CV, carcaça 160, linha padrão WEG W-21 com quatro pólos, velocidade de 1760 rpm e vida útil de 19,4 anos. O autor aborda o dimensionamento, uma vez que o motor sobredimensionado causaria desperdício de energia no quesito consumo e demanda. A análise partiu da curva característica de cada motor retirado do catálogo do fabricante. Tais curvas

permitem averiguar, por exemplo a corrente, escorregamento, fator de potência, dentre outros, e por fim, analisar a operação em regime permanente do motor. O primeiro método usado para identificar o carregamento do motor, foi a medição das correntes nas três fases e a inserção da média da mesma no sistema. Em posse do carregamento, calculou-se a eficiência energética do novo motor a ser instalado considerando a potência real. Os dados usados no decorrer do trabalho para a obtenção do carregamento foram: corrente de linha $I_a = 30,9$ A, $I_b = 29,8$ A, $I_c = 30,2$ A e $I_{\text{méd}} = 30,3$ A. A partir do gráfico de carregamento do motor de 20 CV, consta-se que os motores estavam operando com um carregamento de 45%. Por meio deste valor, o motor de alto rendimento comercial a ser adquirido no processo de substituição foi de potência de 10 CV. Em seguida, verificou-se a viabilidade econômica da troca dos motores de 20 CV por 10 CV. Assim sendo, constatou-se uma redução de 52,36 kWh no consumo de energia mensal, uma economia de R\$ 3,66 / mês e um tempo de retorno de 124,56 meses (aproximadamente de 11 anos). Tal fato torna inviável a substituição do motor padrão por um de alto rendimento.

A eficiência energética está ligada diretamente ao desenvolvimento sustentável em sistemas de produção. Sola & Mota (2015) realizam um estudo de caso em uma indústria que é alimentada em 13,2 kV. Os autores usam o método multicritério PROMETHEE II com o intuito de reordenar os motores que seriam incluídos no plano de troca de acordo com alguns critérios pré-estabelecidos. O estudo visa a importância da integração de todos os setores da indústria, uma vez que a integração entre os mesmos permitiria que todos os critérios usados durante a substituição dos motores fossem atendidos. O método de ordenação PROMETHEE (do inglês, *Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation*) foi escolhido devido a critérios não compensatórios. Este método é baseado em escolha binária entre os critérios estabelecidos pela empresa. Inicialmente, os critérios técnicos foram especificados pela engenharia, dentre eles a potência do ativo. A potência, por estar ligada ao desempenho do processo, recebeu um peso maior. Cada ativo recebeu um peso, de acordo com o grau de contribuição para o processo. Foi adicionado ao problema o critério econômico, uma vez que tanto o Valor Presente Líquido (VPL), quanto o Valor Economizado de Energia (VEE) modificam-se a para cada classe de motor. A simulação foi realizada por meio do software D-Sight, considerando os critérios técnicos e econômicos e tomando como base 20 motores de indução. Em

suma, os resultados obtidos mostraram que a ordem de substituição dos motores utilizando o método PROMETHEE podem ser alterados de acordo com os critérios e os pesos utilizados. Salieta-se ainda que dentre os critérios de ordenação estão inclusos os parâmetros técnicos dos motores, bem como os critérios econômicos. Foram simulados dois cenários distintos, o primeiro considerando apenas os critérios técnicos dos motores e o segundo a inclusão da análise financeira. A ordenação obtida pelo multicritério, levando em consideração o cenário dois, apresentou o motor M16 *premium efficiency* na primeira posição do *ranking*. Em contrapartida, o cenário um classificou na primeira posição o motor M6. Portanto, a análise de multicritério mostrou-se vantajosa, uma vez que diversos parâmetros são analisados. Por fim, a junção entre os dois critérios apresentados acima resultou em uma economia de 25,5%. Entretanto, a inserção de outro parâmetro no mesmo modelo ou a retirada de critérios no método de multicritérios ocasionaria uma variação considerável nos resultados.

O trabalho desenvolvido por FREITAS et. al (2008) refere-se ao estudo comparativo entre rendimentos de motores de linha padrão e de alto rendimento. O rendimento do motor de indução influencia na eficiência da operação. Sendo assim, a utilização de motores de alta rendimento se mostra indispensável no estudo. Segundo os autores há duas formas para se calcular o rendimento do motor segundo (FREITAS, 2008). A primeira técnica apresentada é o Método Direto, que consiste em coletar a potência elétrica na entrada do motor e a potência mecânica entregue ao eixo da máquina. A segunda aborda o Método Indireto, que consiste em quantificar as perdas que ocorrem nos equipamentos no período de operação. As perdas são calculadas enquanto o motor encontra-se em operação, de modo que a potência elétrica da entrada e/ou a potência mecânica são medidas indiretamente. O método escolhido pelo autor do trabalho, foi o indireto. A Equação (1) foi usada para obter o rendimento:

Sendo que n representa o rendimento do motor de indução. Ao se calcular o rendimento, algumas considerações foram levadas em conta, como a tensão e a frequência. Os resultados obtidos nos métodos direto e indireto não foram comparados entre si e a resistência foi ajustada de acordo com a temperatura de operação. Os motores de alto rendimento apresentaram menores perdas, uma vez que a potência mecânica na saída se manteve, apesar da redução da potência fornecida na entrada. Esta classe de motores se mostrou vantajosa nos ensaios de perdas, dado que as perdas no núcleo e suplementares foram reduzidas de forma

significativa. O método indireto utilizado no estudo permitiu analisar as perdas que ocorreram quando o motor estava operando. Efetuar a troca dos motores de indução de linha padrão por motores com alto rendimento mostrou-se vantajoso nos seguintes quesitos: redução do consumo de energia elétrica, melhoria do fator de potência, redução na temperatura de operação, aumento da vida útil, maior capacidade de atuar sob ação de anormalidade, melhor rendimento operacional e redução do número de manutenções. Contudo, a obtenção de um motor de alto rendimento apresentou desvantagens em relação aos motores padrão, dentre elas o investimento inicial elevado. Esses motores possuem um peso maior, portanto ocupam mais espaço e uma aumento significativo na economia de energia apenas para um fator de carga alto.

Silva M. A. (2009) aborda o estudo sobre a substituição de motores elétricos por meio de análise econômica e técnica. Foram analisadas duas possibilidades, dentre as quais estavam um plano de substituição do ativo presente na planta e a aquisição de um novo motor. Os motores usados no estudo estavam na faixa de 1,5 a 10 CV de potência. A análise técnica foi feita tendo como base o motor trifásico em operação, e alguns parâmetros foram verificados durante os testes, tais como: desequilíbrio de tensão, carregamento, sobre e subtensão e harmônicos. A análise econômica tomou como base a vida útil e o tempo de retorno do capital investido. O software *MATLAB* foi usado para simular o carregamento do motor, tensão de entrada, harmônicos, desequilíbrio de tensão e a vida útil do motor. Nos experimentos descritos a temperatura ambiente considerada foi de 40°C. O mesmo software foi usado para determinar os parâmetros econômicos. Os parâmetros técnicos foram usados, a fim de obter o tempo de vida útil aproximado do motor. O tempo de vida do ativo foi especificado em relação ao carregamento e o tempo de operação. No primeiro cenário simulado, os motores foram alimentados por tensões senoidais sem efeito dos harmônicos, ou seja, uma alimentação ideal. No segundo cenário foram incluídos desequilíbrio de tensão, no terceiro cenário a influência de subtensão e desequilíbrio de tensão, o quarto cenário de sobretensão e desequilíbrio de tensão, quinto cenário considerou-se harmônicos e desequilíbrio de tensão e por fim no sexto cenário simulado o autor considerou uma temperatura ambiente de 30° e desequilíbrio de tensão entre fases. Observou-se que a influência de harmônicos na tensão de alimentação e a sobretensão ocasionaram um aumento na temperatura de operação, e em decorrência desse efeito houve uma redução na vida útil do motor. Sendo assim,

conclui-se que é mais viável adquirir um motor novo de alto rendimento em comparação com um motor padrão. A faixa de potência usada neste trabalho apresentou inviabilidade de troca em quase todas as simulações, considerando tarifa verde. A substituição dos motores de baixo rendimento por motores de alto rendimento mostrou-se viável para motores com carregamentos superiores a 75%. Entretanto, este trabalho limita-se apenas a faixas de potências de 1, 5 a 10 CV.

Dalvand & Zare (2006) apresentam uma avaliação técnico-econômica acerca dos motores elétricos iranianos, considerando a eficiência energética dos mesmos. O autor alega que os motores elétricos são responsáveis por consumirem 66% da energia elétrica no setor industrial do Irã. Dado o alto consumo de energia por parte desses motores, tornou-se indispensável o estudo e avaliação da eficiência dessas máquinas. De modo a melhorar a eficiência energética desses motores, foram analisados parâmetros como potência, preço da eletricidade e demanda em um período de 2004 a 2029. Sendo assim, foi proposto um método de modelagem de uma rede de energia para motores elétricos. A rede de energia é composta por motores trifásicos, divididos em três classes de potência, sendo a primeira com potência abaixo de 30 kW, a segunda classe com potência entre 30 e 200 kW e a terceira com potência acima de 200 kW. Por fim, as classes foram subdivididas em motores padrão e de alto rendimento. O método utilizado pelos autores foi o Modelo de Otimização de Fluxo de Energia (do inglês, *Energy Flow Optimization Model - EFON*) é um método que permite simular a rede de energia considerando as diversas classes dos motores elétricos. Este método utiliza a programação linear para calcular a função custo da rede. A função custo é a soma de todos os gastos na aquisição de um novo motor, como investimento, tempo de retorno e operacionalidade. Após a simulação do método EFON o autor sugere que, para aumentar a eficiência energética da rede de energia, deve-se substituir os motores padrão por motores de alto rendimento. Ao implementar tais medidas de eficiência espera-se uma economia de energia de 74,8 GWh nos próximos 25 anos, equivalente a uma redução de 570 MW no setor industrial do Irã. Do mesmo modo, analisou-se uma redução financeira significativa de US\$1,6 bilhão no custeio total para o setor elétrico.

Saidur (2010) apresenta um estudo acerca do uso da energia elétrica por parte dos motores elétricos. O autor aborda um compilado das perdas inerentes aos motores elétricos, bem como os desperdícios de energia e estratégias para reduzir o

consumo de energia. A eficiência do motor elétrico depende das perdas intrínsecas. Uma vez que estas perdas tornam-se significativas, o único modo de reduzi-las é modificando a forma construtiva do motor. Em muitos casos, mostra-se injustificável devido a relação entre o custo (para se modificar as características físicas) e o benefício (aumento da eficiência). Outro método utilizado para aumentar o desempenho dos motores elétricos ocorre por meio de auditorias energéticas. As auditorias permitem identificar, contabilizar e por fim propor soluções que reduzam as perdas energéticas. O autor aborda que a gestão de energia dos motores elétricos deve contemplar o consumo de energia, estratégia econômica na aquisição de um novo motor, bem como a identificação dos desperdícios de energia. Conseqüentemente, a gestão de energia proporcionará a quantificação das perdas e as possíveis ações a serem tomadas, os impactos nos processos, identificação dos motores ineficientes e as possíveis substituições por motores de alta eficiência. Sendo assim, a auditoria energética mostra-se benéfica, visto que a redução com custos operacionais e energia elétrica podem alcançar até 30%. O autor analisa também a aquisição de um motor elétrico em relação ao fator de carga. Cerca de 40% dos motores elétricos nos EUA operam sobredimensionados. Em situações nas quais os motores precisam operar com uma carga reduzida, os mesmos mostram-se ineficientes. Portanto, os motores de baixa eficiência e dimensionados de forma errônea devem ser substituídos por motores mais eficientes, uma vez que, um motor elétrico de alta eficiência apresenta um melhor rendimento em relação ao motor padrão, assim como uma potência menor para um mesmo nível de rendimento, ocasionando a redução da demanda contratada. Ao final da pesquisa o autor apresenta o software *MotorMaster ++* que auxilia na escolha de motores elétricos mais eficientes de acordo com os parâmetros inseridos e retorna uma lista de motores apresentando a relação custo / benefício (eficiência).

1.4 Estrutura do trabalho

O Capítulo 1 apresentou uma breve introdução sobre a importância em substituir motores ineficientes e as oportunidades ao melhorar a eficiência energética nos parques industriais.

O Capítulo 2 aborda a fundamentação teórica acerca dos motores elétricos trifásicos. Este capítulo também discorre sobre os conceitos básicos de máquinas elétricas, como por exemplo: máquinas síncronas, assíncronas. A influência da temperatura na vida útil do motor é tratada de forma sucinta, destacando a interferência que a altitude causa no desempenho desses motores. Esse capítulo também retrata os diversos tipos de manutenção e como as mesmas proporcionam maior longevidade aos motores elétricos. E, por fim, a seção de análise econômica permite avaliar os custos ao adquirir um novo motor elétrico, possibilitando assim verificar a viabilidade do projeto.

O Capítulo 3 tem como objetivo descrever o problema abordado nesta monografia, que consiste no consumo elevado por parte dos motores antigos.

O Capítulo 4 aborda a metodologia usada neste trabalho. Este capítulo descreve sobre duas técnicas financeiras que suportaram a argumentação sobre a viabilidade de troca.

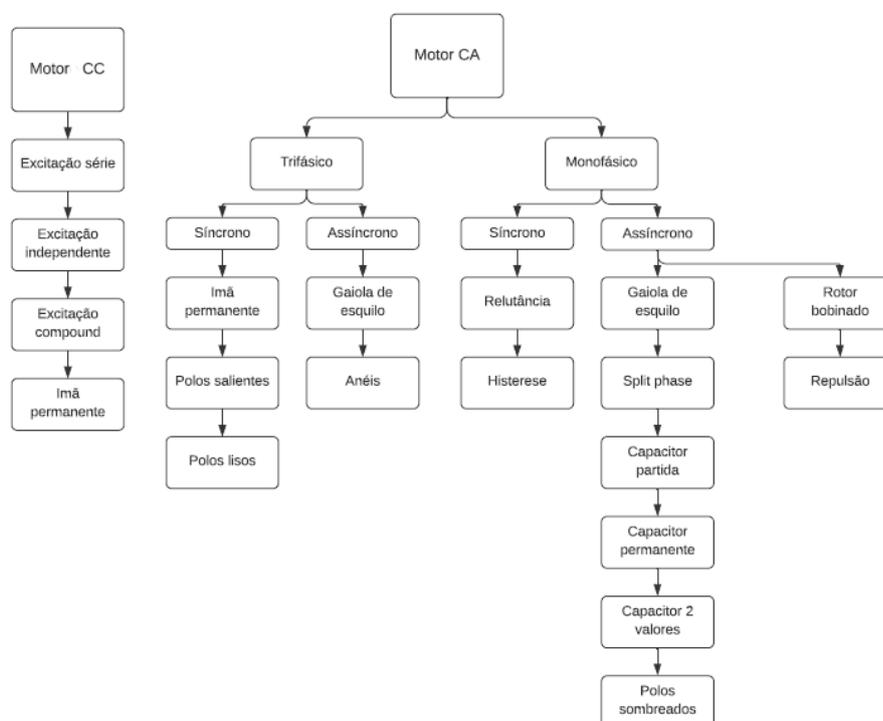
O capítulo 5 descreve os resultados e as discussões acerca do projeto proposto por esta monografia, contemplando a análise dos três métodos.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho, bem como os desafios encontrados ao longo do mesmo e a proposta para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE MOTORES ELÉTRICOS

Os motores elétricos são máquinas que convertem energia elétrica em energia mecânica (MAMEDE, 2010). Esses equipamentos estão presentes em diversos setores produtivos devido às vantagens que envolvem essas máquinas. Dentre estas vantagens pode-se citar a construção simples, simplicidade e versatilidade de uso, robustez, baixo custo e alto rendimento (SUETAKE, 2008). As máquinas de corrente alternada (AC, do inglês *Alternating Current*) são divididas em duas classes: máquinas síncronas e de indução (CHAPMAN, 2013). A primeira classe engloba motores e geradores, visto que a corrente de campo magnético é provida de uma fonte externa de corrente contínua (DC, do inglês *Direct Current*). E a segunda são máquinas de indução que também englobam motores e geradores. No caso de motores de indução, a corrente de campo é provida por indução magnética. Apresenta-se, na Figura 2, uma ampla gama de motores subdivididos em duas categorias: motores CC (corrente contínua) e CA (corrente alternada). Esse trabalho tem como foco de estudo os motores elétricos trifásicos de indução ou assíncronos.

Figura 2 – Divisão dos motores elétricos em CC e CA.



Fonte: Do autor.

2.1 Motores de corrente alternada

WEG CTC (2020) ressalta que o setor industrial é responsável pelo consumo de aproximadamente 30,40% da energia do Brasil. Sendo que os motores elétricos são responsáveis por 70% do consumo de energia elétrica nas indústrias. Estas máquinas são largamente utilizadas na indústria, uma vez que são robustas, duráveis, apresentam facilidade de manuseio, com baixo custo de aquisição e manutenção.

2.1.1 Motores de indução trifásicos

Os motores de indução trifásicos são conhecidos por serem de excitação simples, uma vez que a potência é fornecida apenas aos enrolamentos do estator do motor (UMANS, 2014). Os MIT são alimentados por um conjunto de tensões trifásicas defasadas de 120° elétricos. Além disso, podem ser ligados em Δ ou em Y (PAIVA, 2019). Em suma, o estator de uma máquina de indução é fisicamente similar ao de uma máquina síncrona. Entretanto, o rotor é curto-circuitado e as correntes são induzidas por meio de enrolamentos do estator por efeito transformador. Este trabalho, por se tratar da viabilidade econômico-financeiro, não abordará detalhes contrutivos das máquinas CC e CA.

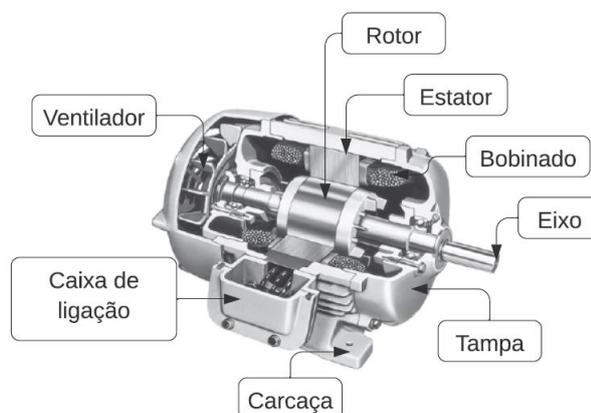
Os rotores dos MIT podem ser classificados em rotor em gaiola de esquilo e rotor bobinado (anel). Os motores com rotor gaiola de esquilo são constituídos de barras acopladas nas ranhuras da superfície do rotor e ligados em curto-circuito por meio de anéis de curto (CHAPMAN, 2013). Os motores de rotor bobinado dispõem de um circuito trifásico estendido no enrolamento do rotor. Os terminais trifásicos são ligados normalmente em Y e conectados ao eixo do rotor. Os rotores bobinados apresentam desvantagens em relação ao rotor gaiola de esquilo em virtude do alto custo e por necessitarem de manutenções frequentes devido às escovas e anéis deslizantes.

2.1.2 Motores assíncronos trifásicos com rotor em gaiola

Motores assíncronos estão presentes principalmente em ambientes industriais nos processos que requerem variação de velocidade. Trata-se de uma máquina robusta e de construção simples, como pode ser observado na Figura 3, tornando o custo de aquisição baixo. Os motores são denominados de indução, pois observa-se tensões induzidas nos enrolamentos do rotor. Uma das características que difere os motores de indução dos demais é que para estas máquinas funcionarem não se requer uma corrente de campo CC.

Na Figura 3 é apresentado um corte longitudinal de um rotor de indução trifásico tipo gaiola de esquilo. Os enrolamentos neste tipo de motor são constituídos por barras acopladas em ranhuras no entreferro do rotor e os anéis condutores são responsáveis por curto-circuitar cada terminal dos enrolamentos. Esse tipo de motor apresenta características construtivas vantajosas sobre os motores de rotor bobinado devido à sua construção robusta e simples.

Figura 3 - Corte longitudinal motor de indução trifásico tipo gaiola de esquilo.



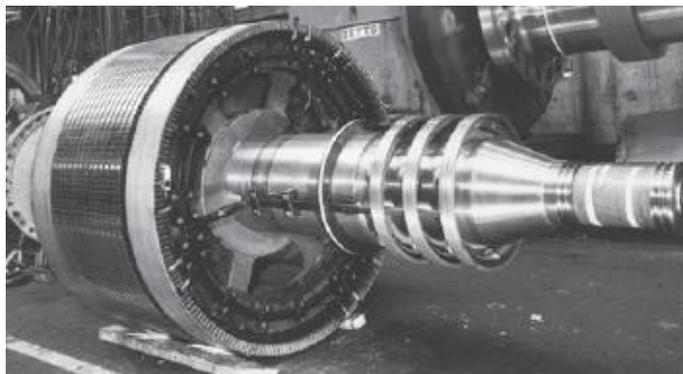
Fonte: Adaptado de Chapman (2013).

2.1.3 Motores assíncronos trifásicos com rotor bobinado

O rotor bobinado é o segundo tipo de rotor de uma máquina de indução trifásica. Os terminais do rotor possuem anéis isolados acoplados ao eixo (SILVA F. B., 2015). A Figura 4 exibe o rotor bobinado de uma máquina de indução trifásica. Os

motores de rotor bobinado não são usados com grande frequência em comparação com os motores de gaiola de esquilo devido ao fato de serem utilizados em processos específicos e custo de aquisição ser alto.

Figura 4 – Rotor de um motor de indução trifásico tipo rotor bobinado.



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

2.2 Influência da temperatura na vida útil do motor

Os motores elétricos devem ser contruídos de forma que não sofram influência do ambiente no qual estão inseridos em termos de isolação e vida útil. A temperatura é um fator que contribui para afetar a vida útil dos motores (DA SILVA, 2009). A temperatura de operação do motor de indução trifásico, pode ser alterada devido às seguintes situações: sobrecarga, aumento da temperatura ambiente, altitude, comprometimento do sistema de ventilação, desgaste mecânico, particulados, dentre outros. O aumento da temperatura advém pricipalmente do estator, rotor e mancais de rolamento. Conforme especificado no norma (NBR 7094 ABNT, 2003) e IEC 60034-1, as máquinas elétricas possuem faixas de temperatura na qual podem operar e tem-se classes de isolamento preestabelecidas.

2.2.1 Classe de isolamento

A classe de isolamento define a temperatura máxima em que o enrolamento do motor poderá operar sem sofrer danos (WEG, 2020). As classes de isolamento podem ser divididas em cinco partes, como pode-se observar na Tabela 1.

Tabela 1 – Classe de isolamento: temperatura ambiente de 40°C.

Classe de isolamento	Temperatura ambiente (°C)
A	105°C
E	120°C
B	135°C
F	150°C
H	180°C

Fonte: Adaptado de WEG Guia Especificação (2020).

A Tabela 2 apresenta as temperaturas do ponto mais quente especificadas por normas, e algumas outras características, como a temperatura ambiente máxima de 40°C e que a diferença da temperatura média e do ponto quente, varia dentro de uma pequena faixa de 5°C de acordo com o motor (WEG GUIA ESPECIFICAÇÃO , 2020). De acordo com a classe de isolamento, a norma especifica uma temperatura ambiente máxima, como também uma elevação na temperatura. A Tabela 2 especifica a temperatura admissível do ponto mais quente de acordo com o tipo de isolamento. Nos casos em que os motores operam dentro da faixa de temperatura pré-estabelecida, a vida útil média estimada é de 20.000 horas.

Tabela 2 – Temperatura admissível do ponto quente.

Classe de isolamento		A	E	B	F	H
Temperatura ambiente	°C	40	40	40	40	40
Δt = elevação de temperatura	°C	60	75	80	105	125
Diferença entre o ponto mais quente e a temperatura média	°C	5	5	10	10	15
Total: temperaturado ponto mais quente	°C	105	120	130	155	180

Fonte: Do autor.

2.2.2 Altitude de operação

Os motores que operam em altitudes superiores a 1.000 m acima do nível do mar podem sofrer alteração no tempo de vida útil. Desta forma, a altitude em que o motor será instalado deve ser levada em consideração, assim como a temperatura de 40°C.

A norma (NBR 7094 ABNT, 2003) estabelece que para motores instalados em altitudes entre 1.000 m a 4.000 m e temperatura ambiente de 40°C, pode haver alteração na isolação térmica. Deste modo, haverá uma redução de 1% dos limites máximo de temperatura para cada classe de isolação. Uma vez que, altas altitudes causam rarefação, conseqüentemente aumentando a temperatura do motor e reduzindo o arrefecimento. A elevação da temperatura, acarretará o aumento das perdas por efeito joule, assim reduzindo a vida útil dos enrolamentos.

2.3 Manutenção em motores

O termo manutenção surgiu na Revolução Industrial durante o século XVIII, devido à necessidade de se manter o ativo funcionando em boas condições. Deste modo, as manutenções feitas nesses ativos eram necessariamente corretivas uma vez que, não havia um plano sistemático de manutenção, bem como ausência prévia

de diagnóstico e de prevenção a falha (PERES & LIMA, 2008). A ausência de mão de obra especializada, acarretava alterações e danos às máquinas e por consequência uma redução no desempenho do ativo.

As organizações estão mais exigentes quando o assunto é confiabilidade e disponibilidade de ativos. Isso se deve ao fato de que a inoperabilidade de um ativo reduz a eficiência operacional e acarreta perdas financeiras e energéticas. Deste modo, a manutenção de ativos tornou-se indispensável. Dentre diversos benefícios que a manutenção preventiva proporciona aos equipamentos, o prolongamento da vida útil operacional do ativo é a principal (FRANCO, JUNIOR, & RIBEIRO, 2015).

Kardec & Nascif (2001) relatam que a manutenção de ativos está ligada diretamente aos resultados produtivos da empresa, uma vez que, a manutenção correta deste ativo proporcionará o aumento da vida útil. Deste modo, a manutenção é inclusa nos pilares estatégicos das grandes empresas, a fim de aumentar a lucratividade e manter os ativos operando de forma eficiente.

A manutenção periódica dos ativos representa uma parcela significativa em termos de custo, em razão de que a manutenção engloba todas as ações técnicas e administrativas. Dentre estas ações estão a supervisão, mão de obra, plano de manutenção e gerenciamento (CARVALHO, 2005). A manutenção é subdividida em duas classes, as manutenções corretivas e preventivas.

2.3.1 Manutenção corretiva

Nunes (2001) define a manutenção corretiva como a manutenção realizada em máquinas após a ocorrência de falhas. Esse tipo de manutenção pode ainda ser definida como ação praticada sobre o ativo, objetivando recuperar suas características, de modo que o mesmo retorne à operação. Em alguns casos, a falta de planejamento prévio de manutenção afetará o todo o processo produtivo, causando assim, perdas financeiras devido à paralisação da produção e a substituição imediata do equipamento.

Outro fator a ser levado em consideração durante a manutenção corretiva é o rebobinamento. Este processo consiste em manter as bobinas ou simplesmente enrolar as bobinas. A rebobinagem é necessária quando há danos nos enrolamentos do motor devido a queima. Porém diversas causas podem levar a esta queima, como

por exemplo o curto entre espiras, bobina curto-circuitada, curto entre fases, pico de tensão, curto na conexão, curto na saída da ranhura, curto no interior da ranhura, desbalanceamento de tensão, sobreaquecimento, falta de fase na ligação estrela / triângulo e rotor travado (WEG, 2017). O processo de rebobinagem é frequentemente escolhido como primeira opção pelas empresas quando o motor queima, visto que a aquisição de um novo motor é mais elevado. Entretanto, segundo estudos apresentados por Procel Info (2017), ao rebobinar o motor elétrico o rendimento pode decair entre 1% a 5 %. Ribeiro et al. (1988) citam que após dez anos de vida útil, as perdas no rendimento pode chegar até 5% caso o motor seja rebobinado.

2.3.2 Manutenção preventiva

A manutenção preventiva é definida como a manutenção realizada em situações em que não ocorreram falhas (NUNES, 2001). A fim de evitar possíveis falhas, a manutenção preventiva deve ser efetuada, conseqüentemente, aumentando a confiabilidade e a disponibilidade física do equipamento. Geralmente as empresas adotam a manutenção preventiva programada, de modo que, a probabilidade de falhas seja reduzida.

A manutenção preventiva é dividida em outras duas categorias, sendo elas a manutenção sistemática e a preditiva. A manutenção preventiva sistemática é requerida quando o estado de falha é causado por desgaste. De acordo com o tempo de vida útil do ativo, algumas partes tendem a se desgastarem mais. Isso é, a manutenção deve ocorrer de forma sistemática. Entretanto, quando a manutenção preventiva não decorre do desgaste, sendo planejada por meio de critérios estatísticos, é dita preditiva. Esse tipo de manutenção requer testes e análises periódicas acerca das características técnicas do motor.

2.4 Dimensionamento do motor

O dimensionamento do motor elétrico é fundamental para que estas máquinas tenham um desempenho eficiente. A ineficiência do motor elétrico pode ser dividida em: superdimensionamento, manutenção inadequada, uso de motores de baixo desempenho e o tipo de carga acoplada no motor (FERNANDES & SILVA, 2009).

Um motor é dito superdimensionado quando a carga acoplada requer uma potência muito inferior à potência nominal do motor. Sendo assim, as cargas que exigem uma potência entre 75% e 100% da nominal da máquina são considerados motores com dimensionamento correto. O sobredimensionamento do motor traz diversos malefícios, dentre eles pode-se destacar o baixo desempenho, redução do fator de potência e aumento na corrente de partida (FERNANDES & SILVA, 2009). O carregamento ou percentual de carga (%carga) expressa o quanto de potência elétrica é entregue ao eixo (DELAIBA, 2008). Diversos estudos apresentados pela literatura, recomendam um carregamento mínimo de 75%, visto que abaixo deste valor, o sistema é considerado sobredimensionado para a carga.

Outro fator que provoca a ineficiência dos motores elétricos são as manutenções feitas. Em geral, uma manutenção incorreta acarreta na redução do rendimento do motor, como pode ser visto na seção 2.6.

Por fim, devemos levar em consideração o tipo de acoplamento feito entre motor-carga. O acoplamento transfere a potência que é produzida pelo motor à carga, todavia, um acoplamento mal projetado, afeta diretamente a potência entregue. Diversos tipos de acoplamentos são usados pelas indústrias, sendo as principais por polias, direto, caixa de engrenagens e correias.

Este trabalho desdobrará diversos testes considerando um sistema sobredimensionado, com a substituição direta e por redimensionamento. Além de simular dois ranges de percentual de carga.

2.5 Técnicas de análise financeira

A análise econômico-financeiro nos permitirá analisar a viabilidade de substituição de motores de baixo rendimento por motores de alto rendimento. A análise econômica possibilitará quantificar o retorno financeiro para um dado investimento, bem como o *payback* (tempo de retorno) e o VPL (Valor Presente Líquido).

O objetivo da análise econômica é apresentar o custo com o investimento inicial, o custo operacional, tanto quanto a economia obtida ao longo dos anos (SILVA M. A., 2009). A partir da análise de todos os parâmetros citados acima, verifica-se se a troca do motor elétrico é ou não viável. De antemão, é necessário avaliar dois cenários

durante o primeiro consiste na compra de um novo motor para uma dada instalação nova. O segundo cenário estuda a aquisição de um motor mais eficiente, a fim de substituir o motor ineficiente instalado. Este trabalho apresentará um estudo acerca do segundo cenário.

A primeira etapa da análise financeira consiste em avaliar se há caixa para a aquisição de um novo motor. A aquisição de um motor de alto rendimento é maior em comparação a um motor padrão. Porém, em relação a custo versus benefício, os motores de alta eficiência se destacam, uma vez que esses motores apresentam um rendimento maior para mesma dada faixa de potência em relação ao motor padrão. A análise econômica embasará todo o estudo que será apresentado no decorrer desta monografia e nos permitirá decidir pelo melhor investimento. A seguir serão descritos os métodos usados para verificar a viabilidade de substituição dos motores elétricos, estando dentre os métodos o VPL e *payback*.

2.5.1 Valor Presente Líquido

O Valor Presente Líquido é uma técnica que permite avaliar o valor do dinheiro no tempo (URTADO, 2009). Utiliza-se o VPL para verificar a viabilidade do plano de troca, avaliando o comportamento do investimento ao longo do tempo (GARCIA, 2003). O VPL permite analisar se o investimento feito será rentável ou não e pode ser obtido pela seguinte equação.

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_i}{(1+i)^j} - FC_0 \quad (2.1)$$

VPL: Valor Presente Líquido;

FC_i : Dados de entrada e saída do caixa em cada intervalo de tempo;

FC_0 : Investimento inicial;

i : Taxa de desconto;

j : período [meses ou anos];

n : tempo total [meses ou anos];

A seguir descreve-se os intervalos os quais o VPL pode assumir:

- VPL maior que zero: investimento atrativo economicamente, visto que o valor da receita é maior que o das despesas.
- VPL igual a zero: investimento minimamente atrativo economicamente.
- VPL menor que zero: investimento economicamente inviável, uma vez que as despesas se tornam maiores do que a receita.

2.5.2 Payback

Payback é o método usado para analisar o tempo de retorno de um investimento (CORREIA & RODRIGUES, 2017). Por meio desta técnica avalia-se o fluxo de caixa ao longo dos anos e estima-se o tempo para recuperar o investimento inicial (URTADO, 2009).

O *payback* ou o período de repagamento permite determinar a quantidade de períodos necessários para recuperar o investimento (MOTTA et al., 2009). Este método não é exato e deve ser utilizado como parâmetro, uma vez que o mesmo baseia-se no fluxo de caixa (GUIMARÃES & MARTINS, 2021).

Para Brito (2003), ao analisar o *payback* de um dado fluxo de caixa dentro de um período de dez anos, o mesmo se mostra distinto para cada empresa analisada. Entretanto, este método se mostra vantajoso, pois apresenta a liquidez do projeto em análise, sendo assim o risco de não recuperar o investimento inicial é menor devido a análise. Quanto mais líquido o projeto, menor é o risco, bem como quanto menor a liquidez maior o risco.

2.5.3 Taxa Interna de Retorno

A Taxa Interna de Retorno também conhecida por TIR é utilizada para analisar o retorno financeiro percentualmente (URTADO, 2009). Sendo assim, é a taxa de desconto que anula o VPL. A partir da TIR, pode-se analisar até qual taxa o projeto se mostra rentável. O cálculo desta taxa é dada por:

$$FC_0 = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} \quad (2.2)$$

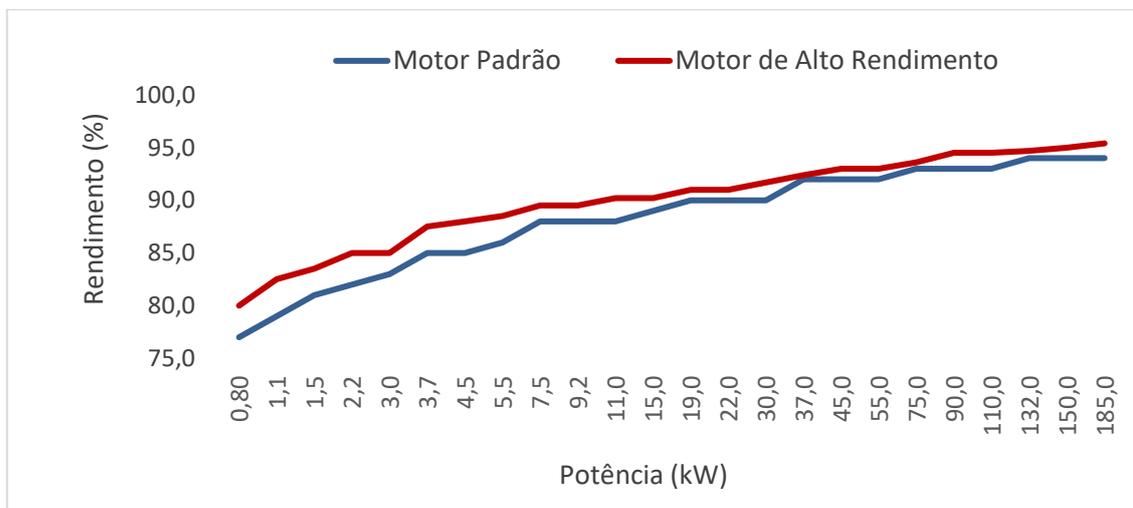
3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Este trabalho apresentará um estudo de caso acerca da viabilidade econômico-financeira em substituir motores elétricos de baixa eficiência por motores de alta eficiência. Segundo a Abramam (Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos) 20% dos motores elétricos nas indústrias excederam 25 anos em operação (WEG, 2017). Portanto, há diversas oportunidades para redução do consumo de energia quando se trata de motores elétricos, principalmente quando se observa a longevidade operacional. Quando se aborda o estudo sobre a troca de motores ineficientes, diversos autores limitam as pesquisas até 7,35 kW ou 10 CV, uma vez que o investimento monetário é relativamente baixo e o tempo de retorno é menor (SILVA M. A., 2009).

Diante da escassez de estudos sobre a viabilidade de troca dos motores com potências mais elevadas, este trabalho versa sobre técnicas financeiras que auxiliam na troca de motores ineficientes. O Ministério de Minas e Energia lançou uma campanha que visa estimular os fabricantes a produzirem motores de alto rendimento. Em razão da Portaria Interministerial número 1 lançada em 2017, estabeleceu-se o índice de rendimento IR3 como padrão de fabricação para motores elétricos. Os motores IR3 (Índice de Rendimento *Standart Premium* de 95,1%) são máquinas que atendem a legislação vigente, já os motores IR2 (Índice de Rendimento mínimo de 93,9%) e IR1 (Índice de Rendimento mínimo de 90,2%) não atendem ao escopo da Portaria 553 de nº1. Diversas empresas que possuem um parque fabril com motores elétricos de baixo rendimento estabelecido por norma estão buscando se adequar à portaria.

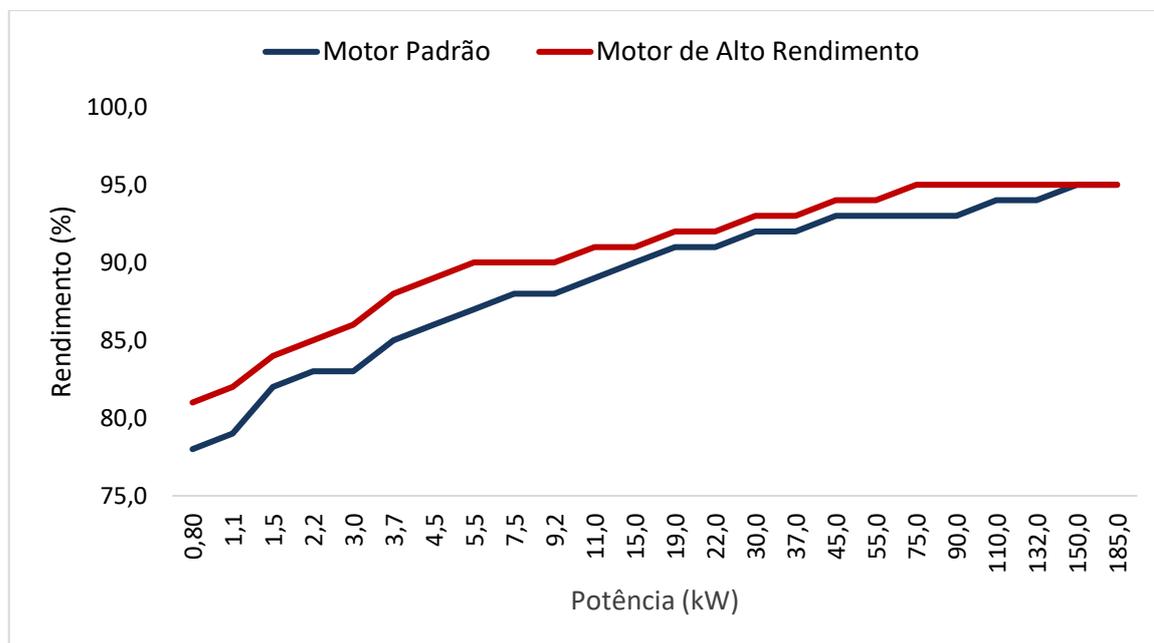
Entretanto, a aquisição de um novo motor engloba o preço inicial (FREITAS, 2014). Porém, os motores de alta eficiência apresentam um rendimento maior em comparação aos motores padrão. As figuras 5 e 6 comparam o rendimento em relação a potência para os motores de 2 e 4 pólos respectivamente.

Figura 5 – Comparação entre rendimentos de motores padrão e de alto rendimento de 2 pólos.



Fonte: Adaptado de Silva (2009).

Figura 6 – Comparação entre rendimentos de motores padrão e de alto rendimento de 4 pólos.

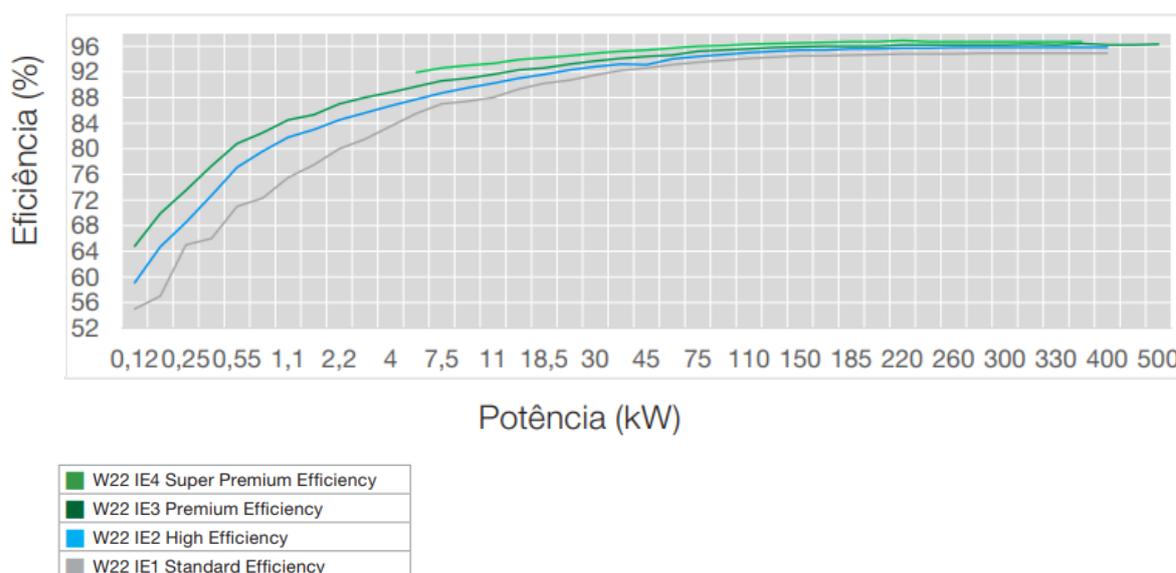


Fonte: Adaptado de Silva (2009).

Ao compararmos o rendimento entre as duas classes de motores, observa-se que há uma diferença significativa entre motores padrão e de alta eficiência, principalmente para motores de até 15 kW. Este fato deve-se à qualidade empregada na forma

contrutiva. Porém, algumas empresas, como por exemplo a WEG, tem desenvolvido motores de alta potência e mantendo a qualidade elevada, como é o caso do motor IR5 (Índice de Rendimento de 96,5%) *Ultra Premium*, que supera em dois níveis o rendimento mínimo preestabelecido pela Portaria Interministerial nº1. Além disso, os motores padrão são ineficientes, como constata-se ao analisar a Figura 7, uma vez que consomem mais energia. O uso de motores com altos níveis de eficiência reduzem o consumo de energia elétrica, dado que essas máquinas apresentam um desempenho melhor para uma mesma potência, além de garantir uma maior economia. Conseqüentemente, ao adotar motores de alta eficiência, as empresas contribuem na redução de carbono que causam o efeito estufa, como também se tornam mais competitivas no mercado.

Figura 7 – Eficiência energética de motores padrão e de alta eficiência de 4 pólos.



Fonte: (WEG, 2020)

Dado este cenário, a eficiência energética busca otimizar o consumo de energia. O estudo de caso desta monografia, contempla um conjunto de 8 motores com potências de: 258, 294, 441, 589 e 669 kW, fabricados pela BBC e Toshiba. Estes motores apresentam um rendimento abaixo de 87%, estão em operação há mais de 25 anos, são robustos e possuem tecnologia construtiva obsoleta. Os dados técnicos

foram coletados em campo e estão resumidos na tabela 3, porém o Anexo 1 descreve de forma mais detalhada as informações dos motores.

Tabela 3 – Descrição técnica resumida dos motores de baixa eficiência

Aplicação	Qtd	Potência (kW)	Rotação (rpm)	Índice de Rendimento	Rendimento (%)	Fabricante
Bomba de vácuo	3	258	1188	IR1	0,89	BBC
Bomba de vácuo	1	294	1188	IR1	0,89	BBC
Bomba de vácuo	1	441	1185	IR1	0,89	Toshiba
Bomba Centrífuga	2	589	1189	IR1	0,89	BBC
Bomba Centrífuga	1	669	1190	IR1	0,89	BBC

Fonte: Do autor.

A fim de reduzir o percentual de consumo de energia elétrica na planta em estudo, este trabalho propõe um estudo de técnicas financeiras que servirão de base para viabilizar a substituição dos motores ineficientes. Entretanto, devido à pandemia, não foi possível adentrar na empresa a qual serve de base para o presente estudo e efetuar as medições necessárias. Sendo assim, serão abordadas duas técnicas baseadas em cálculos que estimam os valores reais que não puderam ser coletados. Essas técnicas serão apresentadas no Capítulo 4 de metodologia.

4 METODOLOGIA

As técnicas utilizadas neste trabalho para análise da viabilidade da substituição de motores de baixa eficiência consistem no redimensionamento da potência do motor e na substituição direta do motor. A primeira técnica consiste em redimensionar a potência do novo motor de acordo com o percentual de carga que o motor antigo aciona. A segunda técnica corresponde à troca do motor antigo por um novo de mesma potência, neste caso, a economia provém da diferença entre os redimentos das máquinas. Cada uma das técnicas serão apresentadas nesta seção, porém, fazer-se-á necessário algumas observações.

No decorrer de seis meses, analisou-se o consumo de energia da indústria em estudo e constatou-se um consumo de energia significativo. Sabe-se que a força motriz é responsável por dois terços do consumo de energia no setor industrial. Dado este fato, para reduzir o consumo de energia elétrica, foi feito um plano de troca de motores elétricos ineficientes e com vida útil superior a 25 anos. Em conjunto com a engenharia e a operação foram decididos os motores que iriam compor a primeira lista. Os critérios para a escolha desses motores foram: (i) motores com baixo rendimento, (ii) em operação há mais de 25 anos e (iii) grau de prioridade (criticidade).

4.1 Coleta dos dados técnicos

Dado o contexto acima, foram selecionados oito motores elétricos padrão, fabricados por BBC e Toshiba, com índice de rendimento IR1, potências de 258, 294, 441, 589 e 669 kW. Na Tabela 3 pode-se observar a descrição de algumas características, contudo na Tabela 17 do Anexo I é apresentado as demais informações não supridas na Tabela 3 abaixo.

Em posse da lista, verificou-se que sete dos oito motores selecionados para estudo foram fabricados pela BBC. E por não mais comercializarem tais motores, as informações preliminares limitaram-se aos dados de placas. Verificou-se com a equipe de engenharia da empresa em estudo sobre a folha de dados dos oito motores, porém, a mesma não possui estas informações no banco de dados. Um dos pontos críticos ao estudar a viabilidade de troca de motores antigos é a falta de dados.

A próxima etapa consistiu no levantamento de campo dos dados mecânicos do motor. Os dados foram coletados durante uma manutenção preventiva, utilizando-

se um paquímetro. Os dados coletados foram: largura da base, comprimento entre bases, largura da chaveta, diâmetro do eixo e tipo de carcaça.

Os motores instalados estão sobredimensionados, ou seja, o percentual de carga está abaixo de 75%. Para efetuar as duas técnicas tanto de redimensionamento, como de substituição direta dos motores, faz-se necessário coletar as correntes de partida de cada máquina, bem como o comportamento em regime permanente e o consumo de energia. Porém, devido ao Covid-19, a empresa em estudo restringiu o acesso à área para evitar a propagação do vírus, então não foi possível adentrar na planta e instalar o analisador de energia. Este dispositivo permitiria a coleta dos dados necessários para o estudo, como tensão, corrente e consumo de energia elétrica. Todavia, dado que a instalação do analisador de energia mostrou-se inviável, o estudo apresentado neste trabalho será baseado em cálculos. No entanto, todo o estudo apresentado neste trabalho poderá ser reproduzido em posse das medições. Sendo assim, as técnicas serão implementadas no *software* Excel, bem como os gráficos.

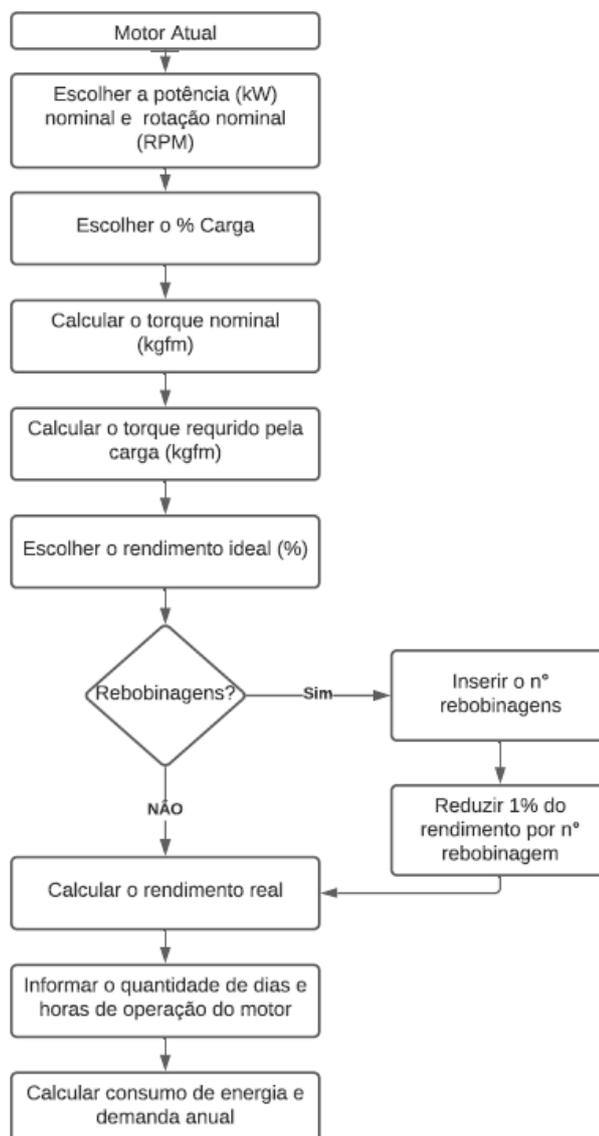
4.2 Redimensionamento da potência do motor

Para redimensionar a potência do motor atual faz-se necessário obter os seguintes dados: potência nominal, rotação nominal, percentual de carga, torque nominal, torque requerido pela carga, rendimento ideal, número de rebobinagens, perda de eficiência por rebobinagem, rendimento real, as horas e dias de operação, demanda e consumo de energia. Para melhor compreensão sobre o redimensionamento, esta técnica será dividida em duas etapas, sendo elas a obtenção dos dados do motor atual (instalado) e o motor indicado para a substituição.

4.2.1 Motor atual

A primeira etapa consiste em calcular os dados referente ao motor atual, ou seja, o motor a ser substituído. A Figura 8 apresenta um fluxograma lógico que resume as etapas necessárias para a análise. Primeiro, deve-se inserir a potência nominal do motor atual, bem como a rotação nominal. Esses dados podem ser obtidos por meio dos dados de placa do motor.

Figura 8 – Fluxograma lógico para obtenção dos dados do motor atual.



Fonte: Do autor.

Após a coleta desses dados, deve-se coletar o percentual de carga do motor. Este dado é coletado por meio de um analisador, porém como este dado não pôde ser medido devido às explicações anteriores, este dado é estimado. Sendo assim, adota-se neste trabalho um percentual de carga de (50% e 75%) para cada um dos motores, de modo que a análise abranja uma ampla faixa de percentual de carga do motor em regime de trabalho. Esses valores são estimativas dos carregamentos dos motores em estudos e que estão instalados na empresa mineradora.

O torque nominal do motor pode ser obtido por meio da seguinte equação:

$$P = \tau N \frac{2\pi}{60} \quad (4.1)$$

onde P: potência nominal do motor em [W];

τ_{nom} : Torque nominal do motor em [Nm];

N : Velocidade do motor em [RPM]

$$\tau_{nom} = \frac{60P}{2\pi N} (Nm) \quad (4.2)$$

$$\tau_{nom} = \frac{30P}{\pi N} \quad (4.3)$$

$$\tau_{nom} = 9,5492 \frac{P}{N} \quad (4.4)$$

Sabe-se que 1 Nm corresponde a 9,81 kgfm, então para obtermos o torque em kgfm, dividir a equação 4.4 por 9.81. Então, tem-se que:

$$\tau_{nom} = \frac{9,5492}{9,81} \cdot \frac{P}{N} (Kgf\cdot m) \quad (4.5)$$

$$\tau_{nom} = 0,974 \cdot \frac{P}{N} \quad (4.6)$$

O torque nominal do motor dado pela equação 4.6 é medido em kgfm. Em seguida, deve-se calcular o torque requerido pela carga que é acionada pelo motor antigo. Para tal, basta multiplicar o torque nominal da máquina pelo percentual da carga. Então, tem-se que:

$$\tau_{carga} = (\tau_{nom}) \times (\%Carga) \quad (4.7)$$

Verique na Figura 8 que, ao obter o torque requerido pela carga, deve-se escolher o rendimento ideal do motor, ou seja, o rendimento especificado nos dados de placa da máquina. O próximo passo deve-se observar se o motor foi rebobinado, caso não, deve-se prosseguir para a próxima etapa. Caso contrário, será inserido o número de rebobinagens feitas ao longo da vida útil do motor. Como abordado anteriormente, para cada rebobinamento o rendimento é reduzido em 1%. O rendimento real é afetado pelas rebobinagens sofridas pelo motor ao longo dos anos, e podemos obtê-lo da seguinte forma:

$$\eta_{real} = \eta_{ideal} - (n^{\circ}\text{rebobinagens} \times 1\%) \quad (4.8)$$

Neste trabalho, considera-se que o motor funciona 24 horas por dia e durante 365 por ano. Este valor poderá ser alterado de acordo como equipamento em estudo e empresa. Em posse dos dados, calcula-se então a demanda e o consumo anual de energia de cada motor elétrico.

A demanda em kWh é obtida por meio da equação a seguir:

$$D = \frac{P_{nom} \times (\%Carga)}{\eta_{real}} \quad (4.9)$$

onde D : é a demanda em [kWh];

P_{nom} : é a potência nominal do motor [kW];

% Carga : é o percentual da carga em regime de trabalho;

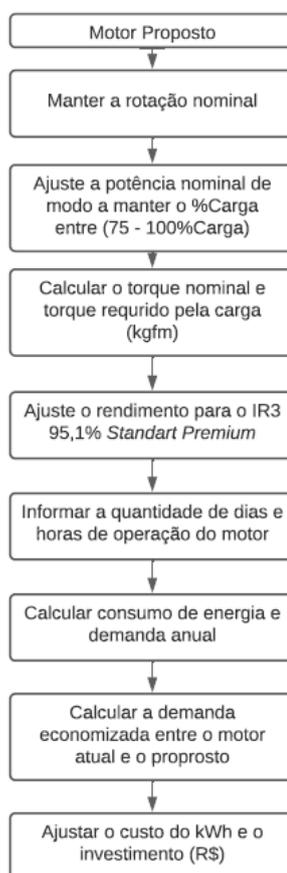
E por fim, o cálculo do consumo de energia é dado por:

$$Consumo = \frac{P_{nom} \times (horas \text{ por dia}) \times (dias \text{ do ano}) \times (\%Carga)}{\eta_{real}} \quad (4.10)$$

4.2.2 Motor a ser indicado para a substituição

A segunda etapa para redimensionar o motor elétrico consiste em determinar e calcular alguns parâmetros de forma semelhante à seção do motor atual. A Figura 9 apresenta o fluxo necessário para redimensionar o motor. Inicialmente, a rotação do motor deve ser a mesma do motor atual, bem como as horas por dia e a quantidade de dias em funcionamento por ano.

Figura 9 – Fluxograma lógico para obtenção dos dados do motor indicado.



Fonte: Do autor.

A potência nominal deve ser ajustada de modo que, o percentual da carga em regime de trabalho do motor indicado permaneça acima de 75%, visto que acima deste valor considera-se que o sistema não esteja sobredimensionado. No caso do motor indicado, o percentual da carga é dado por:

$$\%Carga = \frac{\tau_{carga}}{\tau_{nom}} \quad (4.11)$$

onde %Carga: é o percentual da carga em regime de trabalho.

O valor do %Carga é determinado pela razão do torque na carga e o torque nominal. Do mesmo modo, o torque depende da potência nominal, que por sua vez é ajustada de forma a manter o percentual da carga entre 75 – 100%. Desta forma, torna-se viável redimensionar a potência do motor. O cálculo do torque nominal é o mesmo em relação à etapa 1, como também o torque requerido pela carga nas duas etapas são as mesmas, uma vez que a carga permanece igual, todavia, a potência do motor é ajustada de forma adequada para a carga.

O próximo passo consiste em determinar o rendimento do motor indicado. A Portaria Interministerial nº1 determina que o rendimento mínimo do motor *Standart Premium* de 95,1% a partir de 2017. Então, o rendimento adotado neste trabalho para o motor redimensionado será de 95,1%. A demanda e o consumo de energia são calculados da mesma forma apresentada nas equações 4.9 e 4.10.

Para se obter a demanda economizada tem-se a seguinte equação:

$$Demanda_{economizada} = D_{motorAtual}[kW] - D_{motorProposto}[kW] \quad (4.12)$$

onde:

$Demanda_{economizada}$: dada em [kW];

O cálculo da economia anual é dada por:

$$Economia_{anualMotorProposto} = Consumo_{motorAtual} - Consumo_{motorProposto} \quad (4.13)$$

onde:

$Economia_{anualMotorProposto}$: a economia é dado em [kWh];

$Consumo$: o consumo e dado em [kWh];

O economia com a substituição do motor atual pelo motor indicado é calculado por meio da equação a seguir:

$$Economia(\%) = \frac{Economia_{anualMotorProposto}}{Consumo_{MotorAtual}} \quad (4.14)$$

Para calcularmos o custo da economia anual, considerou-se R\$400 por MWh ou R\$0,40 por kWh, porém deve ser notado que este valor é alterado de acordo com a região e a empresa.

$$CustoDaEconomiaAnual = Economia_{anualMotorProposto} * 0,40 \quad (4.15)$$

onde:

CustoDaEconomiaAnual: é dado em [R\$];

E por fim o investimento é determinado pelo preço investido na compra do motor.

4.3 Substituição direta

A técnica da substituição direta consiste em substituir o motor atual por um motor mais eficiente de mesma potência. Sendo assim, a potência é fixa, ou seja, não há redimensionamento da potência do novo motor e o percentual da carga do motor indicado não é ajustado pela potência nominal do motor. Então, se o motor atual estiver sobredimensionado, ao adquirir um novo motor de mesma potência, a máquina se encontrará na mesma situação.

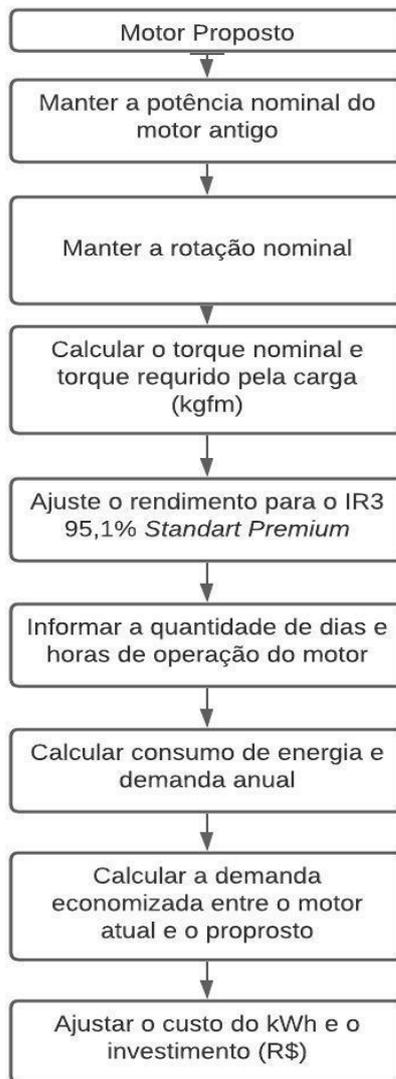
4.3.1 Motor atual

Os cálculos de torque nominal, torque requerido pela carga, rendimento real, demanda e consumo anual para o motor atual são os mesmos utilizados na seção 4.2.1. Nesta técnica, considerar-se-à duas rebobinagens, o rendimento do motor atual é ajustado de acordo com os dados de placa, as perdas no rendimento por rebobinagem de 1% e operação de 24 horas por dia, durante 365 dias por ano.

4.3.2 Motor a ser indicado

Nesta técnica, a potência nominal, rotação nominal, percentual de carga, torque do motor, torque requerido pela carga, horas por dia e dias por ano do motor indicado são mantidas iguais ao caso do motor atual, ou seja, não há redimensionamento de potência. Na técnica de substituição direta, o rendimento proposto para o novo motor obedecerá a legislação vigente e será especificado como IR3 de 95,1% *Standart Premium*. A demanda e consumo anual são calculados por meio das equações 4.9 e 4.10, respectivamente, permitindo analisar o fluxograma presente na Figura 10. A demanda economizada, economia e custo com a economia podem ser calculados conforme especificado na seção 4.2.1.

Figura 10 – Fluxograma lógico para obtenção dos dados do motor indicado.



Fonte: Do autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo aborda os resultados e as discussões acerca do estudo do redimensionamento da potência do motor, bem como a substituição direta do mesmo. As simulações tomaram por base motores com potências de 258, 294, 441, 589, 669 kW e com vida útil acima de 25 anos. Os dois casos foram simulados e estima-se que os motores instalados trabalhavam com carregamentos de 50% e 75%. De posse dos dados, foi implementado um modelo via *software* Excel, que permitiu simular a viabilidade econômica do projeto. Sendo assim, outros parâmetros foram levados em consideração:

1. Custo da energia elétrica: R\$400 por MWh ou R\$0,40 por kWh;
2. Quantidade: 8 motores;
3. Número de rebobinagens: 2;
4. Dia e horas em operação: 365 dias / 24 horas;
5. Investimento por motor: dado fornecido pela empresa em estudo.

O modelo retornará o *Payback*, a economia anual e percentual, como também a demanda economizada e o investimento a ser realizado. Tais métricas permitiram analisar o VPL, a TIR e *Payback*.

5.1 Caso 1: Redimensionamento

Neste primeiro caso as simulação executadas consideraram os dados contidos na tabela 3 e as descrições informadas no início da seção. A Figura 8 apresenta a metodologia utilizada no processo de redimensionamento. A seguir serão apresentados dois subcasos, o primeiro com o motor operando com 50% de carregamento e no segundo caso operando com 75% de carga.

Para os dois casos do carregamento, foram adotados os mesmos procedimentos. Inicialmente os dados técnicos de cada motor antigo foram inseridos na Tabela 4, e a mesma tem por saída a demanda e o consumo anual. Observe que o rendimento real sofre alteração de acordo com o número de rebobinagens feitas. Para cada rebobinagem feita, o motor sofre uma redução de 1% no rendimento real.

Tabela 4 – Modelo implementado para o motor antigo com %carga de 50% e 75%.

Motor Antigo		
Potência nominal	258	kW
Rotação nominal	1.188	rpm
% Carga	50,00%	%
Torque nominal	211,53	kgfm
Torque requerido pela carga	105,76	kgfm
Rendimento ideal	91,10%	%
Nº de rebobinagens	2	
Perda de rendimento por rebobinagem	1,00%	
Rendimento real	89,10%	
Horas/dia	24	horas
Dias/ano	365	dias
Demanda	144,78	kW
Consumo anual	2.536.565,66	kWh

Fonte: Do autor.

No método de redimensionamento da potência do motor, o torque requerido pela carga se mantém, tanto para o motor antigo quanto para o indicado. A partir dos dados de entrada, implementou-se um modelo que permite propor um motor mais eficiente e mantendo o torque requerido pela carga. Todavia, a simulação permite ajustar a potência nominal do motor e manter o carregamento acima de 75%, além de propor um rendimento mínimo IR3 de 95,1%. A Tabela 4 descreve um exemplo de um motor ineficiente de 258 kW, com carregamento de 50% e rendimento do 89,1%.

A partir das informações de entrada a Tabela 5 foi gerada. O modelo apresentado nesta tabela, propõe substituir o motor de 258 kW por um motor de 170 kW, com rendimento de 95,1%, carregamento de 75,88% e mantendo o torque requerido pela carga, bem como as mesmas horas e dias em operação.

Tabela 5 – Modelo implementado para o motor indicado com %carga ajustado.

Motor indicado		
Potência nominal	170	kW
Rotação nominal	1.188	rpm
% Carga	75,88%	%
Torque nominal	139,38	kgfm
Torque requerido pela carga	105,76	kgfm
Rendimento	95,10%	%
Horas/dia	24	horas
Dias/ano	365	dias
Demanda	135,65	kW
Consumo anual	1.565.930,60	kWh
Demanda economizada	9,13	kW
Economia %	38,27%	%
Economia anual	970.635,06	kWh
Valor do kWh	R\$ 0,40	R\$ / kWh
Custo da Economia anual	R\$ 388.254,02	R\$
Investimento	R\$ 170.044,01	R\$

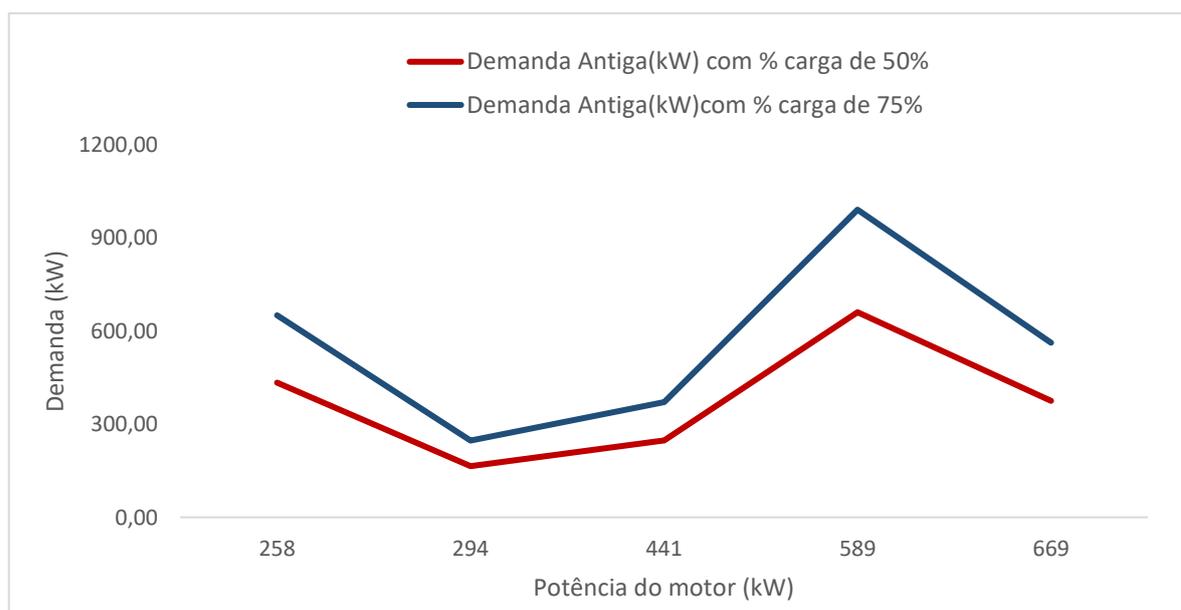
Fonte: Do autor.

Ao substituir o motor antigo pelo motor de alta eficiência proposto, haverá uma economia na demanda de 9,13 kW, um percentual econômico de 38,27%, como também um ganho energético de 970,6 GWh por ano, que representa uma economia anual de R\$388.254,25. E o projeto mostrou-se viável em um ano.

O exemplo acima ilustra a metodologia abordada para o estudo de viabilidade econômica ao substituir motores em uma planta industrial. Todavia, neste trabalho são estudados a substituição de oito motores elétricos. As Tabelas 6, 7, 8 e 9 trazem as informações resumidas de cada simulação.

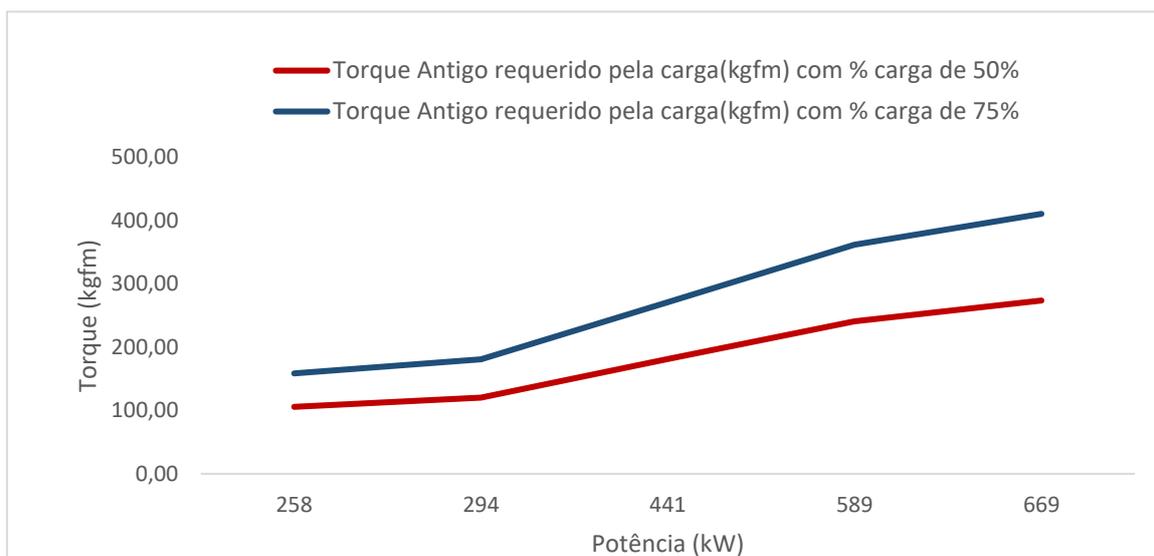
As Tabelas 6 e 7 apresentam os dados dos motores antigos com carregamento de 50% e 75% respectivamente. A Figura 11 apresenta a comparação entre as demandas dos motores antigos operando com carregamento de 50 e 75%. Nota-se que, quando o percentual de carga mantém-se em 75% a demanda aumenta. Este fato se deve ao aumento da potência que é entregue ao eixo da máquina, sendo assim a carga requer um torque maior. Este fato pode ser analisado na Figura 12. Entretanto, operar um motor abaixo de 75% do carregamento para reduzir a demanda acarreta na redução do rendimento, devido ao fato de aumentar as perdas no processo de conversão de energia elétrica para energia mecânica. O ideal é manter o carregamento próximo a 100%, uma vez que o rendimento aumenta de acordo com elevação do %carga. Com o motor bem dimensionado, haverá uma melhora significativa do fator de potência, redução da corrente de partida, além de melhorar o desempenho.

Figura 11 – Demanda do motor antigo para carregamento de 50% e 75%.



Fonte: Do autor.

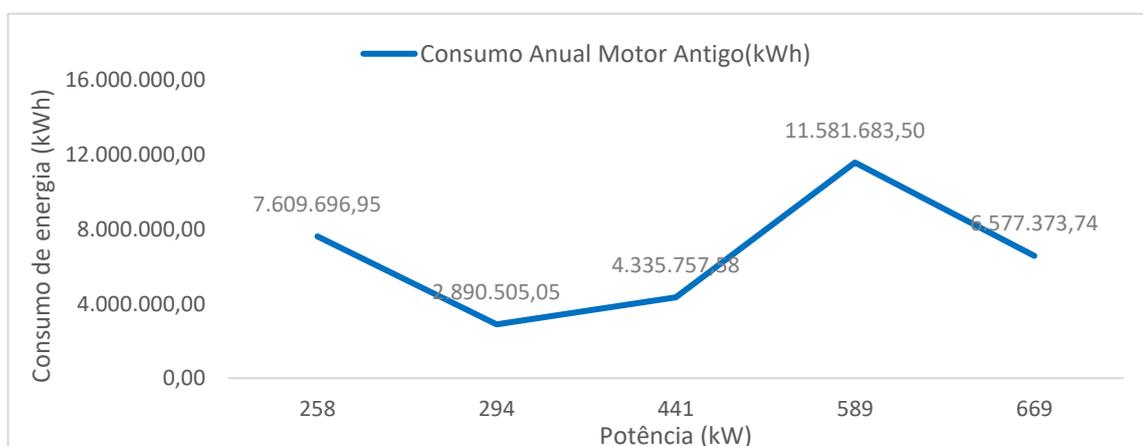
Figura 12 – Torque do motor antigo para carregamento de 50% e 75%.



Fonte: Do autor.

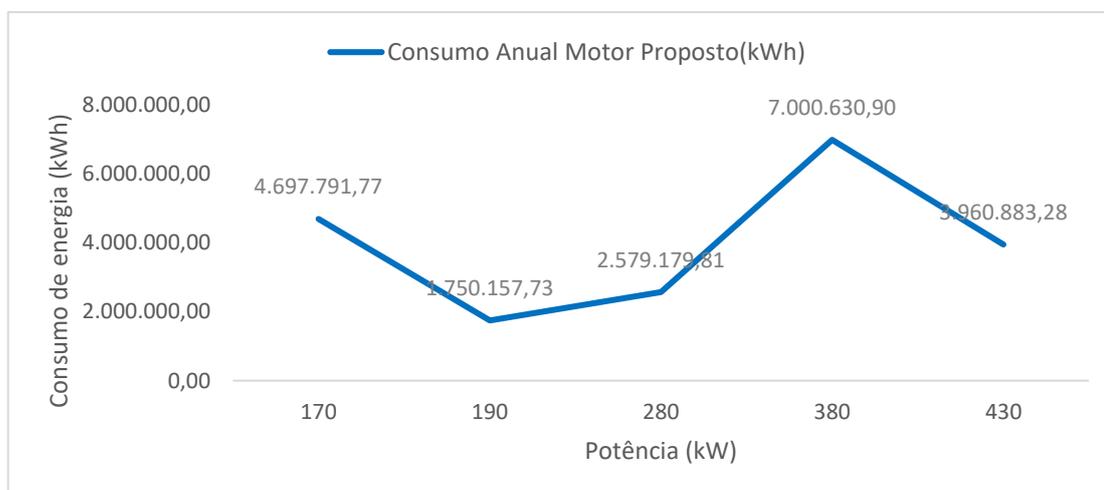
A partir dos dados compilados nas Tabelas 8 e 9, diversas análises foram feitas de modo a certificar a viabilidade de troca dos motores instalados. A primeira análise feita é a comparação do consumo de energia elétrica entre os motores antigos e os motores propostos. Contudo, foi levado em consideração dois cenários para os motores antigos. No primeiro cenário o motor operava com carregamento de 50% e no segundo com o carregamento de 75%. As Figuras 13, 14, 15 e 16 ilustram os resultados das simulações realizadas.

Figura 13 - Consumo anual de energia elétrica dos motores antigos com carregamento de 50%.



Fonte: Do autor.

Figura 14- Consumo anual de energia elétrica dos motores propostos com carregamento de 50%.

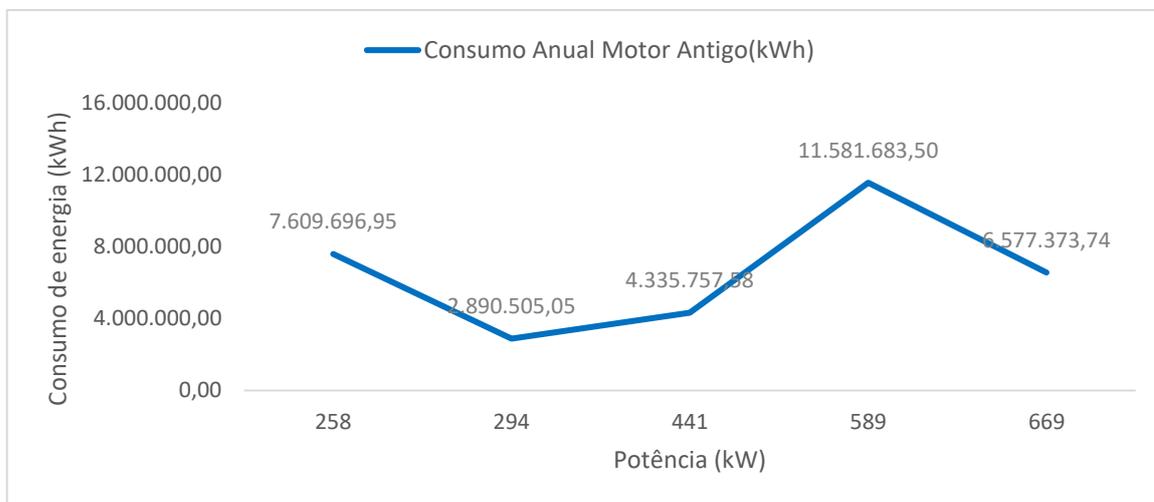


Fonte: Do autor.

Os motores antigos operando com 50% de carregamento apresentam um consumo de energia de 13 MWh a mais em relação aos motores redimensionados, como pode ser visto nas Figuras 13 e 14 respectivamente. Este fato ocorre, visto que os motores propostos operam com carregamento acima de 75%. A Figura 17 descreve o percentual de carga dos novos motores. Além disso, ao redimensionar a potência do motor para a potência que a carga solicita, há um aumento expressivo no rendimento do motor. Conseqüentemente, os novos motores apresentam um melhor desempenho.

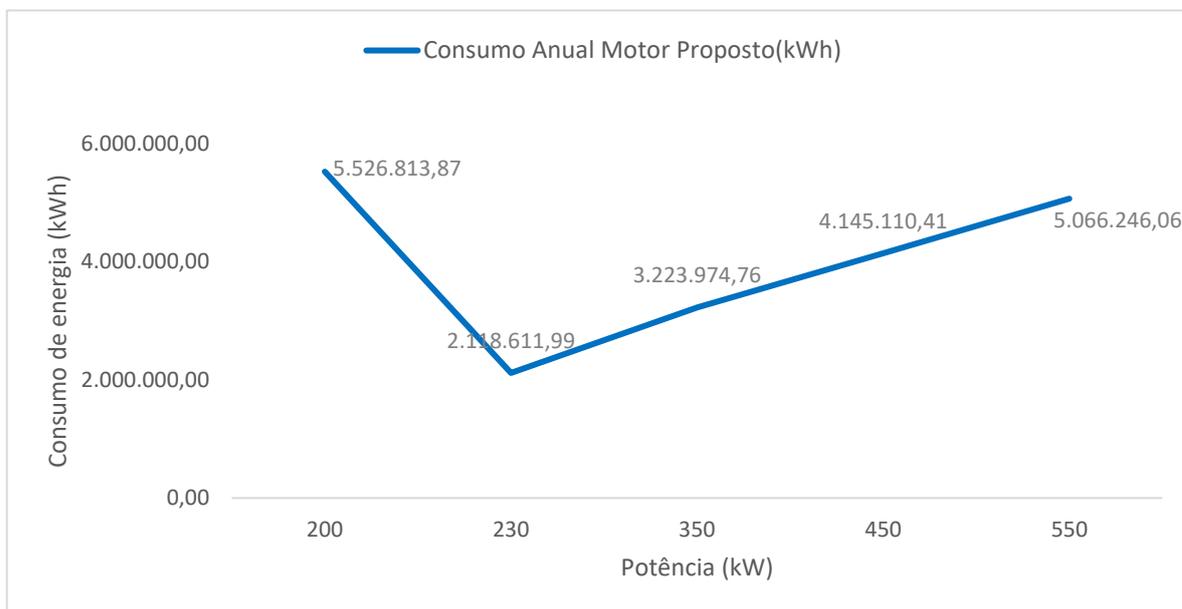
As Figuras 15 e 16 compilam os dados do consumo de energia elétrica dos motores antigos operando com 75% de carregamento e novos propostos respectivamente.

Figura 15 - Consumo anual de energia elétrica dos motores antigos com carregamento de 75%.



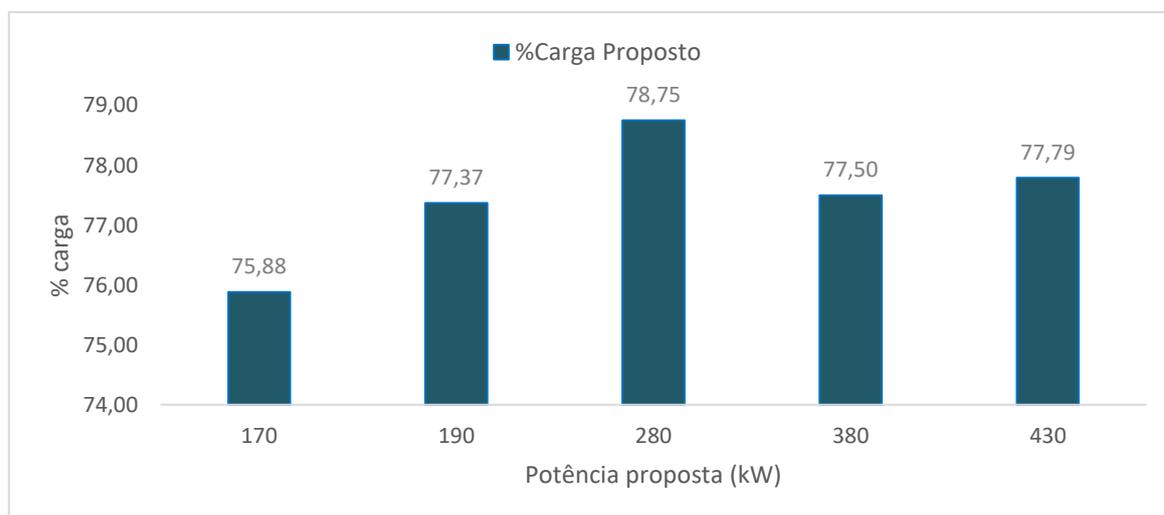
Fonte: Do autor.

Figura 16 - Consumo anual de energia elétrica dos motores propostos com carregamento de acima 75%.



Fonte: Do autor.

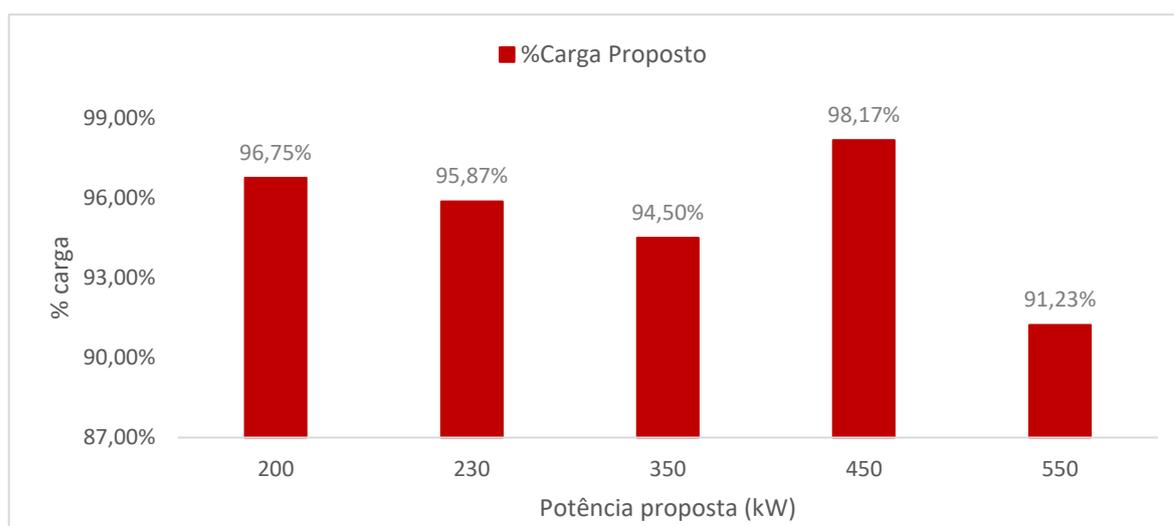
Figura 17 – Carregamento proposto para motores redimensionadas que operavam com 50% da capacidade.



Fonte: Do autor.

Por meio da Figura 18 pode-se observar um carregamento superior a 90% para o motor proposto. Nesta situação, os motores antigos operavam com carregamento de 75%, então ao redimensioná-lo os novos motores assumiram carregamentos superiores a 75%.

Figura 18 – Carregamento proposto para motores redimensionadas que operavam com 75% da capacidade.

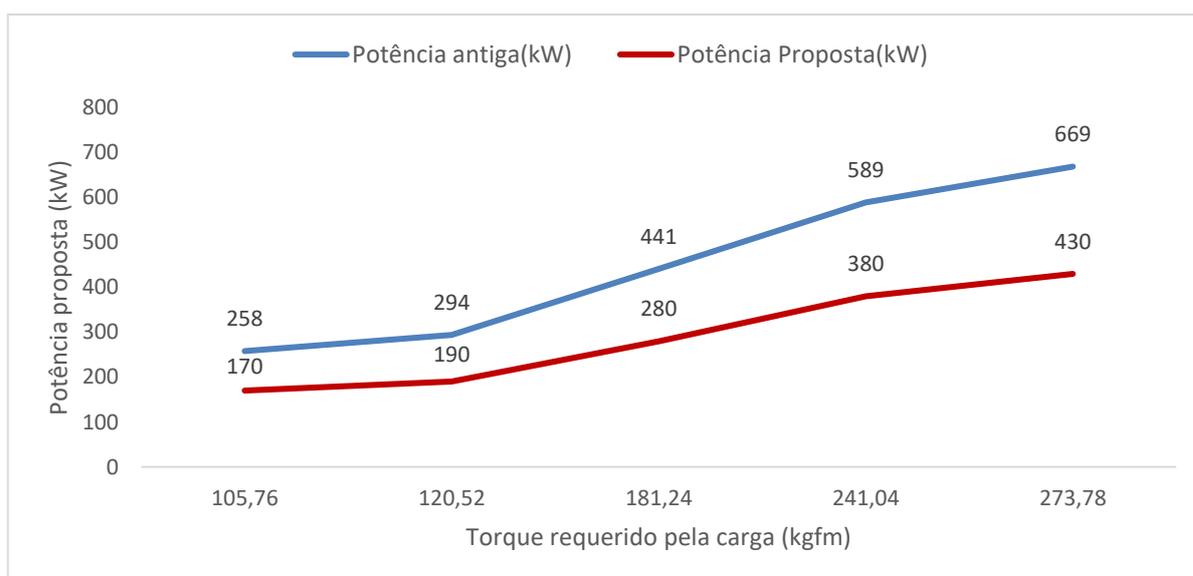


Fonte: Do autor.

Sendo assim, a elevação do carregamento ocorre pois o motor antigo operava no limite aceitável de carregamento. Devido ao carregamento próximo ao nominal, os motores apresentam um rendimento elevado e um consumo de energia reduzido, como pode ser visto na Figura 16 e na Tabela 9.

Outro fato importante a ser ressaltado é o redimensionamento da potência do motor. O torque requerido pela carga não muda, uma vez que a carga que o motor aciona na indústria se mantém a mesma independente do motor trocado. A Figura 19 apresenta a relação da potência nominal do motor pelo torque, considerando que o motor antigo operava com 50% do carregamento.

Figura 19 – Redimensionamento da potência nominal do motor elétrico para acionar uma carga específica para o 1º caso.

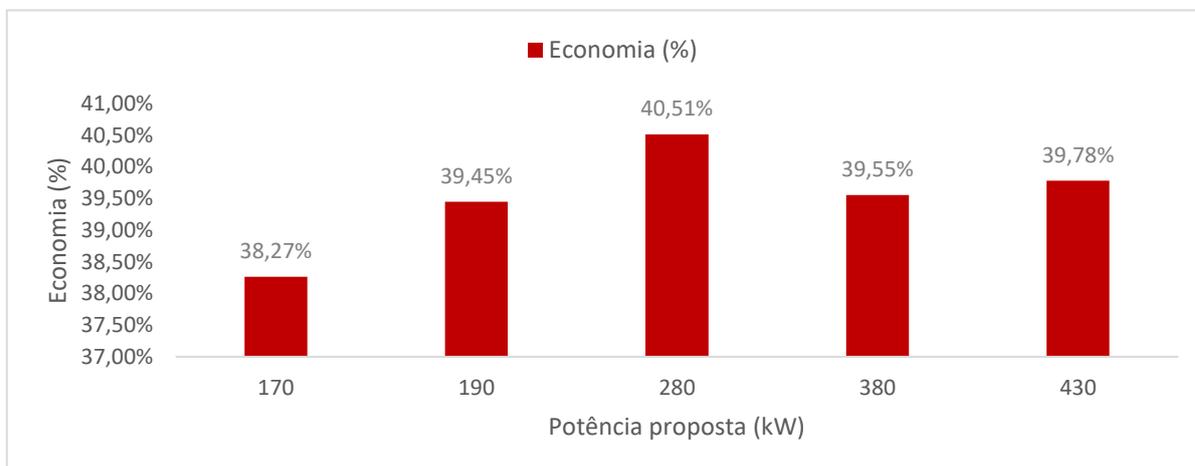


Fonte: Do autor.

A partir do redimensionamento apresentado acima, vide a Figura 19, observa-se uma redução significativa da potência nominal do motor. No caso apresentado, o torque para acionar a carga que está acoplada a cada motor se mantém constante, independente da potência ajustada. A redução da potência oferece diversos benefícios, como por exemplo o custo menor na aquisição do motor, aumento do rendimento devido ao ajuste da potência que é entregue ao eixo, aumento do desempenho, redução do consumo energético e redução das perdas internas da

máquina. Além disso, a economia ao substituir os motores ineficientes encontra-se na faixa de 30%, como pode-se analisar na Tabela 8 e na Figura 20.

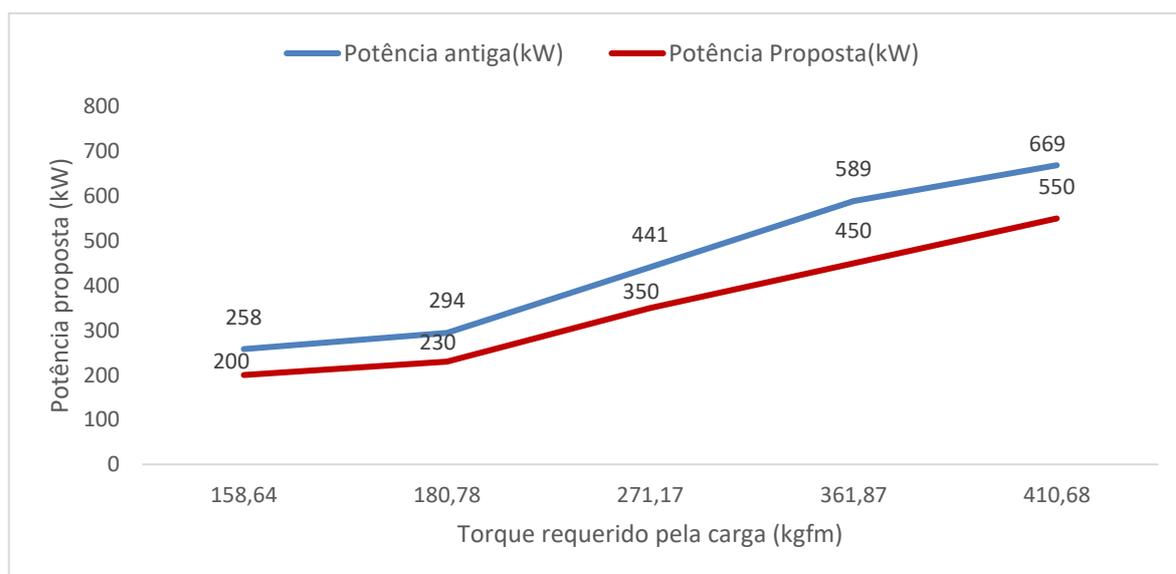
Figura 20 – Economia após substituir o motor ineficiente.



Fonte: Do autor.

O segundo caso é apresentado na Figura 21. Nesta situação, o motor antigo operava com um carregamento de 75%.

Figura 21 – Redimensionamento da potência nominal do motor elétrico para acionar uma carga específica para o 2º caso .

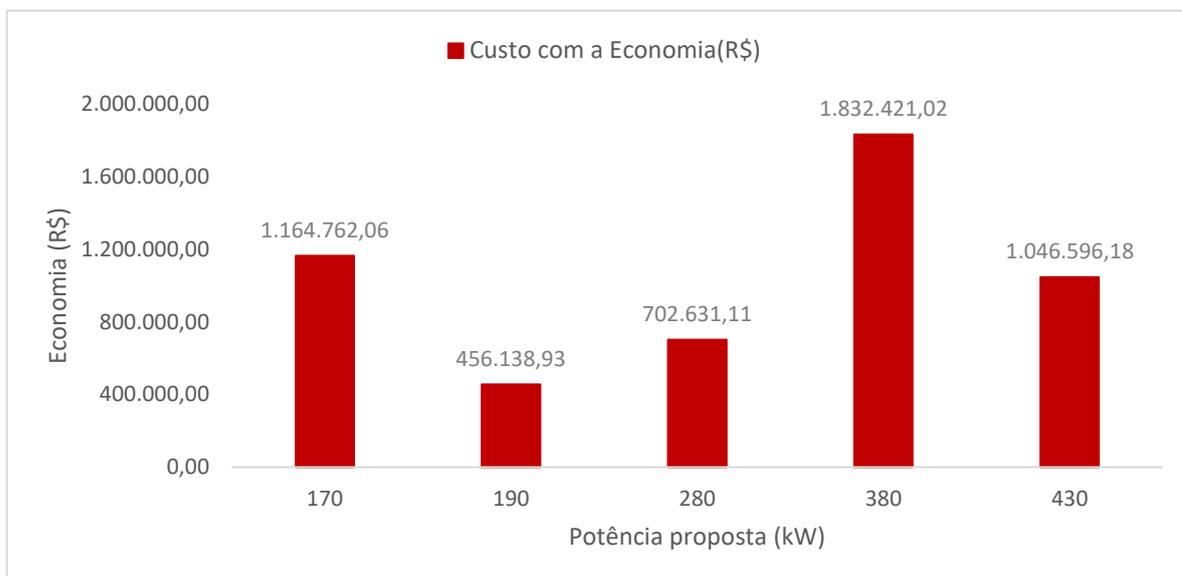


Fonte: Do autor.

Para este caso, o motor ineficiente operava dentro do limite mínimo do carregamento. Dado este motivo, a diferença de potência entre o motor indicado e o antigo são de 58 kW, vide a Figura 21. Em contra partida, para o primeiro caso a diferença entre a potência do motor antigo e o indicado são de 88 kW. O redimensionamento proposto, neste segundo caso, permitiu verificar o aumento do carregamento para a faixa de 90%, como é apresentado na Figura 18. E como já abordado no primeiro caso, outras vantagens são constatadas, como o aumento do rendimento e redução de custos.

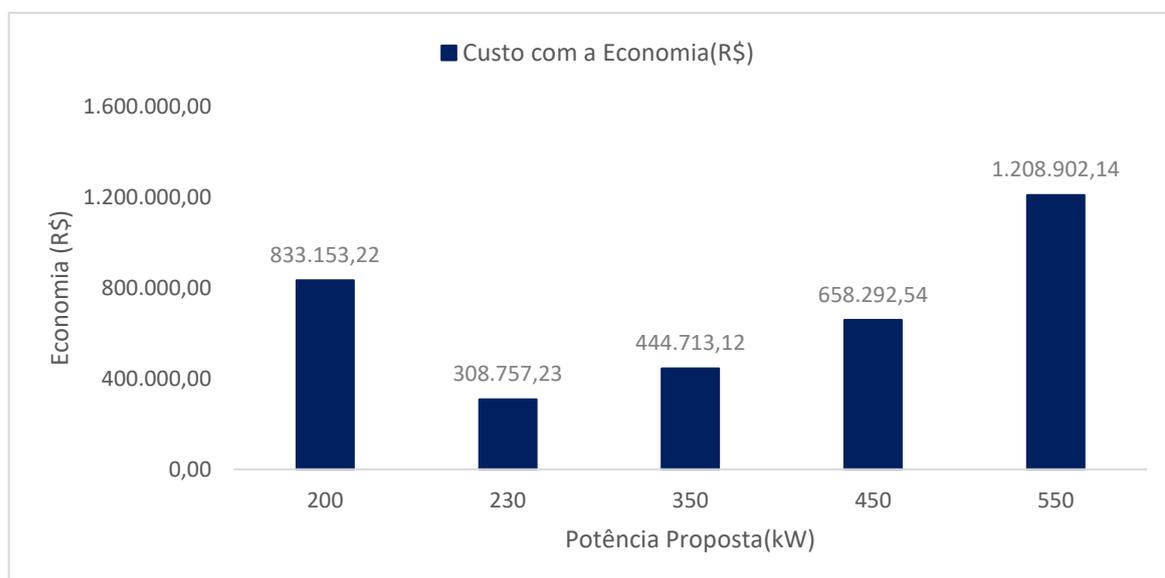
Por fim, a economia dos motores escolhidos ou selecionados. Na primeira situação, (i) o motores antigos operavam com 50% do carregamento e após o redimensionamento começaram a operar com carregamento entre 75,88% a 77,89%, vide a Figura 17. Na segunda situação, (ii) os motores antigos operavam no limite mínimo de carregamento aceitável que corresponde a 75%, e depois do redimensionamento, os motores propostos começaram a operar na faixa de 91,23% a 96,76% de carga. A Figura 18 resumiu o percentual de carga por potência. Dada estas configurações, conclui-se que, os novos motores operando na faixa de carregamento entre 75,88% a 77,89% apresentaram uma economia maior em comparação com os motres operando nas faixas de 91,23% a 96,76% de carregamento. Este fato é constatado ao analisar que a diferença da potência entre as situações (ii) e (i) são de 330 kW, conseqüentemente a economia após a troca será maior. Como por exemplo, para três motores antigos com potência de 258 kW, o modelo propõe um motor redimensionado de 170 kW, ou seja, uma diferença de 118 kW. Em contra partida, no segundo cenário tem-se 3 motores antigos de 258 kW, e que a partir da simulação é proposto uma potência de 200 kW e com uma diferença de 58 kW. Este exemplo, elucida de forma clara a diferença de economia quando se redimensiona uma máquina que opera sobredimensionada.

Figura 22 – Economia (R\$) com o motor proposto operando entre 75,88% a 77,89% do carregamento.



Fonte: Do autor.

Figura 23 – Economia (R\$) com o motor proposto operando entre 91,23% a 96,76% do carregamento.



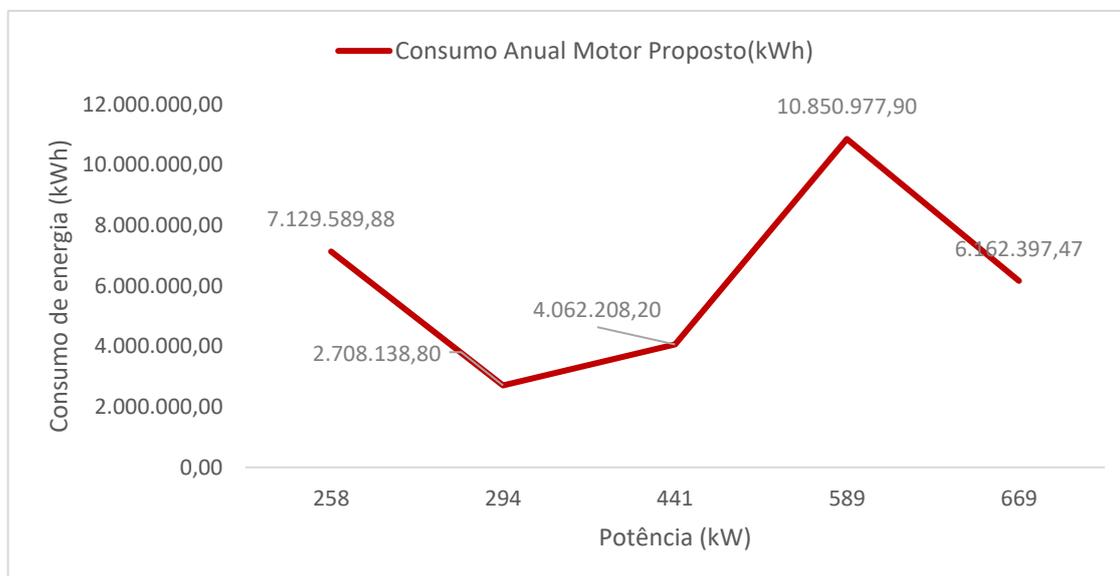
Fonte: Do autor.

5.2 Caso 2: Substituição direta

A substituição direta consiste em trocar o motor antigo por um motor de mesma potência e mantendo as características do motor que se encontrava instalado. A seção 4.3 e o fluxograma da Figura 10 detalham sobre a substituição direta. Esta seção permite analisar as diferenças entre a substituição direta do motor elétrico e a substituição por redimensionamento de potência. Como explicado anteriormente, caso o motor antigo esteja sobredimensionado para a carga acoplada, ao aplicar a técnica de substituição direta o motor proposto manterá as mesmas características.

Quando se compara o caso da substituição direta de motores elétricos com o caso de redimensionamento de potência, as principais diferenças são dadas pela redução de potência e consumo de energia. A seguir serão apresentados algumas comparações e para tal, leve em consideração que o motor opera com 50% do carregamento antes e após a substituição. A Figura 24 informa o consumo de energia elétrica dos motores que foram trocados por meio da técnica de substituição direta.

Figura 24 – Consumo de energia dos motores substituídos de forma direta.



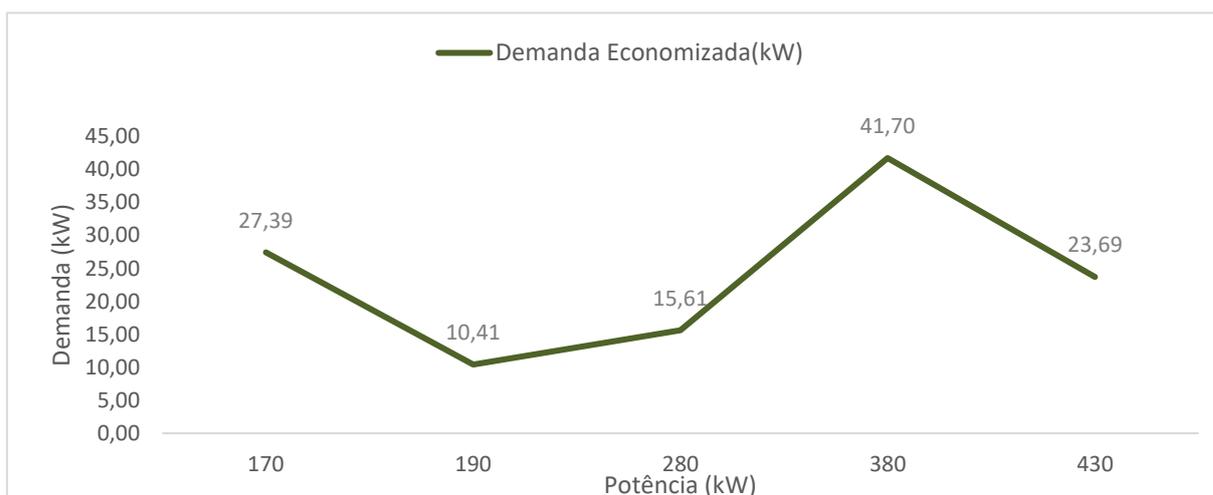
Fonte: Do autor.

Neste caso, como a potência proposta para o motor não foi alterada e permanece elevada. Então constatou-se que, quando se faz uso da substituição direta do motor, haverá um acréscimo no consumo energético de 10,924 MWh em relação ao método de redimensionamento de potência. As Figuras 14 e 24 apresentam de forma detalhada o consumo de energia por conjuntos de motores e separados por classes de potências.

Outro fator que pode ser analisado é a demanda economizada entre os dois métodos. Para a situação onde a potência do motor é redimensionada, obtém-se uma economia na demanda de 118,80 kWh, vide Tabelas 8 e Figura 25 . Como também, no caso onde se adotou a substituição direta, foi verificado uma economia da demanda de mesmo valor, verifique a Tabela 10 e Figura 26.

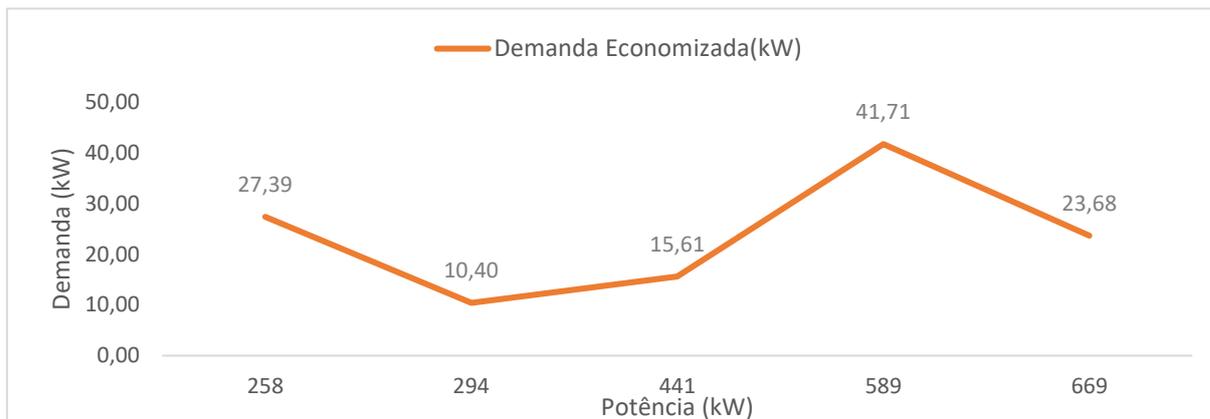
Esta diferença não ocorre, pois mesmo a potência do motor proposto sendo menor no método de redimensionamento, o carregamento é ajustado para um valor acima de 75%. Sendo assim, ao comparar a demanda do motor trocado pelo método da substituição direta, a potência se mantém elevada, porém o carregamento é mantido a 50%.

. Figura 25 – Demanda economizada utilizando o método de redimensionamento de potência.



Fonte: Do autor.

Figura 26 – Demanda economizada utilizando o método de substituição direta.



Fonte: Do autor.

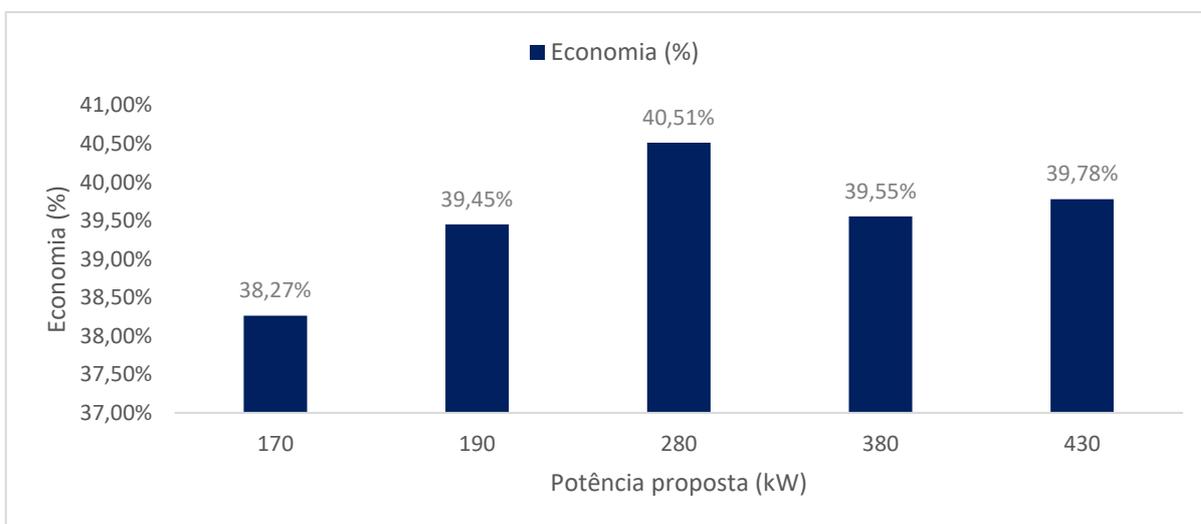
Tabela 10 – Dados dos motores propostos que operavam com carregamento de 50%: Substituição direta.

Motor Proposto 50%												
Potência Proposta(kW)	%Carga Proposto	Rendimento Real Proposto	Torque Nominal Proposto(kgfm)	Torque Proposto requerido pela carga (kgfm)	Demanda Proposta(kW)	Consumo Anual Motor Proposto(kWh)	Demanda Economizada(kW)	Economia (%)	Economia Anual (kWh)	Custo por kWh	Custo com a Economia(R\$)	Investimento (R\$)
258	50%	95,10	211,52	105,76	406,92	7.129.589,88	27,39	6,3%	480.107,04	R\$ 0,40	192.042,60	510.132,03
294	50%	95,10	241,04	120,52	154,57	2.708.138,80	10,40	6,3%	182.366,24	R\$ 0,40	72.946,49	186.656,32
441	50%	95,10	362,48	181,24	231,86	4.062.208,20	15,61	6,3%	273.549,37	R\$ 0,40	109.419,74	204.132,43
589	50%	95,10	482,09	241,04	619,34	10.850.977,90	41,71	6,3%	730.705,58	R\$ 0,40	292.282,22	500.000,00
669	50%	95,10	547,57	273,78	351,74	6.162.397,47	23,68	6,3%	414.976,26	R\$ 0,40	165.990,50	278.648,25

Fonte: Do autor.

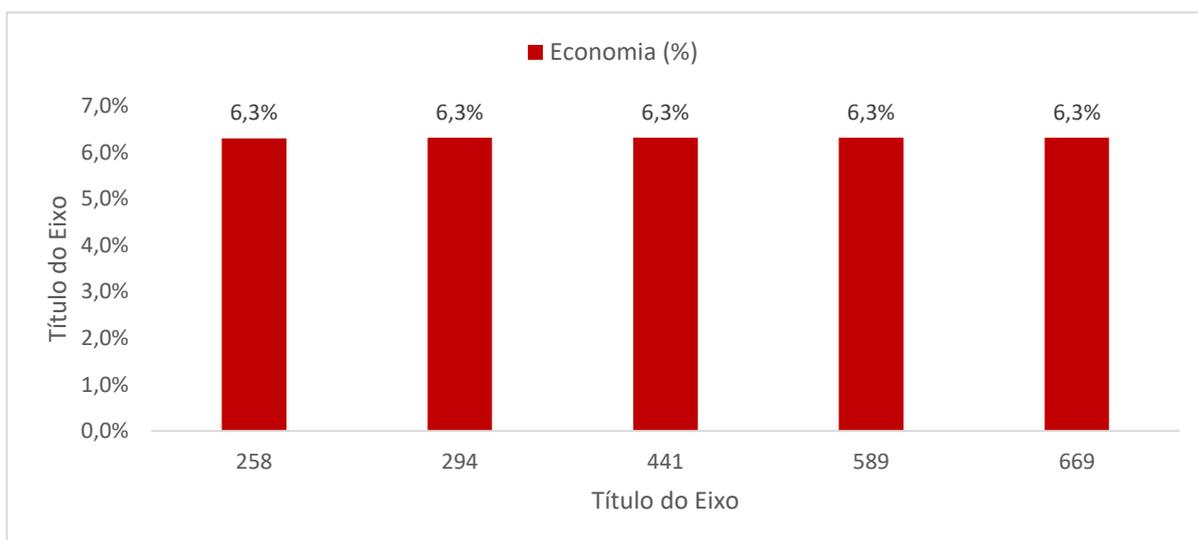
Além do consumo energético, analisou-se os ganhos econômicos entre as duas técnicas. A Figura 27 permite analisar que a economia obtida utilizando o método de redimensionamento, foi de aproximadamente 6 vezes maior quando comparamos com a economia obtida no método de substituição direta, dado este que pode ser constatado na Figura 28.

Figura 27 – Economia no consumo energético ao trocar os motores antigos pelos motores propostos utilizando o método de redimensionamento de potência.



Fonte: Do autor.

Figura 28 – Economia no consumo energético ao trocar os motores antigos pelos motores propostos utilizando o método de substituição direta.



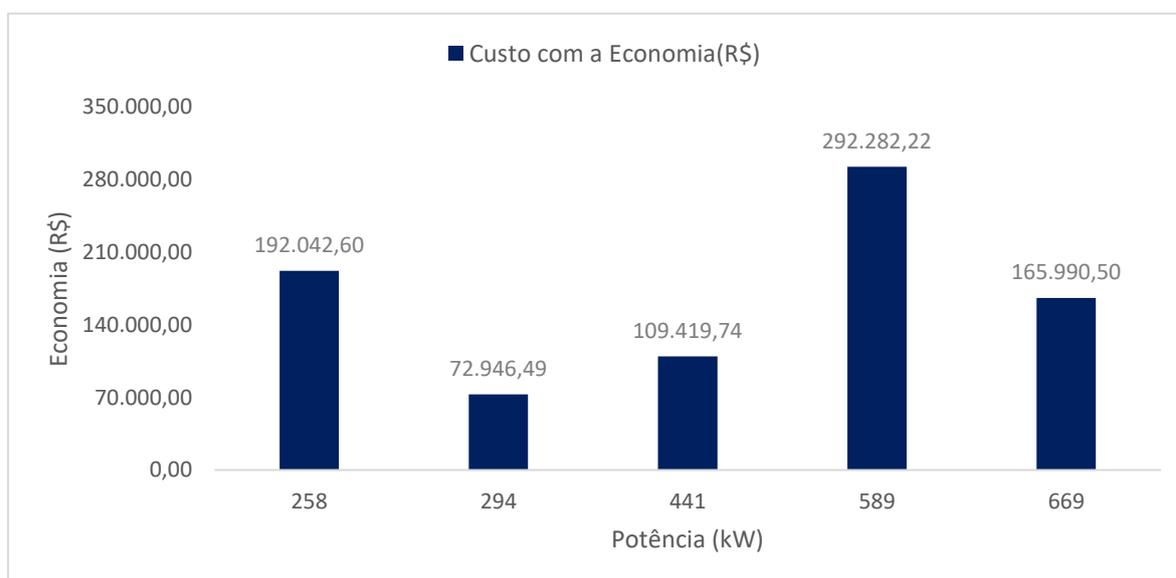
Fonte: Do autor.

Portanto, o método de redimensionamento de potência traz diversos benefícios, além de permitir adequar a potência do motor para a potência solicitada pela carga. Este método também possibilita adequar o carregamento, para que o mesmo permaneça dentro do limite mínimo tolerável de 75%. Sendo assim, a adequação feita

entrega como resultado um menor consumo de energia, uma maior economia e consequentemente a redução com os custos. Esta redução é verificada por meio dos gráficos das Figuras 22 e 32.

A economia obtida com o método de redimensionamento de potência foi de R\$5.202.549,30 e pode ser visto por meio da Figura 22. Todavia, contabilizou-se uma economia menor de R\$832.681,55 utilizando o método de substituição direta, vide Figura 29.

Figura 29 – Economia (R\$) com o motor proposto operando com 50% do carregamento e utilizando a substituição direta.



Fonte: Do autor.

Por fim, analisou-se os investimentos realizados utilizando os dois métodos. O custo com a aquisição dos novos motores utilizando o método de redimensionamento de potência foi de R\$ 1.450.000,00. Por outro lado, o custo com a compra dos motores propostos utilizando o método de substituição direta foi de R\$1.679.569,03. Os investimentos foram distintos devido a diferença de potências entre os dois métodos. Sabe-se que, quanto maior a potência do motor, maior será o custo de aquisição. Portanto, após a análise detalhada dos dois métodos, conclui-se que o método de redimensionamento de potência é o mais adequado quando se deseja obter redução no consumo de energia, maior economia e maior eficiência.

5.3 Análise da viabilidade econômica

Esta seção apresenta a análise da viabilidade econômica ao substituir motores ineficientes. As seções 5.1 e 5.2 abordaram a análise do consumo de energia e economia, utilizando o redimensionamento e a troca direta dos motores. Então, concluiu-se que o método do redimensionamento de potência é mais vantajoso quando o comparamos com o segundo método. Neste contexto, a análise da viabilidade econômica toma por base as potências propostas pelo método do redimensionamento. Entretanto, a análise baseia-se no cenário mais conservativo apresentado na Tabela 9. Os motores propostos nessa situação operam com carregamento na faixa de 91,23% a 96,75% e com potências de 200, 230, 350, 450 e 550 kW. Com base no modelo econômico implementado no *software* Excel, analisou-se os custos estimados com a aquisição dos oito motores elétricos, vide a Tabela 11.

Tabela 11 – Consumo de energia dos motores propostos.

Motores propostos	Potencia Proposta (kW)	Hora em operação	Dias em operação	Consumo de energia(kWh)/ano
Motor novo1	200	24	365	1.752.000,00
Motor novo2	200	24	365	1.752.000,00
Motor novo3	200	24	365	1.752.000,00
Motor novo4	230	24	365	2.014.800,00
Motor novo5	350	24	365	3.066.000,00
Motor novo6	450	24	365	3.942.000,00
Motor novo7	450	24	365	3.942.000,00
Motor novo8	550	24	365	4.818.000,00
Consumo Total				23.038.800,00

Fonte: Do autor.

A próxima etapa realizada foi o levantamento do custo com a aquisição de cada motor elétrico proposto. Nesta etapa, a equipe de suprimentos da empresa foi envolvida, visto que os motores antigos não são mais fabricados. Então, escolheu-se motores com características técnicas similares, porém com as potências já adequadas. Os motores selecionados são modelos WEG e que atendem o rendimento mínimo exigido por lei. A Tabela 12 apresenta o custo por motor e o custo total na aquisição.

Tabela 12 – Custo por motor.

Motores propostos	Custo total material (R\$)	
Motor novo1	R\$	170.044,01
Motor novo2	R\$	170.044,01
Motor novo3	R\$	170.044,01
Motor novo4	R\$	186.656,32
Motor novo5	R\$	204.132,43
Motor novo6	R\$	250.000,00
Motor novo7	R\$	250.000,00
Motor novo8	R\$	278.648,25
Custo total material	R\$	1.679.569,03

Fonte: Do autor.

Silva M. A.(2009) informa que os custos relacionadas a manutenção de motores elétricos não devem exceder a 60% do custo para a aquisição de um motor novo. Neste trabalho, o custo relacionado a mão de obra representa 40% do valor do motor, porém esta despesa é variável e depende da empresa. Sendo assim, as despesas relacionadas ao projeto está contido na Tabela 13.

Tabela 13 – Custo total do projeto incluindo a mão de obra.

Considerando 40% de mão de obra	R\$	671.827,61
Custo Material + Mão de Obra	R\$	2.351.396,64

Fonte: Do autor.

A próxima etapa consiste em contabilizar a economia de energia ao substituir o motor antigo por um motor mais eficiente. Por meio da Tabela 14 sabe-se que o consumo anual de energia dos motores antigos é de 29,38 MWh por ano. No entanto, o consumo energético do motor proposto é de 23,03 MWh por ano, dado este observado na Tabela 11. Portanto, a economia energética ao substituir os oito motores ineficientes é de 6,34 MWh utilizando o método de redimensionamento de potência.

Tabela 14 – Consumo de energia dos motores antigos.

Motores antigos (TAG)	Potência dos motores antigos(kW)	Hora em operação	Dias em operação	Consumo de energia (kWh)/ano
BV 6848	258	24	365	2.256.576,00
BV 6850	258	24	365	2.256.576,00
BV 6851	258	24	365	2.256.576,00
BV 4527	294	24	365	2.578.944,00
BV 4526	441	24	365	3.863.160,00
BA 6258	589	24	365	5.157.888,00
BA 6254	589	24	365	5.157.888,00
BA 4305	669	24	365	5.860.440,00
Consumo Total				29.388.048,00

Fonte: Do autor.

Contudo, para se obter a economia anual com a substituição, deve-se considerar que o valor do quilowatt-hora (kWh) da empresa em estudo é de R\$0,40, todavia este custo pode variar de acordo com a empresa e a região. A Tabela 15 informa que a economia anual obtida com a troca dos oito motores é de R\$ 2.539.699,20.

Tabela 15 - Economia obtida ao substituir os motores ineficientes por motores de alta eficiência.

Economia anual do Projeto (kWh)	6.349.248,00
Custo do kWh do estudo de caso (R\$)	0,40
Economia Anual (R\$)	2.539.699,20

Fonte: Do autor.

O modelo implementado via *software* Excel permite avaliar também parâmetros econômicos, como o VPL, *payback* e TIR. Tais métricas foram vistas nas seções 2.8.1, 2.8.2 e 2.8.3, respectivamente. No modelo foi considerado uma projeção de 10 anos, visto que a vida útil do motor elétrico é em média 25 anos. Além disso, também foi considerado um custo de 10% com as despesas no valor total do projeto. Para este mesmo modelo, considerou-se uma taxa de desconto (TIR) de 6%, vide a Tabela 16.

A Figura 30 apresenta a relação do VPL em relação a TIR. A taxa interna de retorno que anula o VPL é de 30,76043%, e a partir desta taxa o projeto não apresenta

uma boa rentabilidade. No entanto, ao comparar com a taxa de desconto de 6% adotada neste trabalho, o projeto se mostra viável e com uma excelente rentabilidade. Para o caso onde se considera uma taxa de desconto de 6%, tem-se um VPL de R\$1.492.192,78. Como visto na seção 2.8.1, quando o VPL é maior ou igual a zero o investimento é economicamente atrativo, visto que o valor da receita é maior que o das despesas. Portanto, a substituição dos motores ineficientes se mostra viável e rentável. Além disso, como pode ser visto na Tabela 16, o *payback* deste projeto é de 2 anos. Sendo assim, após investir R\$2.351.397,00 na aquisição de 8 motores de alta eficiência, a partir do terceiro ano a empresa receberá apenas lucro da aquisição feita. Entretanto, o *payback* foi relativamente baixo devido ao custo reduzido com a mão de obra, como também não foi considerado o custo com rebobinagem. Caso fosse considerado tais fatos, o *payback* seria maior, ou seja, o tempo de retorno do projeto seria maior que 2 anos.

Figura 30 – Relação entre VPL e TIR.



Fonte: Do autor.

Tabela 16 – Análise econômica da viabilidade de troca de motores.

Taxa de Desconto = 6,00%

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
Investimento	-2.351.397										
Despesas à época		-235.140	-2.279.522	-2.279.522	-2.279.522	-2.279.522	-2.279.522	-2.279.522	-2.279.522	-2.279.522	-2.279.522
Retrofit no ano zero	0										
Despesas no ano zero	-14.848.818	-221.830	-2.028.766	-1.913.931	-1.805.595	-1.703.391	-1.606.973	-1.516.012	-1.430.200	-1.349.246	-1.272.873
Despesa total no ano zero	-17.200.214										
Receita à época		2.539.699	2.539.699	2.539.699	2.539.699	2.539.699	2.539.699	2.539.699	2.539.699	2.539.699	2.539.699
Receita no ano zero	18.692.407	2.395.943	2.260.323	2.132.380	2.011.680	1.897.811	1.790.388	1.689.045	1.593.439	1.503.244	1.418.155
VPL	1.492.193										
Gastou à época	-2.351.397	-235.140	-2.279.522	-2.279.522	-2.279.522	-2.279.522	-2.279.522	-2.279.522	-2.279.522	-2.279.522	-2.279.522
Recebeu à época	0	2.539.699	2.539.699	2.539.699	2.539.699	2.539.699	2.539.699	2.539.699	2.539.699	2.539.699	2.539.699
Valor líquido	-2.351.397	2.304.560	260.177	260.177	260.177	260.177	260.177	260.177	260.177	260.177	260.177
Payback	-2.351.397	-46.837	213.340	473.517	733.694	993.872	1.254.049	1.514.226	1.774.403	2.034.580	2.294.758

Fonte: Do autor.

6 CONCLUSÕES

O setor industrial é o segundo maior consumidor de energia elétrica do Brasil. Os motores elétricos consomem cerca de dois terços desta parcela. Diversos estudos apresentam o fato de que economizar energia elétrica custa menos que produzir a mesma quantidade. Sendo assim, propor métodos que permitam a redução do consumo de energia traz vários benefícios. Neste contexto, este trabalho buscou propor técnicas que permitem avaliar a viabilidade da substituição de motores de baixa eficiência por motores com melhores desempenhos. Os motores do estudo de caso contemplaram potências de 258, 294, 441, 589 e 669 kW. De modo a verificar a viabilidade do projeto, foi proposto o estudo e a implementação de três análises técnicas.

A primeira técnica abordada foi o redimensionamento da potência do motor antigo, considerando duas situações, sendo que na primeira o motor opera com 50% de carregamento e na segunda situação o motor opera com 75% de carga. A análise baseou-se no segundo caso, cenário este mais conservativo. Portanto, este método propôs que as potências dos novos motores fossem de 200, 230, 350, 450 e 550 kW. Em favor da redução da potência, verificou-se uma economia anual de R\$2.539.699 e uma economia energética anual de 6,34 MWh. Outro fator analisado foi carregamento do motor. Para os motores antigos operando no limite mínimo de 75% de carga, após o redimensionamento das potências os motores propostos começaram a operar entre 91,23% a 98,17% do carregamento. Por fim, verificou-se que os motores propostos mantinham um bom desempenho devido ao aumento no rendimento da máquina e conseqüentemente apresentavam maior eficiência.

A segunda técnica implementada consistiu na substituição direta dos motores antigos. Entretanto, ao comparar este método com a primeira técnica, constatou-se diversas desvantagens, como o aumento de 10,924 MWh no consumo de energia, aumento do investimento na aquisição dos oito motores e economia no consumo de energia de apenas 6,3%.

A terceira técnica abordada contemplou o estudo minucioso da viabilidade de econômica e rentabilidade do projeto. As duas técnicas apresentadas acima não

abordavam o VLP e TIR, porém utilizando os novos motores propostos pela técnica de redimensionamento de potência, verificou-se que o projeto é viável. Ao investir R\$2.351.397,00 para a aquisição de oito motores *Super Premium*, considerando uma taxa de desconto de 6% e despesas gerais de 10%, o *payback* foi de 2 anos, como também o VPL manteve-se maior que zero indicando que o projeto é viável de ser implementado. Como citado na seção 5.3, *payback* é baixo, visto que não foi considerado o preço de cada rebobinagem, bem como um custo de 40% com a mão de obra.

Um dos desafios encontrados ao logo deste trabalho foi a obtenção dos dados técnicos dos motores antigos, dado que estas máquinas em estudo não são mais fabricadas pela BBC e Toshiba. Outro fator agravante ocorreu devido ao cenário pandêmico, uma vez que a entrada na empresa estava restrita por causa do COVID-19 e impossibilitou a coleta das medições de consumo de energia, torque requerido pela carga, corrente de partida e tempo de operação. Porém, para contornar este problema, realizou-se o cálculo estimado de algumas destas variáveis.

6.1 Proposta para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros propõem-se manter o estudo com motores de potência elevada, devido a escassez de estudo. Porém, para completar o estudo é indicado:

1. Utilizar medições reais de consumo de energia elétrica, torque requerido pela carga e corrente de partida. E por meio destas medições verificar a viabilidade e rentabilidade do projeto;
2. Considerar o custo com cada rebobinagem;
3. Variar o custo com a mão de obra.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL. **Projeto prioritário de eficiência energética: “eficiência energética**. Brasília – DF: ANEEL, 2017. Disponível em < [https://www.aneel.gov.br/sala de imprensa - exibicao/asset/Publisher / XGPXSqd MFHrE / contente / chamada de projeto para incentivar substituição de motores elétricos e prorrogada / 656877 ? inherit Redirect = false](https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/asset/Publisher/XGPXSqdMFHrE/contente/chamada-de-projeto-para-incentivar-substituicao-de-motores-eltricos-e-prorrogada/656877?inheritRedirect=false)>. Acesso em 3 de Abril de 2021.

Balanço Energético Nacional, BEN. **Balanço Energético Nacional - Relatório Síntese**. Rio de Janeiro - RJ: EPE GOV. 2020. Disponível em < [https://www.epe.gov.br/sites pt publicacoes dados-abertos / publicacoes / Publicacoes Arquivos/publicacao479/topico/521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020 ab%202019_Final.pdf](https://www.epe.gov.br/sites/pt/publicacoes/dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao479/topico/521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019-Final.pdf) >. Acesso em: 4 de Janeiro de 2021.

Brasil, M. d. Ministério das Minas e Energia – MME. **Fundação para Desenvolvimento Tecnológico de Engenharia - FDTE**. Brasília – DF: MME - GOV, 2005. Acesso em <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_TN_STO_099_666_13129.pdf> 10 de Março de 2021.

Brasil, Ministério de Minas e Energia - MME. **Plano Nacional de Energia 2030. Eficiência Energética**. Brasília – DF: MME – EPE. 2007. Cartilha, p.11.

BRITO, Paulo. **Análise e Viabilidade de Projetos de Investimentos**. São Paulo. Editora Atlas SA, 2003. P.100.

CARVALHO, NC de. **Avaliação do desempenho empresarial da manutenção: uma abordagem sistêmica**. 2005. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Gestão) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Gestão, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

CEMIG. Companhia de Energia de Minas Gerais. **Estímulo em eficiência energética por meio de bônus**. 2017. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/programa-sustentabilidade/estimulo-em-eficiencia-energetica-por-meio-de-bonus/>. Acesso: Junho de 2021.

CENTRO DE TREINAMENTO DE CLIENTES WEG, **Módulo 6 Eficiência Energética em Aplicação de Motores Elétricos**, Jaraguá do Sul - SC, 2020. (Apostila).

CORREIA, Luis Alexandre Pereira; RODRIGUES, Anderson Lacerda. **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE MOTORES ELÉTRICOS: UM ESTUDO DE CASO EM UMA FÁBRICA DE ÓLEO VEGETAL**. 2018. Monografia de Conclusão de Curso de Engenharia de Produção – Departamento de Engenharia de Produção - DEP, UEM, Paraná, v. 13, n. 1.

DA SILVA, Marcos A. **Avaliação de parâmetros técnicos e econômicos na substituição de motores de indução trifásicos de 1cv a 10 cv**, 2009. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da UFMG - PPGEE, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

DALVAND, H.; ZARE, M. **Techno-economic evaluation of energy efficiency measures in iranian industrial 3-phase electric motors**. IEEE International Power and Energy Conference. IEEE, p. 1-5., Novembro, 2006.

DELAIBA, Antônio C. et al. **Estudo da eficiência energética e dimensionamento de motores de indução trifásicos a partir da plotagem de suas curvas características**. Artigo. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG, 2008. Disponível em: https://www.peteletricaufu.com/static/ceel/doc/artigos/artigos2008/ceel2008_37.pdf Acesso em: 10 Janeiro 2021.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Atlas da Eficiência Energética**. Rio de Janeiro: EPE. 2019. Disponível em < [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-461/Atlas%20da%20Efici%C3%Aancia%20Energ%C3%A9tica%20do%20Brasil%20\(002\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-461/Atlas%20da%20Efici%C3%Aancia%20Energ%C3%A9tica%20do%20Brasil%20(002).pdf) > Acesso em: 12 de Janeiro 2021.

FERNANDES, Ueslei Barbosa et al. **Análise econômica na especificação do motor de indução trifásico**. Artigo. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia – MG, v. 4, n. 8, p. 1-6, 2009.

Franco, B. C., Junior, J. M., & Ribeiro, M. V. **Custo de manutenção de ativos numa óptica operacional e estratégica no ambiente industrial**. XII (SAGET) Simpósio em Excelência em Gestão e Tecnologia., UNESP, UNINOVE, São Paulo, 2015.

FREITAS, G. V. **Eficiência energética em motor de indução trifásico através do uso de inversor de frequência PWM**. 2013. Dissertação de Mestrado - DCEEng - Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, UNIJUÍ, Rio Grande do Sul, 2013.

FREITAS, P. C. F. et al. **Análise Comparativa dos Rendimentos dos Motores da Linha Padrão e de Alto Rendimento sob o Enfoque da Eficiência Energética**. 2008. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2008). Belo Horizonte. 2008.

GADONNEIX, Pierre et al. **Energy Efficiency: A recipe for success**. World Energy Council, 2010. Disponível em < http://ozewortal.ekspert-sitr.pl/files/biblioteka/energy_efficiency_a_recipe_for_success_world_energy_council.pdf> Acesso em: Junho 2021.

GARCIA, A. G. **Impacto da lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria**. 2003. Dissertação de Mestrado no Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro. 2003.

GELLER, Howard et al. **Policies for advancing energy efficiency and renewable energy use in Brazil**. ELSEVIER. Energy Policy, v. 32, n. 12, p. 1437-1450, Agosto, 2004.

GUIMARÃES, Ana Maria Paiva; MARTINS, Pablo Luiz. **Estudo da Viabilidade de Investimentos em uma Franquia de Ensino Profissionalizante**. Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, UFSJ, 2012.

KARDEC, Alan; NASCIF, **Manutenção - Função estratégica**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda, p. 341, 2001.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos, 2007.

MOREIRA, H. J. Guia operacional de motores elétricos. PROCEL, 2021. Disponível em: <Copel/Eletrobrás: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7BBBD83513-23E1-4226-9A4E-1BB5E3626CCD%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>> Acesso em: Dezembro de 2020.

MOTTA, R.R. [et al.]. **Engenharia Econômica e Finanças**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

NBR 7094 ABNT. Máquinas Elétricas Girantes Motores de Indução - Especificação. ABNT. 2003.

NUNES, E. L. **Manutenção Centrada em confiabilidade (MCC): análise da implantação em uma sistemática de manutenção preventiva consolidada**, Florianópolis, 2001. p. 146. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

PAIVA, Gabriel A. Duarte de. **Avaliação da transição do índice de rendimento mínimo IR3 para IR4 no Brasil para motores de indução trifásicos até 10 CV.** 2019. Monografia de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica - Centro de Engenharias, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró – RN, 2019.

PENROSE, Howard W. **Electric Motor Energy and Reliability Analysis Using the US Department of Energy's Motor Master.** US Department of Energy, US, 2002. Disponível em < <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.567.9404&rep=rep1&type=pdf> > Acesso em: Junho de 2021.

PERES, Carlos Roberto Coelho; LIMA, Gilson Brito Alves. **Proposta de modelo para controle de custos de manutenção com enfoque na aplicação de indicadores balanceados.** Gestão & Produção, São Carlos, v. 15, n. 1, p. 149-158, Janeiro.2008.

PROCEL INFO. Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética. **Troca de motores como indutora de competitividade na indústria brasileira.** 2017. Fonte: PROCEL: Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BF5EAA DD6-CCB0-4E29-A0C4-482D3D66 BB65%7D&Team=¶ms=itemID=%7B3BA BCE8B-A76C-4042-B985-2526F1F6FEC4%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D>. Acesso: Julho de 2021.

PROCEL INFO. Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética. **Guia apresenta os benefícios da adoção do Motor Premium pela indústria.** 2016. Fonte: PROCEL: Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?ViewID=%7B8 D1A C2E8%2DF790%2D4B7E%2D8DDD%2DCAF4CDD2BC34%7D¶ms=itemID=%7B5CE07750%2DF1F4%2D493E%2D93A9%2D81E36FD2F3DF%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB%2D05D4%2D4644%2DA8F2%2DFAD4803C8898%7D>. Acesso: Julho de 2021.

PROCEL INFO. Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética. **Troca de motores como indutora de competitividade na indústria brasileira.** 2017. Fonte: PROCEL: Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BF5EAA DD6-CCB0-4E29-A0C4-482D3D66 BB65%7D&Team=¶ms=itemID=%7B3BA BCE8B-A76C-4042-B985-2526F1F6FEC4%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D>. Acesso: Julho de 2021.

RIBEIRO, Fernando Cássio et al. **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.** Artigo do Centro Universitário FEI e Universidade doVale do Paraíba (UNIVAP 1988). Disponível em < http://cronos.univap.br/cd/INIC_2007/trabalhos/engenharias/inic/INICG00476_01O.pdf > Acesso: Fevereiro de 2021.

SAIDUR, Rahman. A review on electrical motors energy use and energy savings. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 14, n. 3, p. 877-898, Abril, 2010.

SCARMIN, Alcir. **Otimização da eficiência energética no acionamento de motores de indução utilizando técnicas de controle adaptativo em tempo discreto**. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2001.

SILVA, Fernando Bento et al. **Atenuação do afundamento de tensão em geradores síncronos isolados quando submetidos a partida direta de motores de indução**. 2015. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2015.

SILVA, Pedro Petri Dias da. **Dispositivo para o aumento da eficiência energética de motores de indução trifásicos acionados por inversores de frequência comerciais**. Monografia de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2016.

SOLA, Antonio Vanderley Herrero; MOTA, Caroline Maria de Miranda. **Melhoria da eficiência energética em sistemas motrizes industriais**. Production, v. 25, n. 3, p. 498-509, 2015.

SUETAKE, Marcelo. **Implementação de sistemas inteligentes em processadores digitais para controle de máquinas elétricas rotativas**. 2008. Tese de Doutorado do Programa de Pós Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2008.

SZYSZKA, E.; AMÉRICO, M. **Metodologia de Realização de Diagnósticos Energético**. Rio de Janeiro: Eletrobrás/PROCEL, 2004. Acesso em: Junho de 2021.

UMANS, Stephen. D. (2014). **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. Porto Alegre: AMGH Editora, 2014.

URTADO, Edson Silva et al. Aplicação do método do valor presente líquido (VPL) na análise da viabilidade econômica de projetos na indústria metal mecânica: um estudo de caso. Encontro Latino Americano de Pós-Graduação, v. 9, p. 1-4, ,2009.

WEG GUIA ESPECIFICAÇÃO . (Março de 2020). Guia de especificação - Motores elétricos. Fonte: Static WEG: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>> 4 de Março de 2021.

WEG . (Dezembro de 2020). Guia prático de treinamento técnico/comercial. Fonte: Static WEG: Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h6c/he0/WEG-guia-pratico-de-treinamento-tecnico-comercial-50009256-brochure-portuguese-web.pdf>> Acesso 10 Dezembro 2020.

WEG CTC. (Junho de 2020). **Soluções em Eficiência Energética**. Fonte: Static WEG:Disponível em< <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h09/h7a/WEG-solucoes-em-eficiencia-energetica-50058390-brochure-portuguese-web.pdf>> Acesso: 12 de Junho de 2020.

WEG NET. WEG lança Cartilha Educativa sobre Eficiência Energética, 2020. Disponível em: <<https://www.weg.net/institucional/BR/pt/news/produtos-e-solucoes/weg-lanca-cartilha-educativa-sobre-eficiencia-energetica>>. Acesso em: jan/2021.

WEG. WEG W22 Motor de indução trifásico Catálogo técnico, 2020. Disponível em: <file:///C:/Users/Micro/Downloads/WEG-w22-motor-eletrico-trifasico-de-inducao-tecnico-o-mercado-africano-50058213-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso: Jul/2021.

WEG. Danos em Enrolamentos Motor Trifásico. 2017. Disponível em: < chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fstatic.weg.net%2Fmedias%2Fdownloadcenter%2Fh0b%2Fhbf%2FWEG-danos-em-enrolamentos-motores-trifasicos-50009255-brochure-portuguese-web.pdf&clen=1194881&chunk=true> Acesso: Julho/2021.

WEG. Eficiência Energética – Índices de Rendimento IR3. 2017. Disponível em: <<https://www.weg.net/institucional/BR/pt/solutions/energy-efficiency/efficiency-index>>. Acesso: Jul/2021.

ANEXO 1

Tabela 17 – Descrição técnica completa dos motores de baixa eficiência

Informações da posição de instalação					
TIPO	TAG	Aplicação	Qtde	Tensão da rede (V)	TO-MEL
BV	6848	Bomba de Vácuo	1	4160	0145
BV	6850	Bomba de Vácuo	1	4160	0146
BV	6851	Bomba de Vácuo	1	4160	0147
BO	4527	Bomba de Vácuo	1	4000	0239
BO	4526	Bomba de Vácuo	1	4000	0015
BO	6258	Bomba Centrífuga	1	4000	N/A
BO	6254	Bomba Centrífuga	1	4000	0108
BO	4305	Bomba Centrífuga	1	4160	0052

Fonte: Do autor

Acoplamento						
Forma Construtiva	Tipo de acoplamento	Largura da Base (mm)	Comprimento entre bases (mm)	Comprimento do eixo	Largura da Chaveta (mm)	Diametro do eixo
B3E	DIRETO	1000	1380		23	80
B3E	DIRETO	1000	1380		23	80
B3E	DIRETO	1000	1380		23	80
B3E	DIRETO	1000	1380		23	80
B3E	DIRETO	985	1510		23	80
B3E	DIRETO	900	1400		23	80
B3E	DIRETO	1120	1635		23	80
B3E	DIRETO	1260	1780		32	125

Fonte: Do autor

Dados de placa									
Potência (cv)	Potência (kW)	Nº polos	Rotação (rpm)	Fator de Potência	Carcaça	Fabricante	Nível de rendimento	Frequência nominal (Hz)	Corrente nominal (A)
350,0	257,6	6	1188	0,840	QR 500	BBC	IR1	60	44,80
350,0	257,6	6	1188	0,840	QR 500	BBC	IR1	60	44,80
350,0	257,6	6	1188	0,840	QR 500	BBC	IR1	60	44,80
400,0	294,4	6	1188	0,850	QRH 500	BBC	IR1	60	54,00
600,0	441,6	6	1185		MIKT-FCKW	TOSHIBA	IR1	60	76,00
800,0	588,8	6	1189	0,877	QR 560 156	BBC	IR1	60	102,00
800,0	588,8	6	1188	0,877	QR 560 1b6	BBC	IR1	60	102,00
910,0	669,8	6	1190	0,880	QRH 630 Kb6	BBC	IR1	60	115,00

Fonte: Do autor

Característica da partida	Medições elétricas					
	Rebobinagens	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (kW)	Fator de potência	Consumo Mensal (kWh) - 2021
Direta	\-					38.428,50
Direta	\-					42.698,90
Direta	\-					46.458,50
Direta	\-					
Direta	\-					118.095,00
Direta	\-					160.830,00
Direta	\-					191.730,00
Direta	\-					55.002,00

Fonte: Do autor

Tabela 6 – Dados dos motores antigos com carregamento de 50%.

Motor Antigo							
Potência antiga(kW)	Quantidade	%Carga Antigo	Rendimento Real Antigo	Torque Nominal Antigo(kgfm)	Torque Antigo requerido pela carga(kgfm)	Demanda Antiga(kW)	Consumo Anual Antigo(kWh)
258	3	50%	89,10	211,52	105,76	434,34	7.609.696,95
294	1	50%	89,10	241,04	120,52	164,98	2.890.505,05
441	1	50%	89,10	362,48	181,24	247,47	4.335.757,58
589	2	50%	89,10	482,09	241,04	661,04	11.581.683,50
669	1	50%	89,10	547,57	273,78	375,42	6.577.373,74

Fonte: Do autor.

Tabela 7 – Dados dos motores antigos com carregamento de 75%.

Motor Antigo							
Potência antiga(kW)	Quantidade	%Carga Antigo	Rendimento Real Antigo	Torque Nominal Antigo(kgfm)	Torque Antigo requerido pela carga(kgfm)	Demanda Antiga(kW)	Consumo Anual Antigo(kWh)
258	3	75%	89,10	211,53	158,64	651,51	7.609.696,95
294	1	75%	89,10	241,04	180,78	247,47	2.890.505,05
441	1	75%	89,10	361,56	271,17	371,21	4.335.757,58
589	2	75%	89,10	482,49	361,87	991,58	11.581.683,50
669	1	75%	89,10	547,57	410,68	563,13	6.577.373,74

Fonte: Do autor.

Tabela 8 – Dados dos motores propostos que operavam com carregamento de 50%.

Motor Proposto 50%												
Potência Proposta(kW)	% carga Proposto	Rendimento Real Proposto	Torque Nominal Proposto(kgfm)	Torque Proposto requerido para carga(kgfm)	Demanda Proposta(kW)	Consumo Anual Motor Proposto(kWh)	Demanda Economizada(kW)	Economia (%)	Economia Anual (kWh)	Custo por kWh	Custo com a Economia(R\$)	Investimento (R\$)
170	75,88	95,10	139,38	105,76	406,92	4.697.291,77	27,39	38,27%	2.911.905,15	R\$ 0,40	1.164.762,06	420.000,00
190	77,37	95,10	155,77	120,52	154,57	1.750.157,73	10,41	39,45%	1.140.347,32	R\$ 0,40	466.138,93	150.000,00
280	76,75	95,10	230,14	181,24	231,86	2.579.179,81	15,61	40,51%	1.756.577,77	R\$ 0,40	702.631,11	195.000,00
380	77,50	95,10	311,03	241,04	619,34	7.000.630,90	41,70	39,55%	4.581.052,58	R\$ 0,40	1.832.421,02	440.000,00
430	77,79	95,10	351,95	273,78	351,74	3.960.883,28	23,69	39,78%	2.616.490,46	R\$ 0,40	1.046.596,18	245.000,00

Fonte: Do autor.

Tabela 9 – Dados dos motores propostos que operavam com carregamento de 75%.

Motor Proposto 75%												
Potência Proposta(kW)	%Carga Proposto	Rendimento Real Proposto	Torque Nominal Proposto(kgfm)	Torque Proposto requerido pela carga(kgfm)	Demanda Proposta(kW)	Consumo Anual Motor Proposto(kWh)	Demanda Economizada(kW)	Economia (%)	Economia Anual	Custo por kWh	Custo com a Economia(R\$)	Investimento (R\$)
200	96,75%	95,10	163,97	158,64	610,41	5.526.813,87	41,10	27,37%	2.082.883,08	R\$ 0,40	833.153,22	510.132,03
230	95,87%	95,10	188,57	180,78	231,86	2.118.611,99	15,61	26,70%	771.893,06	R\$ 0,40	308.757,23	186.656,32
350	94,50%	95,10	286,95	271,17	347,79	3.223.974,76	23,42	25,64%	1.111.782,81	R\$ 0,40	444.713,12	204.132,43
450	98,17%	95,10	368,63	361,87	929,02	4.145.110,41	62,56	28,42%	1.645.731,34	R\$ 0,40	658.292,54	500.000,00
550	91,23%	95,10	450,17	410,68	527,60	5.066.246,06	71,04	22,97%	3.022.255,36	R\$ 0,40	1.208.902,14	278.648,25

Fonte: Do autor.