



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Márcio da Silva Ferreira

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E VIABILIDADE
FINANCEIRA EM MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO EM UMA
PLANTA INDUSTRIAL DE AÇÚCAR E ETANOL: UM ESTUDO DE
CASO**

Florianópolis
2023

Márcio da Silva Ferreira

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E VIABILIDADE
FINANCEIRA EM MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO EM UMA
PLANTA INDUSTRIAL DE AÇÚCAR E ETANOL: UM ESTUDO DE
CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Mauricio V. F. da Luz, Dr.

Florianópolis
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Ferreira, Márcio da Silva
ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E VIABILIDADE
FINANCEIRA EM MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO EM UMA PLANTA
INDUSTRIAL DE AÇÚCAR E ETANOL : UM ESTUDO DE CASO / Márcio
da Silva Ferreira ; orientador, Mauricio Valência Ferreira
da Luz, 2023.
75 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

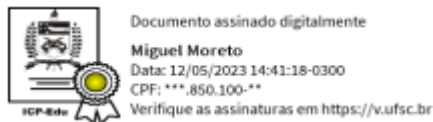
1. Engenharia Elétrica. 2. Eficiência energética. 3.
Motor elétrico de indução. 4. Manutenção. 5. Viabilidade
econômica. I. da Luz, Mauricio Valência Ferreira. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

Márcio da Silva Ferreira

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E VIABILIDADE
FINANCEIRA EM MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO EM UMA
PLANTA INDUSTRIAL DE AÇÚCAR E ETANOL: UM ESTUDO DE
CASO**

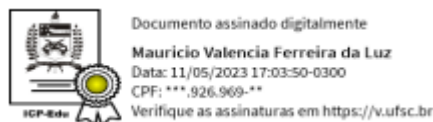
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aprovado, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 11 de Maio de 2023.

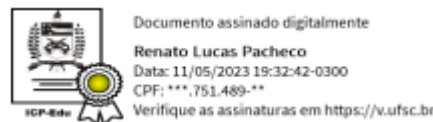


Prof. Miguel Moreto, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina
Coordenador do Curso

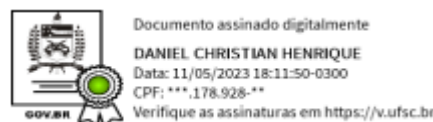
Banca Examinadora:



Prof. Mauricio V. F. da Luz, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina
Orientador



Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Daniel Christian Henrique, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para o meu sucesso.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, gostaria de expressar minha sincera gratidão à minha mãe, Débora. Seu amor incondicional pelos filhos permitiu que ela abrisse mão do convívio conosco em diversas ocasiões, sacrificando sua vida pessoal para garantir que nunca nos faltasse nada. Para mim, ela é a personificação da abnegação. Portanto, meu diploma é tão merecidamente dela quanto meu.

Ao meu avô Antônio, o Tunico, colorado e provavelmente a pessoa mais teimosa do planeta, não caberia aqui, nem em dezenas de páginas, tudo o que aprendi com ele. Devo muito a ele por me tornar o homem que sou hoje.

Minha avó Rosa, que passou a vida na cozinha, sempre preparando refeições deliciosas com muito amor, independentemente da hora ou do dia. Em diversas ocasiões, ela se tornou minha advogada, mesmo quando não haviam argumentos para sustentar a defesa. Por isso, diziam que eu era seu neto preferido e eu sabia, intimamente, que era verdade. Embora não tivesse estudado formalmente, minha avó era uma pessoa culta e sempre tinha conselhos sábios para as diversas situações da vida. Apesar de não ter tido a oportunidade de mostrar-lhe que obtive meu diploma, por conta de seu falecimento durante meu processo de graduação, eu sempre soube que ela jamais duvidou de mim.

À minha namorada e companheira, Fernanda, que esteve ao meu lado em todos os momentos, independente das circunstâncias. Às vezes, esqueço-me de como era a minha vida antes de conhecê-la, mas não me arrependo um segundo sequer.

Aos meus queridos sogros, Alexandre e Betina, que são pessoas verdadeiramente generosas e altruístas. É difícil expressar com palavras todo o bem que eles fizeram e continuam fazendo por mim. Tenho certeza de que sou uma pessoa melhor simplesmente por ter tido a sorte de conviver ao lado deles.

Ao meu irmão Eduardo, que é mais parecido comigo do que imagina e cuja vida tornei excepcionalmente difícil. O tempo mostrou-nos quais caminhos não devemos seguir. Conte sempre comigo.

Agradeço, ainda, ao meu pai, Glênio, que muitas vezes fui o seu maior crítico. Se o retirássemos da equação que representa a minha trajetória até aqui, o resultado seria, certamente, muito diferente do que é agora.

Ao meu professor e orientador, Mauricio, que sempre nos aconselhou com honestidade e sinceridade, às vezes mais do que nossos próprios pais têm coragem de fazer.

Também gostaria de agradecer à Universidade Federal de Santa Catarina, por oferecer educação gratuita, da qual eu não teria condições de pagar, e aos seus programas de assistência estudantil, dos quais os alunos de baixa renda, como eu, dependem para sobreviver.

Por fim, mas não menos importante, desejo agradecer a mim mesmo por nunca ter duvidado de minha própria capacidade e por ser o indivíduo magnífico que sou.

*“Coisas comuns são para pessoas
comuns, eu sou diferente.”
(Arnold Schwarzenegger)*

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo sobre eficiência energética na substituição de motores elétricos em uma planta de açúcar e etanol. A substituição por máquinas mais eficientes muitas vezes gera economia de energia suficiente para cobrir o investimento realizado. A idade média dos equipamentos na indústria brasileira é de 17 anos, o que gera uma alta demanda por serviços de manutenção e impulsiona a busca por melhorias na eficiência energética. Isso torna este estudo ainda mais relevante. Devido à praticidade, baixo custo e agilidade na prestação de serviços, a indústria de manutenção e recuperação de motores é muitas vezes maior do que a de produção de novas máquinas. Para analisar os fatores que afetam a eficiência energética de um motor elétrico, todos os fatores que envolvem a operação do motor são levados em consideração. Os dados coletados, sejam medidos ou estimados, foram empregados para calcular os rendimentos dos motores e os indicadores de viabilidade econômica. Foi constatado que a substituição dos equipamentos estudados é plenamente viável e que a metodologia empregada pode ser aplicada em outros modelos de negócio. Dessa forma, é possível obter benefícios significativos na eficiência energética e contribuir para a sustentabilidade das empresas.

Palavras-chave: Eficiência energética. Açúcar e etanol. Motor elétrico. Manutenção. Viabilidade econômica.

ABSTRACT

This work aims to present a study on energy efficiency in the replacement of electric motors in a sugar and ethanol plant. The replacement of less efficient machines often generates enough energy savings to cover the investment made. The average age of equipment in the Brazilian industry is 17 years, which generates a high demand for maintenance services and drives the search for improvements in energy efficiency. This makes this study even more relevant. Due to the practicality, low cost, and agility in providing services, the maintenance and motor recovery industry is often larger than the production of new machines. To analyze the factors that affect the energy efficiency of an electric motor, all factors involving the motor's operation are taken into account. The data collected, whether measured or estimated, were used to calculate motor efficiencies and economic viability indicators. It was found that the replacement of the studied equipment is fully feasible and that the methodology employed can be applied to other business models. Thus, it is possible to obtain significant benefits in energy efficiency and contribute to the sustainability of companies.

Keywords: Energy efficiency. Sugar and ethanol. Electric motor. Maintenance. Economic viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Projeção do consumo final de energia por setor em 2023.	17
Figura 2 – O rotor de um motor do tipo gaiola de esquilo e a sua estrutura sem as lâminas.	21
Figura 3 – Etapas do processo de montagem de um estator.	22
Figura 4 – Conjugado resistente constante.	25
Figura 5 – Conjugado resistente linear.	26
Figura 6 – Conjugado resistente parabólico.	27
Figura 7 – <i>Encoder</i> acoplado em um motor com ventilação forçada.	29
Figura 8 – Motor operando em uma planta de mineração.	31
Figura 9 – Combinação da vedação por retentor e labirinto.	32
Figura 10 – Pintura interna em um motor elétrico.	33
Figura 11 – Acoplamento elastomérico bipartido HDFB.	34
Figura 12 – Causas comuns de queima no motor elétrico.	39
Figura 13 – Perda de rendimento x Quantidade de rebobinamentos.	40
Figura 14 – Ponto ótimo de disponibilidade.	41
Figura 15 – Lucratividade x Custo da manutenção.	41
Figura 16 – Relação entre VPL, TIR e TMA.	43
Figura 17 – Placa de identificação de um motor elétrico da marca WEG.	45
Figura 18 – Curvas de desempenho de um motor genérico WEG.	47
Figura 19 – Correntes de operação x Porcentagem de carga.	48
Figura 20 – Consumo de um motor de 37 kW para diferentes cargas e rendimentos.	52
Figura 21 – Análise financeira: VPL x TMA.	52
Figura 22 – Mexedor do Decantador 01 (Motor A).	73
Figura 23 – Mexedor do Decantador 03 (Motor B).	74
Figura 24 – Esteira intermediária 03 (Motor C).	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Custos de energia elétrica para um consumo de 100.000 kWh.	39
Tabela 2 – Fluxo de caixa descontado do projeto.	53
Tabela 3 – Resultados financeiros do projeto.	54
Tabela 4 – Mexedor do Decantador 01 (Motor A).	55
Tabela 5 – Mexedor do Decantador 03 (Motor B).	56
Tabela 6 – Esteira intermediária 03 (Motor C).	56
Tabela 7 – Valores de rebobinagem e aquisição de motores.	58
Tabela 8 – Valores de rendimento e consumo de energia.	58
Tabela 9 – Motor A - Proposta de substituição.	59
Tabela 10 – Motor B - Proposta de substituição.	60
Tabela 11 – Motor C - Proposta de substituição.	60
Tabela 12 – Eficiência energética para o modelo IR3 Premium.	61
Tabela 13 – Eficiência energética para o modelo Super Premium.	61
Tabela 14 – Análise de viabilidade econômica do motor A.	62
Tabela 15 – Análise de viabilidade econômica do motor B.	63
Tabela 16 – Análise de viabilidade econômica do motor C.	64
Tabela 17 – Análise de viabilidade econômica do projeto.	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DC	Tarifa de Demanda Contratada
ED	Tarifa de Excedente de Demanda
FC	Fluxo de Caixa
IBC	Índice de Benefício-Custo
IEC	International Electrotechnical Commission
IR1	Índice de Rendimento um
IR3	Índice de Rendimento três
NBR	Norma Brasileira
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
ROI	<i>Return on Investment</i>
ROIA	<i>Return on Invested Assets</i>
TE	Tarifa de Energia
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
TUST	Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão
VP	Valor Presente
VPA	Valor Presente Acumulado
VPL	Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

n	Velocidade do motor (rpm)
f	Frequência da rede (Hz)
p	Número de polos
C	Conjugado (Nm)
P	Potência mecânica (kW)
s	Escorregamento (%)
n_s	Velocidade síncrona (rpm)
η	Rendimento (%)
U	Tensão nominal (V)
I	Corrente nominal (A)
$\cos \varphi$	Fator de potência
C_{med}	Conjugado resistente médio (Nm)
C_0	Conjugado de partida (Nm)
C_n	Conjugado nominal (Nm)
n_{CARGA}	Velocidade de rotação da carga (rpm)
D_{MOTOR}	Diâmetro da polia do motor (m)
D_{CARGA}	Diâmetro da polia da carga (m)
C_{CARGA}	Conjugado de carga (Nm)
$\%CARGA$	Porcentagem de potência fornecida em relação à nominal (%)
H_{op}	Quantidade diária de horas operacionais
D_{op}	Quantidade anual de dias operacionais
$\%CARGA_{REF}$	Porcentagem de potência referência em relação à nominal (%)
P_{ABS}	Potência elétrica absorvida (kW)
η_{REF}	Rendimento de referência (%)
$\%CARGA_{PRO}$	Porcentagem de carga do motor proposto (%)
C_{ATU}	Conjugado do motor atual (Nm)
C_{PRO}	Conjugado do motor proposto (Nm)
$\%CARGA_{ATU}$	Porcentagem de carga do motor atual (%)
cst_{CV}	Consumo com variação de velocidade para cargas constantes (kWh/ano)
$consumo_{SV}$	Consumo sem variação de velocidade (kWh/ano)
n_{ATUAL}	Velocidade do motor atual (rpm)
lnr_{CV}	Consumo com variação de velocidade para cargas lineares (kWh/ano)
prb_{CV}	Consumo com variação de velocidade para cargas parabólicas (kWh/ano)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2.3	METODOLOGIA	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO	21
3.1.1	Aspectos Construtivos	21
3.1.1.1	Rotor	21
3.1.1.2	Estator	22
3.1.1.3	Carcaça	22
3.1.2	Fundamentos de um Motor Elétrico	23
3.2	APLICAÇÃO	24
3.2.1	Conjugado Resistente de Carga	24
3.2.1.1	Carga Constante	24
3.2.1.2	Carga Linear	25
3.2.1.3	Carga Parabólica	26
3.2.2	Regime de Serviço	27
3.2.2.1	Regime de Serviço Contínuo	27
3.2.2.2	Regime de Serviço Intermitente	28
3.2.2.3	Regime de Serviço de Partida	28
3.2.2.4	Regime de Serviço Variável	28
3.2.2.5	Regime de Serviço de Curta Duração	28
3.2.2.6	Regime de Serviço Pulsante	28
3.3	INVERSOR DE FREQUÊNCIA	28
3.4	SOFT-STARTER	30
3.5	VENTILAÇÃO FORÇADA	30
3.6	LOCAL DA INSTALAÇÃO	30
3.6.1	Contaminantes	31
3.6.1.1	Água	31
3.6.1.2	Poeira e Fibras	31
3.6.1.3	Gases	31
3.6.1.4	Temperatura	32
3.6.2	Vedação	32
3.6.3	Plano de Pintura	33
3.6.4	Resistência de Aquecimento	34
3.7	ACOPLAMENTO	34

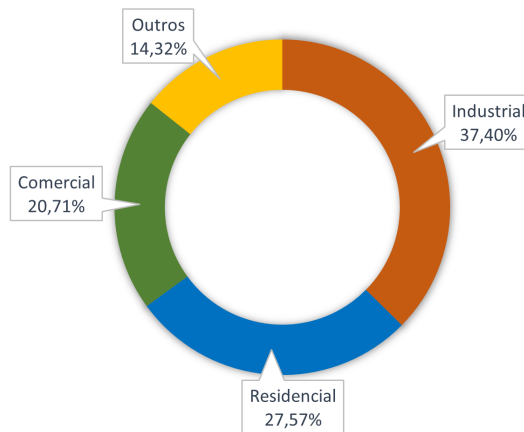
3.7.1	Acoplamento Flexível	35
3.7.2	Acoplamento Rígido	35
3.7.3	Acoplamento de Engrenagem	35
3.7.4	Acoplamento de Corrente	35
3.7.5	Acoplamento de Grade	36
3.7.6	Acoplamento de Lâminas	36
3.7.7	Acoplamento de Polias e Correia	36
3.8	CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA	37
3.8.1	Legislação	37
3.8.2	Tarifas de Energia	38
3.9	MANUTENÇÃO	39
3.9.1	Custo e Viabilidade	40
3.10	MÉTODOS DE ANÁLISE FINANCEIRA	41
3.10.1	Valor Presente Líquido (VPL)	42
3.10.2	Taxa Interna de Retorno (TIR)	42
3.10.3	Payback	43
3.10.4	Cenários e Incerteza	43
3.10.5	Índice IBC	44
4	METODOLOGIA	45
4.1	OBTENÇÃO DOS DADOS	45
4.1.1	Dados de Placa	45
4.1.2	Dados Complementares	46
4.2	CÁLCULOS	46
4.2.1	Análise de Carga	47
4.2.1.1	Análise de Carga por Corrente de Operação	47
4.2.1.2	Análise de Carga por Potência Absorvida	48
4.2.2	Análise do Consumo	49
4.2.3	Análise de Manutenção	50
4.2.4	Análise Financeira	51
4.2.4.1	Análise do VPL	51
4.2.4.2	Análise dos Demais Parâmetros Financeiros	53
5	RESULTADOS	55
5.1	LEVANTAMENTO DE DADOS	55
5.1.1	Motores Atuais	55
5.1.2	Aplicação	56
5.1.3	Operação	57
5.2	MOTORES PROPOSTOS	58
5.2.1	Economia	60
5.3	VIABILIDADE ECONÔMICA	61

6	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS	69
	ANEXO A – MOTORES ANALISADOS NO ESTUDO	73

1 INTRODUÇÃO

No mundo, a demanda energética segue uma tendência crescente de aumento; entretanto, a capacidade de produção de energia não acompanha a mesma taxa de desenvolvimento. No Brasil, segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2023), o país projeta um crescimento da demanda de carga de 2,7% para 2023 e, a partir de 2025, de 3,6% ao ano. Ainda para o ano de 2023, segundo estudo da Empresa Pesquisa Energética (EPE, 2023), a indústria brasileira será responsável por consumir cerca de 37,4% (Figura 1) da energia produzida no país e, dessa fatia, segundo publicação da (PROCEL, 2023), 70% será consumida por motores elétricos.

Figura 1 – Projeção do consumo final de energia por setor em 2023.



Fonte: Adaptado de (EPE, 2023).

Tendo em vista o impacto causado por esses equipamentos na matriz energética brasileira, foi criada a Portaria Interministerial N^o 1, que define os níveis mínimos de rendimento por potência e polaridade que os motores elétricos devem ser fabricados ou importados (MME, 2023b). Estima-se que a substituição de um motor tradicional por um de Índice de Rendimento três (IR3), nomenclatura popularmente adotada para referenciar o rendimento mínimo vigente por lei em 2023, pode propiciar ganhos de eficiência de 6%.

Segundo dados da Associação Brasileira de Gestão e Manutenção de Ativos (ABRAMAN), a idade média dos equipamentos instalados no Brasil é de 17 anos, isto é, embora exista uma lei vigente que regulamenta a fabricação e importação de motores elétricos no país, não há uma eficácia na atuação da lei quanto à substituição dos motores antigos, gerando um enorme potencial para a empregabilidade de estudos de eficiência energética (PROCEL, 2023).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade de substituir equipamentos em operação, levando em consideração critérios econômico-financeiros obtidos por meio de um estudo de eficiência energética em uma planta industrial de açúcas e etanol. Em outras palavras, será feita uma comparação dos benefícios adquiridos ao substituir motores elétricos antigos por equipamentos mais eficientes.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Ainda dentro do estudo de viabilidade de substituição de equipamentos, são analisados os custos que envolvem a manutenção de um equipamento em operação, a incerteza de variáveis-chave envolvidas no processo e como isso pode impactar na decisão de substituir o motor por um modelo mais novo e eficiente. Também, discorre-se sobre os impactos da rebobinagem na perda de eficiência de um motor elétrico.

2.3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo consiste em uma revisão teórica das características do motor elétrico, com foco especial nos Capítulos 3 e 4, abordando temas como potência na ponta do eixo e consumo de energia. Com base nessas informações, será possível avaliar se um equipamento está bem dimensionado e como é possível realizar uma substituição adequada. Em seguida, será analisado como a operação do motor elétrico se traduz em custos de energia elétrica, bem como será estudada a legislação que aborda essa questão.

Ainda dentro da operação do motor, são apresentados todos os fatores que impactam nos custos de manutenção e como isso afeta o dispositivo a longo prazo.

Por último, no Capítulo 4, é apresentada uma revisão sobre métodos econômicos para dar embasamento, como fator de decisão, na substituição de um equipamento em operação. O resultado do Capítulo 5 será uma composição de todos os aspectos discutidos ao longo da metodologia. No Capítulo 6 serão apresentadas as conclusões do estudo que indicam a viabilidade de implementação do projeto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO

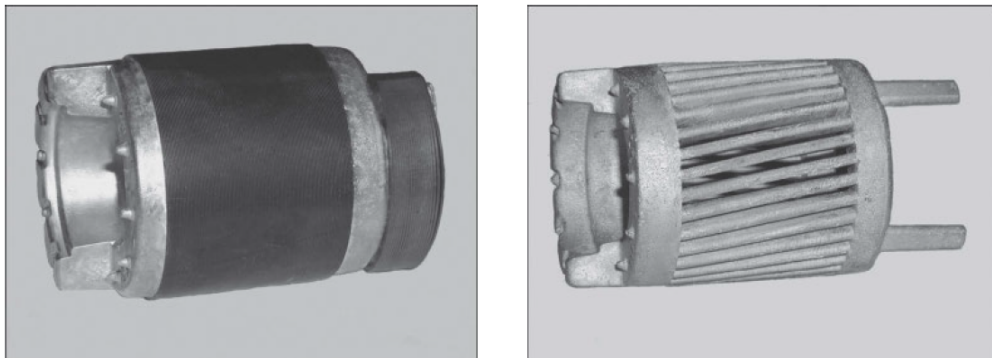
O motor elétrico de indução é uma máquina amplamente utilizada em diversos setores da indústria, como em plantas de mineração, petróleo e gás, papel e celulose, siderurgia, entre outros. Seu princípio básico consiste na conversão de energia elétrica em energia mecânica, que é responsável por gerar movimento para as mais diversas aplicações. Sua construção envolve diversos aspectos técnicos que são fundamentais para seu funcionamento adequado, incluindo o número de polos, o rotor, o enrolamento das bobinas, a carcaça, entre outros fatores.

3.1.1 Aspectos Construtivos

3.1.1.1 Rotor

Em um motor elétrico de indução, a parte girante é o elemento chamado de rotor, que é responsável por produzir o torque necessário para rotacionar o eixo da máquina. Os rotores são construídos com chapas empilhadas de aço silício, que são dispostas em uma estrutura maciça de alumínio com formato semelhante ao de uma gaiola de esquilo (Figura 2). Quando uma corrente elétrica é aplicada às bobinas do estator do motor, um campo magnético é gerado, que interage com a gaiola de esquilo, permitindo que o rotor gire. As barras condutoras da gaiola de esquilo estão dispostas de tal forma que a corrente elétrica induzida cria um campo magnético que interage com o campo magnético do estator, gerando o torque que faz o rotor girar (CHAPMAN, 2017).

Figura 2 – O rotor de um motor do tipo gaiola de esquilo e a sua estrutura sem as lâminas.



Fonte: Adaptado de (UMANS, 2014).

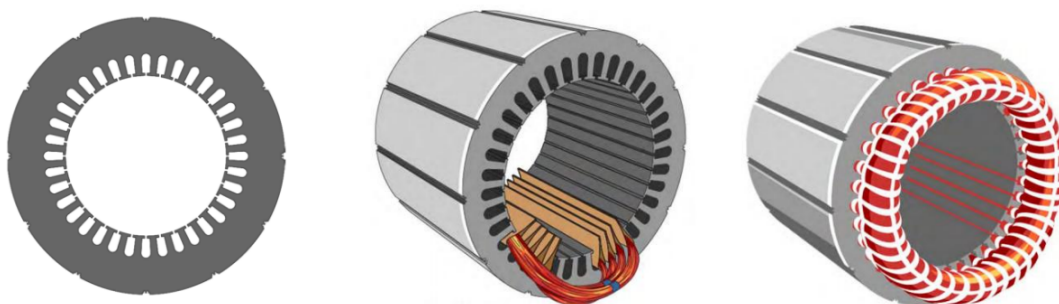
O tipo de material utilizado nas chapas possui como características: baixa perda magnética e alta resistividade elétrica. Combinado com o uso de finas lâminas desse material, as perdas causadas por correntes parasitas ou correntes de Foucault, são reduzidas a níveis mínimos (TOLEDO, 2007).

3.1.1.2 Estator

O estator é a parte estacionária do motor de indução e é responsável por produzir o campo magnético rotativo que faz o rotor girar. Isso ocorre com a aplicação de uma corrente elétrica alternada em suas bobinas, conforme mencionado anteriormente.

De forma análoga ao rotor, o estator também é constituído por chapas, entretanto, as lâminas são presas por cintas metálicas, ao invés de uma estrutura de alumínio, como ocorre no rotor (Figura 3). Essas chapas, em formato de anel, possuem ranhuras que permitem acomodar os enrolamentos das bobinas durante o processo de montagem. As bobinas podem ser conectadas em série ou em paralelo, dependendo das características do projeto do motor e determinam, entre outras coisas, a quantidade de polos da máquina (CHAPMAN, 2017). Os enrolamentos são isolados entre si e recebem uma impregnação de verniz isolante para garantir a segurança e a eficiência do motor.

Figura 3 – Etapas do processo de montagem de um estator.



Fonte: Adaptado de (LATERRA, 2019)

A velocidade síncrona de um motor de indução é determinada pela frequência da corrente elétrica injetada no motor e pelo número de polos do estator, conforme (1). No entanto, o rotor nunca atinge efetivamente essa velocidade, pois está sempre limitado pelo escorregamento, que é a diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor.

3.1.1.3 Carcaça

A carcaça de um motor elétrico é a estrutura que incorpora e protege os elementos internos do motor, como o rotor, o estator, os mancais, entre outros. Existem vários padrões comerciais de carcaça de motor elétrico, que são definidos por organizações internacionais, como a International Electrotechnical Commission (IEC) e a National Electrical Manufacturers Association (NEMA). As normas criadas por essas instituições estabelecem as dimensões, características e requisitos de desempenho para diferentes tamanhos e tipos de carcaças de motor elétrico.

As duas instituições mencionadas diferem em sua abordagem ao calcular o tamanho de uma carcaça. O padrão mais comumente adotado no mercado brasileiro, estabelecido pela IEC, determina o número de uma carcaça com base em sua altura, medida da base do equipamento até o centro de seu eixo.

3.1.2 Fundamentos de um Motor Elétrico

A seguir, apresenta-se alguns dos principais termos utilizados para caracterizar um motor elétrico. Essas nomenclaturas serão amplamente utilizadas ao longo do trabalho.

Velocidade síncrona é definida pela velocidade do campo girante, a qual depende da relação entre a frequência da rede e do número de polos do motor. Conforme (1).

$$n = \frac{120 f}{p} \quad (1)$$

Onde:

n - Velocidade do motor (rpm);

f - Frequência da rede (Hz);

p - Número de polos.

Potência nominal é a potência entregue no eixo do motor quando alimentado por tensão e corrente nominal, ou seja, é a potência para a qual o motor foi desenvolvido para trabalhar.

Conjugado, também conhecido como torque, é definido pela relação entre a potência nominal e a velocidade de rotação do motor. Conforme (2).

$$C = \frac{9555 P}{n} \quad (2)$$

Onde:

C - Conjugado (Nm);

P - Potência mecânica (kW);

n - Velocidade do motor (rpm).

Escorregamento, normalmente apresentado como um valor em porcentagem, consiste na diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do eixo do motor, dividida pela velocidade síncrona. Conforme (3).

$$s = 100 \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3)$$

Onde:

s - Escorregamento (%);

n_s - Velocidade síncrona (rpm);

n - Velocidade do motor (rpm).

Rendimento, também dado em porcentagem, é a relação entre potência elétrica retirada da rede e a potência nominal. Conforme (4).

$$\eta = \frac{1000 P}{\sqrt{3} U I \cos \varphi} \quad (4)$$

Onde:

η - Rendimento (%);

P - Potência mecânica (kW)

U - Tensão nominal (V);

I - Corrente nominal (A);

$\cos \varphi$ - Fator de potência.

Fator de serviço é uma constante que, ao ser multiplicada pela potência nominal, indica a potência limite que pode ser aplicada continuamente ao motor, sob condições especificadas, sem que ele seja danificado.

3.2 APLICAÇÃO

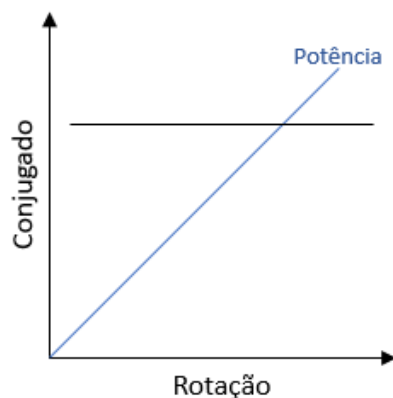
Conhecer o uso em que o motor elétrico está sendo empregado resulta em obter informações essenciais sobre o seu dimensionamento, principalmente, no que diz respeito ao conjugado resistente de carga. Desse modo, serão apresentados a seguir os tipos de conjugado resistente e a sua relação direta com a aplicação do equipamento, além dos tipos de regime de serviço.

3.2.1 Conjugado Resistente de Carga

3.2.1.1 Carga Constante

O conjugado resistente constante caracteriza-se por manter desde a partida um torque constante em toda a faixa de velocidades. Em outras palavras, o motor é capaz de fornecer um torque elevado mesmo em baixas rotações, o que resulta em alta aplicabilidade em operações que exigem grande força de tração como, por exemplo, britadores e transportadores contínuos (WEG, 2021). Ver Figura 4.

Figura 4 – Conjugado resistente constante.



Fonte: Adaptado de (PAULA SILVA; PEREIRA; HLUCHAN, 2013).

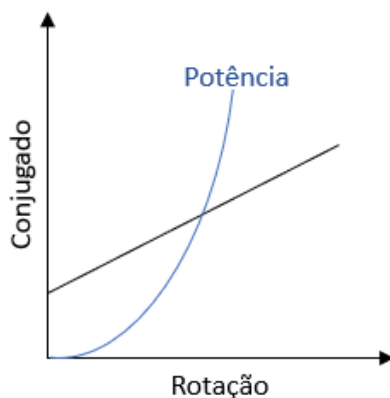
Para que o motor possua essa característica, é necessário que o projeto do equipamento contemple enrolamentos especiais, que permitam a geração de um campo magnético mais forte e estável, mesmo em condições de partida. Todavia, essa característica também pode ser obtida com o uso de redutores de velocidade ou inversores de frequência. Para cargas constantes, o conjugado de carga médio é igual ao conjugado de carga nominal.

3.2.1.2 Carga Linear

O conjugado resistente de carga linear pode se comportar de forma diferente, dependendo do tipo de carga acionada e da potência do motor. Em uma carga leve, o conjugado resistente tende a diminuir à medida que a rotação do motor aumenta, seguindo uma relação inversamente proporcional. Isso pode ser facilmente justificado ao olhar para o momento de inércia, pois à medida que o motor aumenta a rotação, o torque necessário para manter a carga em movimento diminui (WEG, 2021).

Em cargas pesadas ou de alta resistência ao movimento, o conjugado resistente tende a aumentar à medida que a rotação do motor aumenta, seguindo uma relação diretamente proporcional como mostrado no gráfico da Figura 5. Isso ocorre porque o motor precisa superar forças cada vez maiores à medida que a rotação do motor aumenta.

Figura 5 – Conjugado resistente linear.



Fonte: Adaptado de (PAULA SILVA; PEREIRA; HLUCHAN, 2013).

Motores elétricos projetados para trabalhar com conjugado resistente linear geralmente utilizam ímãs permanentes e são muito utilizados em conjunto com bombas de vácuo. Para cargas lineares, é possível calcular o conjugado de carga médio utilizando (5), que consiste na média aritmética entre o conjugado de partida e o conjugado nominal.

$$C_{med} = \frac{C_0 + C_n}{2} \quad (5)$$

Onde:

C_{med} - Conjugado resistente médio (Nm);

C_0 - Conjugado de partida (Nm);

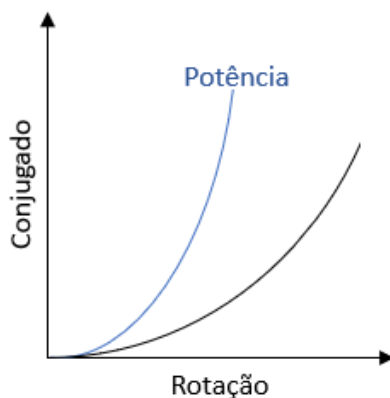
C_n - Conjugado nominal (Nm).

3.2.1.3 Carga Parabólica

Nesse modelo, o conjugado resistente varia com o quadrado da velocidade de rotação do motor, o que caracteriza o comportamento de uma parábola. O conjugado resistente pode aumentar ou diminuir dependendo da demanda de carga, podendo também assumir o perfil de uma parábola invertida.

O comportamento mais comum é descrito pelo gráfico da Figura 6, no qual o conjugado resistente aumenta com o aumento da carga e da velocidade de rotação. Nesse cenário, quanto maior a demanda de trabalho da máquina, maior será o conjugado resistente que ela terá que superar (WEG, 2021). Motores acoplados a centrífugas e compressores trabalham com esse tipo de conjugado.

Figura 6 – Conjugado resistente parabólico.



Fonte: Adaptado de (PAULA SILVA; PEREIRA; HLUCHAN, 2013).

Motores elétricos modificados para trabalhar com esse tipo de carga geralmente possuem dispositivos de ajuste de velocidade, eixo diferenciado e sistema de resfriamento adicional. Internamente é possível aumentar a seção transversal dos cabos para aumentar a capacidade de circulação de corrente elétrica, e dessa forma o motor é capaz de suportar uma carga de trabalho mais intensa tal qual o conjugado parabólico exige. Para calcular o conjugado de carga médio utiliza-se (6).

$$C_{med} = \frac{2C_0 + C_n}{3} \quad (6)$$

Onde:

C_{med} - Conjugado resistente médio (Nm);

C_0 - Conjugado de partida (Nm);

C_n - Conjugado nominal (Nm).

3.2.2 Regime de Serviço

Por resolução da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e das diretrizes da Norma Brasileira (NBR) 17094-1, os tipos de regime de serviço passam a ser padronizados. Segundo a normativa, ficam classificados os regimes pela letra S e ordenados de um a dez. Embora a NBR relacione dez tipos de regime de serviço e outros especiais, é possível agrupá-los em um número menor, sendo eles:

3.2.2.1 Regime de Serviço Contínuo

Nesse regime, o motor é projetado para operar de forma contínua, de modo que não ocorram interrupções. Esse regime é designado para máquinas cujas aplicações necessitem

alta disponibilidade e confiabilidade, por exemplo, transportadoras e compressores.

3.2.2.2 Regime de Serviço Intermitente

Nesse regime, o motor é projetado para operar com interrupções regulares, cuja operação oscile entre períodos de trabalho e repouso. Esse tipo de regime caracteriza o circuito percorrido por motores de elevadores, dos quais se necessita de um ciclo de trabalho específico.

3.2.2.3 Regime de Serviço de Partida

Nesse regime, o motor elétrico é projetado para suportar as exigências de carga mais intensamente durante o processo de partida, normalmente mais acentuado que o regime de operação contínua. Esse regime, tal qual o conjugado resistente linear, exige um alto torque inicial e pode ser observado em prensas.

3.2.2.4 Regime de Serviço Variável

Nesse regime, o motor elétrico é projetado para operar com variações de carga e velocidade, sem configurar um padrão de operação. Esse tipo de regime é comum em aplicações que envolvam linhas de produção industrial robotizadas.

3.2.2.5 Regime de Serviço de Curta Duração

Nesse regime, o motor elétrico é projetado para operar durante curtos períodos de tempo, normalmente em tempos menores que uma hora e com sobrecarga em relação ao regime contínuo. Esse tipo de regime é comum em aplicações que demandam picos de potência, por exemplo, furadeiras de bancada.

3.2.2.6 Regime de Serviço Pulsante

Nesse regime, o motor elétrico é utilizado em aplicações que exigem alta velocidade e com interrupções regulares e rápidas, como em máquinas de corte e perfuração.

3.3 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

O inversor de frequência é um dispositivo capaz de controlar a velocidade de motores elétricos. Resumidamente, ele é um equipamento que combinando a variação da frequência e variação da tensão elétrica injetada no motor, consegue ajustar a velocidade de rotação e a potência no eixo da máquina. Isso é facilmente explicado mediante (1) e (2).

Controlando a velocidade de rotação do motor, é possível evitar o consumo exacerbado de energia, uma vez que a máquina também adquire a capacidade de ajustar o

torque de acordo com a aplicação, mantendo a qualidade do processo e garantindo uma operação mais eficiente.

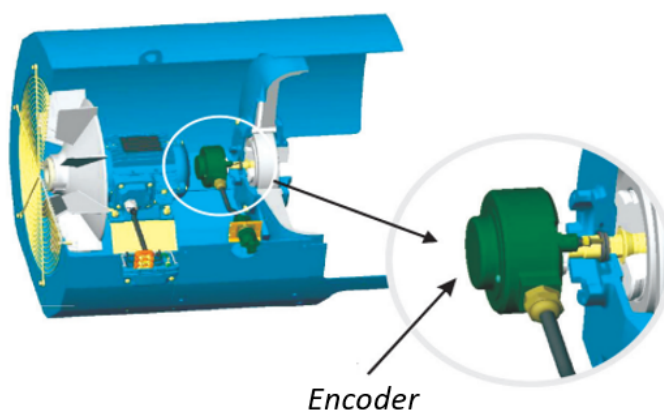
Ruídos e vibrações, que também são consideradas perdas energéticas, conseguem ser reduzidos ao controlar a velocidade do motor. Além da economia de energia, a máquina também ganha um aumento da vida útil, uma vez que os desgastes mecânicos causados por essas perdas são amenizados.

O inversor de frequência também traz vantagens em relação à temperatura do motor, pois, como já falado anteriormente, esses dispositivos são capazes de controlar a corrente do motor e, conseqüentemente, monitorar a sua temperatura. Entretanto, esse monitoramento possui certas limitações, pois o inversor consegue evitar somente queimas decorrentes de sobrecargas e não efetivamente manter a temperatura em um ponto ideal.

Em outras palavras, em operações em que o motor necessita manter alto torque em rotações mais baixas, a máquina vai aquecer e não há nada que o inversor consiga fazer a respeito, a não ser desligar o sistema. Para esse tipo de operação, recomenda-se o uso de sistemas de ventilação externos, tópico que será abordado posteriormente.

Motores elétricos modificados para trabalhar com inversores necessariamente precisam do auxílio de um dispositivo chamado *encoder* (Figura 7), que nada mais é do que um sensor de posição acoplado no eixo do motor. Esse sensor atua fornecendo informações sobre a posição do rotor, permitindo o ajuste preciso da frequência da energia elétrica fornecida ao motor, de acordo com a demanda de carga e a rotação desejada.

Figura 7 – *Encoder* acoplado em um motor com ventilação forçada.



Fonte: Adaptado de (WEG, 2023c).

Além do mais, a bobina do estator também recebe modificações. Ela deve ser projetada para suportar correntes mais altas sem sobreaquecer. Dependendo da aplicação, outras partes do motor podem ser modificadas para suportar as variações bruscas de velocidade impostas pelo inversor.

3.4 SOFT-STARTER

O *soft-starter*, assim como o inversor de frequência, é um dispositivo utilizado para controlar o acionamento de motores elétricos. Entretanto, possuem diferenças significativas entre si.

O *soft-starter* age limitando a corrente elétrica no momento da partida do motor, possibilitando reduzir consideravelmente os impactos causados na rede elétrica e no motor. Ele também é capaz de controlar gradativamente a tensão e a frequência injetadas no motor; porém, diferente do inversor, após atingir valores nominais, a velocidade de rotação da máquina não pode ser modificada. Esse aumento controlado dos parâmetros resulta em um acionamento mais suave, daí o nome do dispositivo *soft-starter*.

É possível utilizar *soft-starter* e inversor de frequência juntos em um mesmo motor elétrico. Enquanto um dispositivo atua reduzindo a corrente de partida do motor, limitando também o torque gerado durante o tempo de aceleração, o outro controla a velocidade de rotação de acordo com a necessidade da carga. Dessa forma, a combinação dos dois equipamentos propicia um controle mais preciso do motor elétrico.

3.5 VENTILAÇÃO FORÇADA

Motores elétricos de indução normalmente possuem sistema próprio de ventilação, que utiliza a própria rotação da máquina para forçar a passagem de ar por aletas fixas na carcaça do equipamento. Em algumas aplicações, principalmente em alta potência, esse sistema de autoventilação não é suficiente para resfriar o motor e nessas ocasiões, opta-se pelo uso de ventilação forçada.

A ventilação forçada é realizada por sistemas externos independentes que não afetam diretamente o rendimento do motor elétrico; entretanto, a falta de um sistema externo de ventilação, em casos de necessidade, pode manter a temperatura de operação do motor fora de uma faixa ideal e, isso sim, pode afetar o rendimento da máquina.

Motores que operam em velocidades acima ou abaixo da nominal, com o auxílio de inversores de frequência, tendem a trabalhar em temperaturas acima da convencional. Logo, ao combinar as tecnologias de inversores e ventilação forçada, pode-se obter um sistema mais eficiente e que consome menos energia.

3.6 LOCAL DA INSTALAÇÃO

Motores elétricos são equipamentos robustos e altamente confiáveis; no entanto, em algumas situações, podem ser submetidos a falhas que representam não apenas um risco para o próprio motor, mas também para o ambiente ao seu redor. Considera-se a contaminação o agente causador destes defeitos (Figura 8).

O motor que trabalha em condições nominais de carga e alimentação, mas que

trabalha em um ambiente agressivo, está exposto a um risco maior de falha prematura. Ambientes hostis são todos aqueles capazes de interferir direta ou indiretamente no funcionamento da máquina.

Figura 8 – Motor operando em uma planta de mineração.



Fonte: Elaboração própria.

3.6.1 Contaminantes

3.6.1.1 Água

O agente contaminante mais comum e presente em todo o tipo de planta industrial, a água afeta principalmente a lubrificação dos rolamentos. Quando os rolamentos estão danificados, o motor perde não apenas seu rendimento, mas também a isolação entre as bobinas e a carcaça, o que pode resultar na aderência de partículas e corpos estranhos. Indústrias de alimentos e bebidas, que precisam constantemente de limpeza em suas máquinas, estão frequentemente expostas a problemas com água.

3.6.1.2 Poeira e Fibras

Muito comum em plantas de mineração e cimento, o particulado em suspensão afeta tanto rolamentos quanto a ventilação. Este agente contaminante resseca a lubrificação da máquina e, quando acumulado sobre o equipamento, causa problemas de aumento de temperatura. Em alguns casos, quando há alto índice de umidade, a poeira também causa oxidação.

3.6.1.3 Gases

Este é um caso em que o equipamento, quando exposto a um ambiente isalubre, pode causar dano ao próprio dispositivo e ao local de instalação. Este ambiente é descrito

na norma como área classificada e é encontrado, principalmente, em plantas industriais que trabalham com derivados do petróleo.

Motores elétricos que operam em plataformas de petróleo, por exemplo, devem seguir normas rigorosas de construção. Entre outras coisas, a norma exige itens como dupla isolamento dos rolamentos e carcaça a prova de explosão.

3.6.1.4 Temperatura

Motores expostos a altas temperaturas, além da temperatura prevista de trabalho, deterioram a isolamento por impregnação das bobinas e, conseqüentemente, interrompem o seu funcionamento. O monitoramento constante da temperatura do motor e, quando necessário, o uso de ventilação forçada podem ajudar a contornar essa questão. No entanto, outra alternativa seria modificar e preparar o equipamento para suportar temperaturas mais elevadas.

3.6.2 Vedação

A vedação em motores elétricos é um processo importante para mitigar os danos causados pelos contaminantes supracitados. Existem diversos tipos de vedação, que podem variar dependendo da localidade e da aplicação do motor. Alguns dos principais métodos de vedação são:

A **vedação por retentor**, que é uma técnica de vedação simples constituída por um anel de borracha ou outro material, utilizado em torno do eixo para evitar a entrada de água e outros contaminantes.

A **vedação por labirinto**, que é uma técnica mais complexa, envolvendo canais em espiral no eixo do motor para desviar a água e outros contaminantes (Figura 9).

E a **vedação com selo mecânico**, uma técnica mais refinada que utiliza um conjunto de anéis e molas para garantir uma vedação mais hermética em torno do eixo da máquina.

Figura 9 – Combinação da vedação por retentor e labirinto.



Fonte: Adaptado de (WEG, 2023b).

3.6.3 Plano de Pintura

O plano de pintura é outra forma de evitar a redução prematura da vida útil de motores elétricos. Ambientes com presença de gases corrosivos, agentes oxidantes ou umidade excessiva tendem a encurtar a longevidade dos equipamentos. Para minimizar esses problemas, adotam-se alguns procedimentos envolvendo o plano de pintura, sendo eles:

1. Preparação da superfície: antes de aplicar a pintura, é necessário limpar a superfície onde a tinta será aplicada, o que garante maior aderência da tinta e evita a formação de bolhas causadas pela oxidação da carcaça da máquina. O jateamento abrasivo é uma excelente técnica para limpeza de superfícies metálicas.

2. Tintas de base: já com a superfície do motor devidamente limpa, aplicam-se camadas de tinta de fundo com a finalidade de preencher imperfeições e irregularidades, além de prevenir a corrosão e aumentar a durabilidade das camadas de tinta que serão aplicadas posteriormente. Em alguns casos, também é aplicada uma camada de tinta intermediária, com outras características químicas, que complementam o trabalho da tinta de fundo e melhoram a aderência da camada final.

3. Tinta de acabamento: a tinta que é aplicada na etapa de acabamento, dependendo da aplicação do motor, pode ser formulada para fornecer proteção extra para o motor, como resistência a temperatura e danos mecânicos. Essa camada de tinta também tem como finalidade o acabamento estético.

Em locais com alto índice de umidade, como em ambientes marítimos, é recomendado que as partes internas do motor também sejam revestidas com tinta (estator, bobinado e rotor). Esse procedimento evita a corrosão das chapas metálicas e, principalmente, a deterioração da impregnação isolante (Figura 10).

Figura 10 – Pintura interna em um motor elétrico.



Fonte: Adaptado de (NARDY, 2023).

3.6.4 Resistência de Aquecimento

A resistência de aquecimento é um dispositivo instalado no enrolamento do estator do motor elétrico, projetado para aquecer a máquina e evitar a condensação de umidade em seu interior. Essa resistência é geralmente conectada a um circuito elétrico separado do motor.

Ainda com o motor desligado, a resistência de aquecimento é acionada por um termostato ou temporizador, fazendo com que o enrolamento do estator aqueça, elevando gradualmente a temperatura interna do equipamento. Com a temperatura mais alta, a umidade interna do motor condensa menos em superfícies e passa a ser absorvida pelo ar quente e, dessa forma, a umidade acaba sendo transportada para fora do motor.

A redução da umidade no interior do motor ajuda a evitar a condensação de partículas em suas superfícies internas, o que prolonga a vida útil das partes da máquina mais sensíveis à umidade e evita perda de rendimento do motor. Além disso, em ambientes com temperaturas abaixo de zero, a resistência de aquecimento propicia ao motor elétrico o ponto ideal de temperatura para as partidas.

3.7 ACOPLAMENTO

Resumidamente, trata-se de um dispositivo ligado ao eixo do motor, responsável por transmitir a potência mecânica (Figura 11). Todavia, na prática, os acoplamentos desempenham outras funções importantes, como a redução de impactos em engrenagens e a diminuição de vibrações, resultando em maior durabilidade das peças e aumento da vida útil dos equipamentos envolvidos. A seguir serão expostos tipos de acoplamento comumente encontrados na indústria.

Figura 11 – Acoplamento elastomérico bipartido HDFB.



Fonte: Adaptado de (HENFEL, 2023).

3.7.1 Acoplamento Flexível

Normalmente utilizado quando se deseja evitar trancos em mudanças repentinas de velocidade na máquina (geralmente acionamentos). Um acoplamento flexível proporciona suavidade na transmissão da energia mecânica, pois são torcionalmente flexíveis, ou seja, problemas com desalinhamentos e combinação de eixos são facilmente evitados com esse tipo de acoplamento.

Existem algumas variantes de acoplamento flexível que são conhecidas como acoplamento elástico. De forma similar, elas também visam mitigar impactos, choques mecânicos e vibrações. Ambos os acoplamentos são de fácil manutenção e instalação, uma vez que não necessitam desmontar a máquina, além de apresentar encaixes mais exclusivos.

3.7.2 Acoplamento Rígido

Utilizado somente quando há eixos completamente alinhados, o acoplamento rígido, que não contém elementos flexíveis, permite conectar equipamentos sem que o torque danifique as máquinas. Os acoplamentos rígidos são divididos em três tipos: luva, flagelado e bipartido.

1. O tipo **luva** é geralmente em formato de tubo e faz com que os eixos se encaixem um em cada lado.

2. O tipo **flagelado** é constituído por flanges parafusadas entre si e ligadas nas extremidades de cada eixo.

3. O tipo **bipartido**, também encontrado como acoplamento flexível, é formado basicamente por duas peças no formato de engrenagens (uma em cada eixo) que se encaixam abraçando um terceiro elemento rígido ou flexível (Figura 11). Esse tipo é usado quando o acoplamento precisa ser instalado e removido facilmente, pois os elementos de fixação são presos por um parafuso.

3.7.3 Acoplamento de Engrenagem

O acoplamento de engrenagem funciona basicamente por transferência de força via cubo dentado (semelhante a engrenagens). Esse tipo de dispositivo é altamente recomendado para transmissão de grandes torques por conseguir mitigar desalinhamentos em direções axiais, paralelas e angulares. O seu uso também é recomendado para altas velocidades.

3.7.4 Acoplamento de Corrente

Utilizado principalmente em equipamentos de média a baixa velocidade com alto torque. O acoplamento de corrente consiste em cubos engrenados radialmente. Em outras palavras, os dois eixos são unidos por uma correia dupla de rolos. A transmissão mecânica,

que é feita pelo engrenamento dentado, possui pequenas folgas e, por consequência disso, só consegue ajustar desalinhamentos pequenos, como o angular, paralelo e o axial.

3.7.5 Acoplamento de Grade

O acoplamento em questão, também classificado como flexível, é constituído por um elemento bipartido com sulcos em formato de serpentina, que formam um circuito vazado preenchido pela grade. Recomenda-se o uso desse acoplamento quando há necessidade de corrigir desalinhamentos lineares, radiais e angulares. Ele é comumente utilizado em máquinas com alto nível de torque e amortecimento, destacando-se pela capacidade de absorver vibrações.

3.7.6 Acoplamento de Lâminas

Considerado o acoplamento com maior capacidade de transmissão de força, esse acoplamento funciona por meio do tensionamento e compressão de lâminas. Visualmente, muito semelhante a um acoplamento de flange, o acoplamento de lâminas é formado por três elementos parafusados entre si separados por lâminas. Esse dispositivo consegue ajustar todos os tipos de desalinhamentos, porém necessita de um tipo de acoplamento diferente para cada um. Também é capaz de compensar movimentos que aproximam e afastam as faces dos eixos.

3.7.7 Acoplamento de Polias e Correia

O acoplamento por polias e correia é formado por duas polias, uma ligada ao motor e a outra à carga, com uma correia que as conecta. As polias apresentam tamanhos diferentes, sendo essa diferença responsável pela relação de transmissão e pela velocidade de rotação do motor e da carga.

Recomenda-se fortemente que motores que utilizam esse sistema façam a troca do rolamento esférico pelo rolamento de rolos, pois o acoplamento de polias e correia aumenta significativamente o esforço radial no eixo do motor e o rolamento de rolos é projetado especialmente para suportar esse tipo de carga.

O sistema de polias e correia é capaz de alterar tanto a velocidade de rotação, quanto o torque na ponta do eixo, conforme apresentado em (7) e (8). Entretanto, para relações de transformação muito grandes, as polias são fisicamente incapazes de atender a demanda, uma vez que o diâmetro delas tende a ficar cada vez maior. Quando isso acontece, deve-se usar redutores de velocidade.

É importante salientar que sempre haverá uma pequena perda de rendimento com a utilização de qualquer dispositivo transmissor de energia mecânica. Todavia, os redutores de velocidade, em alguns casos, registram perda de rendimento de até 40%.

$$n_{CARGA} = n \frac{D_{MOTOR}}{D_{CARGA}} \quad (7)$$

$$C_{CARGA} = C \frac{D_{MOTOR}}{D_{CARGA}} \quad (8)$$

Onde:

n_{CARGA} - Velocidade de rotação da carga (rpm);

n - Velocidade do motor (rpm);

D_{MOTOR} - Diâmetro da polia do motor (m);

D_{CARGA} - Diâmetro da polia da carga (m);

C_{CARGA} - Conjugado de carga (Nm).

3.8 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Com os dados obtidos na etapa de dimensionamento do motor, é possível calcular o percentual de carga e o rendimento operacional do equipamento. Utiliza-se (9) para o cálculo do consumo de energia.

$$consumo = \%_{CARGA} \frac{P H_{op} D_{op}}{\eta} \quad (9)$$

Onde:

consumo - Consumo de energia elétrica do motor (kWh/ano);

$\%_{CARGA}$ - Porcentagem de potência fornecida em relação à nominal (%);

P - Potência mecânica (kW);

H_{op} - Quantidade diária de horas operacionais;

D_{op} - Quantidade anual de dias operacionais;

η - Rendimento (%).

Estima-se que o consumo de energia do motor elétrico pode representar uma grande parte do custo total ao longo de sua vida útil. Os custos de energia podem ser afetados por fatores como a eficiência do motor, a carga de trabalho e a tarifa de energia elétrica. Eles podem variar de 70% a 95% do custo total de um motor elétrico, segundo a (ABB, 2023).

3.8.1 Legislação

Conforme mencionado anteriormente, no ano de publicação deste trabalho, as diretrizes da Portaria Interministerial N° 1 (MME, 2023b) determinam que, para cada potência e a sua variante de rotação (para equipamentos novos e reconicionados comercializados no

Brasil), exista um rendimento nominal mínimo. Para casos excepcionais não padronizados, a portaria também determina um valor de rendimento por tamanho de carcaça.

De acordo com o estudo de (GARCIA, 2003), a aplicação da lei de eficiência energética poderá propiciar uma economia de aproximadamente 1% da energia elétrica usada pelos motores na indústria. No ano de 2021, a usina hidrelétrica de Itaipu produziu cerca de 66 TWh (BINACIONAL, 2023). Sabendo que a indústria consome 37,4% da energia elétrica do país (EPE, 2023) e que desse montante 70% será consumido por motores de indução (PROCEL, 2023), estimando uma economia de 1% causada pela aplicação da lei, algo em torno de 660 GWh poderia ser economizado somente em Itaipu. No Brasil, essa mesma economia poderia manter em funcionamento uma cidade de aproximadamente 429.687 residências na região nordeste do país durante um ano (MME, 2023a).

Outra consequência da nova lei a longo prazo será a renovação do maquinário industrial do país, o que pode resultar em um aumento da produtividade e da qualidade dos produtos produzidos pela indústria.

3.8.2 Tarifas de Energia

O mercado de energia elétrica brasileiro é regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e é composto por três tipos de mercado: regulado, livre e *spot*. No mercado regulado ou cativo, os consumidores são atendidos pelas distribuidoras locais e pagam tarifas reguladas pela ANEEL, que incluem as Tarifa de Energia (TE) e Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD).

Já no mercado livre, os consumidores têm a liberdade de escolher seu fornecedor de energia elétrica e negociar livremente as condições contratuais, como preços, prazos e volumes de energia. Nesse mercado, as tarifas de TUSD e Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão (TUST) são definidas em negociação entre o consumidor e o fornecedor de energia, e não são mais reguladas pela ANEEL.

Por fim, no mercado *spot* ou de curto prazo, a energia é comercializada por meio de um sistema de leilões eletrônicos, onde os preços são definidos pela oferta e demanda de energia em tempo real. Nesse mercado, a tarifa de energia elétrica é calculada pelo Preço de Liquidação das Diferenças (PLD), que reflete as condições de oferta e demanda de energia no sistema.

Além das tarifas mencionadas, existem outras tarifas que podem ser cobradas, como a Tarifa de Demanda Contratada (DC), que é cobrada dos consumidores que possuem um contrato com um determinado nível de demanda, independente do consumo de energia, e a Tarifa de Excedente de Demanda (ED), que é cobrada quando o consumo de energia ultrapassa o nível contratado de demanda.

Uma vez que cada perfil de consumidor é único, a escolha do tipo de mercado e as ações tomadas dentro dele podem ter um impacto significativo no preço final da energia consumida. Na Tabela 1, é possível observar um exemplo genérico em que o mercado livre

apresenta mais vantagens para o consumidor.

Tabela 1 – Custos de energia elétrica para um consumo de 100.000 kWh.

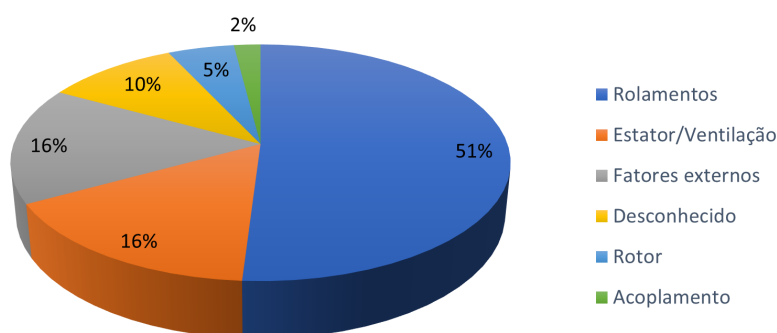
Tarifas	Regulado (R\$/kWh)	Livre (R\$/kWh)	Spot (R\$/kWh)
TUSD	0,19	0,19	-
TE	0,51	-	-
PU	-	0,30	-
TUST	-	0,10	-
PLD	-	-	0,65
Custo	R\$ 70.000,00	R\$ 49.000,00	R\$ 65.000,00

Fonte: Elaboração própria.

3.9 MANUTENÇÃO

Ao longo do tempo, é comum que equipamentos necessitem de manutenção para que o seu funcionamento não seja interrompido. Existe uma gama de fatores que levam o motor à falha total, contudo, não será exposto individualmente cada motivo que leva o equipamento à parada completa, e sim o fator comum entre eles, que é a queima (Figura 12).

Figura 12 – Causas comuns de queima no motor elétrico.



Fonte: Adaptado de (ELECTRIC, 2023).

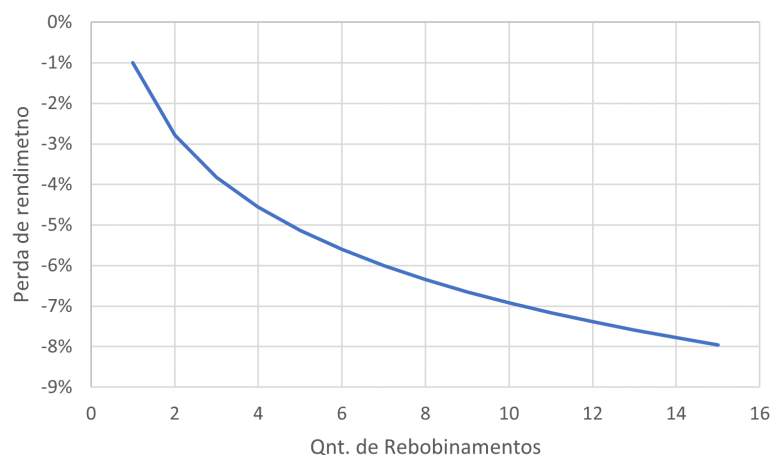
Geralmente, queimas não danificam as chapas magnéticas do estator; porém, dependendo da temperatura atingida no motor durante a queima, sendo ela suficientemente alta, as características magnéticas das chapas podem ser alteradas e com isso haverá um aumento das perdas no ferro. Algumas queimas podem danificar as chapas ao ponto em que uma chapa se funde a outra. Em outras palavras, seria como se uma chapa fosse soldada à outra. Dependendo da magnitude do estresse causado pela queima, esses pon-

tos de solda podem caracterizar uma cavidade no pacote, causando, além da perda de rendimento, uma redução na vida útil do motor.

Quando se fala de manutenção de motores elétricos, a rebobinagem é um dos principais procedimentos de ação corretiva para os casos em que o motor queimou. Rebobinar um motor também pode levar à diminuição da vida útil e do rendimento do equipamento, se não for feita corretamente, uma vez que se torna improvável garantir uma perfeita substituição tal qual a originalmente instalada, embora haja meios de minimizar ou até mesmo anular essas perdas segundo (PENROSE, 1997). Conforme o trabalho publicado de (AGUIAR *et al.*, 2018), consegue-se, inclusive, aumentar o rendimento de motores com o uso de técnicas de rebobinagem; todavia, o uso desse artifício com o intuito de incremento do desempenho do motor só atinge esse resultado em equipamentos de rendimento mais baixo, por exemplo, os motores elétricos de indução de categoria inferior a IR3.

No entanto, para os casos em que a rebobinagem foi feita após um evento de queima do motor, estima-se que o rendimento do equipamento pode diminuir conforme indicado no gráfico da Figura 13.

Figura 13 – Perda de rendimento x Quantidade de rebobinamentos.

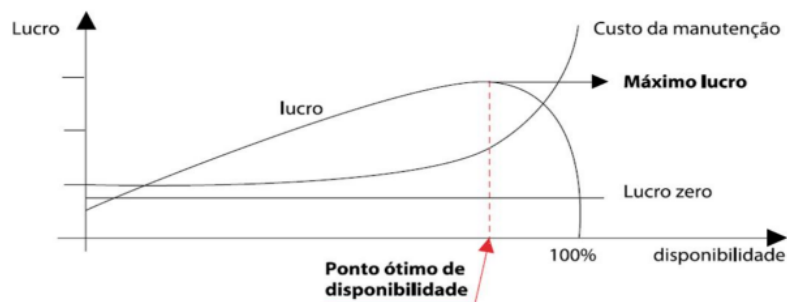


Fonte: Adaptado de (PENROSE, 2007).

3.9.1 Custo e Viabilidade

Segundo (MURTY; NAIKAN, 1995), a lucratividade da operação está diretamente relacionada à disponibilidade do equipamento e ao seu custo de manutenção. Ou seja, há um ponto ótimo de disponibilidade que pode ser determinado para calcular o período em que o dispositivo deve alternar entre o tempo de produção e o tempo de parada para reparos, sem que isso afete significativamente sua operação. A Figura 14 ilustra essa relação entre disponibilidade e custos de manutenção.

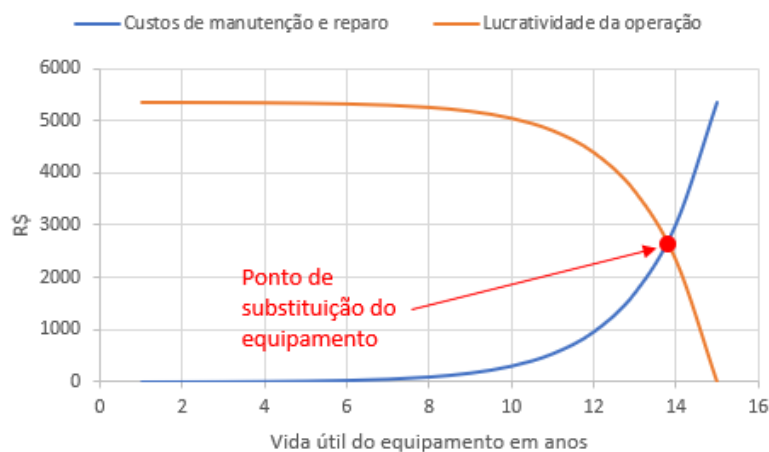
Figura 14 – Ponto ótimo de disponibilidade.



Fonte: Adaptado de (MURTY; NAIKAN, 1995).

Considerando que cada vez que o equipamento deixa de funcionar é contabilizado como uma parada não programada e é razoável afirmar que um motor elétrico necessita de um crescente número de intervenções à medida que envelhece, então, também é plausível afirmar que existe um número limite, inteiro e positivo, que determina a quantidade de vezes que um dispositivo pode queimar até que não compense mais economicamente o seu reparo (Figura 15). Para calcular este ponto, é necessário conhecer todos os custos de manutenção e operação envolvidos.

Figura 15 – Lucratividade x Custo da manutenção.



Fonte: Elaboração própria.

3.10 MÉTODOS DE ANÁLISE FINANCEIRA

Para determinar a viabilidade de um investimento ou até mesmo quantificar a atratividade entre diferentes projetos, ferramentas de análise financeira como, por exemplo, Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR) são de grande ajuda para auxiliar na tomada de decisão.

3.10.1 Valor Presente Líquido (VPL)

O VPL é utilizado para se conhecer o valor atual do retorno de um investimento. A análise do seu resultado constitui um dos indicadores que permite decidir a viabilidade de um projeto.

Para calcular o VPL, é necessário que todos os valores futuros estimados para o Fluxo de Caixa (FC) sejam transformados em valores presente, ou seja, esta técnica baseia-se em usar recebimentos futuros para quantificar com valores presentes se um projeto é viável ou não, conforme mostrado em (10).

O método do VPL utiliza a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) para determinar o retorno mínimo exigido pelo investidor. A TMA é subjetiva e representa o quanto o investidor está disposto a ganhar ou pagar em um investimento. É utilizada no cálculo do VPL, descontando os fluxos de caixa futuros. Se o VPL for maior que zero, o investimento é considerado atrativo. A TMA varia de acordo com o perfil do investidor, expectativas e riscos. É um parâmetro importante para avaliar a viabilidade financeira de um projeto de investimento (GITMAN, 2010).

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1 + TMA)^j} - Investimento\ Inicial \quad (10)$$

Onde:

VPL - Valor Presente Líquido;

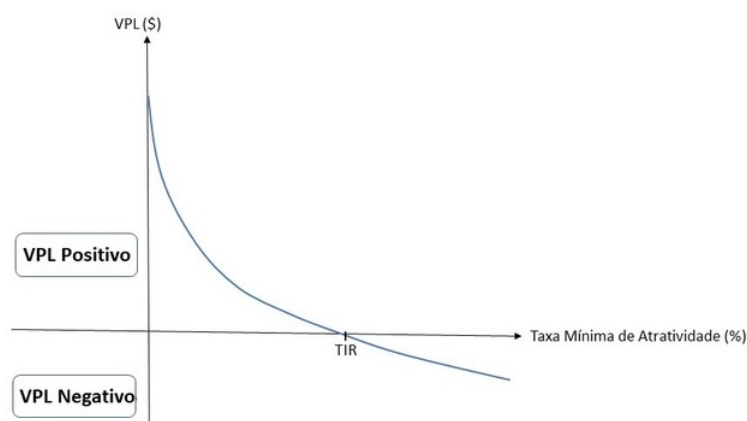
FC - Fluxo de Caixa;

TMA - Taxa Mínima de Atratividade.

3.10.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR é uma métrica utilizada na análise de investimentos que representa a taxa de retorno efetiva de um projeto. Ela é calculada encontrando a taxa de desconto que faz com que o VPL seja igual a zero. Em outras palavras, a TIR é a taxa de desconto na qual os fluxos de caixa projetados ao longo do tempo são exatamente iguais ao capital investido. Se a TIR for maior que a TMA, o projeto é considerado atrativo, pois está proporcionando um retorno maior do que o exigido pelo investidor. Por outro lado, se a TIR for menor que a TMA, o projeto pode não ser considerado atrativo. Portanto, a TIR e o VPL são métricas complementares na avaliação da viabilidade de um projeto, permitindo que os investidores tomem decisões mais embasadas considerando a taxa de retorno e os fluxos de caixa ao longo do tempo (GITMAN, 2010). No gráfico da Figura 16 é possível visualizar essa relação.

Figura 16 – Relação entre VPL, TIR e TMA.



Fonte: Adaptado de (ALMEIDA, 2021).

A TIR é uma ferramenta importante na tomada de decisão de investimentos entre projetos diferentes. Ela é expressa como um percentual e auxilia na identificação do investimento que oferece o maior retorno com base no capital aplicado e nos benefícios econômicos futuros. Para calcular a TIR, é necessário substituir o VPL por zero e a TMA pela TIR em (10).

3.10.3 *Payback*

O *payback* é um indicador do tempo que um investimento levará para retornar, em sua totalidade, as mãos do investidor. Nesse formato, este instrumento também é conhecido como *payback simples*; logo, existe outra configuração que calcula o tempo de retorno baseado nos benefícios financeiros descontados à TMA, modalidade essa chamada de *payback descontado*.

3.10.4 Cenários e Incerteza

A análise de cenários e a análise de sensibilidade são técnicas utilizadas para lidar com a incerteza na tomada de decisões.

A análise de cenários envolve a criação de diferentes cenários futuros possíveis, levando em consideração diferentes conjuntos de variáveis e eventos que podem ocorrer. Cada cenário representa uma visão plausível do futuro, com base em diferentes premissas e condições. Essa abordagem permite que os tomadores de decisão avaliem o impacto de diferentes situações e identifiquem estratégias adequadas para cada cenário.

Por outro lado, a análise de sensibilidade é focada em avaliar a influência de mudanças nas variáveis-chave em relação a um determinado resultado ou indicador. Ela envolve a realização de testes para verificar como uma alteração nas premissas ou estimativas impacta o resultado desejado. Por exemplo, pode-se analisar como uma mudança na taxa de câmbio ou nos custos de produção afeta o retorno financeiro de um projeto.

Em resumo, a análise de cenários é uma técnica que envolve a criação de diferentes visões do futuro, enquanto a análise de sensibilidade examina o impacto das mudanças em variáveis-chave sobre um resultado específico. Ambas as abordagens são úteis para lidar com a incerteza e auxiliar na tomada de decisões informadas.

3.10.5 Índice IBC

O Índice de Benefício-Custo (IBC) que foi identificado como a taxa de lucratividade nas tabelas ao longo do trabalho, é uma medida utilizada para avaliar a viabilidade econômica de um projeto, comparando os benefícios esperados com os custos associados. O cálculo do índice IBC envolve a comparação do VPL dos benefícios com o VPL dos custos, ambos descontados a uma taxa de desconto apropriada.

Ao analisar as tabelas apresentadas, o índice IBC foi utilizado como indicador da taxa de lucratividade dos projetos, sendo considerado favorável quando é superior a 1. Isso indica que os benefícios esperados superam os custos, resultando em uma taxa de lucratividade positiva. Por outro lado, um índice IBC inferior a 1 indica que os custos superam os benefícios, resultando em uma taxa de lucratividade negativa.

É importante destacar que o índice IBC fornece uma visão abrangente da relação entre benefícios e custos ao longo do tempo, permitindo uma avaliação mais precisa da viabilidade econômica de um projeto. Ao contrário do *Return on Investment* (ROI) ou *Return on Invested Assets* (ROIA), o índice IBC leva em consideração a perspectiva temporal e a taxa de desconto, fornecendo uma análise mais completa da rentabilidade do investimento (GITMAN, 2010).

4 METODOLOGIA

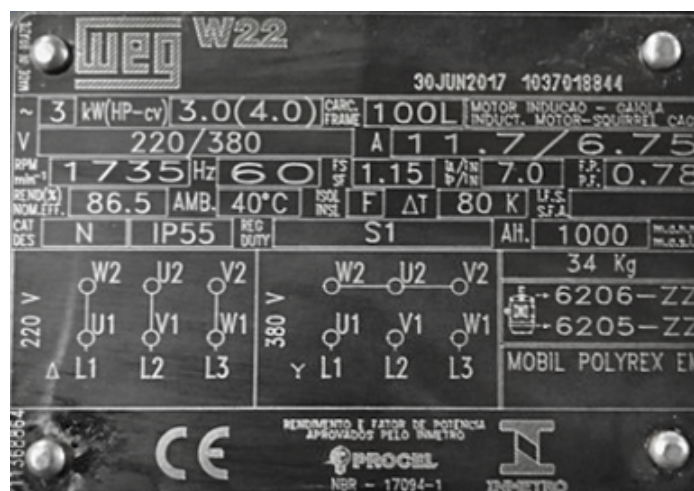
4.1 OBTENÇÃO DOS DADOS

Para o caso de um eventual redimensionamento do equipamento em operação, é crucial obter do responsável pela máquina todas as informações relevantes sobre o seu funcionamento. As informações coletadas nessa fase serão utilizadas posteriormente nos cálculos de carga, consumo e manutenção para desenvolver o modelo financeiro. Ter acesso a esses dados é fundamental para garantir a precisão e a eficácia do processo de redimensionamento, que visa otimizar a eficiência do equipamento e reduzir os custos operacionais. Por isso, é importante realizar uma coleta de dados completa e minuciosa, de forma a assegurar que todas as informações relevantes sejam consideradas no processo de análise e tomada de decisão.

4.1.1 Dados de Placa

Como este trabalho trata de analisar soluções de eficiência energética para equipamentos em operação, o primeiro passo para iniciar o estudo consiste em obter informações dos motores, e para isso, a melhor e mais eficiente forma é obter os dados de placa das máquinas. A placa de um motor elétrico de indução funciona como um documento de identificação. Assim, como no RG de uma pessoa, nela é possível encontrar todos os dados importantes que caracterizam o funcionamento do equipamento, como pode ser visto na Figura 17. Para o mercado brasileiro, as placas de identificação dos motores devem seguir a norma NBR 17094 e suas variantes.

Figura 17 – Placa de identificação de um motor elétrico da marca WEG.



Fonte: Adaptado de (ELETROMECAÂNICA, 2023).

Com a placa de identificação em mãos, é possível obter o número de série do equipamento e, quando possível, solicitar a ficha técnica da máquina ou folha de dados.

Este documento contém todas as informações relevantes sobre o motor, incluindo suas curvas de desempenho e desenhos.

Em muitos casos, especialmente em motores mais antigos ou expostos a ambientes agressivos, a placa de identificação pode estar completamente deteriorada, tornando as informações ilegíveis. Nessas situações, torna-se impossível obter as informações técnicas do equipamento por meio da placa de identificação. Portanto, a análise das capacidades da máquina terá que ser feita exclusivamente com base nas informações coletadas no local. É importante salientar que a coleta de dados *in loco* é uma etapa crítica na análise de eficiência energética, já que as informações precisam ser obtidas de forma rigorosa e confiável.

4.1.2 Dados Complementares

Para realizar uma análise completa do motor elétrico, é necessário coletar tanto os dados técnicos da placa de identificação, quanto os dados complementares da máquina relacionados à sua operação. Um dos aspectos mais importantes nessa etapa é identificar a aplicação do motor, o que permite estimar as características do conjugado resistente de carga e o regime de operação com uma pequena margem de erro. Além disso, é fundamental obter informações sobre as condições em que o motor é utilizado, incluindo a presença de contaminantes que possam afetar o seu funcionamento.

Outro ponto relevante é verificar se estão sendo utilizados dispositivos adicionais, como inversores de frequência, *soft-starters*, ventilação forçada, acoplamentos ou redutores, entre outros. Essas informações são de extrema relevância, pois podem exigir modificações de projeto em um motor padrão, garantindo o desempenho e a eficiência energética do sistema como um todo.

4.2 CÁLCULOS

Com base nos resultados obtidos até esta etapa, torna-se possível avaliar se o motor elétrico está devidamente dimensionado e, assim, avaliar a viabilidade de substituição do equipamento por um modelo de mesma capacidade ou até mesmo por outro modelo, caso esteja sobredimensionado ou subdimensionado. Para avaliar a carga do motor, serão utilizados dois métodos distintos: análise da corrente de operação e análise da potência absorvida.

A medida da corrente elétrica que flui pelo motor elétrico é uma indicação direta da carga do motor, uma vez que a corrente elétrica é proporcional à carga mecânica aplicada ao eixo da máquina. Assim, com uma análise de carga baseada em medidas de corrente, consegue-se avaliar o desempenho do motor em tempo real, especialmente em situações em que a carga do motor varia constantemente.

Por outro lado, a medida da potência ativa absorvida pelo motor elétrico é uma

indicação da quantidade de energia que está sendo transformada diretamente em trabalho mecânico. Essa medida também é útil para avaliar o consumo de energia do motor e determinar se ele está funcionando de maneira eficiente. A análise de carga baseada em medidas de potência ativa absorvida é melhor aproveitada para avaliar o desempenho do motor em um período de tempo mais longo e para identificar possíveis oportunidades de melhoria de eficiência energética.

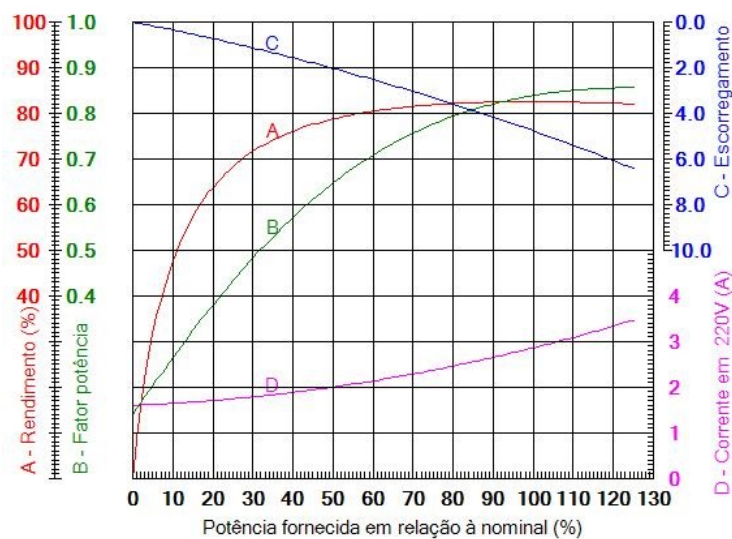
Portanto, ambas as metodologias têm suas vantagens e podem ser úteis em diferentes situações de análise de carga de um motor elétrico.

4.2.1 Análise de Carga

4.2.1.1 Análise de Carga por Corrente de Operação

Com base nas medições de corrente obtidas no local de instalação onde o equipamento está operando, e com o acesso às curvas de desempenho do motor elétrico (Figura 18), é possível obter a porcentagem de carga em relação à nominal.

Figura 18 – Curvas de desempenho de um motor genérico WEG.



Fonte: Adaptado de (WEG, 2023a).

Após essa etapa, utiliza-se a (11) para calcular o conjugado na ponta do eixo que está sendo exigido pela operação.

$$C_{CARGA} = \%CARGA \frac{9555 P}{n} \quad (11)$$

Onde:

C_{CARGA} - Conjugado de carga (Nm);

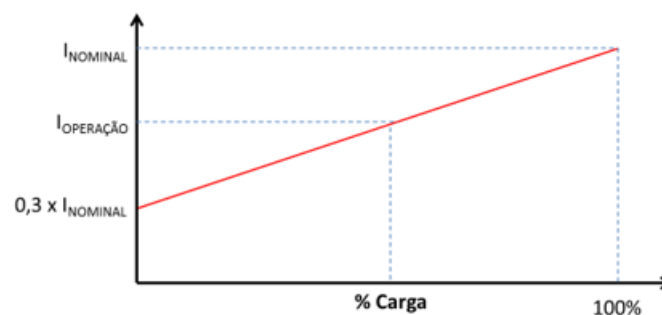
$\%CARGA$ - Porcentagem de potência fornecida em relação à nominal (%);

P - Potência mecânica (kW);

n - Velocidade do motor (rpm).

Caso não seja possível ter acesso às curvas de desempenho do equipamento, a porcentagem de carga pode ser estimada traçando uma reta com os valores de corrente medidos, corrente nominal e corrente em vazio, como no gráfico da Figura 19. Para o último, assume-se um valor de 30% da corrente nominal. Para calcular o rendimento em função da corrente de operação, deve-se adotar a mesma metodologia. No entanto, é importante ressaltar que esse método é limitado, pois depende de valores de catálogo.

Figura 19 – Correntes de operação x Porcentagem de carga.



Fonte: Elaboração própria.

4.2.1.2 Análise de Carga por Potência Absorvida

Sabe-se que a potência elétrica é constituída por duas componentes: uma ativa, que efetivamente é transformada em trabalho, e outra reativa, que não realiza trabalho. Logo, obtendo medidas da potência absorvida e utilizando métodos numéricos, consegue-se de maneira mais precisa a real porcentagem de carga do motor. Então, com a medida de potência absorvida, o primeiro passo é obter uma porcentagem de carga referência utilizando (12).

$$\%_{CARGA_{REF}} = \frac{P_{ABS} \eta}{P} \quad (12)$$

Onde:

$\%_{CARGA_{REF}}$ - Porcentagem de potência referência em relação à nominal (%);

P_{ABS} - Potência elétrica absorvida (kW);

η - Rendimento (%);

P - Potência mecânica (kW).

Com base nos resultados obtidos em (12), (13) e (14), pode-se utilizar (15) para obter o rendimento do ponto de carga medido. Quando não houver informação do rendimento a 75% da carga, assume-se o valor nominal.

$$V_L = \frac{\left(\frac{100}{\eta_{100}} - 1\right) - 0,75\left(\frac{100}{\eta_{75}} - 1\right)}{0,4375} \quad (13)$$

$$V_0 = \left(\frac{100}{\eta_{100}} - 1\right) - V_L \quad (14)$$

$$\eta_{REF} = \frac{100}{1 + \frac{V_0}{\frac{\%CARGA_{REF}}{100}} + \left(V_L \frac{\%CARGA_{REF}}{100}\right)} \quad (15)$$

Onde:

η_{REF} - Rendimento de referência (%);

$\%CARGA_{REF}$ - Porcentagem de potência referência em relação à nominal (%).

A partir deste ponto, para aprimorar os resultados obtidos até o momento, é necessário utilizar métodos numéricos que permitam iterações de corrente e rendimento. Dessa forma, será possível obter uma análise mais precisa e refinada do desempenho do motor elétrico.

4.2.2 Análise do Consumo

Após concluir a etapa de análise de carga, caso os resultados indiquem que o equipamento atual esteja mal dimensionado, isso já configuraria um cenário de baixa eficiência energética, fornecendo um forte argumento para a substituição do motor elétrico. No entanto, ainda é necessário avaliar a economia de energia que o novo equipamento gerará. Para isso, é preciso realizar uma análise do consumo do equipamento antigo em função do equipamento novo com (16).

$$\%CARGA_{PRO} = \frac{C_{ATU}}{C_{PRO}} \%CARGA_{ATU} \quad (16)$$

Onde:

$\%CARGA_{PRO}$ - Porcentagem de carga do motor proposto (%);

C_{ATU} - Conjugado do motor atual (Nm);

C_{PRO} - Conjugado do motor proposto (Nm);

$\%CARGA_{ATU}$ - Porcentagem de carga do motor atual (%).

Em seguida, ao obter o resultado de (16), pode-se calcular o consumo de energia do motor proposto utilizando (9). Finalmente, utilizando (17), pode-se avaliar a economia no consumo de energia gerada pela substituição proposta.

$$economia\ de\ energia = consumo_{ATU} - consumo_{PRO} \quad (17)$$

Onde:

$consumo_{ATU}$ - Consumo de energia elétrica do motor atual (kW/ano);

$consumo_{PRO}$ - Consumo de energia elétrica do motor proposto (kW/ano).

Se a operação do motor elétrico envolver o uso de inversor de frequência, é necessário utilizar em conjunto (18), (19) ou (20), dependendo do tipo de conjugado resistente de carga, para depois retomar com (17). Essa informação é obtida na etapa dos dados complementares, que é realizada ao questionar a aplicação do motor.

$$cst_{CV} = consumo_{SV} \frac{n_{ATUAL}}{n} \quad (18)$$

$$lnr_{CV} = consumo_{SV} \left(\frac{n_{ATUAL}}{n} \right)^2 \quad (19)$$

$$prb_{CV} = consumo_{SV} \left(\frac{n_{ATUAL}}{n} \right)^3 \quad (20)$$

Onde:

cst_{CV} - Consumo com variação de velocidade para cargas constantes (kWh/ano);

lnr_{CV} - Consumo com variação de velocidade para cargas lineares (kWh/ano);

prb_{CV} - Consumo com variação de velocidade para cargas parabólicas (kWh/ano);

$consumo_{SV}$ - Consumo sem variação de velocidade (kWh/ano);

n_{ATUAL} - Conjugado (rpm);

n - Velocidade do motor atual (rpm).

É importante destacar que, para aplicações que demandam baixa rotação, (20) não segue uma relação cúbica como forma de compensação.

4.2.3 Análise de Manutenção

Existem diversos fatores que podem influenciar os custos de manutenção de um motor elétrico, tais como o tamanho e o tipo do motor, o ambiente em que ele opera e o tempo de uso. É possível categorizar esses custos em três tipos: manutenção preventiva, manutenção corretiva e manutenção preditiva. A última categoria depende diretamente de tecnologias de monitoramento que, com base em dados estatísticos, conseguem prever com certa precisão quando uma falha ocorrerá.

Entre todas as categorias de manutenção, a preventiva é a que geralmente possui menor custo em relação aos demais tipos, representando uma variação de 5% a 15% do custo de um motor novo por intervenção. Esse tipo de manutenção inclui a substituição

de peças, como rolamentos, bem como serviços de limpeza e lubrificação, que ajudam a prevenir possíveis falhas no motor elétrico.

A manutenção corretiva é realizada quando o motor apresenta falhas ou quebras inesperadas, tendo como objetivo restabelecer o seu funcionamento. Usualmente, além da substituição de peças, essa categoria de manutenção envolve reparos mais complexos, como a rebobinagem. O custo dessa intervenção pode variar de 40% a 50% do valor de um motor novo, dependendo das características do equipamento em questão (FERREIRA, 2009). Por fim, a perda de produtividade causada por uma parada não programada pode representar um custo significativo, chegando a 30% do custo do motor novo ou até mais, dependendo da indústria e da aplicação.

Com base nessas estimativas, que correspondem a valores relativos a um motor de custo unitário, é possível desenvolver um modelo econômico para avaliar a viabilidade de substituição de motores em operação.

4.2.4 Análise Financeira

A partir dos resultados das etapas anteriores, é possível estimar os custos anuais de manutenção e consumo de energia de um motor elétrico em operação. Para que um comparativo de eficiência energética seja estruturado, é necessário avaliar todos os custos envolvidos na aquisição e operação do novo equipamento, incluindo o custo de aquisição, custos de instalação, manutenção, consumo de energia e quaisquer outros custos associados. A avaliação desses custos é essencial para garantir que a substituição do motor elétrico seja economicamente viável e eficiente em termos de energia.

4.2.4.1 Análise do VPL

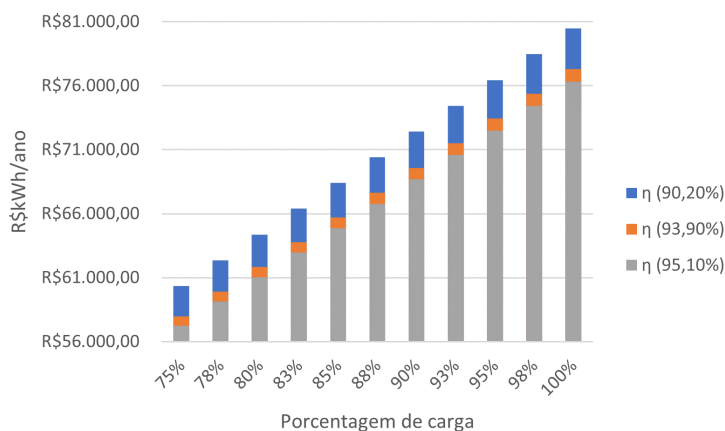
Sabe-se que o VPL é uma ferramenta de análise financeira que permite avaliar investimentos com retornos futuros, em que os recebimentos são conhecidos como FC. No entanto, para o projeto que será usado como exemplo a seguir, o fluxo de caixa será substituído pela economia de energia elétrica gerada como resultado da substituição do motor antigo pelo novo. Os custos de aquisição, instalação, manutenção e despesas relacionadas à operação do motor a ser substituído não serão levados em conta, apenas o consumo de energia elétrica será avaliado.

Para conduzir a análise financeira utilizando o VPL, serão comparadas duas situações dentro de um cenário que oferece várias possibilidades, todas envolvendo o mesmo motor elétrico de 37 kW com diferentes rendimentos e demandas de carga. Essas situações estão ilustradas na Figura 20. É preciso frisar que para a construção do gráfico foi estimado um H_{op} de 24 h e um D_{op} de 268 dias, além de uma TE de R\$ 0,25/kWh e uma TUSD de R\$ 0,055/kWh.

Para simplificar o cálculo, no cenário proposto, os motores comparados utilizarão toda a capacidade de carga disponível. O motor que será substituído está representado

pela cor azul no gráfico, enquanto o motor proposto é indicado pela cor cinza.

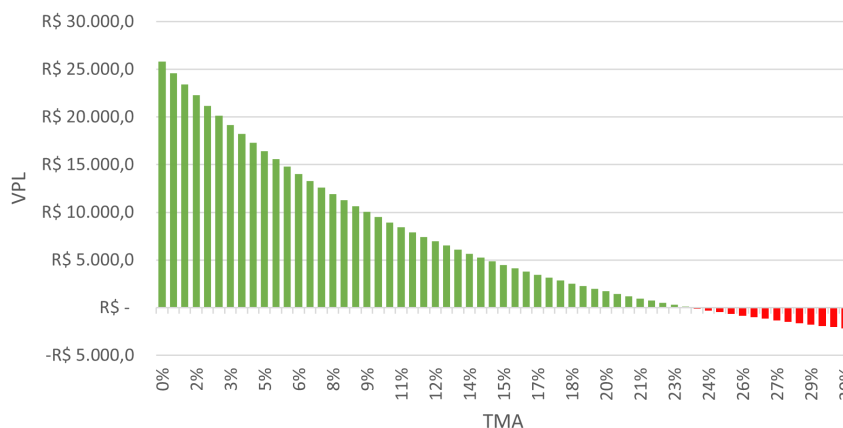
Figura 20 – Consumo de um motor de 37 kW para diferentes cargas e rendimentos.



Fonte: Elaboração própria.

Diante desse contexto, com os dados propostos e o auxílio de (9), o motor novo apresentará uma economia anual de R\$ 4.146,26 em relação ao motor antigo. No entanto, para calcular o VPL é necessário um investimento de aquisição da máquina e, para isso, será proposto um valor genérico de R\$ 15.637,34. O resultado pode ser verificado na Figura 21.

Figura 21 – Análise financeira: VPL x TMA.



Fonte: Elaboração própria.

Ao analisar o gráfico da Figura 21, é possível perceber que o VPL do projeto é positivo até uma TMA de aproximadamente 23%. Isso significa que, a partir desse ponto, os descontos da TMA superam as economias de energia elétrica, tornando o projeto inviável. Esse ponto também é conhecido como TIR que, no caso desse projeto, é de 23%.

Para ilustrar outra situação, suponha um motor superdimensionado em operação, com potência de 45 kW e operando constantemente a 75% da capacidade máxima de carga, apresentando um rendimento de 90%. Observando apenas a potência, é possível

substituir esse motor por um de 37 kW, operando a 91% da capacidade máxima de carga, sem nenhum prejuízo. Caso o novo motor possua rendimento de 95%, a economia anual em energia elétrica gerada seria de R\$ 3.871,89, supondo os mesmos parâmetros utilizados na construção da Figura 21. Além disso, a substituição do motor reduziria os custos de manutenção, já que o motor é de porte menor. Vale ressaltar que o custo de aquisição do novo motor também seria menor.

Nesse caso, não seria necessário desenvolver um modelo financeiro para avaliar a viabilidade do projeto, pois os dados apresentados por si só já garantem excelentes vantagens.

4.2.4.2 Análise dos Demais Parâmetros Financeiros

Continuando com o exemplo anterior, em que foram analisados dois motores de 37 kW, observa-se, na Tabela 2, o fluxo de caixa descontado do projeto para uma TMA de 10%. Além do Valor Presente (VP) e FC representado pela economia em energia elétrica para cada ano, também foi incluída uma coluna com o Valor Presente Acumulado (VPA), que mostra o valor acumulado ao longo do tempo.

Tabela 2 – Fluxo de caixa descontado do projeto.

Ano	FC (R\$)	VP (R\$)	VPA (R\$)
0	-15.637,34	-15.637,34	-11.868,01
1	4.146,26	3.769,33	-8.098,68
2	4.146,26	3.426,66	-4.672,02
3	4.146,26	3.115,15	-1.556,87
4	4.146,26	2.831,95	1.275,08
5	4.146,26	2.574,50	3.849,58
6	4.146,26	2.340,46	6.190,04
7	4.146,26	2.127,69	8.317,72
8	4.146,26	1.934,26	10.251,98
9	4.146,26	1.758,42	12.010,40
10	4.146,26	1.598,56	13.608,97

Fonte: Elaboração própria.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 2, é possível ampliar a análise utilizando outros indicadores, conforme ilustrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados financeiros do projeto.

Indicador	Valor
VP total	R\$ 25.476,98
VPL	R\$ 9.839,64
TIR	23,23%
Taxa de Lucratividade	1,63
<i>Payback</i>	3,55 anos

Fonte: Elaboração própria.

Era esperado que o VPL fosse positivo, uma vez que a TMA escolhida é menor que a TIR. No entanto, destaca-se a taxa de lucratividade, que indica que para cada R\$ 1,00 investido no projeto, espera-se um retorno de R\$ 1,63 ao final dos 10 anos. Além disso, o tempo de *payback* é de 3,55 anos, indicando que o projeto levará esse período para recuperar o investimento inicial.

Considerando que a operação do motor novo é mais lucrativa devido à economia de energia elétrica, o que por si só garante a viabilidade do projeto, é crucial considerar agora os outros custos mencionados anteriormente. Uma vez que os dois motores comparados são equipamentos equivalentes e a operação é a mesma, é razoável supor que o custo unitário de manutenção e os prejuízos causados por paradas sejam muito próximos ou até mesmo idênticos. Portanto, esses custos não afetam a viabilidade do projeto.

No entanto, é importante ressaltar que o motor novo proporcionará uma melhoria significativa ao garantir um funcionamento contínuo da linha de produção por um período prolongado, além de reduzir a ocorrência de manutenções não programadas nos primeiros anos. Essa informação deve ser considerada, uma vez que possui uma influência direta sobre o fluxo de caixa. Além disso, é válido mencionar que o motor antigo pode ser vendido como sucata, o que pode ajudar a compensar parte do investimento necessário para a instalação do novo equipamento. Essa possibilidade de recuperação de valor também contribui para a análise financeira do projeto.

5 RESULTADOS

5.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

5.1.1 Motores Atuais

Durante a etapa de obtenção de dados do estudo em questão, o primeiro e mais crucial passo foi coletar as informações de placa dos motores a serem analisados. Esses equipamentos possuem em média mais de 12 anos de idade e foram expostos ao clima local e contaminantes, o que tornou impossível obter os dados de identificação.

Ao entrar em contato com o responsável pelos motores, foram obtidas informações importantes sobre suas características, incluindo a potência, polaridade, tamanho da carcaça e frequência, uma vez que nenhum dos equipamentos possui dispositivos controladores de velocidade ou partida.

Com base na aparência das máquinas, a fabricante dos equipamentos informou que os motores são mais antigos do que o indicado pelo responsável e que provavelmente pertencem à classe de Índice de Rendimento um (IR1). Devido à dificuldade em identificar os motores, a fabricante também forneceu ao estudo os valores para os parâmetros de tensão e corrente nominal, rendimento e fator de potência com base em seu banco de dados e nos dados coletados.

Para fins de simplificação, os motores serão identificados neste trabalho como motor A (Tabela 4), motor B (Tabela 5) e motor C (Tabela 6). Esses motores são apresentados no anexo A.

Tabela 4 – Mexedor do Decantador 01 (Motor A).

Características	Valores
Carcaça	90L
Potência	3 cv (2,2 kW)
Polos	6
Frequência	60 Hz
Tensão nominal	220 V
Corrente nominal	10,2 A
Rotação nominal	1140 rpm
Rendimento	78,5%
Fator de potência	0,72
Fator de serviço	1,15
Classe de eficiência energética	IR1

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5 – Mexedor do Decantador 03 (Motor B).

Características	Valores
Carcaça	112M
Potência	7,5 cv (5,5 kW)
Polos	4
Frequência	60 Hz
Tensão nominal	220 V
Corrente nominal	20,0 A
Rotação nominal	1740 rpm
Rendimento	88%
Fator de potência	0,82%
Fator de serviço	1,15
Classe de eficiência energética	IR1

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 6 – Esteira intermediária 03 (Motor C).

Características	Valores
Carcaça	180M
Potência	30 cv (22 kW)
Polos	4
Frequência	60 Hz
Tensão nominal	220 V
Corrente nominal	75,5 A
Rotação nominal	1765 rpm
Rendimento	91,0%
Fator de potência	0,84
Fator de serviço	1,15
Classe de eficiência energética	IR1

Fonte: Elaboração própria.

5.1.2 Aplicação

O estudo em questão visa analisar a substituição de motores em uma usina de açúcar e etanol. No entanto, é importante entender como esses novos equipamentos serão aplicados na planta.

De acordo com a Tabela 4, a Tabela 5 e a Tabela 6, o motor A e o motor B são responsáveis pelo acionamento de misturadores em um decantador, enquanto o motor C movimentava uma esteira. A partir dessas informações, é possível realizar uma estimativa inicial do tipo de conjugado resistente de carga que cada aplicação exige.

No caso de esteiras transportadoras, como na aplicação do motor C, normalmente se considera um conjugado resistente constante, independentemente das especificações da esteira, como a massa da carga tracionada, inclinação, velocidade, fricção entre correia e

rolos, e outros fatores. Dessa forma, a operação é padronizada, garantindo a eficiência em diferentes setores da indústria.

Já para os motores A e B, responsáveis por movimentar fluidos em um tanque, embora a aplicação pareça simples, determinar o tipo de conjugado resistente de carga é bastante complexo. Isso ocorre porque a carga acionada pode variar devido a diversos fatores, como o tamanho do tanque, a quantidade e a densidade do fluido, além de outros fenômenos físico-químicos.

No caso de decantadores, a variação da densidade do fluido ao longo do tempo é uma característica comum. Conforme as partículas sólidas se assentam no fundo do tanque, o líquido se torna menos denso, o que pode afetar o tipo de carga acionada. Além disso, em alguns casos, é preciso considerar que a densidade do fluido pode sofrer alterações devido à oxidação e fermentação ao longo do tempo.

Na situação específica dos decantadores, também será considerado um conjugado resistente de carga contínuo. Embora outra opção possível seja o conjugado parabólico, essa escolha teria um impacto insignificante em termos de economia de energia ou aquisição de equipamentos especiais.

Os motores em análise serão considerados em regime de serviço S1, operando dentro das tolerâncias de segurança em relação à temperatura e expostos somente a contaminantes comuns, como poeira e condições climáticas típicas de áreas rurais. Como resultado, os novos equipamentos devem apresentar uma vedação mais eficiente do que seus predecessores.

5.1.3 Operação

Conforme mencionado anteriormente, a idade média dos equipamentos avaliados no estudo é de 12 anos. Segundo o responsável pelas máquinas, não há qualquer protocolo de manutenção preventiva ou preditiva para os motores, sendo realizada apenas manutenção corretiva. Além disso, outra informação relevante é que os motores foram rebobinados uma ou duas vezes por ano, o que pode resultar em uma redução de aproximadamente 7% no rendimento, de acordo com a Figura 13.

De acordo com um levantamento realizado junto a empresas especializadas em rebobinagem de motores e vendas de equipamentos, foram obtidos os valores apresentados na Tabela 7, que representam os custos de cada intervenção em relação ao valor de aquisição de uma máquina nova com tecnologias atuais e características padrão. Para todos os cálculos futuros de consumo de energia, será adotado um período de H_{op} de 24 horas e um período de D_{op} de 268 dias.

Tabela 7 – Valores de rebobinagem e aquisição de motores.

Motor	Rebobinagem (R\$)	Aquisição (R\$)	Reb./Aqu. (%)
A	876,74	3.516,20	25
B	1.283,38	5.633,45	23
C	3.952,30	15.582,18	25

Fonte: Elaboração própria.

Segundo o responsável pelo setor de produção e manutenção, não há um controle da quantidade de energia elétrica consumida pelos equipamentos estudados. No entanto, sabe-se que o projeto inicial da planta previa uma aplicação de demanda de carga superior a 90% que, para fins práticos, será considerada como 100%.

Devido à falta de analisadores de energia e à dificuldade de obter medições precisas de corrente e potência absorvida pelos motores, a análise de eficiência energética não terá um valor exato da energia elétrica consumida. No entanto, com base nas informações obtidas até o momento, será possível fazer uma estimativa muito próxima do consumo real dos equipamentos, como pode ser visto na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores de rendimento e consumo de energia.

Motor	Rendimento Inicial (%)	Rendimento Atual (%)	Consumo (kWh/ano)
A	79	73,01	19.382,78
B	88	81,84	43.225,81
C	91	84,63	167.203,12

Fonte: Elaboração própria.

Além disso, é importante mencionar que os três motores movimentavam suas respectivas cargas por meio de polias e correias, que eram acopladas a redutores de velocidade. Todavia, devido à idade avançada dessas máquinas, também é difícil estimar sua eficiência com precisão.

5.2 MOTORES PROPOSTOS

Para possibilitar uma substituição rápida e econômica dos equipamentos em operação, as melhores opções são os motores elétricos padrão modelo W22 IR3 Premium e W22 Super Premium da marca WEG. Os motores padrão são aqueles que podem ser facilmente adquiridos com base em poucas características do seu aspecto construtivo, enquanto que os motores especiais, que possuem características únicas, como potência não tabelada ou dimensões do eixo diferentes, exigem alterações na rotina de produção, tornando-se mais caros e demorados para serem produzidos.

Com base na Tabela 9, na Tabela 10 e na Tabela 11, é possível observar as principais características das duas linhas de motor padrão da marca WEG disponíveis no mercado. No entanto, é importante destacar que, no caso da substituição do motor A, os motores com potência de 3 cv em 6 polos não são mais produzidos na carcaça 90. Nesse sentido, caso seja necessária a substituição do equipamento, é preciso considerar a possibilidade de realizar algumas alterações para que um motor maior possa ser instalado em seu lugar. Entretanto, nem sempre essas alterações são possíveis ou viáveis. Quando isso ocorrer, é recomendável solicitar um projeto especial de redução de carcaça para garantir a compatibilidade e o desempenho adequado do novo equipamento.

Neste caso específico, em que tanto o motor quanto os acoplamentos são antigos e serão substituídos simultaneamente, não será necessário realizar nenhum tipo de adaptação no local onde os equipamentos estão instalados. A substituição dos equipamentos será realizada de forma direta, sem a necessidade de ajustes ou modificações adicionais. Porém, dependendo do tipo de máquina acoplada ao eixo do novo motor, pode ser necessário substituir os rolamentos esféricos por rolamentos de rolos.

Tabela 9 – Motor A - Proposta de substituição.

Informações	W22 IR3 Premium	W22 Super Premium
Carcaça	L100L	L100L
Potência	3 cv (2,2 kW)	3 cv (2,2 kW)
Polos	6	6
Frequência	60 Hz	60 Hz
Tensão nominal	220/380/440 V	220/380/440 V
Corrente nominal	9,34/5,41/4,67 A	9,40/5,44/4,70 A
Rotação nominal	1155 rpm	1160 rpm
Rendimento	87,0%	87,8%
Fator de potência	0,71	0,70
Fator de serviço	1,25	1,25
Classe de eficiência energética	IR3	IR4

Fonte: Elaboração própria.

Para os motores B e C, é possível encontrar substitutos do mesmo tamanho apenas na linha IR3 Premium. Na outra variante, no caso do motor C, não há produção de motores com a mesma potência, além do tamanho da carcaça ser diferente. Portanto, nesse caso, não é possível considerar a linha mais eficiente energeticamente como uma opção viável sem adaptar o projeto, pois os custos de adaptação necessitam de uma análise a parte deste estudo.

Tabela 10 – Motor B - Proposta de substituição.

Informações	W22 IR3 Premium	W22 Super Premium
Carcaça	L112M	132S
Potência	7,5 cv (5,5 kW)	7,5 cv (5,5 kW)
Polos	4	4
Frequência	60 Hz	60 Hz
Tensão nominal	220/380/440 V	220/380/440 V
Corrente nominal	20,6/11,9/10,3 A	22,0/12,7/11,0 A
Rotação nominal	1750 rpm	1770 rpm
Rendimento	91,0%	92,0%
Fator de potência	0,77	0,71
Fator de serviço	1,25	1,25
Classe de eficiência energética	IR3	IR4

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 11 – Motor C - Proposta de substituição.

Informações	W22 IR3 Premium	W22 Super Premium
Carcaça	180L	200M
Potência	30 cv (22 kW)	40 cv (30 kW)
Polos	4	4
Frequência	60 Hz	60 Hz
Tensão nominal	220/380/440 V	220/380/440 V
Corrente nominal	76,2/44,1/38,1 A	102/59,3/51,2 A
Rotação nominal	1775 rpm	1780 rpm
Rendimento	93,6%	95,0%
Fator de potência	0,81	0,81
Fator de serviço	1,25	1,25
Classe de eficiência energética	IR3	IR4

Fonte: Elaboração própria.

5.2.1 Economia

Nas Tabelas 12 e 13, é possível visualizar, respectivamente, a previsão de aumento de rendimento e o consumo anual de energia em relação ao motor antigo, bem como a economia prevista em valores relativos e absolutos.

Tabela 12 – Eficiência energética para o modelo IR3 Premium.

W22 IR3 Premium				
Motor	Rendimento (%)	Consumo (kWh/ano)	Economia (%)	Economia (kWh/ano)
A	19,17	16.264,83	16,09	3.117,95
B	11,19	38.874,73	10,07	4.351,08
C	10,60	151.179,49	9,58	16.023,63

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 13 – Eficiência energética para o modelo Super Premium.

W22 Super Premium				
Motor	Rendimento (%)	Consumo (kWh/ano)	Economia (%)	Economia (kWh/ano)
A	20,27	16.116,63	16,85	3.266,15
B	12,41	38.452,17	11,04	4.773,63
C	12,25	148.951,58	10,92	18.251,54

Fonte: Elaboração própria.

5.3 VIABILIDADE ECONÔMICA

Para a análise de viabilidade econômica, será proposto um TMA de 13% (taxa Selic em 2023) e serão considerados três custos tarifários de energia elétrica por kWh para a análise de incerteza. Como o estudo aborda a substituição de equipamentos para aumentar a eficiência energética, os diferentes valores de tarifas podem ter impacto significativo na viabilidade do projeto. Em outras palavras, uma tarifa de energia elétrica mais elevada pode tornar o investimento ainda mais vantajoso, uma vez que um equipamento altamente eficiente é capaz de economizar uma quantidade maior desse recurso.

É fundamental ressaltar que, embora os acoplamentos dos motores possam ser substituídos por dispositivos mais modernos e eficientes, o desempenho desses acoplamentos depende das características de trabalho do motor. Dessa forma, todos os fatores que afetam o desempenho de um motor elétrico também impactam de maneira semelhante um redutor de velocidade. Portanto, é necessário um estudo específico para determinar o redutor de velocidade mais adequado para cada aplicação, considerando-se as condições de operação do motor e as características da carga.

No momento, todos os motores do estudo estão equipados com sistemas de polia e correia, que geralmente resultam em uma diminuição de eficiência energética de 5% a 15%, dependendo de vários fatores, como o tipo de polia e correia utilizados, a tensão

da correia, a carga aplicada, a rotação do motor e o tamanho do acoplamento. Para o motor A em particular, devido às características do projeto, seria recomendável considerar a utilização do redutor WCG20 C09 da marca WEG CESTARI, que tem um rendimento de 94%. Embora o custo do investimento possa não ser totalmente recuperado apenas pela economia de energia elétrica, é importante ressaltar que o ganho de confiabilidade operacional, com a redução dos custos de manutenção e paralisações por falhas, poderia justificar a aquisição desse equipamento.

Ao analisar os dados da Tabela 14, pode-se observar, pelos indicadores econômicos, que, em todos os casos considerados, a substituição do equipamento atual é viável. Mesmo no caso em que a tarifa de energia é a menor e o motor novo é o mais caro, o investimento inicial é recuperado na íntegra. Além disso, os motores da linha Super Premium são conhecidos pela sua alta confiabilidade, construção robusta e baixos custos de manutenção, o que adiciona ainda mais valor à escolha de substituir o equipamento antigo.

Para determinar o custo de investimento dos motores da linha W22 Super Premium, foram utilizados os valores da Tabela 7 como base, levando em conta um acréscimo de 12% para o Motor A, 21% para o Motor B e 32% para o Motor C.

Tabela 14 – Análise de viabilidade econômica do motor A.

Indicadores	Mínimo	Normal	Máximo
Tarifa	R\$ 0,25	R\$ 0,31	R\$ 0,43
TMA	13%	13%	13%
W22 IR3 Premium			
Soma VP	R\$ 4.229,69	R\$ 5.244,82	R\$ 7.275,08
VPL	R\$ 713,49	R\$ 1.728,62	R\$ 3.758,88
TIR	17,90%	24,39%	36,42%
Taxa de Lucro	1,20	1,49	2,07
<i>Payback</i>	5,23	3,64	2,10
W22 Super Premium			
Soma VP	R\$ 4.430,74	R\$ 5.494,11	R\$ 7.620,87
VPL	R\$ 492,59	R\$ 1.555,97	R\$ 3.682,72
TIR	16,06%	22,27%	33,71%
Taxa de Lucro	1,13	1,40	1,94
<i>Payback</i>	5,88	4,06	2,36

Fonte: Elaboração própria.

Considerando a Tabela 15, é possível observar que o investimento na substituição do motor B pode não ser viável, no caso em que a tarifa de energia elétrica está mais barata, ao adquirir o modelo Super Premium. Ademais, no mesmo caso em que a tarifa de energia é a mais baixa, o motor da linha padrão apresenta um resultado próximo da inviabilidade. Dependendo do perfil de risco do investidor e considerando uma margem de

segurança, esse investimento pode ser considerado inviável.

No entanto, é importante ressaltar que os indicadores apresentados na tabela refletem a economia de energia resultante da melhoria na eficiência energética alcançada pela substituição dos motores. Além disso, é fundamental levar em conta a redução dos custos de manutenção e parada, que serão consideravelmente reduzidos. Com isso, mesmo nos dois casos citados, ainda há possibilidade de recuperação do investimento inicial.

Tabela 15 – Análise de viabilidade econômica do motor B.

Indicadores	Mínimo	Normal	Máximo
Tarifa	R\$ 0,25	R\$ 0,31	R\$ 0,43
TMA	13%	13%	13%
W22 IR3 Premium			
Soma VP	R\$ 5.902,51	R\$ 7.319,11	R\$ 10.152,31
VPL	R\$ 269,06	R\$ 1.685,66	R\$ 4.518,86
TIR	14,18%	20,11%	30,98%
Taxa de Lucro	1,05	1,30	1,80
<i>Payback</i>	6,70	4,58	2,66
W22 Super Premium			
Soma VP	R\$ 6.475,72	R\$ 8.029,90	R\$ 11.138,24
VPL	-R\$ 352,26	R\$ 1.201,92	R\$ 4.310,26
TIR	11,70%	17,27%	27,39%
Taxa de Lucro	0,95	1,18	1,63
<i>Payback</i>	8,11	5,44	3,13

Fonte: Elaboração própria.

Em todos os casos, incluindo os que a tarifa de energia elétrica é mais barata, o investimento na substituição do motor C é economicamente viável. Mesmo um investidor conservador deve considerar a troca do equipamento. É importante ressaltar que a linha Super Premium é produzida apenas em potência 40 cv (30 kW) e carcaça 200. Embora o motor novo trabalhe com um percentual de demanda de carga mais baixo, ele ainda é uma opção adequada para esse caso. A economia de energia é semelhante à de um motor de potência menor, mas os custos de manutenção são ligeiramente maiores. É importante mencionar que pode ser necessária uma adaptação no projeto.

Tabela 16 – Análise de viabilidade econômica do motor C.

Indicadores	Mínimo	Normal	Máximo
Tarifa	R\$ 0,25	R\$ 0,31	R\$ 0,43
TMA	13%	13%	13%
W22 IR3 Premium			
Soma VP	R\$ 21.737,03	R\$ 26.953,92	R\$ 37.387,70
VPL	R\$ 6.154,85	R\$ 11.371,74	R\$ 21.805,52
TIR	22,26%	29,47%	42,98%
Taxa de Lucro	1,39	1,73	2,40
<i>Payback</i>	4,06	2,84	1,63
W22 Super Premium			
Soma VP	R\$ 24.759,33	R\$ 30.701,56	R\$ 42.586,04
VPL	R\$ 4.146,10	R\$ 10.088,33	R\$ 21.972,81
TIR	17,85%	24,34%	36,36%
Taxa de Lucro	1,20	1,49	2,07
<i>Payback</i>	5,24	3,65	2,11

Fonte: Elaboração própria.

Embora cada investimento, individualmente, seja economicamente viável, é importante verificar que eles fazem sentido em conjunto. Ao observar a Tabela 17, é possível confirmar que a soma desses investimentos é igualmente viável.

Tabela 17 – Análise de viabilidade econômica do projeto.

Indicadores	Mínimo	Normal	Máximo
Tarifa	R\$ 0,25	R\$ 0,31	R\$ 0,43
TMA	13%	13%	13%
W22 IR3 Premium			
Soma VP	R\$ 31.869,23	R\$ 39.517,85	R\$ 54.815,08
VPL	R\$ 7.137,40	R\$ 14.786,02	R\$ 30.083,25
TIR	19,87%	26,86%	39,37%
Taxa de Lucro	1,29	1,60	2,22
<i>Payback</i>	4,65	3,24	1,87
W22 Super Premium			
Soma VP	R\$ 36.665,78	R\$ 44.225,57	R\$ 61.345,15
VPL	R\$ 4.268,43	R\$ 12.846,22	R\$ 29.965,79
TIR	16,33%	22,58%	34,11%
Taxa de Lucro	1,14	1,41	1,95
<i>Payback</i>	5,77	3,98	2,32

Fonte: Elaboração própria.

Os dados apresentados na Tabela 14, na Tabela 15, Tabela 16 e na Tabela 17 refletem exclusivamente a viabilidade financeira baseada na economia de energia elétrica. No entanto, como mencionado várias vezes ao longo do trabalho, é importante levar em consideração alguns custos associados à operação de um motor de indução.

Após realizar um levantamento para este estudo, constatou-se que os custos de instalação de um motor variam de 5% a 15% do seu valor de aquisição, enquanto o valor de revenda do equipamento como sucata pode chegar a até 10% do custo de aquisição. Considerando essas informações, pode-se afirmar que as despesas com a instalação do equipamento têm pouca relevância para a viabilidade do projeto, desde que o motor seja revendido.

Outro ponto destacado ao longo do estudo é que os motores antigos e novos são equivalentes em termos de modelo, e as peças de reposição também possuem valores comerciais semelhantes, incluindo os reparos, como a rebobinagem. Uma vez que os equipamentos novos desempenham a mesma função dos antigos, os custos de parada na linha de produção são exatamente iguais. Portanto, as despesas mencionadas até o momento não influenciam na análise de implementação.

Embora os gastos com manutenção e parada na linha de produção, quando vistos como custo unitário, sejam semelhantes, é crucial observar e contabilizar com precisão a frequência com que esses eventos ocorrem. Infelizmente, esses dados geralmente não estão prontamente disponíveis e requerem um estudo separado para serem incluídos no projeto. Contudo, é sabido que, com equipamentos novos, a frequência desses eventos deve diminuir consideravelmente nos primeiros anos de operação. Isso fortalece ainda mais o argumento de que o projeto de substituição das máquinas é viável e altamente recomendado.

6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho visa esclarecer que motores elétricos não são projetados para operar sob qualquer condição, mas que podem ser adaptados para isso. Além do mais, embora o tema deste trabalho possa parecer simples, sua complexidade reside na necessidade de fundamentar argumentos que sustentem a maximização dos lucros de uma linha de produção por meio da busca pela eficiência energética.

Muitas vezes, as indústrias, na ânsia de manter a produção ininterrupta de suas fábricas, acabam por desconsiderar os impactos que um motor ineficiente pode causar em suas margens de lucro. A falta de planejamento de manutenção e a ineficiência na administração dos recursos próprios geram situações frequentes na indústria brasileira, em que o número de reparos supera, muitas vezes, o custo de aquisição de um equipamento novo.

Essas situações são negligenciadas em detrimento do tempo de parada que a linha de produção pode sofrer, tendo em vista a indisponibilidade de substituição imediata, por conta da complexidade de certas máquinas. Em alguns casos, a frequência de reparos é tão grande que as próprias fábricas possuem micro setores especializados em recuperação de equipamentos. Nesses casos, o tempo de parada de um motor produz perdas significativas, levando a reparos mal executados devido à pressão em retomar a produção.

Na revisão bibliográfica, foram discutidos todos os aspectos que cercam a operação de um motor e que podem afetar seu desempenho, resultando em perda de rendimento e eficiência energética. Considerando todos os tópicos tratados, é possível traçar uma estratégia adequada de manutenção para prolongar a vida útil de um motor elétrico com o mínimo de intervenções necessárias.

De acordo com os resultados, considerando os três motores como um único investimento, verificou-se que é altamente recomendado realizar a substituição dos equipamentos. Mesmo em um caso em que as tarifas de energia estão mais baratas, a troca de máquinas com mais de doze anos de uso por modelos mais modernos trará inúmeros benefícios para a linha de produção. Além disso, é importante destacar que a substituição de todos os motores de uma única vez pode gerar economias em termos de custos de instalação e de mão de obra, além de simplificar a gestão e manutenção do sistema elétrico. Em resumo, a substituição dos motores é uma escolha estratégica para o aumento da eficiência energética, confiabilidade e redução de custos operacionais.

Embora este estudo seja específico para as condições de uma planta de açúcar e etanol, é importante destacar que os assuntos apresentados na revisão bibliográfica podem ser aplicados a qualquer situação. Além disso, é importante mencionar que estudos de eficiência energética tendem a gerar retornos mais significativos em equipamentos desatualizados ou cujo condicionamento afetou significativamente seu desempenho.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de um estudo complementar sobre

eficiência energética, com foco em redutores de velocidade, seguindo os mesmos princípios adotados neste estudo. É importante que fatores externos também sejam considerados e seus impactos no desempenho operacional dos equipamentos envolvidos sejam avaliados. Além disso, um ponto de grande relevância para este estudo é a avaliação dos dispositivos de monitoramento em tempo real, utilizados para previsão de falhas, e seu potencial para reduzir os custos de manutenção, prolongar a vida útil do motor e manter os níveis de rendimento em padrões aceitáveis.

REFERÊNCIAS

- ABB. **Conheça os custos reais dos seus motores elétricos**. ABB. Disponível em: <https://new.abb.com/news/pt-BR/detail/82057/conheca-os-custos-reais-dos-seus-motores-eletricos>. Acesso em: 16 mar. 2023.
- AGUIAR, Victor de Paula Brandão *et al.* Avaliação técnico-econômica do aumento do rendimento em motores de indução trifásicos de baixa potência após rebobinagem, 2018.
- ALMEIDA, Beatrice Silva de. Análise de viabilidade econômica de projetos de geração fotovoltaica com a estimação de índices macroeconômicos por redes neurais artificiais com seleção de atributos. Universidade Federal de São Carlos, 2021.
- BINACIONAL, Itaipu. **PRODUÇÃO ANO A ANO**. Itaipu Binacional. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/energia/producao-ano-ano>. Acesso em: 3 mar. 2023.
- CHAPMAN, Stephen. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2017. P. 400.
- ELECTRIC, Duke. **Electric Motor Failure**: The essential guide to troubleshooting, repairing and preventing industrial motor problems. Duke Electric. Disponível em: <https://www.dukeelectric.com/electric-motor-failure/>. Acesso em: 2 mar. 2023.
- ELETROMECCÂNICA, Kimotor. **Leitura da Placa de Motor**. Disponível em: <https://blog.kimotor.com.br/leitura-da-placa-do-motor/>. Acesso em: 8 mar. 2023.
- EPE, E. P. E. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023**. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-47/topico-85/Relat%5C%3\\$%5C%B3rio%5C%\\$20Final%5C%\\$20do%5C%\\$20PDE%5C%\\$202023.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-47/topico-85/Relat%5C%3$%5C%B3rio%5C%$20Final%5C%$20do%5C%$20PDE%5C%$202023.pdf). Acesso em: 28 fev. 2023.
- FERREIRA, Fernando José Teixeira Estêvão. **Strategies to improve the performance of three-phase induction motor driven systems**. 2009. Tese (Doutorado) – Universidade de Coimbra (Portugal).
- GARCIA, Agenor Gomes Pinto. Impacto da lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria. **COPPE UFRJ, M. Sc., Planejamento Energético–Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 2003.
- GITMAN, Lawrence Jeffrey. **Princípios de Administração Financeira**. 12. ed. [S.l.]: Pearson, 2010. P. 500.

HENFEL. **Aplicação de acoplamentos bipartidos radialmente em equipamentos de manejo de cana-de-açúcar**. HENFEL. Disponível em: <https://www.henfel.com.br/artigo/estudo-de-caso-aplicacao-de-acoplamentos-bipartidos-radialmente-em-equipamentos-de-manejo-de-cana-de-acucar>. Acesso em: 8 mar. 2023.

LATERRA, Matteo. **Noise and Vibration Sources in Electric Motor Industrial Applications**. 2019. Tese (Doutorado) – Politecnico di Torino.

MME, M. M. E. **Consumo de eletricidade em dezembro foi o maior de toda série histórica**. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/consumo-de-eletricidade-em-dezembro-foi-o-maior-de-toda-serie-historica#:~:text=De%5C%20acordo%5C%20com%5C%20a%5C%20Resenha,%5C%2C2%5C%25%5C%20comparado%5C%20a%5C%202020>. Acesso em: 3 mar. 2023.

_____. **PORTARIA INTERMINISTERIAL Nº 1, DE 29 DE JUNHO DE 2017**. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=50&data=30/08/2017>. Acesso em: 28 fev. 2023.

MURTY, ASR; NAIKAN, VNA. Availability and maintenance cost optimization of a production plant. **International Journal of Quality & Reliability Management**, MCB UP Ltd, 1995.

NARDY, JS. **Pintura tropicalizada no bobinado**. JS Nardy. Disponível em: <https://www.facebook.com/JSNardySumare/photos/a.811221855743491/994321054100236/>. Acesso em: 11 mar. 2023.

ONS, O. N. do S. **Previsões de carga para o Planejamento Anual da Carga 2023-2027**. Operador Nacional do Sistema Elétrico. Disponível em: https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Boletim%5C%20T%5C%20c3%5C%20a9cnico%5C%20PLAN%5C%202027_EPE_ONS_CCEE.pdf. Acesso em: 28 fev. 2023.

PAULA SILVA, Sérgio de; PEREIRA, Fabiana; HLUCHAN, Andres. Simulação de cargas mecânicas para estudos de eficiência energética. *In*: DOI: 10.13140/RG.2.1.4118.3127.

PENROSE, Howard W. Anatomy of an energy efficient electric motor rewind. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, IEEE, v. 13, n. 1, p. 14–19, 1997.

_____. Test methods for determining the impact of motor condition on motor efficiency and reliability. **ALL-TEST Pro, LLC**, 2007.

PROCEL. **Troca de motores como indutora de competitividade na indústria brasileira**. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Disponível em:

[http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%5C%\\$7BF5EAADD6-CCB0-4E29-A0C4-482D3D66BB65%5C%\\$7D&Team=¶ms=itemID=%5C%\\$7B3BABCE8B-A76C-4042-B985-2526F1F6FEC4%5C%\\$7D;&UIPartUID=%5C%\\$7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%5C%\\$7D](http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%5C%$7BF5EAADD6-CCB0-4E29-A0C4-482D3D66BB65%5C%$7D&Team=¶ms=itemID=%5C%$7B3BABCE8B-A76C-4042-B985-2526F1F6FEC4%5C%$7D;&UIPartUID=%5C%$7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%5C%$7D). Acesso em: 28 fev. 2023.

TOLEDO, Thalita França de. Siliciação de aço silício. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Rede Temática em ..., 2007.

UMANS, Stephen D. Máquinas polifásicas de indução. *In*: MÁQUINAS elétricas de Fitzgerald e Kingsley. [S.l.: s.n.], 2014. P. 344–402.

WEG. **Curvas de Desempenho**. WEG. Disponível em: https://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_curva_web.asp. Acesso em: 1 mar. 2023.

_____. **Guia de Especificação de Motores Elétricos**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <https://static2.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>. Acessado em: 14/05/2023.

_____. **Linhas de Motores Mining**. WEG. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hf7/h2b/WEG-linhas-de-motores-mining-motores-para-mineracao-50009265-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2023.

_____. **Módulo Plug-in com Entrada de Encoder ENC e ENC2**. WEG. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hdf/h7d/WEG-cfw500-enc-modulo-plug-in-com-entrada-de-encoder-10002552668-guia-de-instalacao-portugues-br-dc.pdf>. Acesso em: 1 mar. 2023.

ANEXOS

ANEXO A – MOTORES ANALISADOS NO ESTUDO

Figura 22 – Mexedor do Decantador 01 (Motor A).



Fonte: Elaboração própria

Figura 23 – Mexedor do Decantador 03 (Motor B).



Fonte: Elaboração própria

Figura 24 – Esteira intermediária 03 (Motor C).



Fonte: Elaboração própria