



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Rebeca Thaiana Pimentel Alves

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MOTORES
TRIFÁSICOS - UM ESTUDO DE CASO**

Campina Grande, PB
Agosto de 2022

Rebeca Thaiana Pimentel Alves

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MOTORES TRIFÁSICOS
- UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Célio Anésio da Silva

Campina Grande, PB
Agosto de 2022

Rebeca Thaiana Pimentel Alves

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MOTORES TRIFÁSICOS
- UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em: ____ / ____ / ____

Célio Anésio da Silva, DSc

Professor Orientador

Professor 1, DSc

Professor Avaliador

Campina Grande, PB

Agosto de 2022

*Dedico este trabalho aos meus queridos pais Valdir e Tânia,
e ao meu amado esposo Daniel.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado a vida, a saúde e coragem necessária para enfrentar o que seriam os anos mais desafiadores da minha jornada até então. Sem a fé de que Ele estava cuidando de mim, eu não teria chegado até aqui.

Aos meus pais, Valdir e Tânia, por acreditarem no meu sonho desde o início e não medirem esforços pela minha educação. O que sou e o que consegui conquistar também é mérito de vocês.

Ao meu amado esposo Daniel, que por todos esses anos chorou e vibrou comigo inúmeras vezes. Obrigada por não soltar minha mão nenhum momento, você acreditou em mim e me ajudou a fazer o mesmo.

Aos amigos Erika, Joyce, Margareth, Ana Rita, Hericles, Andhré, Carlos, Larissa, Natan, Luiz, Taís, Maria Luiza, Igor, que compartilharam a amizade, os desafios, o conhecimento e o suporte tão generosamente.

À Missão Federal que por tanto tempo foi um verdadeiro oásis, certamente trouxeram leveza a essa jornada.

Ao professor orientador, Célio, agradeço toda a paciência e apoio na construção do presente trabalho.

Por fim, deixo aqui meus agradecimentos aos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da caminhada e contribuíram para minha formação.

“Tudo tem um tempo determinado, e há tempo para
todo propósito debaixo do céu.”

Eclesiastes 3:1

Resumo

O avanço da tecnologia e a modernização da sociedade tornaram o uso da energia elétrica essencial em todos os aspectos da vida humana. Com o crescimento dessa necessidade, sobretudo na indústria, e a limitação física de fontes naturais de energia que atendam essa demanda, esforços tem sido realizados para padronizar valores mínimos de eficiência energética em máquinas, equipamentos e processos. Esse trabalho apresenta uma revisão sobre assuntos relacionados a esse tema tratando de forma mais específica a eficiência energética em motores de indução trifásicos e aplicando os conceitos apresentados no estudo para otimização de um sistema de bombeamento de água na indústria automotiva.

Palavras-chave: Eficiência energética, Motor de Indução Trifásico, Otimização.

Abstract

The advancement of technology and the modernization of society have made the use of electrical energy essential in all aspects of human life. With the growth of this need, especially in the industry, and the limitation of natural energy sources that meet this demand, efforts have been made to standardize minimum values of energy efficiency in machines, equipment and processes. This work presents a review on issues related to this topic, dealing more specifically with energy efficiency in three-phase induction motors and applying the concepts presented in the study to optimize a water pumping system in the automotive industry.

Keywords: Energy Efficiency, Three Phase Induction Motor, Optimization.

Lista de Figuras

Figura 1 - Ciclo PDCA	3
Figura 2 - Distribuição do consumo energético da indústria nacional	5
Figura 3 - Motor de Indução Trifásico	7
Figura 4 - Conversão Eletromecânica Motriz	7
Figura 5 - Curva de desempenho em carga do motor de indução trifásico	10
Figura 6 - Macro Perdas em reais	12
Figura 7 - Perda de Energia Elétrica por Setor	13
Figura 8 - Consumo da Formação em kWh/mês	13
Figura 9 - Estratificação do consumo da Formação em kWh/mês	14
Figura 10 - Sistema de Resfriamento da água	15
Figura 11 - Funcionamento do Sistema de Resfriamento de água	16
Figura 12 - Validação do dispositivo de medição	18
Figura 13 - Motor W22 IR3 <i>Premium</i>	19
Figura 14 - Placa do Motor de indução WEG W22	19
Figura 15 - Painel de interface do sistema	20
Figura 16 - Conjunto de Bombas	21
Figura 17 - Espectro da bomba parada	21
Figura 18 - Medição realizada com equipamento Fluke	22
Figura 19 - Gráfico da potência em uma bomba antes da melhoria	23
Figura 20 - Primeiro teste da prototipagem	24
Figura 21 - Segundo teste da prototipagem	24
Figura 22 - Gráfico da potência em uma bomba após a melhoria	25
Figura 23 - Proteção das válvulas	26
Figura 24 - Gráfico da projeção de redução da perda de energia em um ano	27

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Distribuição Percentual de Perdas em Motores	8
Tabela 2 - <i>Checklist</i> dos Controlistas - Turma A	17
Tabela 3 - Resumo das Características técnicas	19

Lista de Abreviaturas e Símbolos

η	<i>Rendimento</i>
A	<i>Amperes</i>
CA	<i>Corrente Alternada</i>
cv	<i>Cavalo-vapor</i>
Hz	<i>Hertz</i>
$I_{nominal}$	<i>Corrente nominal</i>
I_s	<i>Corrente RMS no estator</i>
kWh	<i>Quilowatt-hora</i>
$P_{Entrada}$	<i>Potência medida no estator</i>
$P_{Nominal}$	<i>Potência nominal da máquina</i>
$P_{Perdida}$	<i>Potência total perdida</i>
$P_{Saída}$	<i>Potência medida no eixo da máquina</i>
$P_{wnúcleo}$	<i>Potência perdida no núcleo</i>
P_{wr}	<i>Potência perdida no rotor</i>
P_{ws}	<i>Potência perdida no estator</i>
PH	<i>Potencial Hidrogeniônico</i>
R_s	<i>Resistência por fase do estator</i>
rpm	<i> rotações por minuto</i>
s	<i>Escorregamento</i>
V	<i>Volts</i>

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo Geral	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
1.2	Metodologia	2
1.3	Estrutura do Trabalho	4
2	Fundamentação Teórica	4
2.1	Eficiência Energética	4
2.2	Motor de Indução Trifásico	6
2.3	Perdas em motores	7
2.3.1	Perdas por efeito joule no estator	8
2.3.2	Perdas por efeito joule no rotor	8
2.3.3	Perdas no núcleo	9
2.3.4	Perdas por atrito e no enrolamento da bobina	9
2.3.5	Perdas complementares	9
2.4	Baixa eficiência em sistemas motrizes	9
2.4.1	Dimensionamento	10
2.4.2	Instalação	11
2.4.3	Manutenção	11
2.4.4	Alimentação Elétrica	11
3	Estudo de Caso	11
3.1	Direcionador	12
3.2	Funcionamento do sistema de resfriamento de água	15
3.3	Verificação dos Parâmetros	17
3.4	Modelo do Motor	18
3.5	Dimensionamento	20
3.6	Instalação	20
3.7	Alimentação elétrica	22
3.8	Prototipagem	23
3.9	Plano de Ação	25
3.10	Resultados	26
4	Conclusão e Proposta para Trabalhos Futuros	27
	Referências Bibliográficas	29

1 Introdução

O século XX foi marcado pelos primeiros serviços centralizados de produção e distribuição de eletricidade e pela a invenção dos motores de combustão. Esse marco evidenciou a relação entre o desenvolvimento econômico-social e a utilização da energia. À medida que outras invenções como os motores e transformadores de corrente alternada surgiram, a eletricidade deixou de ser restrita à iluminação e passou a ser vista como a forma de energia mais apropriada para a produção da força motriz na indústria. Desde então, a ela tem tomado espaços essenciais não somente no setor industrial, mas também no residencial e de serviços. Dessa forma, surge a necessidade de que esse recurso seja utilizado de forma cada vez mais eficiente.

De acordo com o *Roadmap* de Ações de Eficiência Energética realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em novembro de 2020, a indústria é responsável por 41,9% do consumo de eletricidade no Brasil e possui um grande potencial de ganhos de eficiência a partir da incorporação de tecnologias mais eficientes e mediante o processo de digitalização das unidades produtivas. Brunner (2007) mostra que os motores elétricos trifásicos se destacam nesse cenário, pois são responsáveis pela maior parcela de consumo de energia da indústria. Fatores como as características físicas, condições de instalação e a ausência de um dimensionamento apropriado afetam diretamente os níveis de eficiência energética do sistema.

Os motores elétricos são máquinas capazes de realizar a transformação de energia elétrica em energia mecânica com algumas perdas no processo. Definir bem as perdas totais da máquina é essencial, pois a partir dessa informação a eficiência do motor é mensurada (CARVALHO, 2008). No que se refere às características físicas dos motores de indução trifásicos, podemos destacar perdas magnéticas, mecânicas e suplementares que podem afetar a eficiência da máquina. Elas podem ser minimizadas a partir de medidas como o aperfeiçoamento do material ativo da máquina, otimização do *design* e do processo de fabricação.

Além das características físicas apresentadas, o Balanço de Resultados das Ações de Eficiência Energética destaca oportunidades no setor industrial sobretudo em sistemas de bombeamento utilizados para transporte de fluidos como água e outros químicos. Segundo Haddad e Nogueira (2019, p.8) “Além do emprego dos motores mais eficientes, pode-se atuar no controle da vazão e pressão, tornando desnecessária a utilização de válvulas de controle, instalando-se um inversor de frequência. Devido às suas características operativas e desempenho, pequenas reduções na frequência de operação do motor vão gerar grandes reduções do consumo”.

Tratando-se de um sistema industrial onde existem Torres de Resfriamento de água, o controle da velocidade e da frequência de operação do motor pode proporcionar

ganhos efetivos de economia de energia. O estudo das condições de funcionamento e dimensionamento do sistema é capaz de propor importantes ações que visem garantir esse ganho e, sobretudo, aumentar os índices de eficiência energética.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo desse trabalho é realizar uma análise das oportunidades de eficiência energética em motores de indução trifásicos e apresentar um estudo de caso com propostas de soluções para um sistema de resfriamento industrial onde 4 motores de indução trifásicos de 60 cv atuam em um ambiente ácido realizando o bombeamento de água.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Compreender o contexto de perdas energéticas em motores de indução trifásicos e seus impactos;
- Definir tipos de perdas nos motores de indução trifásicos;
- Identificar perdas no conjunto de motores do sistema de resfriamento de água em uma indústria automotiva;
- Realizar estudo das características elétricas e do consumo de energia no sistema;
- Propor melhorias que aumentem a eficiência energética no sistema;
- Apresentar resultados das melhorias implementadas.

1.2 Metodologia

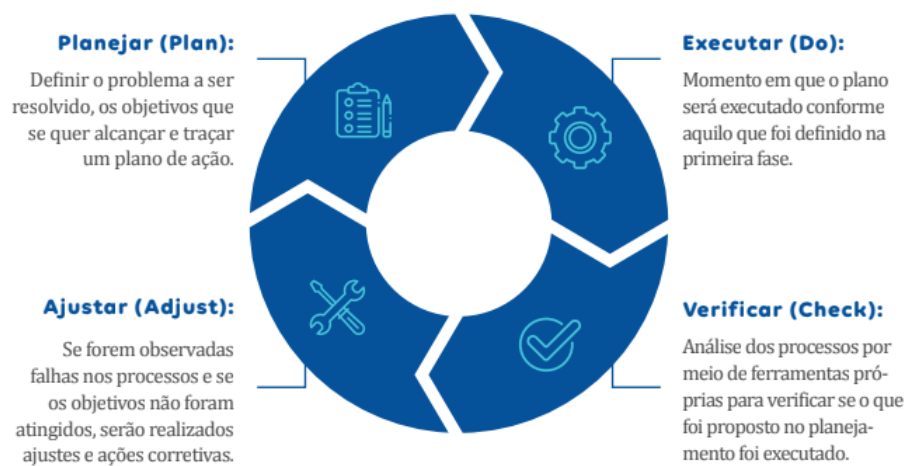
Inicialmente será feita uma revisão bibliográfica sobre os assuntos relacionados ao tema como os padrões de eficiência energética estabelecidos para indústria ao redor do mundo, o cenário nacional das ações de eficiência energética em sistemas motrizes e a apresentação das máquinas de indução trifásicas com suas perdas associadas.

A segunda etapa consiste no estudo de caso do sistema de bombeamento de água, onde será utilizado o método do ciclo PDCA para resolução de problemas. Essa metodologia tem por objetivo esclarecer o problema, encontrar sua causa raiz e propor soluções de impacto mais efetivas no processo. Werkema (1995, p. 17), define o ciclo PDCA como

“um método gerencial de tomada de decisões para garantir o alcance de metas necessárias à sobrevivência de uma organização”.

Para os autores Brown e Marshall (2008 apud Islam, 2013); Pagani (2009); Sidhu et al. (2013) o PDCA consiste em quatro fases podem ser definidas como Plano (Plan), Fazer (Do), Verificar (Check) e Agir (Action). De forma mais específica, na primeira etapa (P) são definidos os objetivos e metas, em seguida são identificadas as necessidades e as mudanças são implementadas através da prototipagem (D), os resultados das mudanças são monitorados e avaliados comparando-se os dados (C), e por fim é realizado o ajuste nas estratégias de melhoria (A).

Figura 1: Ciclo PDCA



Fonte: (UNIMOURA, 2020).

A partir do roteiro proposto pela metodologia PDCA, inicia-se o estudo no conjunto de motores em questão. A matriz de perdas da empresa é estudada e utilizada como o direcionador do projeto, visto que aponta onde ocorrem as maiores perdas. Nesse momento inicial, são definidos e justificados o local de atuação, os desafios e metas.

Em seguida, é feito um estudo do sistema que consiste na avaliação dos motores em uso, local de instalação, características do consumo de energia e o levantamento de oportunidades de atuação. Mediante o estudo realizado, serão propostas medidas para aumentar os índices de eficiência energética no local e reduzir o consumo de energia.

Após definir o que será implementado, elabora-se um plano de ação. As mudanças validadas nos testes realizados são padronizadas. Por fim, será apresentado o resultado obtido para as medidas que foram adotadas.

1.3 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 1 foi feita, brevemente, uma introdução do trabalho desenvolvido, explicando um pouco da problemática, bem como dos objetivos e metodologia aplicada.

No capítulo 2 é realizada a fundamentação teórica, apresentando o desenvolvimento de padrões de eficiência energética para sistemas motrizes no Brasil e no mundo. Ademais, é feita uma apresentação do motor de indução trifásico, suas perdas associadas e outros tipos de perdas que podem ocasionar baixa eficiência em motores.

No capítulo 3 é apresentado o estudo de caso de otimização do uso de motores em um contexto industrial.

No capítulo 4 apresenta-se a conclusão do trabalho e propostas futuras visando complementar as atividades desenvolvidas.

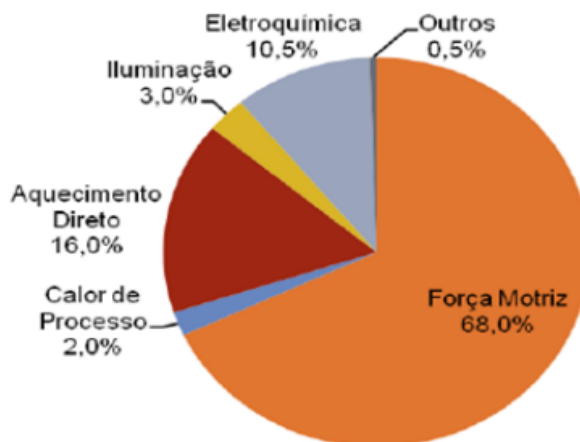
2 Fundamentação Teórica

2.1 Eficiência Energética

O crescente desenvolvimento econômico exige investimentos cada vez mais pesados em geração de energia, o que se torna um fator preocupante à medida que as fontes naturais ficam mais escassas e os impactos ambientais, irreversíveis. A partir desse cenário, várias partes do mundo tem realizado esforços pela padronização de valores mínimos de eficiência de máquinas, equipamentos e processos.

Os motores elétricos de indução trifásicos aparecem como prioridade nestas iniciativas por serem responsáveis pela maior parcela de consumo de energia no mundo, chegando a cerca de um terço do total (ANDRADE, 2011). Ainda segundo o relatório de ações em eficiência energética emitido pela WEG em 2021, no contexto nacional quase 70% da energia utilizada na indústria é consumida por motores elétricos. A Figura 2 apresenta resultado da distribuição levantando pelo último balanço.

Figura 2: Distribuição do consumo energético da indústria nacional



Fonte: (WEG, 2021 apud BEN, 2009).

Desde a década de 70, existem iniciativas como a SEEEM (“*Standards for Energy Efficiency of Electric Motor Systems*”), que reuniu em 2006 mais de 40 representantes de organizações industriais e empresariais, governos, concessionárias, academias e agências de energia fazem um apelo aos governos e outras partes interessadas para implementação de medidas como:

- Início de uma estratégia mais abrangente de promoção de sistema de motores de indução eficientes no mercado;
- Padronizar procedimentos de testes de eficiência energética, classes de eficiência e esquemas de marcação para motores;
- Introduzir um cronograma, definir requisitos mínimos obrigatórios de desempenho energético para padronizar os motores em um alto nível de eficiência;
- Engajar a comunidade na realização de testes e compartilhamento das experiências de modo a desenvolver as melhores práticas e direcionar medidas para promover sistemas de motores eficientes.

Esses esforços evoluíram para sistemas de etiquetagem e padronização de índices de eficiência, voluntários ou obrigatórios. A partir dessas iniciativas internacionais, vários países já regulamentam esse assunto e possuem uma padronização dos índices mínimos de eficiência.

No Brasil, a portaria nº 553 do Ministério de Minas e Energia entrou em vigor em 2009 estabelecendo níveis mínimos de rendimento para motores elétricos trifásicos. Em 2013, a Norma NBR 17094-1 foi revisada complementando a lei e especificando valores

mínimos de rendimento para duas classes de produtos: IR2 e IR3. Desta forma, fabricantes de máquinas e consumidores finais deveriam utilizar produtos que atendessem a estes níveis de rendimento.

Em agosto de 2019 entrou em vigor a nova lei, que determina o nível mínimo de rendimento em IR3 (faixa de potência de 0,16 a 500 CV, de 2 a 8 polos), válido para todos os motores comercializados, sejam novos ou usados. A partir desta definição, o Brasil se juntou à parcela de países pioneiros na adoção de um nível mínimo de rendimento para motores trifásicos fracionários.

Essas exigências, entretanto, não abrangem equipamentos já instalados e sem previsão de substituição. De acordo com a Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos, associado ao fato do parque industrial nacional ter em média 17 anos, a modernização de sistemas de energia elétrica industriais incluindo motores elétricos de indução permite até 60% de redução de consumo com ações de eficiência energética de rápida implementação. (ABRAMAN,2019)

Piovesan (2016) pontua em seu trabalho algumas barreiras que impedem a execução das oportunidades de eficiência energética :

- Tecnológica: relacionada a indisponibilidade de equipamentos, preços inacessíveis e ao uso de tecnologias pouco consolidadas e certificadas;
- Cultural: está associada à falta de conhecimento e a conscientização das técnicas;
- Econômica: trata-se da negligência do custo de energia que causa impacto no orçamento, o risco de paralisação da produção e risco de perda de qualidade também na produção;
- Financeira: Dificuldade de obter crédito, *payback* elevado.

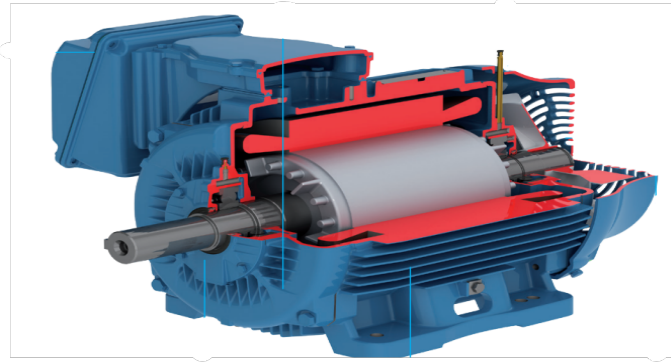
2.2 Motor de Indução Trifásico

As máquinas elétricas rotativas são utilizadas para conversão de energia elétrica em trabalho mecânico podendo assumir basicamente três formas: síncrona, de indução e de corrente contínua. Fitzgerald (2014) destaca que essencialmente os três compartilham dos mesmos princípios básicos de funcionamento, onde o movimento de um campo magnético gera a tensão e a interação dos campos magnéticos dos enrolamentos do estator e do rotor produzem os conjugados. Esse princípio básico pode ser implementado a partir de diferentes métodos de conexão e excitação dos enrolamentos, o que caracteriza os diversos tipos de máquinas.

O motor de indução é uma máquina de corrente alternada (CA) onde os enrolamentos do rotor não são excitados por fonte externa. Sendo assim, o que ocorre é a

indução de correntes nos enrolamentos curto-circuitados do rotor quando ele atravessa a onda de fluxo da armadura sincronicamente. Esse tipo de motor é amplamente utilizado tanto na indústria e manufatura, quanto para o uso residencial.

Figura 3: Motor de Indução Trifásico

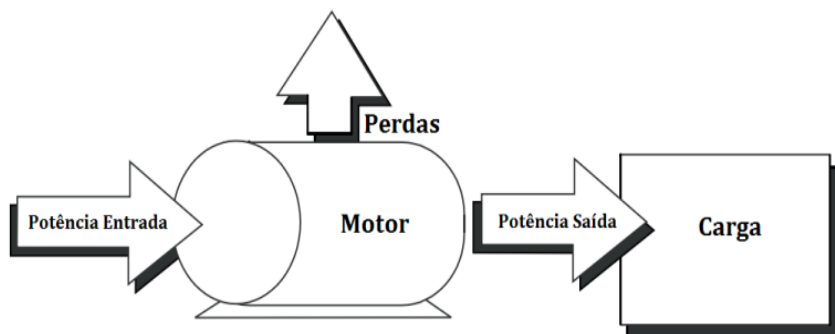


Fonte: (WEG, 2021).

2.3 Perdas em motores

De acordo com MCCOY; DOUGLASS (2014), o rendimento ou eficiência de um motor pode ser expresso como a relação entre a potência útil entregue à carga ($P_{Saída}$) e a potência utilizada pelo motor, entregue pela rede elétrica ($P_{Entrada}$). A figura 4 ilustra o processo de conversão de energia e como as perdas tem uma influência direta na potência que chega até a carga.

Figura 4: Conversão Eletromecânica Motriz



Fonte: Adaptado de (MCCOY; DOUGLASS, 2014).

Sendo assim, a eficiência de um motor de indução é definida como:

$$\eta = \frac{P_{Saída}}{P_{Entrada}} = \frac{P_{Entrada} - P_{Perdida}}{P_{Entrada}} = 1 - \frac{P_{Perdida}}{P_{Entrada}} \quad (1)$$

Através da equação 1 podemos presumir que o cálculo do rendimento de um motor de indução está diretamente associado ao cálculo de suas perdas. A maior parte das perdas que influenciam a conversão de energia elétrica para mecânica acontecem nos enrolamentos e núcleos magnéticos da máquina. Essas perdas podem ser magnéticas, mecânicas ou suplementares dependendo de suas características.

A Tabela 1 apresenta uma distribuição percentual típica de perdas em motores de diferentes potências e operando em regime nominal (Piovesan, 2016 apud MOREIRA et al., 2000).

Tabela 1: Distribuição Percentual de Perdas em Motores

POTÊNCIA NOMINAL (HP)	25	50	100
Perdas no Núcleo (%)	15	20	13
Perdas Mecânicas (%)	7	8	14
Efeito Joule no Estator (%)	42	38	18
Efeito Joule no Rotor (%)	21	22	18
Perdas Complementares (%)	15	12	27

Fonte: (Piovesan, 2016 apud MOREIRA et al., 2000).

A norma brasileira ABNT NBR 17094-3:2018 define os tipos de perdas existentes nos motores em basicamente cinco grupos definidos a seguir.

2.3.1 Perdas por efeito joule no estator

Para uma máquina trifásica, a perdas por efeito joule no estator (P_{ws}) é definida como:

$$P_{ws} = 3.R_s I_s^2 \quad (2)$$

2.3.2 Perdas por efeito joule no rotor

Esta perda, incluindo as perdas por contato da escova para motores com rotor bobinado, deve ser determinada pelo escorregamento em fração decimal e para o máquina operando como motor é determinada pela equação:

$$P_{wr} = (P_{Entrada} - P_{ws} - P_{wnucleo}) * s \quad (3)$$

2.3.3 Perdas no núcleo

São perdas decorrentes da histerese de magnetização e correntes parasitas no material magnético. Nas condições normais de operação variam aproximadamente com o quadrado da tensão de entrada, mas para uma tensão de entrada fixa apresentam um valor aproximadamente constante para uma carga variando de vazio até a carga nominal.

2.3.4 Perdas por atrito e no enrolamento da bobina

Perdas mecânicas devido ao atrito nos rolamentos e mancais e ao enrolamento das bobinas. Para determinar a potência perdida no núcleo ($P_{wnucleo}$) e a potência por atrito e no enrolamento das bobinas ($P_{watrigo}$) é necessário realizar um teste a vazio no motor. Nestas condições $P_{entrada}$ correspondente ao somatório de todas as perdas da máquina, portanto podemos calcular $P_{wnucleo}$ e $P_{watrigo}$ através da equação:

$$P_{wnúcleo} + P_{watrigo} = P_{Entrada}P_{ws} \quad (4)$$

A separação de $P_{wnucleo}$ e $P_{watrigo}$ é realizada por meio de medições da tensão RMS no estator (V_s), da corrente RMS no estator (I_s) e a $P_{Entrada}$ na frequência nominal com V_s variando de 125% da tensão nominal até o ponto onde uma redução da tensão resulta no aumento da corrente. Em seguida plota-se um gráfico de $P_{Entrada}P_{ws}$ em função de V_s , estende-se a curva até o ponto onde $V_s = 0$, o ponto de intersecção correspondente ao valor de $P_{watrigo}$.

2.3.5 Perdas complementares

Trata-se de perdas devido às frequências fundamentais e altas na estrutura da máquina, correntes circulantes no estator e no material magnético. São proporcionais ao quadrado da corrente. A determinação destas perdas é um problema para a maioria dos métodos de estimação de eficiência e pode ser calculado de forma indireta através da equação a seguir:

$$P_{wcomp} = P_{Perdida}(P_{ws} + P_{wr} + P_{wnúcleo} + P_{watrigo}) \quad (5)$$

2.4 Baixa eficiência em sistemas motrizes

Apesar de os motores de indução na faixa de 60 cv serem considerados máquinas com elevada eficiência, com rendimento normalmente acima de 90%, esse rendimento pode

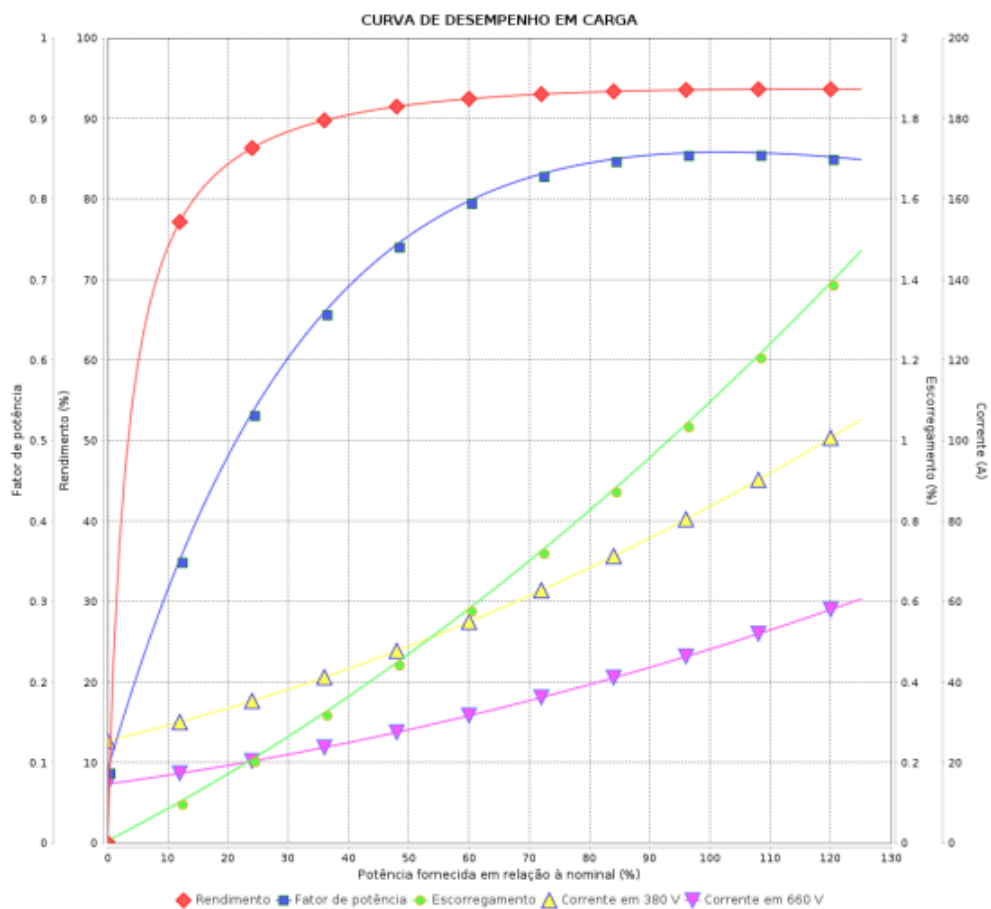
diminuir a depender do estado ou das condições nas quais o motor se encontra. Garcia (2003) destaca quatro causas principais para baixa eficiência em motores:

2.4.1 Dimensionamento

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN 2009), estima-se que aproximadamente 40% dos motores operam abaixo de 50% da sua capacidade nominal e por isso o projeto e a seleção destes equipamentos deve ser muito criteriosa e assertiva, levando-se em conta todos os dados relacionados à carga acionada (aplicação) e a instalação.

É possível verificar na Figura 5 a queda brusca no rendimento quando o motor opera com cargas baixas, em torno de 40% da carga nominal. A faixa ideal de trabalho se dá entre 75% e 100% de carga. Para realizar o dimensionamento, deve-se considerar o torque de partida, o torque nominal (ou de operação) e a carga e o regime de funcionamento, visto que para alguns casos é necessário utilizar motores de maior porte para suprir as características da carga. (WEG, 2020)

Figura 5: Curva de desempenho em carga do motor de indução trifásico



Fonte: (Catálogo da WEG, 2022).

Em casos de dimensionamento onde já existe um histórico de manutenção no equipamento, é importante avaliar quais as principais causas de falhas e assim realizar o dimensionamento de modo a evitar a recorrência desse tipo de problema. “Por exemplo, caso haja histórico de quebra de rolamentos por falta ou excesso de graxa, certamente o problema irá persistir durante a operação com o novo motor, caso não se solucione o problema, ou seja, lubrificação deficiente.” (Considerações sobre...2020, p.2)

2.4.2 Instalação

A má instalação pode afetar em fatores mecânicos como o ambiente em que o motor foi instalado, fixação, temperatura, alinhamento também se caracterizam como potenciais influenciadores nas perdas do motor, podendo afetar o desempenho. Entretanto, segundo Piovesan (2016), esses fatores nem sempre são facilmente mensuráveis quando se quer analisar seus impactos na eficiência do motor.

2.4.3 Manutenção

A limpeza do motor também pode afetar positivamente o desempenho do motor. BORTONI et al. (1999) observou em seu trabalho que após a realização da limpeza houve redução das perdas por atrito e ventilação. Ademais, fatores como lubrificação, ambiente limpo, boas conexões também afetam o desempenho o motor.

2.4.4 Alimentação Elétrica

Há possibilidade de haver harmônicos e desequilíbrio entre as fases na rede em que o motor está alimentado. Os harmônicos, distúrbios nas formas senoidais de tensão e corrente, podem ocorrer devido a aparelhos eletrônicos também ligados a rede. Já o desbalanceamento entre fases pode provir da própria rede distribuidora, assim como da diferença de indutância entre os cabos de alimentação do motor.

3 Estudo de Caso

Antes de realizar um investimento, é sempre importante avaliar a real necessidade e o retorno esperado a partir daquela aquisição. Desse modo, quando uma empresa decidir investir num motor elétrico, por exemplo, deve levar em consideração os custos atrelados ao consumo de energia que essa nova carga vai representar. Isso deve ser feito pois os custos inerentes ao projeto podem variar consideravelmente a partir de condições como instalação de má qualidade e aplicações inapropriadas.

A partir da compreensão da necessidade de reduzir custos através da análise de perdas, foi realizado um projeto numa fábrica do setor automotivo visando propor melhorias que aumentassem a eficiência do sistema reduzindo perdas de energia.

3.1 Direcionador

No contexto fabril, onde não são poucos os apontamentos de perda, é importante a utilização de um bom indicador de perdas para priorizar problemas mais recorrentes e propor soluções que gerem um impacto maior. Esse indicador é conhecido por direcionador, visto que direciona os pontos com alto volume de perdas. Para identificar o ponto de atuação com maior oportunidade de redução utilizou-se a Matriz de Custos, uma planilha dinâmica onde todos os principais tipos de perdas são contabilizados pela empresa.

A figura 6 ilustra as macro perdas registradas na unidade em reais. Em destaque está a perda de energia elétrica, a segunda maior registrada.

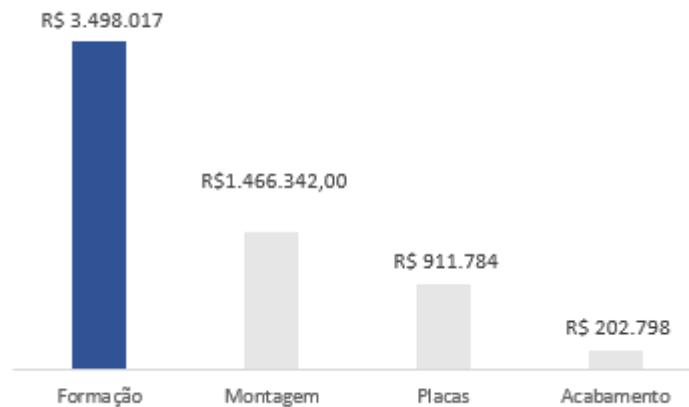
Figura 6: Macro Perdas em reais



Fonte: (Matriz de Custos, 2021).

A perda de energia elétrica é calculada a partir da diferença entre a estimativa de consumo em condições ideais e do consumo real registrado. Através de uma estratificação dessa perda, podemos visualizar quais as áreas mais afetadas. Na figura 7 é possível observar em destaque a Formação, responsável por 58% das perdas de energia.

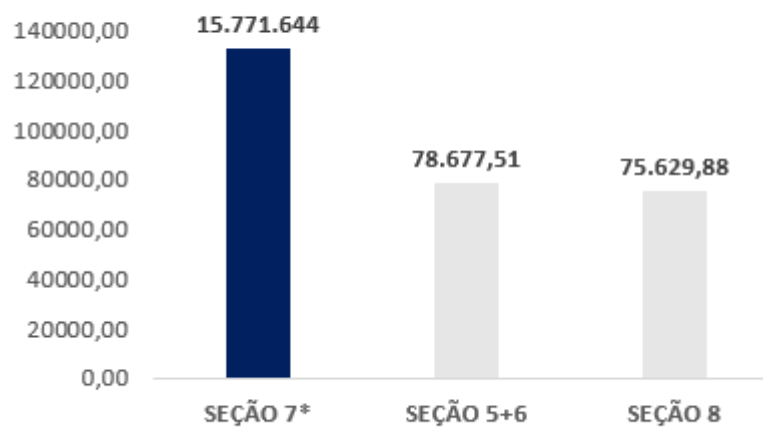
Figura 7: Perda de Energia Elétrica por Setor



Fonte: (Matriz de Custos, 2021).

Como se trata-se de um cenário de perdas de energia, foi realizado então o levantamento de quanto essa perda corresponde em termos de Quilowatt-hora (kWh). A figura 8 ilustra o consumo distribuído entre as seções que constituem o setor de Formação, onde a seção 7 se destaca com o maior valor de kWh.

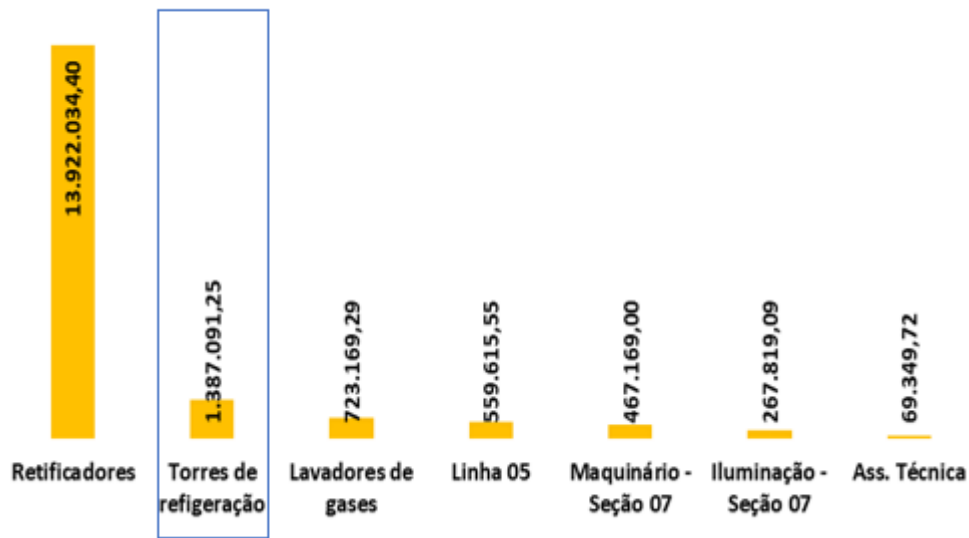
Figura 8: Consumo da Formação em kWh/mês



Fonte: (Autoria Própria, 2022).

Por fim, foi analisado o último nível e estratificação disponível como indicador, que seriam os circuitos que compõem as seção 7.

Figura 9: Estratificação do consumo da Formação em kWh/mês



Fonte: (Matriz de Perdas, 2021).

O objeto de trabalho foi definido a partir de uma análise de locais onde se registram maiores perdas e que ainda não possuem um projeto de melhoria sendo implementado. O circuito dos retificadores possui uma diferença considerável em relação aos demais devido às características próprias do processo e já é alvo de outros projetos de melhoria. Sendo assim, foi decidido que o circuito das torres de refrigeração deveria ser o alvo do estudo.

Esse processo de investigação a partir de uma visão macro e, em seguida, estratificando as informações até definir o último nível é uma fase importante para que se priorize a realização de melhorias nas áreas com as maiores perdas e se aproveite, consequentemente, as melhores oportunidades de ganho.

O circuito Torres de Refrigeração consiste num conjunto de bombas e tanques responsáveis por realizar o resfriamento da água que vem do processo de formação do produto. Nesse circuito, foi observada a atuação de um conjunto de 3 bombas de 60CV que conduziam a água verticalmente para as torres de refrigeração, localizadas num nível acima do tanque. A figura 10 ilustra o tanque - em concreto- e as torres de resfriamento.

Figura 10: Sistema de Resfriamento da água



Fonte: (Autoria Própria, 2021).

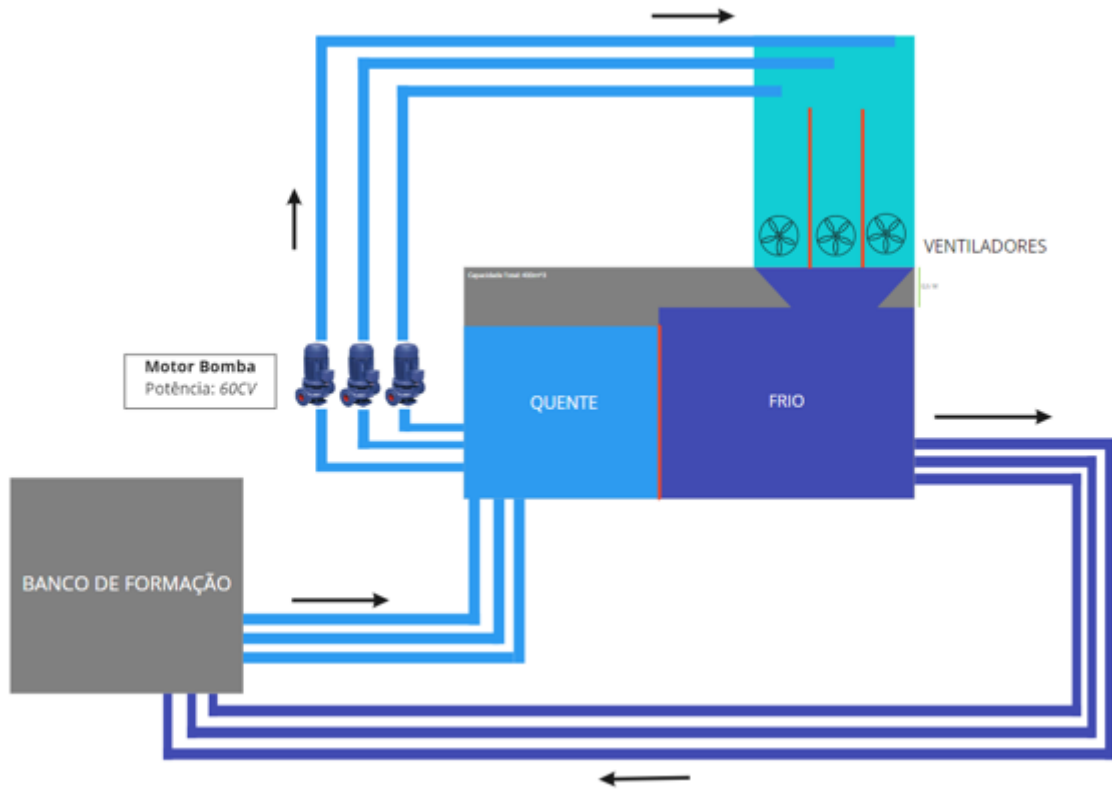
O processo de Formação na qual esse sistema se encontra de pode variar bastante de acordo o modelo de produto produzido e seu respectivo plano de formação. Além disso, não existe uma frequência padronizada para o seu funcionamento, logo, há dias com demanda muito maior em comparação com outros. Identificou-se que os três motores atuavam ininterruptamente, fora das condições básicas e não existia um controle que possibilitasse o uso eficiente, o que poderia estar causando perdas de energia.

3.2 Funcionamento do sistema de resfriamento de água

Em primeiro momento, foi feito um estudo mais aprofundado da dinâmica de funcionamento do conjunto. A figura a seguir ilustra um desenho esquemático sistema no qual esses motores atuam. O processo de formação pode durar até 24 horas onde o produto atinge temperaturas de até 85°C. Para para evitar que a elevação de temperatura afete o desempenho do processo, utiliza-se água como meio de facilitar a troca de calor e, conseqüentemente, retardar o aumento da temperatura. Sendo assim, acrescenta-se um volume de água nos bancos de formação e à medida que essa água aquece, começa a ser recirculada e quando a recirculação já não consegue conter a elevação temperatura, é

trocada. A água que acaba de ser removida é conduzida para um tanque de água quente onde as três bombas de 60CV que aparecem na figura realizam a condução para o topo das torres de resfriamento.

Figura 11: Funcionamento do Sistema de Resfriamento de água



Fonte: (Autoria Própria, 2022).

A água ao chegar no topo das torres, cai por gravidade numa espécie de sistema em espiral que a espalha à medida que três grandes ventiladores trabalham juntos auxiliando no processo de resfriamento. Após cair no tanque de água fria já com a temperatura bem mais baixa, ocorre a condução de volta para os bancos de formação.

Para garantir que o sistema funcione dentro dos padrões estabelecidos, um controlista verifica periodicamente a temperatura da água no tanque quente (TQ) e no tanque frio (TF) e anota esse histórico num *checklist*. Além da temperatura do tanque, o mesmo também acompanha parâmetros como nível da água, PH, o funcionamento das bombas e ventiladores. Caso seja identificado algum tipo de anomalia, anota-se a sigla NOK indicando a não conformidade e a manutenção é acionada. A tabela 2 mostra o histórico levantado dessas medidas pelo período de uma semana no turno A.

Tabela 2: *Checklist* dos Controlistas - Turma A

DIA	HORA	NÍVEL	PH	BOMBAS	VENTILADORES	TEMP. TF	TEMP. TQ
1	6:00	3.687	3.5	OK	OK	32° C	34°C
	10:00	3.52	4	OK	OK	30°C	32°C
2	6:00	3.8638	4	OK	OK	30°C	32°C
	10:00	3.414	4	OK	OK	30°C	32°C
3	6:00	4.201	3	OK	NOK	30°C	32°C
	10:00	3.429	3.5	OK	NOK	30°C	31°C
4	6:00	4.113	4	OK	OK	29°C	31°C
	10:00	3.583	3	OK	OK	30°C	31°C
5	6:00	3.828	3	OK	OK	29°C	32°C
	10:00	3.241	4	OK	OK	29°C	31°C
6	6:00	3.913	4	OK	OK	30°C	32°C
	10:00	3.588	4	OK	OK	30°C	31°C
7	6:00	3.602	4.5	OK	OK	31°C	32°C
	10:00	3.397	4	OK	OK	30°C	32°C

Fonte: (Autoria Própria, 2021).

Quanto menor a temperatura da água, melhor é o resultado final do processo, onde 31°C é o limiar no qual a água se caracteriza como fria. Na tabela acima, é possível observar alguns momentos onde a água chega no tanque quente já com uma temperatura considerada fria.

Diante do desafio de identificar oportunidades de eficiência energética, a primeira oportunidade observada foi de otimizar esse sistema garantindo que a água retorne aos bancos de formação dentro da temperatura convencional e o nível do tanque não sofra nenhum tipo de anomalia. Isso pode ser feito a partir da implementação de uma automação no sistema onde as bombas são desligadas sempre que a temperatura TQ registrada já estiver suficientemente fria, ou seja, abaixo de 31°C.

3.3 Verificação dos Parâmetros

A temperatura elevada da água que vem dos bancos de formação até as torres de resfriamento não pode ser controlada, visto que é intrínseca ao processo. Contudo, a água fria que faz o caminho inverso, tem um valor máximo estipulado para que o processo de formação não seja afetado. Diante disso, faz-se necessária a validação dos parâmetros para verificar se a leitura realizada pelo controlador de fato correspondia à temperatura real da água.

Como a calibração do pirômetro só poderia ser feita mediante o esvaziamento do tanque e parada da produção, não foi possível utilizar esse meio de correção dos

parâmetros. Dessa forma, optou-se por realizar uma medição da temperatura real da água no tanque e comparar com a temperatura registrada. para A Figura 12 mostra o registro da temperatura medida com um termômetro de mercúrio que foi de 30°C enquanto simultaneamente o controlador registrava a temperatura do 31°C para o tanque fio.

Figura 12: Validação do dispositivo de medição



Fonte: (Autoria Própria, 2022).

Compreendendo a diferença entre a temperatura medida e registrada, e avaliando como aceitável devido a dificuldade de acesso para realizar manutenção no local de instalação, considerou-se 1°C a diferença para as futuras medições realizadas.

3.4 Modelo do Motor

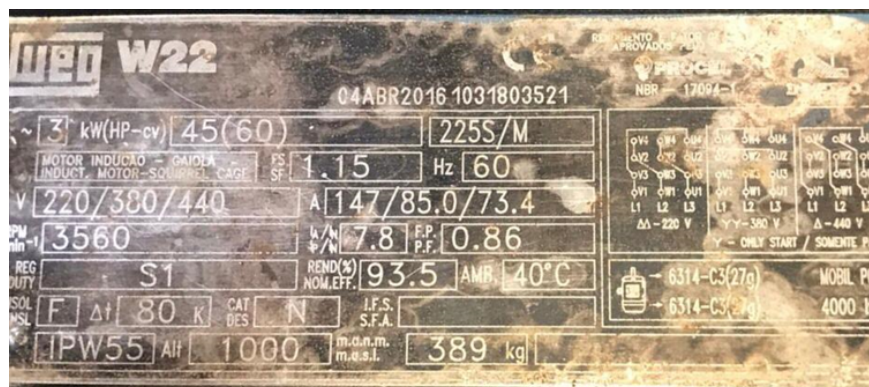
O modelo de motor utilizado no sistema é o W22 IR3 Premium da Weg. A linha W22 atende aos níveis de rendimento especificados na Portaria Interministerial n.º 1, de 29 de junho de 2017, dessa forma, trata-se de um modelo que de fato promove redução do consumo de energia, oferece uma boa relação custo-benefício e, conseqüentemente, maior produtividade e gastos reduzidos para a indústria. Portanto, o motor instalado já atende padrões suficientemente bons de eficiência energética.

Figura 13: Motor W22 IR3 *Preminum*

Fonte: (Catálogo da Weg, 2021).

A figura abaixo é um registro da placa do motor, onde é possível verificar o conjunto de características técnicas. Como as condições ácidas do local provocam a rápida degradação dos dados de placa e dificultam a visualização, a tabela 3 contém um resumo das principais informações.

Figura 14: Placa do Motor de indução WEG W22



Fonte: (Autoria Própria, 2022).

Tabela 3: Resumo das Características técnicas

Potência	60CV
Frequência	60Hz
Tensão	380/660 V
Número de polos	2
Corrente Nominal	85 A
Rotação Síncrona	3600 rpm
Rendimento	93,5%
Fator de Potência	0.86

Fonte: (Autoria Própria, 2022).

3.5 Dimensionamento

Como apresentado acima, o modelo do motor possui especificações técnicas dentro dos padrões de eficiência energética estabelecidos e regulamentados no Brasil. Entretanto, essa condição não é suficiente para garantir um desempenho ótimo, é necessário observar os parâmetros reais de trabalho.

Figura 15: Painel de interface do sistema



Fonte: (Autoria Própria, 2022).

A partir de uma análise comparativa, registrou-se que a IHM (Interface Homem-Máquina) registrava uma corrente média de 49,16 A para cada uma das três bombas, enquanto a corrente nominal indicada na placa para uma ligação a 380 V deveria ser de 85 A, como consta na Tabela 3. Assim, as três bombas funcionavam ininterruptamente trabalhando abaixo da sua capacidade nominal para suprir uma demanda de resfriamento que não é fixa. A partir das informações levantadas foi possível definir o seguinte fenômeno: As bombas estavam superdimensionadas, o que provoca perdas de energia durante a condução da água do tanque para as torres de resfriamento diariamente.

A curva de desempenho em carga do motor em questão foi apresentada na Figura 5, onde também é possível verificar o baixo rendimento consequente da corrente de trabalho inferior ao seu valor nominal.

3.6 Instalação

Como pode ser observado na Figura 17, o conjunto de bombas está montado numa mesma base, de modo que a vibração é transmitida de umas para outras. Essa vibração certamente decorre da sucção axial da bomba que é potencializada pela falta de rigidez do sistema. Portanto, somando a sucção no sentido axial, a tubulação flexível e a falta de fixação obtemos uma vibração excessiva em todo o sistema.

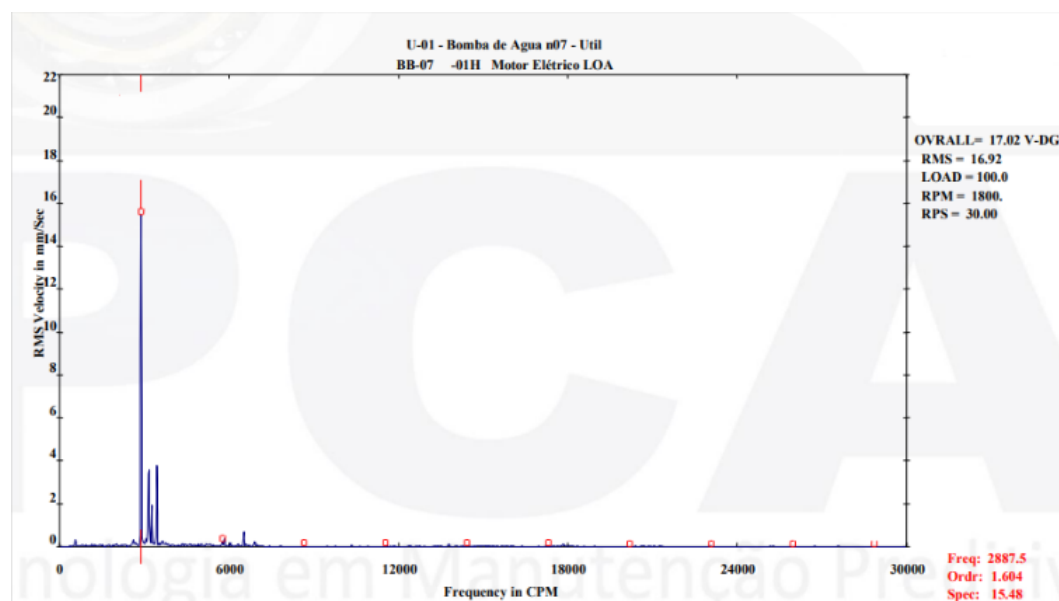
Figura 16: Conjunto de Bombas



Fonte: (Autoria Própria, 2022).

Através da análise de vibração, foi possível verificar que mesmo uma das bombas estando desligada, apresentava uma vibração de 13,6mm/s devido ao uso da base única. Essa informação pode ser conferida a partir do espectro da bomba que ficou parada, que ainda assim vibra a 13,6mm/. Nesse caso, a falta de rigidez pode afetar o eixo do motor quanto ao empeno e folgas dos rolamentos.

Figura 17: Espectro da bomba parada



Fonte: (Laudo de Análise de Vibração, 2022).

Outro ponto observado na instalação foi o nível de degradação física do conjunto como um todo, que se dá principalmente devido ao ambiente ácido em que se encontra.

De formas mais específica, a corrosão das válvulas pneumáticas impede que ocorra a vedação apropriada ao ligar e desligar as bombas. Como as mesmas estão instaladas num nível um pouco acima dos tanques (vide Figura 22), sem a vedação completa da válvula da máquina ao desligar, começa a ocorrer vazamento de água com teor ácido causando desperdício e contaminação do solo.

3.7 Alimentação elétrica

O aparelho analisador de energia Fluke foi utilizado para realizar medições em uma dos motores e compreender o comportamento dos parâmetros elétricos de funcionamento. Com o relatório gerado, foi possível analisar o consumo de energia da bomba.

Figura 18: Medição realizada com equipamento Fluke

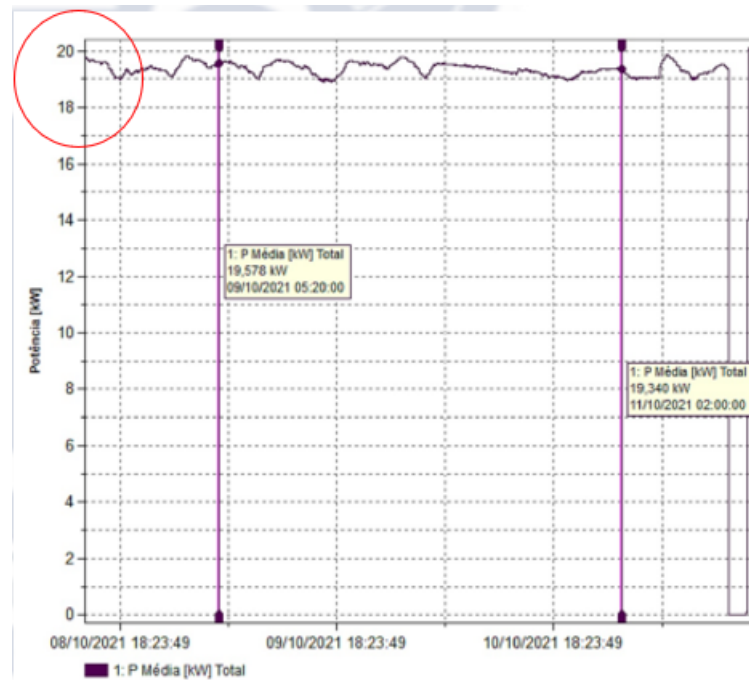


Fonte: (Autoria Própria, 2022).

O relatório obtido indicou um consumo médio de 504,36 kWh de uma bomba em um dia, o que equivale a um custo diário de R\$126,59 para a empresa. A figura abaixo ilustra o gráfico de consumo de potência ativa emitido pelo Fluke. Como o acionamento das bombas é feito por meio de inversores, não houve preocupação com o alto consumo de uma partida direta, que seria evidenciado na região destacada pelo círculo em vermelho.

É possível verificar na figura abaixo a característica de consumo da bomba atuando. Observa-se que não há relação programada entre a demanda real solicitada pelo sistema de resfriamento e o uso da capacidade total das bombas.

Figura 19: Gráfico da potência em uma bomba antes da melhoria



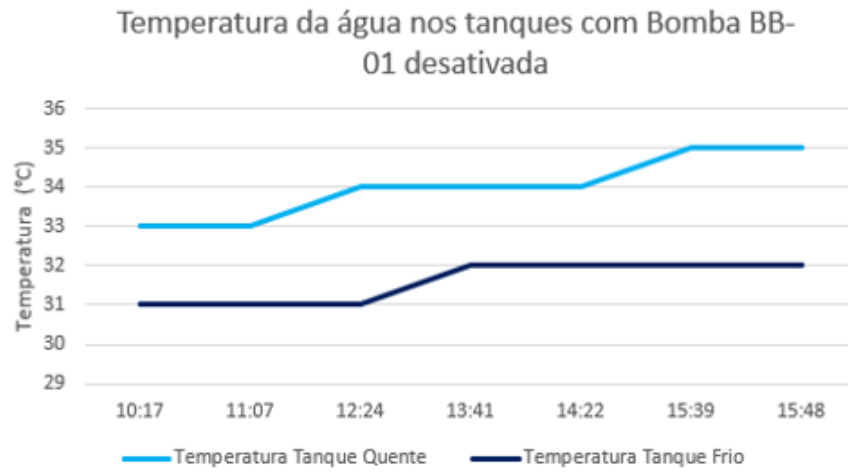
Fonte: (Relatório FLUKE, 2022).

3.8 Prototipagem

Dos pontos avaliados nas seções anteriores, foram identificadas algumas oportunidades de melhoria, das quais em primeiro momento, a automatização do sistema e as condições de instalação foram aprovadas pela empresa para serem implementadas de forma imediata. Portanto, após a finalização da etapa de estudos e análises iniciou-se a prototipagem, ou seja, um teste em escala reduzida da solução levantada para investigar a viabilidade de introduzi-la.

A prototipagem consistiu no desligamento manual de uma bomba e o acompanhamento das variações de temperatura da água, do nível do tanque e dos parâmetros da bomba. Foram realizados dois testes, sendo o primeiro durante o dia com duração de 5 horas e 31 minutos. A figura abaixo mostra as temperaturas registradas nos tanques quente e frio durante esse período.

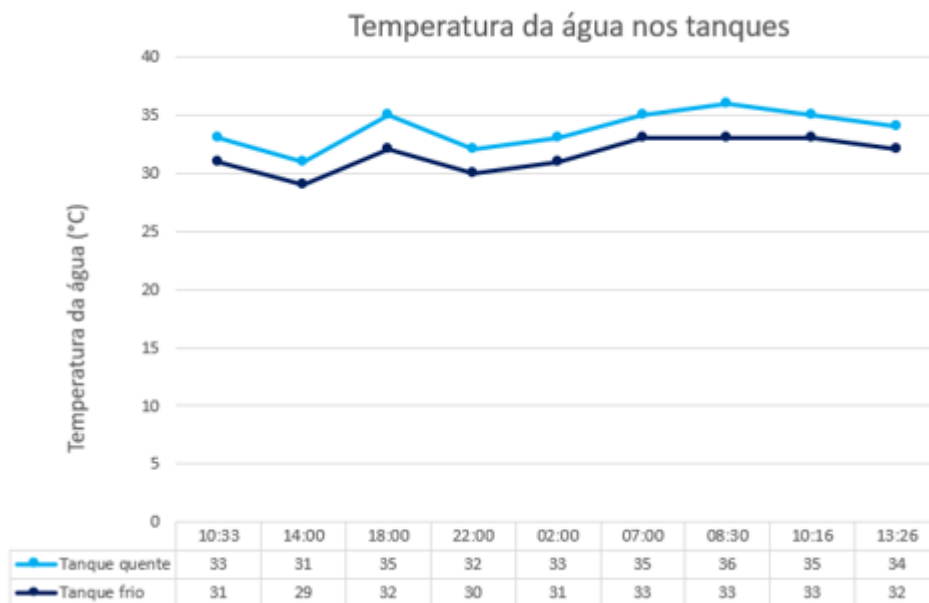
Figura 20: Primeiro teste da prototipagem



Fonte: (Autoria Própria, 2022).

Em posse desses dados, observou-se a variação de 1°C na temperatura da água do tanque frio. O segundo teste teve duração de 16 horas e 7 minutos, e como pode ser observado na figura 21 a temperatura da água subiu 1°C após 8 horas com uma bomba parada e voltou a descer durante a noite.

Figura 21: Segundo teste da prototipagem



Fonte: (Autoria Própria, 2022).

Ambos os testes iniciaram a partir as 10 horas da manhã, registrando o período mais quente do dia e durante o verão. Levando em consideração períodos chuvosos e um clima mais ameno durante a noite, esse tempo pode aumentar.

A partir dessa prototipagem confirmou-se a possibilidade de que o sistema funcione bem por uma média de aproximadamente 7 horas no dia com apenas 2 bombas ligadas e sem resultar em anomalias nos parâmetros da produção.

3.9 Plano de Ação

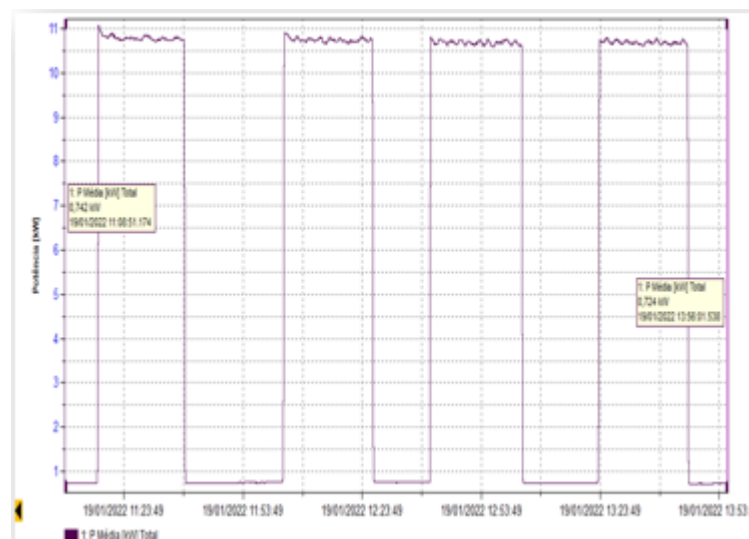
Diante disso, foi realizado um plano de ação com responsáveis e prazos para implementação das melhorias.

A primeira ação está relacionada à otimização do funcionamento das bombas e requer o uso de um controlador lógico programável (CLP) para receber as informações de temperatura registradas pelo Controlador de Temperatura TLK48 e realizar o acionamento ou desligamento das bombas.

Sendo assim, foi realizada a programação de dois alarmes no controlador, um para identificar quando a temperatura do tanque de água fria estiver baixa (menor que 31°C) e outro para a temperatura alta (maior que 32°C). Esses alarmes eram então setados para que o CLP tomasse a decisão de acionar ou não a bomba.

Após a melhoria, colocamos novamente o medidor de energia e registramos o comportamento de funcionamento condicional da bomba, como é possível verificar na figura abaixo.

Figura 22: Gráfico da potência em uma bomba após a melhoria



Fonte: (Relatório FLUKE, 2022).

Antes da melhoria, a bomba permanecia acionada independentemente da necessidade de reduzir a temperatura da água que chegava ao tanque quente, já com a automação implementada podemos observar que o motor só é acionado quando a temperatura do tanque frio excede os 31°C e é preciso um terceiro motor para atender a demanda de água

recirculando.

A segunda ação foi direcionada para as condições de instalação dos motores, onde foi realizado o reforço da fixação das bomba e instalação de vigas ao longo da base de sustentação das bombas. Por fim, foi implementado um quadro para proteção das válvulas de manobra pneumáticas com o intuito de garantir a sua longevidade.

Figura 23: Proteção das válvulas



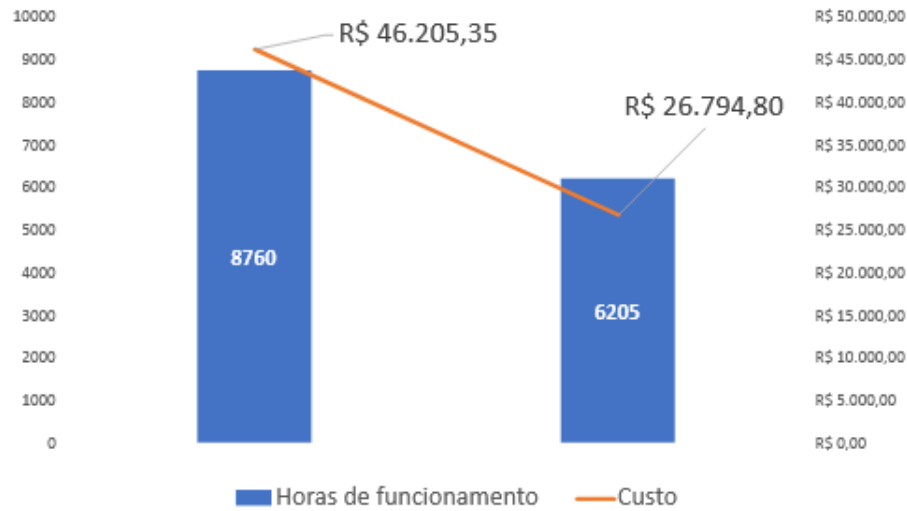
Fonte: (Relatório FLUKE, 2022).

3.10 Resultados

A programação da lógica de funcionamento para o motor permitiu que a sua utilização fosse condicionada à necessidade de reduzir a temperatura da água do TF. Através dessa melhoria, o motor que antes permanecia funcionando ininterruptamente passou a ser ligado apenas quando a temperatura do tanque frio estava acima de 31°C. Logo, a estimativa é de que o motor agora pase uma média de pelo menos 7 horas parado ao longo do dia, diminuindo os custos pelo consumo de energia.

Realizando uma projeção desse padrão de comportamento ao longo de 365 dias do ano, estima-se que essa otimização reduza o consumo anual da energia de um motor reduza em torno de 41%, proporcionando um ganho anual de R\$18.777,60.

Figura 24: Gráfico da projeção de redução da perda de energia em um ano



Fonte: (Autoria Própria, 2022).

Sendo assim, um ganho relevante foi obtido levando em consideração que apenas parte das ações foram implementadas. Foi possível atingir diretamente o indicador de perdas de energia da empresa através da otimização do uso do conjunto de motores. No que se refere ao tempo de vida útil dos materiais, também houve um prolongamento a partir das ações de fixação dos motores e da confecção da proteção das válvulas.

4 Conclusão e Proposta para Trabalhos Futuros

No trabalho desenvolvido foi realizada uma revisão bibliográfica dos conceitos que envolvem o avanço da padronização dos níveis de eficiência energética no Brasil e no mundo para motores de indução trifásicos. Ainda nessa etapa, foram apresentadas as principais perdas intrínsecas às características físicas dos motores e além dessas, quais outras oportunidades de eficiência podem ser encontradas nos sistemas motrizes.

Empresas que tomam decisões baseadas somente em orçamentos ou em valores investidos na aquisição podem cometer equívocos. Mais que o investimento inicial, é preciso fundamentalmente considerar o custo operacional, ou seja, as despesas durante toda a vida útil do motor elétrico, além de uma boa instalação e manutenção.

Comprovadamente, o consumo de energia elétrica concentra os maiores custos a longo prazo. Assim, o valor adicional com a aquisição de uma solução de alto rendimento retorna na forma de economia com o insumo, tornando essa equação extremamente vantajosa a médio e longo prazo. Entretanto, como o caso apresentado nesse trabalho, nem sempre a empresa está disposta a investir para aplicar essas soluções.

Esse trabalho mostrou como é possível explorar soluções de eficiência com baixo custo. No caso da automação implementada para otimização do uso da bomba, não houve investimento com a compra de materiais e os ajustes da instalação puderam ser feito com a equipe de manutenção e materiais disponíveis na fábrica, o que barateou o projeto.

Para trabalhos futuros sugere-se a revisão do dimensionamento dos motores superdimensionados e verificação do *payback* associado. Outra oportunidade que pode ser explorada e é capaz de trazer resultados muito positivos com redução de custos por perdas de energia é a análise da modalidade tarifária.

Referências Bibliográficas

- Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética: MME/EPE, 2020. Disponível em: www.epe.gov.br. Acesso em: 25 de julho de 2022.
- BRUNNER, Conrad U. et al. Standards for efficient electric motor systems SEEEM building a worldwide community of practice. ECEEE Summer Study. Panel 7. Making Industries More Energy Efficient, 2007.
- CARVALHO, D. P. ; ANDRADE, D. A. ; GOMES, L. C. ; CARVALHO, W. J. ; SILVEIRA, A. W. F. V. ; BERNADELLI, V. R. ; BISSOCHI JUNIOR, C. A. . Uma Revisão das Técnicas de Estimacão de Eficiência de Motores de Induo Trifásicos. In: VI Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, 2008, Uberlândia, MG. Anais da VI Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica. Uberlândia: VI CEEL, 2008, v. 01.
- HADDAD, Jamil; NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. Balanço de Resultados das Aoes de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes. Centro de Excelência em Eficiência Energética (Excen), 2019.
- WERKEMA, M.C.C. As Ferramentas da Qualidade no Gerenciamento de Processos. Belo Horizonte: Fundaco Christiano Ottoni, 1995 . Criando a Cultura Seis Sigma. Rio de Janeiro: Qualitymark Ed., 2002. (Série Seis Sigma; V. 1).
- ISLAM, M. M., S. A., Ahmed, T., Hossain, M. M. Improving FTT by Using PDCA Cycle in RMG Sector-A. Case Study. Proceedings of 9th Asian Business Research Conference, 20-21 December, BIAM Foundation, Dhaka, Bangladesh, 2003.
- SIDHU, B. S., Kumar, V., Bajaj, A. (2013). The "5S" Strategy by using PDCA cycle for continuous improvement of the manufacturing process in agriculture industry. International Journal of Advanced Scientific and Technical Research, 2013.
- PAGANI, R. N. (2009). Proposta de aplicao do método PDCA na Estruturao de um SPL na região dos campos gerais, PR, Brasil. Associao Brasileira de Engenharia de Produo – ABEPRO, 2009.
- ANDRADE, Cssio T. C.; MAGALHÃES, Francisco Rodrigo P. de; PONTES, Ricardo S. T.; Análise de resultados da regulamentaco de índices de eficiência energética de motores de induo - um estudo de caso. Ceará, 2019. Disponível em: <https://www.academia.edu/38346273/Artigo14?bulkDownload=thisPaper-topRelated-sameAuthor-citingThis-citedBy-This-secondOrderCitationsfrom=coverpage>. Acesso em 10 de agosto de 2022.
- FITZGERALD, A. E; KINGSLEY Jr, Máquinas elétricas[recurso eletrnico] / Stephen D. Umans ; traduo: Anatólio Laschuk. – 7. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre : AMGH, 2014
- WEG. Soluoes em eficiência energetica. Disponível em: <https://static.weg.net/medias>

/downloadcenter/h09/h7a/WEG-solucoes- em-eficiencia- energetica-50058390-brochure-portuguese-web.pdf. Janeiro 2021. Acesso: 26 de julho de 2022

GARCIA, A. G. P. Impacto da lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

WEG. Soluções em Eficiência Energética. Disponível em: <http://catalogo.weg.com.br/files/artigos/4339.pdf>. Acesso em: 015 Julho de 2022.

WEG. Considerações sobre redimensionamento de motores elétricos de indução. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h94/hb9/WEG-consideracoes-sobre-redimensionamento-de-motores-eletricos-de-inducao-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>. Acesso em: 15 Julho de 2022.

PIOVESAN, Leonardo Vinicius. Análise Multicritério para substituição de conjuntos motrizes baseados em indicadores de eficiência energética. (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade do Estado de Santa Catarina, 2016.

MCCOY, G. A.; DOUGLASS, J. G. Premium Efficiency Motor Selection and Application Guide: A Handbook for Industry. [S.l.], 2014. Disponível em: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/amo_motorshandbookweb.pdf. Acesso em: 20 de julho de 2022.

MOREIRA, H. J. F.; SOARES, G. A.; TABOSA, R. P.; SHINDA, R. Guia operacional de motores elétricos. Eletrobrás, 2000. Companhia Paranaense de Energia Elétrica, 2000. Disponível em: [http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/manual/\\$FILE/manualeficienciaenerg.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/manual/$FILE/manualeficienciaenerg.pdf). Acesso em: 20 de julho de 2022.

EPE. Balanço Energético Nacional 2021 - ano base 2020. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2015. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em: 15 de julho de 2022