

ASSOCIAÇÃO EDUCATIVA EVANGÉLICA  
FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA – FACEG  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TÉRCIO DOMINGOS ALVES

**ESTUDO SOBRE A OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UMA  
INDÚSTRIA DO SETOR SUCROALCOOLEIRO POR MEIO DE  
REDIMENSIONAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS**

GOIANÉSIA

2021

2021	ESTUDO SOBRE A OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UMA INDÚSTRIA DO SETOR SUCROALCOOLEIRO POR MEIO DE REDIMENSIONAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS. TERCIO DOMINGOS ALVES.
FACEG	

TÉRCIO DOMINGOS ALVES

**ESTUDO SOBRE A OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UMA  
INDÚSTRIA DO SETOR SUCROALCOOLEIRO POR MEIO DE  
REDIMENSIONAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

GOIANÉSIA  
2021

D671e

Alves, Tércio Domingos.

Estudo sobre a otimização da eficiência energética em uma indústria do setor sucroalcooleiro por meio de redimensionamento de motores elétricos :  
Estudo de caso / Tércio Domingos Alves– Goianésia: Faculdade Evangélica de Goianésia, 2021 – Faceg, 2021.  
44 p.; il.

Orientador: Prof. Me Vitor Escher Martins.

Monografia de graduação – Faculdade Evangélica de Goianésia: FACEG, 2021.

1. Redimensionamento. 2. Motores. 3. Economia. 4. Energia. 5. Eficiência.

I. Alves, Tércio Domingos. II. Estudo sobre a otimização da eficiência energética em uma indústria do setor sucroalcooleiro por meio de redimensionamento de motores elétricos.

CDU 621

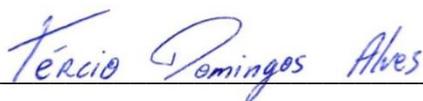
## CESSÃO DE DIREITOS AUTORAIS

NOME: Tércio Domingos Alves

GRAU: Bacharel

ANO: 2021

É concedida à Faculdade Evangélica de Goianésia permissão para reproduzir cópias desta Monografia de Graduação para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta Monografia pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada a fonte.



Nome: TÉRCIO DOMINGOS ALVES

CPF: 052.056.331-07

Endereço: Rua 31, qd. 89, lt. 16 - Residencial Venâncio, bairro Laurentino Martins

E-mail: terciomalves8@gmail.com

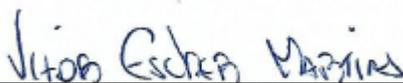
TÉRCIO DOMINGOS ALVES

**ESTUDO SOBRE A OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UMA  
INDÚSTRIA DO SETOR SUCROALCOOLEIRO POR MEIO DE  
REDIMENSIONAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

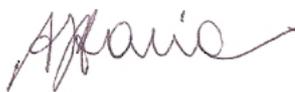
Goianésia, 09 de julho de 2021.

**BANCA EXAMINADORA**



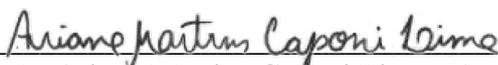
---

Prof. Me. Vitor Escher Martins - Orientador  
Faculdade Evangélica de Goianésia



---

Prof. Dr. Alessandro Rodrigues Faria - Avaliador  
Faculdade Evangélica de Goianésia



---

Prof<sup>a</sup>. Me. Ariane Martins Caponi Lima - Avaliador  
Faculdade Evangélica de Goianésia



## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta monografia àquele que me susteve, e sustém, durante toda a jornada: Deus. Aos meus pais, Daniel Domingos Pereira e Eliane Alves de Souza Domingos, e ao meu irmão, Samir Domingos Alves, por amar, acreditar e investirem em mim. Dedico este trabalho àquela que se manteve compreensiva e amorosa ao meu lado, Tarianny Rangel Barra. Por fim, mas não menos importante, dedico este estudo ao caríssimo amigo e companheiro de jornada acadêmica Raniell Mazzily Izidoro, pelo incentivo e apoio na desenvoltura deste estudo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a dedicação e paciência do querido orientador, professor Me. Vitor Escher Martins, que não mediu esforços para instruir-me na confecção deste trabalho; agradeço aos familiares e amigos por todo apoio oferecido, cada um de vocês tem parte na concretude deste trabalho e desta etapa em minha vida.

## RESUMO

A energia elétrica tornou-se um recurso indispensável para a vida e a sobrevivência das pessoas devido à sua ampla gama de usos e conveniência. No entanto, o uso excessivo e contínuo deste recurso pode provocar consequências danosas à economia e ao meio ambiente. Com vistas à economia no consumo de energia elétrica, políticas de eficiência energética têm sido implantadas em diversos setores da indústria. Isto significa reduzir o custo e aumentar a quantidade de energia fornecida, sem aumentar a sua geração. Neste sentido, uma das medidas possíveis para reduzir o consumo de energia elétrica é o redimensionamento de motores elétricos. Tal medida proporciona uma atualização do parque fabril ao determinar o tamanho do motor ou ajustar o tamanho adequado à carga de operação. Portanto, objetiva-se com este estudo avaliar a otimização da eficiência energética em uma empresa do setor sucroalcooleiro através do redimensionamento de motores elétricos. A metodologia utilizada para o presente trabalho é o estudo de caso para uma usina do setor sucroalcooleiro. A fundamentação teórica foi realizada através de livros, artigos acadêmicos, periódicos e sites especializados quanto ao tema escolhido. Após efetuar uma simulação para o redimensionamento de 32 motores da planta industrial em estudo, pôde-se enxergar a oportunidade de redução do consumo de energia elétrica de aproximadamente 15% por período de safra na indústria em estudo.

**Palavras-chave:** Redimensionamento. Motores. Economia. Energia. Eficiência.

## ABSTRACT

Electric energy has become an indispensable resource for people's lives and survival due to its wide range of uses and convenience. However, the excessive and continuous use of this resource can cause harmful consequences to the economy and the environment. With a view to saving electricity consumption, energy efficiency policies have been implemented in various sectors of the industry. This means reducing the cost and increasing the amount of energy supplied, without increasing its generation. In this sense, one of the possible measures to reduce electrical energy consumption is the resizing of electric motors. Such measure provides an update of the industrial park when determining the engine size or adjusting the adequate size to the operating load. Therefore, the objective of this study is to evaluate the optimization of energy efficiency in a company in the sugar and alcohol sector through the redimensioning of electric motors. The methodology used for this work is the case study for a sugarcane industry plant. The theoretical foundation was carried out through books, academic articles, periodicals and specialized websites regarding the chosen topic. After carrying out a simulation for the resizing of 32 motors in the industrial plant under study, it was possible to see the opportunity to reduce electricity consumption by approximately 15% per harvest period in the industry under study.

**Keywords:** Resize. Engines. Economy. Energy. Efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.1 - Inversor de frequência .....	15
Figura 2.1.4.1 - Detalhes construtivos do rotor gaiola de esquilo .....	20
Figura 2.1.4.2 - Polaridade de um motor de indução .....	21
Figura 2.1.4.3 - Motor elétrico de indução trifásico .....	22
Figura 2.2.1 - Rendimento do motor .....	28

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.5.1 - Perdas em função da variação do nível de tensão para um motor de 7,5 cv operando a plena carga .....	24
Tabela 4.1 – Dados coletados dos motores em estudo .....	33
Tabela 4.2 – Percentual de carga e rendimento por motor .....	34
Tabela 4.3 – Consumo de safra (kWh) e despesa de safra por motor .....	36
Tabela 4.4 – Valores reajustados após redimensionamento de motores .....	38

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IR	Índice de Rendimento
MIT	Motor de Indução Trifásico
NBR	Norma Brasileira
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
2.1	Conceito de Motor Elétrico .....	14
2.1.1	Motores de Corrente Contínua .....	15
2.1.2	Motores de Corrente Alternada.....	16
2.1.3	Motor de Indução.....	16
2.1.4	Motor de Indução Trifásico .....	17
2.1.5	Problemas dos Motores de Indução .....	23
2.2	O Redimensionamento de Motores Elétricos .....	26
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>30</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>32</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>40</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>41</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica tornou-se um recurso fundamental para a vida e a sobrevivência das pessoas devido à sua ampla gama de usos e conveniência, sendo também indispensável para o desenvolvimento econômico do país. No entanto, o uso excessivo e contínuo deste recurso pode provocar consequências danosas à economia e ao meio ambiente (PIRES, 2006).

De acordo com o último Balanço Energético Nacional (BEN) divulgado anualmente pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) a indústria é o setor responsável por 35,9% de toda energia que é consumida no Brasil. Em comparação, pode-se observar no Gráfico 1.1 que a soma dos consumos de energia dos setores comercial e público resultam em 25,9% do valor total (BEN, 2020).

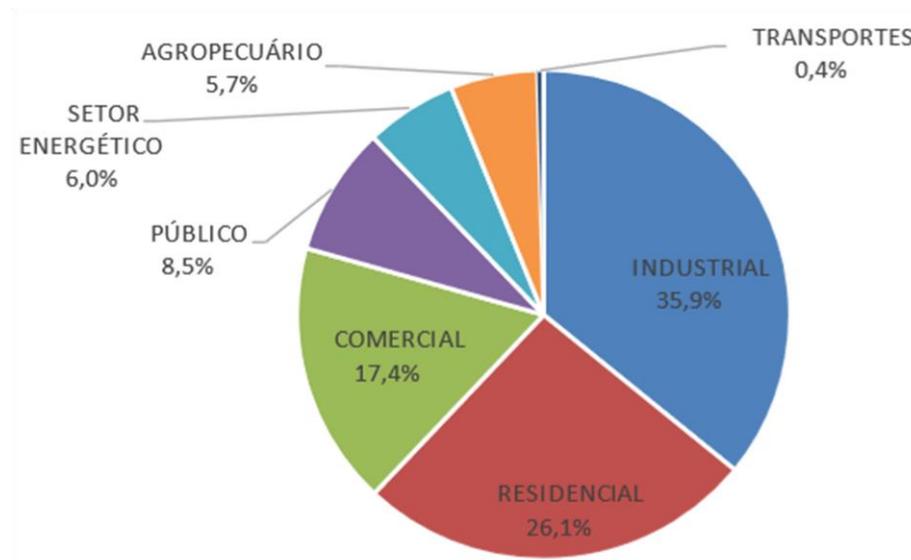


Gráfico 1.1 - Participação setorial no consumo de eletricidade (BEN, 2020)

Em muitos casos, o gerenciamento eficaz de energia e manutenção determina a lucratividade das operações. Quando planos de eficiência energética são implementados na indústria, muito dinheiro pode ser economizado, o que pode reduzir o custo do produto final (FERREIRA et al., 2009).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2010), o uso racional da energia tem contribuições importantes para o atendimento da demanda futura, garantindo a segurança do abastecimento energético, aumentando o preço da eletricidade de forma adequada e reduzindo o impacto ambiental.

Diante desse cenário apontado para o uso racional da energia elétrica, é de suma importância que o modo de consumo de energia seja otimizado, com o máximo de eficiência energética. Augusto Jr (2010) define eficiência energética como um conjunto de políticas e ações que visam reduzir o custo real da energia utilizada, ou mesmo aumentar a quantidade de energia fornecida sem aumentar a quantidade de geração de energia.

A conservação de energia pode ser alcançada por meio de diversas atitudes, que visam contribuir para a redução dos gastos com consumo de energia em toda a sociedade. Portanto, é possível postergar a expansão das redes de geração de energia, proceder com a utilização desses recursos para outros fins e, conseqüentemente, cooperar na proteção ambiental. O consumo de energia em muitas fábricas é responsável por uma parte importante dos custos de produção. Os principais motivos de desperdício vão desde as características inerentes ao projeto a questões de instalação elétrica inadequada (ELETROBRÁS, 2003).

Os motores elétricos são os equipamentos responsáveis pela conversão da energia elétrica em energia mecânica. Na maioria dos campos da economia rural e industrial, os motores elétricos são a principal forma de aproveitamento final da energia elétrica. Estima-se que aproximadamente 40% dos motores operem com menos de 50% de sua capacidade nominal. Portanto, o projeto e a seleção do equipamento devem ser feitos levando em consideração todos os dados relativos à carga motriz (aplicação) e a instalação (WEG, 2002).

Uma das medidas para melhorar a eficiência energética é investir em produtos mais eficientes para substituir os obsoletos. Apesar de serem mais caros, motores de alto rendimento são exemplo e uma boa opção para produtos de alta eficiência. Para estimular a redução do consumo de energia, entrou em vigor o Decreto nº 553/2009, que estipula o rendimento mínimo para máquinas e equipamentos (ANEEL, 2006).

O nível mínimo estipulado para motores elétricos é o Índice de Rendimento 02 (IR2). Sendo assim, fabricantes e consumidores de equipamentos devem utilizá-los de modo que atendam pelo menos ao IR2. Para especificar valores mínimos de rendimento às classes IR2 e IR3, foi revisada a Norma NBR 17094-1/2003, que complementa a portaria de 2009 (WEG, 2015).

Desse modo, o tema do presente estudo é a otimização da eficiência energética em uma indústria do setor sucroalcooleiro por meio de redimensionamento de motores elétricos.

Tem-se por objetivo geral avaliar se, de fato, a aplicação do método de redimensionamento de motores elétricos é algo rentável e válido para a realidade da indústria adotada para este estudo.

Como objetivos específicos pretende-se:

- Conceituar o motor elétrico de corrente contínua e de corrente alternada;
- Tratar do motor de indução trifásico e suas limitações;
- Entender a importância do redimensionamento de motores elétricos para fins de atualização do parque fabril e, conseqüentemente, redução no consumo de energia.

A justificativa do presente estudo se traduz no fato de que a falta de investimentos no parque industrial (com respeito à correta aplicação de força motriz), e a escassez de recursos naturais, tornam o uso racional da energia uma importante ferramenta de apoio ao crescimento econômico de empresas e do país. Nesse sentido, o aumento das ações voltadas para a redução do consumo de energia e ferramentas que auxiliam a manutenção de energia estável no sistema elétrico, têm desempenhado um papel importante na implementação de políticas de consumo sustentável.

Assim, buscando entender o papel do redimensionamento de motores elétricos como ferramenta para promover uma redução maior no consumo de energia, a metodologia utilizada para o presente trabalho é o estudo de caso para uma usina do setor sucroalcooleiro. A fundamentação teórica foi realizada através de livros, artigos acadêmicos, periódicos e sites especializados quanto ao tema escolhido.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Conceito de Motor Elétrico

Por definição, motor elétrico é a máquina com a capacidade de transformar energia elétrica em energia mecânica útil para uma carga. Todo motor elétrico funciona com uma corrente elétrica que gera um campo magnético. A grosso modo, dois ímãs são formados, um no estator e outro no rotor, e sua interação faz com que o eixo do motor tenha movimento de rotação (MAMEDE FILHO, 2012).

Os principais componentes de um motor de indução trifásico são: estator e rotor. O estator consiste basicamente em três enrolamentos, que são simétricos e possuem uma diferença de fase elétrica de  $120^\circ$  (WEG, 2013).

O princípio de funcionamento de qualquer motor elétrico é baseado na interação entre o campo magnético (do rotor e do estator), que produz o torque e, portanto, a rotação de seu eixo. No caso do motor de indução, seu funcionamento é similar ao de um transformador. O campo do rotor (ou do secundário) é induzido por meio de uma única fonte de alimentação, que é ligada ao estator. Os motores elétricos são divididos em dois grandes grupos, considerando a alimentação, em corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC) (FILIPPO FILHO, 2013).

De acordo com Filippo Filho (2013) no momento em que o enrolamento do estator é energizado pela corrente alternada, cria-se o campo girante. A medida em que esse campo percorre os condutores do rotor, uma força eletromotriz (f.e.m) é induzida, ocasionando circulação de corrente. Essa corrente também gera um campo magnético que interage com o campo do estator, produzindo um torque magnético que resulta na rotação do rotor.

A eficiência de um motor depende de seu desempenho. Quanto maior for o desempenho, maior será a eficiência e menor será a perda de energia devido ao aquecimento, atrito, etc. O uso de materiais de alta qualidade no processo de fabricação ajuda a reduzir as perdas e melhorar o desempenho do motor (CHANG; LIANG, 2009).

Outro ponto que contribui para elevar a eficiência é o método utilizado no acionamento do motor de indução. Em aplicações que exigem velocidade variável o uso do inversor de frequência é amplamente empregado na indústria sendo o método mais eficiente (BARNES, 2003).

O inversor mostrado na Figura 2.1.1 é um dispositivo eletrônico que controla os valores de tensão e frequência fornecidos ao motor. Ao alterar esses parâmetros, a velocidade no eixo do motor pode ser alterada. Alguns dos benefícios do uso de inversores incluem redução

de custos, controle remoto, versatilidade, melhor qualidade, produtividade e melhor aproveitamento de energia (WEG, 2012).



Figura 2.1.1 - Inversor de frequência (Lorenzo, 2018)

Na indústria, as cargas centrífugas (bombas, ventiladores e compressores) correspondem a grande parte das aplicações de motores. Portanto, é possível controlar o fluxo usando o conversor de frequência para controlar a velocidade do motor, e tem grande potencial para reduzir o consumo de energia (MARQUES et al., 2006).

Quando a velocidade do motor muda devido a frequência, o torque no eixo permanece inalterado. Portanto, sem alterar o torque, a frequência de partida do motor será menor para um valor de corrente menor na partida do motor. A frequência é aumentada gradativamente até que a velocidade desejada seja atingida. Uma variedade de configurações e funções podem ser aplicadas usando o inversor para melhorar o desempenho e eficiência de uma máquina que utiliza força motriz (LUCA, 2018).

### 2.1.1 Motores de Corrente Contínua

De acordo com Luca (2018) os motores de corrente contínua são acionados por uma fonte de alimentação de corrente contínua. Estes motores são amplamente utilizados na indústria quando é necessário manter um bom controle de velocidade em qualquer processo de fabricação. Quanto aos tipos de motores de corrente contínua tem-se os de ímã permanente; excitação série; excitação paralela, também denominado como derivação ou shunt; excitação composta, mista ou *compound*; e excitação independente.

Todos apresentam características diferentes, tais como: controle de velocidade; controle de torque; faixa de velocidade de trabalho de torque inicial; entre outros fatores. Como a bobina de campo e a bobina de armadura são conectadas em série, o motor de corrente contínua é conhecido como motor em série. A principal característica do motor em série é que a corrente de carga também é usada como corrente de campo. Isso resulta em um motor com alto torque de partida, que é um requisito básico em aplicações como guindastes e elevadores (LUCA, 2018).

### 2.1.2 Motores de Corrente Alternada

Como o próprio nome sugere, os motores de corrente alternada são aqueles que são acionados por meio de uma fonte de corrente alternada - energia CA. Eles são usados na maioria das aplicações industriais. O motor de indução assíncrono com rotor de gaiola está dentre aqueles que são mais utilizados. Isto se deve por sua estrutura simples, longa vida útil e custos reduzidos de aquisição e manutenção (HELERBROCK, 2018).

### 2.1.3 Motor de Indução

O motor de indução é uma das máquinas mais robustas e amplamente utilizadas na indústria. O estator é feito de chapa de aço de alta qualidade. A superfície interna possui uma ranhura para acomodar o enrolamento trifásico (DEL TORO, 2009).

Dos diversos tipos de motores elétricos existentes, o que melhor atende à necessidade de economia é o motor de indução trifásico, capaz de utilizar 95% de seu consumo total de energia para gerar força motriz. Segundo dados do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), o motor elétrico trifásico é o único que possui a Etiqueta de Eficiência Energética do Programa Brasileiro de Etiquetagem, que indica o grau de eficiência energética de equipamentos que precisam de eletricidade para funcionar (GADELHA, 2014).

De acordo com o relatório do Balanço Energético Nacional de 2018 (BEN 2018), no Brasil, houve um consumo no total de 472.242 GWh, e que aproximadamente 31% desse total foi destinado somente ao setor industrial devido ao uso em grande escala de motores de indução. Portanto, a fim de melhor controlar as pesquisas de eficiência energética do motor elétrico e seu impacto no sistema de potência, algumas leis foram formuladas para estabelecer o menor nível de consumo de energia ou a melhor eficiência energética destes equipamentos. Sendo

assim, os fabricantes de motores são obrigados a adaptar e fornecer produtos de acordo com os padrões mínimos estipulados por lei (GADELHA, 2014).

#### 2.1.4 Motor de Indução Trifásico

Conforme Americo (2003) o motor elétrico de indução trifásica equivale a 75% dos motores elétricos existentes no Brasil. Os 25% restantes dos motores, grande parte deles são motores monofásicos com potência inferior a 1 cv, e são utilizados em geladeiras, condicionadores de ar, máquinas de lavar, ventiladores, etc.

Isso ocorre porque a maioria dos sistemas de distribuição de energia atuais são de corrente alternada. Em comparação com os motores de corrente contínua, os motores de indução têm a vantagem da simplicidade, que se traduz em baixo custo e maior eficiência e menores custos de manutenção. Para cargas médias e máximas, o desempenho é alto e um bom fator de potência pode ser garantido pela seleção correta. Essas características têm afetado muito os custos de implantação e produção de qualquer empresa, e têm contribuído enormemente para o consumo razoável de energia elétrica (STEPHAN, 2008).

Em aplicações industriais, os motores de indução trifásicos são a principal fonte de força motriz. A aplicação do motor não se limita às fábricas e meios de produção, mas também existe em edifícios e casas que realizam tarefas, como bombas de acionamento, compressores, ventiladores, agitadores, laminadores, transportadores, elevadores, etc. (BARNES, 2003).

O motor de indução trifásico surgiu na década de 1890. Um século antes, James Watt tinha atingido o completo aperfeiçoamento do motor a vapor. De acordo com Filippo Filho (2013), o motor de vapor de Watt foi uma das conquistas tecnológicas que propiciou o grande desenvolvimento provindo pela Revolução Industrial. As indústrias da época eram pequenas comparadas às de hoje. Em geral eram indústrias de moagem de grãos, de fiação e tecelagem. Com o advento da Revolução Industrial puderam transferir-se para os centros urbanos, deixando de se localizar às margens dos rios. A máquina a vapor os libertou da força motriz obtida pela roda d'água. Com a invenção do motor elétrico, surgiu a segunda etapa de grande desenvolvimento industrial. Vários sistemas de acoplamento mecânico da máquina a vapor não são mais utilizados, pois sob a ação do motor elétrico, a energia elétrica é transmitida diretamente para a estação de trabalho através do fio (Filippo Filho, 2013).

Cada posto de trabalho tinha seu próprio motor elétrico. Em 1831, Michael Faraday estabeleceu o princípio da indução eletromagnética, embora F. D. Arago havia descoberto tal princípio alguns anos antes, em 1824. Nessa época já se sabia que um ímã rotativo era capaz de

girar um disco metálico pela ação da indução. Somente em 1879, o inglês U. Bailey conseguiu obter um campo magnético girante rudimentar, a partir de eletroímãs fixos, porém sem nenhuma aplicação (FILIPPO FILHO, 2013).

A característica básica de um motor de indução trifásico (MIT) é operar a uma velocidade logo abaixo da velocidade síncrona. A velocidade é definida pelo número de polos e a frequência da alimentação. A configuração básica de um motor de indução inclui um enrolamento (geralmente localizado no estator) conectado à rede de alimentação e um segundo enrolamento (geralmente alojado no rotor), que exibe a eletricidade gerada pela indução causada pelo primeiro enrolamento (ARAÚJO, 2006).

As características de desempenho do motor de indução dependem basicamente do formato das barras que compõem a “gaiola de esquilo”, assim denominada a parte de enrolamento do rotor. Elas podem ter várias configurações e utilizar materiais de diferentes condutividades, tais como: alumínio, formando uma única peça com as barras e os anéis de curto circuito nas suas extremidades, além de aletas para ventilação e adaptação para balanceamento; cobre, em barras colocadas nas ranhuras do rotor e em forma de anel soldado a suas extremidades, anéis de curto-circuito; o rotor também pode ser formado por duas gaiolas (gaiola dupla) sobrepostas, independentes ou não, em cobre, em uma liga de cobre e latão, ou em alumínio. Os formatos das ranhuras podem ser bem distintos (ranhura profunda, superficial, circular, retangular, etc.), para definir o comportamento do conjugado com a velocidade (PEREIRA ET AL., 2012).

Segundo WEG (2000), o funcionamento do motor de indução costuma ser em velocidade constante, variando ligeiramente com a carga mecânica imposta ao eixo, e por sua simplicidade, robustez e baixo custo, é o mais utilizado de todos os motores, sendo adequado para quase todos os tipos de máquinas.

Segundo a pesquisa de Freitas (2013), o motor de indução trifásico é uma máquina robusta e durável, e que se usado corretamente, tem durabilidade de vários anos e o custo de manutenção é extremamente baixo. Assim, a inspeção do motor e do sistema de alimentação aumentará sua vida útil.

Quando o desempenho de isolamento do enrolamento do motor diminui e se torna seco e quebradiço, a vida útil do mesmo pode estar próxima ao fim. A melhor forma de prevenir defeitos é seguir as instruções de manutenção do fabricante e observar o desempenho normal do motor (WEG, 2013).

A interpretação correta dessas observações pode ajudar a evitar falhas graves ou mau funcionamento do motor. Pode-se fazer observações simples para verificar se alguma alteração foi feita no motor, da seguinte forma (WEG, 2013):

- Observar se o motor faz um ruído mais alto que o normal;
- Observar se a temperatura na carcaça do motor está acima do normal;
- Observar se o tempo de aceleração para o motor atingir a velocidade de trabalho supera o nível normal;
- Observar se a vibração aumenta.

Entre os motores de indução trifásicos, existem motores de rotor de bobina e motores de gaiola de esquilo. Conforme demonstra a Figura 2.1.4.1, o rotor de gaiola é composto por várias barras de cobre, que estão imersas nas ranhuras do rotor e conectadas em ambas as extremidades por dois anéis de cobre. A estrutura de um rotor de gaiola é mais simples e econômica do que um rotor forte e em espiral. Os motores de indução em gaiola de esquilo têm sido amplamente utilizados na indústria devido à sua estrutura simples e atratividade econômica (MEDEIROS, 2015).

De acordo com Kosow (1982), entre todos os tipos de motores, o motor de indução de rotor de gaiola de esquilo é o mais simples em estrutura, pois não possui comutador, nem anel coletor, e não há folga entre o rotor e o estator. Este tipo de estrutura apresenta muitas vantagens, incluindo operação livre de manutenção, indicando sua aplicação em áreas remotas, e operação em condições severas de trabalho considerando poeira e outros materiais abrasivos.

O rotor de gaiola de esquilo é composto de hastes condutoras, que são embutidas nas ranhuras do ferro do rotor, e essas hastes condutoras são curto-circuitadas pelos anéis em ambas as extremidades. Quando a energia é fornecida ao estator a partir de uma fonte de tensão CA trifásica, a corrente circulando no estator gera um campo magnético no entreferro, que gira a uma velocidade constante. Esse mesmo campo rotativo induz correntes na frequência de ruptura, que vão gerar outro campo magnético que tentará se alinhar com o primeiro campo magnético (MEDEIROS, 2015).



Figura 2.1.4.1 - Detalhes construtivos do rotor gaiola de esquilo (MASHINBAZ, 2013)

Além de uma ampla gama de aplicações, a popularidade do motor também é atribuída à sua robustez, confiabilidade, baixo preço e manutenção reduzida. No entanto, para ser mais vantajoso industrialmente, o motor deve operar a uma velocidade ou torque diferente da velocidade nominal. Por este motivo, conversores de potência e circuitos de controle devem ser inseridos para ajustar os parâmetros do motor aos parâmetros necessários para a operação (PAREKH, 2003)

Um motor de indução trifásico consiste em duas partes eletromagnéticas, uma é um estator fixo e a outra é um rotor giratório. Ambos são compostos por um circuito que conduz corrente e um circuito magnético que conduz fluxo magnético. O estator é alimentado por uma tensão trifásica e o rotor é alimentado pela corrente induzida pelo próprio estator (BARNES, 2003).

Em um motor trifásico, a distribuição das bobinas trifásicas no estator é  $120^\circ$  defasada, o que torna a soma de seus respectivos campos magnéticos um campo magnético uniforme e rotativo. Esse campo magnético circula nos núcleos do estator e do rotor, fazendo com que a corrente circule nas barras do rotor. A corrente do rotor gera um campo magnético que tende a se opor aos polos fixados no estator, impedindo assim o movimento que gera o campo magnético (BARNES, 2003).

O resultado é que o campo magnético do estator arrasta o rotor através da rotação, mas o rotor sempre desliza em relação ao campo magnético giratório a uma velocidade superior a essa velocidade. Quando uma carga é aplicada ao eixo do motor, o rotor reduz sua velocidade, aumentando assim o escorregamento (AZEVEDO, 2004).

Portanto, o motor elétrico se ajustará para se adaptar à carga no eixo: se a carga aumentar e a rotação diminuir, a corrente do motor aumentará e a energia elétrica fornecida aumentará. De acordo com a disposição das bobinas do estator, apenas dois polos, um polo

norte, um polo sul, ou quatro, seis ou oito polos podem ser formados para mostrar os polos mais comuns, conforme mostrado na figura 2.1.4.2 (WEG, 2015).

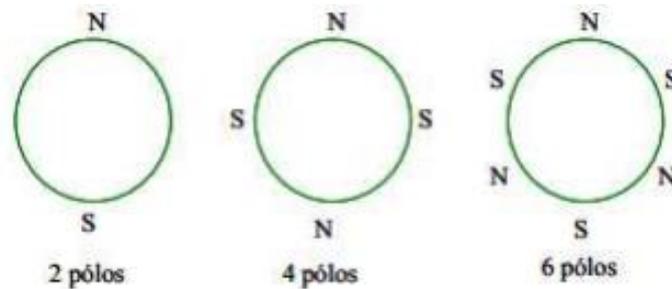


Figura 2.1.4.2 - Polaridade de um motor de indução (WEG, 2015)

O motor de indução apresentado na Figura 2.1.4.3, inventado por Nikola Tesla, é o mais utilizado em razão de sua simplicidade, robustez, baixo custo e melhor eficiência (WEG, 2012). O motor apresenta sua maior eficiência quando trabalha com cargas entre 75% a 100% de sua potência nominal (MELLO, 2013).

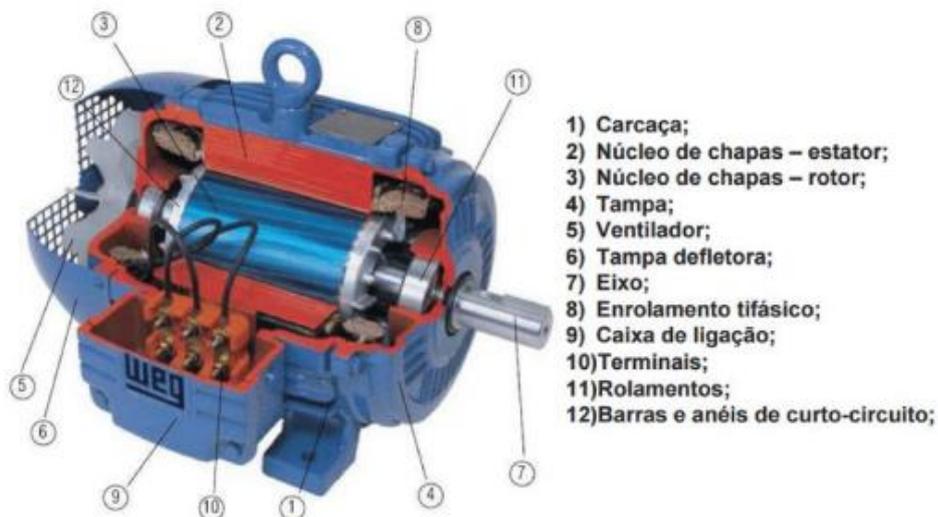


Figura 2.1.4.3 - Motor elétrico de indução trifásico (SANTOS, 2016)

O motor é constituído basicamente dos seguintes itens:

- Rotor: ligado ao eixo transmite a energia mecânica para a carga.
- Estator: contém as bobinas que geram os campos magnéticos do motor e o núcleo, conjunto de chapas metálicas que serve de estrutura de fixação das bobinas
- Ventilador: responsável por auxiliar a troca térmica do motor.

- Rolamentos: permitem que o eixo gire livremente com relação à carcaça, exibindo baixo atrito e pouco desgaste.

Há uma variedade de motores de indução no mercado que são projetados para atender às mais diversas aplicações da indústria. Porém, o conhecimento das características da carga é fundamental para a correta seleção do motor a ser utilizado (ARAÚJO, 2011).

Um momento delicado na operação do motor de indução trifásico é a aceleração inicial. Com o escorregamento muito alto, a corrente do motor é muito alta, chegando tipicamente a oito vezes a corrente nominal. Isto pode causar problemas tanto à rede, provocando queda de tensão, quanto ao próprio motor. O tempo de aceleração é decisivo: ele pode ser igual a 1 segundo, tipicamente para bombas centrífugas e cargas com baixa inércia, mas pode chegar a mais de 30 segundos para ventiladores e centrífugas, por exemplo, que têm elevada inércia. O limite para o motor é o chamado tempo de rotor bloqueado, que é o tempo máximo que o motor pode resistir nesta condição (valor típico 20 segundos). O conjunto motor carga acelera porque o conjugado motor é maior que o conjugado resistente. A grandeza que resiste à mudança de velocidade é o momento de inércia, que faz o mesmo papel da massa no movimento linear (ARAÚJO, 2011).

O acionamento de máquinas CA compreende topologias com malha intermediária e topologias de conversão direta. A topologia com malha intermediária é a mais utilizada. Nesta, a conversão ocorre com dois estágios: a tensão alternada de alimentação é retificada fornecendo tensão CC ou corrente CC, em seguida, este link CC é convertido em tensão alternada a partir de um inversor (SOUZA ET AL., 2019).

As topologias com malha intermediária são divididas em VSI (Voltage Source Inverter) e CSI (Current Source Inverter): a) VSI: Nesta topologia, a malha intermediária funciona como uma fonte de tensão. O sinal alternado oriundo da rede de alimentação é retificado com uma ponte de diodos e após filtrado com capacitores, para se obter uma fonte de tensão CC. Os inversores VSI, por sua vez, podem ser classificados em PAM (Pulse Amplitude Modulation) ou PWM (Pulse Width Modulation). Outra topologia que também é inserida nessa classificação é a CRVSI-PWM, que é o conversor VSI-PWM com realimentação de corrente (Current Regulation). b) CSI: Nesta topologia, a malha intermediária comporta-se como uma fonte de corrente. O sinal da rede de alimentação é retificado e, com auxílio de um indutor, se obtêm uma fonte de corrente (LIANG; ZHOU, 2018).

### 2.1.5 Problemas dos Motores de Indução

O principal sintoma do desvio é o funcionamento a "frio" do motor. Para a equipe de manutenção é um sinal de que há muita folga em suas operações, e todas as consequências estão descritas. Reduzir a potência do motor geralmente não requer a modificação da base ou do acoplamento, pois o mesmo tamanho de chassi pode abranger múltiplas potências. Mas essa é uma atividade que deve seguir padrões para garantir as condições mais críticas no processo de avaliação. Dependendo do tipo de equipamento acionado pelo motor, também pode ser necessário monitorar a partida. De qualquer forma, trata-se de uma grande oportunidade que deve ser explorada. Uma boa diretriz é estudar os motores que funcionam com uma corrente muito mais baixa do que sua corrente nominal (GARCIA, 2003).

As alterações da amplitude de tensão em motores de indução trifásicos são atribuídas, geralmente, a transformadores e/ou cabos subdimensionados e ao baixo fator de potência. Segundo a NBR 7094/1996 da ABNT, para que o motor elétrico opere com temperaturas e correntes dentro do permitido e torques de partida e de regime satisfatórios, faz-se necessário que a rede de alimentação opere com variações de tensões de no máximo 10% da tensão nominal (PROCEL, 1998). A Tabela 2.1.5.1 demonstra as perdas de rendimento, fator de potência e corrente solicitada em decorrência da variação da amplitude de tensão, acima da nominal, para um motor de 7,5 cv operando a plena carga.

Tensão de alimentação	90%	100%	110%
Rendimento (%)	82,93	83,50	79,82
Fator de potência (decimal)	0,877	0,822	0,755
Corrente demandada (A)	22,45	21,09	21,78

Tabela 2.1.5.1 - Perdas em função da variação do nível de tensão para um motor de 7,5 cv operando a plena carga (PROCEL, 1998)

Para a avaliação da adequação de força motriz, deve-se medir o rendimento do motor elétrico na condição de carga. A medida do rendimento pode ser obtida através da leitura do gráfico de curvas de desempenho de um motor elétrico, conforme o Gráfico (2.1.5.1). Dentre os parâmetros que podem ser considerados para a adequação de força motriz, citam-se: (1) potência de entrada; (2) corrente; (3) escorregamento; e (4) fator de potência. Nesses casos, a avaliação do índice de carregamento e por consequência do rendimento é feita por meio das curvas características dos motores (SHINDO; SOARES, 1998).

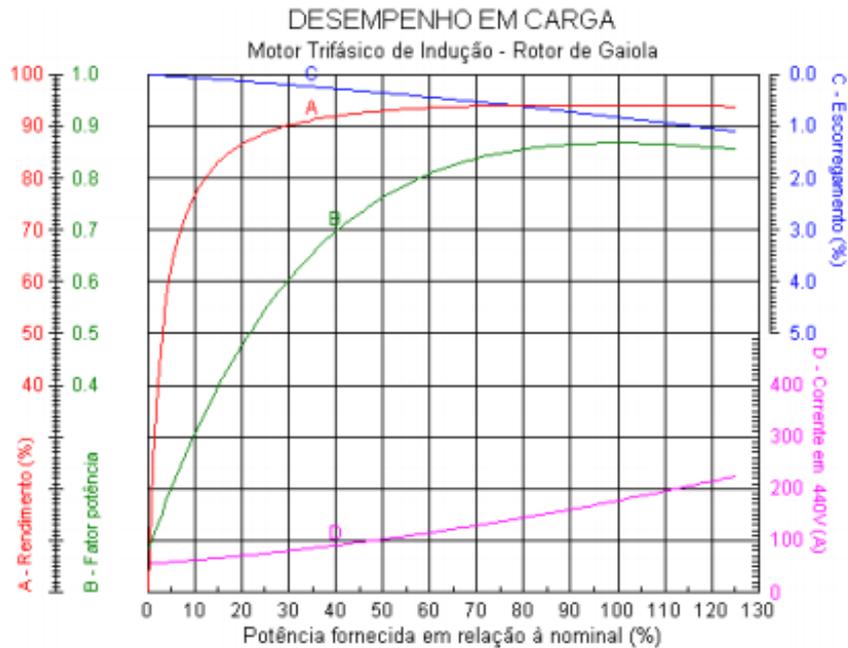


Gráfico 2.1.5.1 - Curvas de desempenho de um motor elétrico (WEG, 2015)

Segundo Shindo & Soares (1998) o melhor método para a determinação do carregamento de motores de indução trifásicos é a medição da potência de entrada. Comparando-se os resultados de avaliação do índice de carregamento pelos métodos do escorregamento, da corrente de linha e da medição da potência de entrada, verificou-se que em 78% dos motores estudados a medição da potência de entrada apresentou precisão superior aos demais métodos, incorrendo num erro máximo de 5%. É importante salientar que no estudo a corrente de linha foi calculada a partir das seguintes metodologias: (1) ajuste de curva por mínimos quadrados (equação do 2º grau) para quatro pontos de operação do motor; (2) linearização da curva de conjugado em função da velocidade de rotação para a região de operação do motor; e (3) circuito equivalente do motor.

A adoção de um método de partida eficaz pode ser considerada um pré-requisito básico para a obtenção de um motor de longa vida, pois além de melhorar a confiabilidade do trabalho diário, também pode reduzir os custos operacionais. O critério de seleção de um método de partida adequado envolve a consideração da capacidade de instalação e a legislação do local de instalação (MAMEDE FILHO, 2013).

Segundo Mamede Filho (2013), a ativação direta é o método mais fácil sem o uso de um dispositivo especial de ativação. Ao iniciar diretamente, use apenas contatores, disjuntores ou chaves como dispositivos de proteção.

Para conectar o motor diretamente à rede elétrica, três fatores devem ser considerados: a corrente de partida do motor é diferente da corrente nominal da rede elétrica; o motor de baixa potência fornece baixa corrente de partida; o motor executa partida sem carga. Mamede Filho (2013) também mencionou dois fatores que impedem a partida direta: a potência do motor é superior à potência licenciada da concessionária conectada diretamente à rede de abastecimento, e cargas que exigem acionamento lento e gradual.

Em equipamentos elétricos industriais, especialmente em equipamentos sobrecarregados, as chaves estrela-triângulo podem ser usadas como um método para reduzir o efeito da partida do motor. No entanto, pode-se observar que apenas a chave estrela-triângulo pode dar partida no motor, desde que o motor tenha seis terminais acessíveis, tenha dupla tensão nominal, e a tensão da fonte de alimentação principal deve ser consistente com a menor tensão da placa do motor, e se possível, o motor dá a partida sem carga (MAMEDE FILHO, 2013).

A seguir estão algumas das vantagens do uso das chaves estrela – triângulo.

- Reduzir o custo;
- Alta mobilidade;
- A corrente de partida é reduzida a 1/3 do valor nominal;
- Baixa queda de pressão durante o jogo;
- Tamanho relativamente reduzido. Na configuração estrela, o motor é acionado até que a velocidade máxima seja atingida, então a conexão é desconectada e a conexão é feita em delta. (MAMEDE FILHO 2013).

As *soft starters* são aparelhos constituídos por um circuito eletrônico e um microprocessador que controla um conjunto de tiristores que regulam a tensão aplicada aos terminais do motor. Portanto, com essas configurações acessíveis, pode-se controlar o torque de partida e a corrente da máquina. O starter estático é uma chave microprocessada projetada para acelerar ou desacelerar e proteger o motor de indução. O controle do drive é concluído ajustando o ângulo de disparo do tiristor, controlando assim a tensão aplicada ao motor. Após o dimensionamento correto das variáveis, o torque e a corrente podem ser ajustados de acordo com a demanda de carga (WEG, 2016).

Algumas vantagens das chaves estáticas de partida são:

- Ajuste da tensão de partida dentro de um tempo pré-determinado;
- Para cargas com alto torque de partida, pulso de tensão na partida;
- Redução da tensão para um nível ajustável;
- Proteção contra falha de fase, sobrecorrente, sub corrente, etc.

Os motores de indução também podem ser acionados por conversores de frequência estáticos, que é um novo método alternativo, mas tem sido amplamente utilizado na indústria. Esses dispositivos podem controlar a velocidade do motor (WEG, 2016).

É importante para avaliar se ocorrem e quais são as principais causas de falhas nos motores e assim dimensionar e especificar um equipamento de maneira a evitar a recorrência destas falhas. 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.

## 2.2 O Redimensionamento de Motores Elétricos

Embora os motores de indução sejam máquinas intrinsecamente eficientes, são verificadas que grandes parcelas dos problemas que ocorrem com essas máquinas são ocasionadas devido ao seu mau dimensionamento, falta de manutenção, excesso de rebobinagens, não utilização de acionamento eletrônico, etc., dessa forma, reforça-se a importância de estudos direcionados ao seu uso de forma adequada (GADELHA, 2014)

O dimensionamento de motores com potência acima da necessária acarreta maior custo inicial, menor rendimento e menor fator de potência. No dimensionamento de motores elétricos deve-se considerar o torque de partida da carga e o regime de funcionamento (número de partidas por hora) haja vista que, em algumas situações, é necessário o uso de motores de maior potência para suprir as características da carga. Num universo de 3.425 motores, 28,75% estavam superdimensionados atribuindo-se, a este fato: (1) o desconhecimento das características da própria carga; (2) os sucessivos fatores de segurança nas diversas etapas de projeto; (3) a expectativa de futuro aumento da carga; e (4) a falta de informações sobre métodos de dimensionamento mais adequados. Como consequência do superdimensionamento do motor elétrico citam-se, dentre outros, a redução do fator de potência e do rendimento e o aumento da corrente de partida (CAMPANA ET AL., 1999).

Rendimento ou desempenho é uma medida de "qualidade" pela qual a energia elétrica absorvida da rede é convertida em energia mecânica na extremidade do eixo (peça), conforme demonstra a Figura 2.2.1. Motores funcionando com indicadores de desempenho adequados podem não apenas fornecer maiores efeitos de economia de energia, mas também obter rapidamente um retorno sobre o investimento e refletir a redução nos custos operacionais e nas emissões de dióxido de carbono (WEG, 2015).

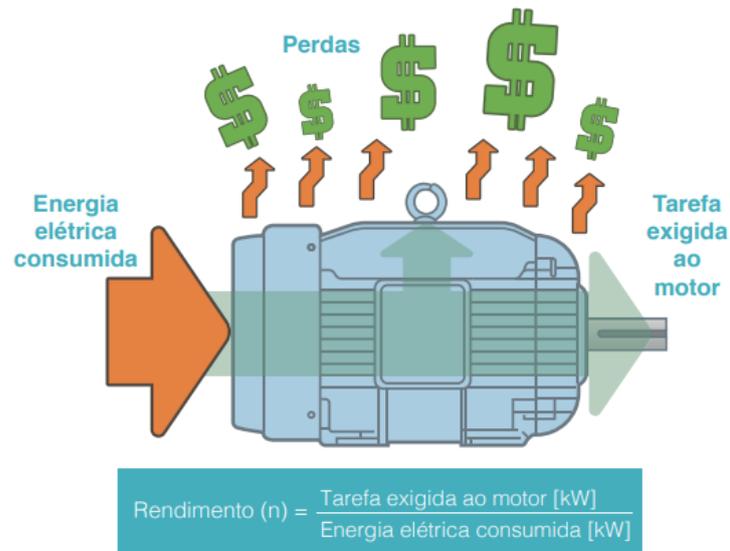


Figura 2.2.1 - Rendimento do motor (Souza et al., 2019)

Motores muito grandes com potência excessiva são comuns na indústria. O redimensionamento do motor elétrico proporciona uma atualização do parque fabril e ao mesmo tempo promove uma redução ainda maior no consumo de energia. Ao determinar o tamanho do motor ou ajustar o tamanho, é necessário conhecer os dados do equipamento a ser acionado e as condições de operação em que ele está localizado (REZENDE; BISPO, 2014).

Isso é muito comum quando a potência suficiente é alcançada para economizar até 14% do consumo de energia. Motores muito grandes também operam com um fator de potência muito baixo, e um pelotão mais refinado é adicionado à conta de energia, o que requer recursos adicionais de investimento / ajuste para corrigir o fator de potência (REZENDE; BISPO, 2014).

De acordo com o item 5.4 descrito na norma ABNT NBR 7094, a potência nominal do motor é a mesma que a mecânica disponível no eixo, e esta potência é a mesma da definição do modo de trabalho. Existem muitas razões para a potência excessiva do motor. Seu escopo inclui não registrar e instalar motores mais potentes em situações de emergência sem correções posteriores, que irão persistir por muito tempo. Em projetos antigos, devido à falta de recursos de dimensionamento suficientes e ao “fator de segurança” excessivo da época, essa situação também era comum, e não é incomum mesmo em projetos recentes.

Como as condições originais do projeto mudam, as modificações do processo e do produto também são um motivo muito importante. Projetos antigos costumam usar motores de alta potência para quebrar cargas de alta inércia. Após a partida, eles funcionarão muito - com os recursos existentes, essas condições podem ser superadas por métodos de partida mais

eficazes (como *soft starters* e conversores de frequência), permitindo o uso de motores de menor potência (REZENDE; BISPO, 2014). O torque de partida e o torque nominal (ou de trabalho) obtidos a partir da curva de aceleração (torque x rotação) e a inércia do equipamento são os dados básicos para a análise dinâmica do drive (RAMOS, 2009).

Usando esta informação, o tempo de aceleração pode ser determinado, sendo que o tempo de aceleração deve ser menor ou igual a 80% do tempo de rotor travado do motor selecionado para garantir o correto funcionamento da aplicação. Esses dados podem ser obtidos com o fabricante do equipamento em questão, caso não seja possível, é necessário fazer uma estimativa com base nos resultados das medições no local. Em qualquer caso, mesmo sem informações estimadas, o tamanho ou as dimensões do motor não podem ser determinados, o que significa que a continuidade do processo de produção estará em risco (SOUZA ET AL., 2019).

Reduzir a potência do motor geralmente não requer a modificação da base ou do acoplamento, pois o mesmo tamanho de chassi pode abranger múltiplas potências. Mas essa é uma atividade que deve seguir padrões para garantir as condições mais críticas no processo de avaliação. Dependendo do tipo de equipamento acionado pelo motor, também pode ser necessário monitorar a partida (SOUZA ET AL., 2019).

Um motor supergrande consome mais energia do que um motor com a potência correta, pois suas condições de trabalho são muito diferentes das utilizadas no projeto e sua eficiência de trabalho é muito baixa. Se for adicionado o fato de que o motor é menos eficiente, então o desperdício é muito óbvio - o motor deve usar 75% a 100% de sua potência para atingir a melhor eficiência, porque isso mostra que a área é mais estável e a eficiência pode ser melhorada mesmo se a carga mudar (SOUZA ET AL., 2019)

Portanto, a ideia de redimensionamento é baseada no princípio de fazer o motor operar nesta faixa ótima. Neste caso, por exemplo, substituir o motor por outro motor operando em um estado "relaxado", cuja potência seja suficiente para atender a carga operando em sua faixa ideal, pode melhorar significativamente a eficiência em comparação com a simples substituição e fator de potência. Outro motor mais eficiente com a mesma potência. Isso significa que ele pode economizar muita energia, melhorar o fator de potência, reduzir a necessidade de calibração do capacitor, reduzir os custos dos ativos (estoque ou reposição) e recuperar rapidamente o capital de investimento (WEG, 2012).

Um motor supergrande consome mais energia do que um motor com a potência correta, pois suas condições de trabalho são muito diferentes das utilizadas no projeto e sua

eficiência de trabalho é muito baixa. Quando somado ao fato de ser um motor menos eficiente, o desperdício será muito alto (MELLO, 2013).

### 3 METODOLOGIA

O presente estudo de caso está direcionado à possível otimização da eficiência energética que os motores da indústria em estudo podem obter através da técnica de redimensionamento de motores elétricos. A metodologia para desenvolvimento deste trabalho aborda algumas etapas que são interdependentes, como pode-se observar abaixo.

Etapa 1) Seleção dos motores da planta industrial, nos quais ocorrerá a coleta dos dados a serem analisados. Para a seleção dos motores, procedem-se os seguintes critérios:

1. idade do motor (avançada);
2. quantidade de rebobinagens;
3. ocorrências de falhas elétricas;
4. partida e regime de operação.

Etapa 2) Aferir a corrente elétrica do motor em operação, utilizando um alicate-amperímetro.

Etapa 3) Coletar no banco de dados da empresa os dados nominais (potência, corrente e número de polos) dos motores e conferir os dados na placa de identificação de cada motor.

Etapa 4) Proceder com o cálculo do percentual de carga. O percentual de carga é a potência fornecida ou potência de trabalho em relação à potência nominal do motor. Sabendo-se que o valor de potência é o produto da tensão pela corrente elétrica, o percentual de carga pode ser dado pela seguinte expressão:

$$\% \text{ de carga} = \frac{V \text{ de trabalho} \times I \text{ de trabalho}}{V \text{ nominal} \times I \text{ nominal}} \times 100 \quad (3.1)$$

Lembrando que, os valores de tensão de trabalho e tensão nominal são conhecidos e iguais um ao outro (440 volts), a corrente de trabalho será aferida no motor em operação (conforme descrição na etapa 2) e a corrente nominal é um dado fornecido pelo fabricante do motor.

Etapa 5) Tendo o valor calculado do percentual de carga, procede-se com a leitura do rendimento do motor no gráfico de curvas de desempenho, conforme o Gráfico 2.1.5.1.

Etapa 6) Com os valores de percentual de carga, potência nominal e rendimento, e sendo conhecidos os valores de horas e dias de trabalho do motor, calcula-se o consumo para o período de safra em kWh (quilowatt hora) através da equação (3.2):

$$kWh \text{ consumido (ano)} = \frac{\% \text{ carga} \times P \text{ nominal}}{\eta \%} \times \text{horas} \times \text{dias} \quad (3.2)$$

Para os motores em estudo, os valores de horas de trabalho são de vinte e quatro horas e os dias serão iguais a duzentos e quarenta. Este último, corresponde ao período de safra na indústria do setor sucroalcooleiro em estudo.

Etapa 7) A partir do valor do consumo de safra [kWh], e conhecendo o custo unitário do quilowatt-hora (R\$/kWh), pode-se calcular a despesa com os motores em estudo para o período de safra.

Etapa 8) Utilizando a ferramenta See+ (software WEG), pode-se simular a economia em kWh quando aplicado um motor de alto rendimento substituindo o motor atual. Sobre esta ferramenta, WEG descreve:

O See+ é um software para simulação da aplicação de motores elétricos de alta eficiência com foco na redução do consumo de energia elétrica na indústria. [...] O programa calcula o potencial de economia que o usuário pode obter com a substituição do motor elétrico em operação, queimado ou novo, por um de maior eficiência, através de dados do motor atual ou a ser adquirido como potência, nº de polos, nº de rebobinagens, quantidade e horas trabalhadas (WEG, 2021, p.01).

Sendo assim, pode-se obter o novo consumo de safra em kWh subtraindo o valor da economia gerada com a aplicação do motor de alto rendimento, em relação ao consumo do motor antigo.

Etapa 9) Por fim, para obter a nova despesa de safra (R\$/kWh) repete-se a etapa 7, utilizando o valor do novo consumo [kWh] determinado pela etapa 8.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aplicando as técnicas descritas na metodologia para desenvolvimento deste estudo, foram selecionados 32 motores da planta industrial utilizando os critérios descritos na etapa 1. Passando à execução da etapa 2 e 3, foi coletado o valor da corrente elétrica de cada motor em operação e os dados nominais, respectivamente. A Tabela 4.1 exibe os valores coletados de cada motor.

Tabela 4.1 – Dados coletados dos motores em estudo

<b>Motor</b>	<b>Potência nominal (CV)</b>	<b>Corrente nominal (A)</b>	<b>Corrente aferida (A)</b>	<b>Nº de polos</b>
<b>Motor 1</b>	100	123,0	81,99	4
<b>Motor 2</b>	100	123,0	78,7	4
<b>Motor 3</b>	2	3,3	4,1	4
<b>Motor 4</b>	150	180	22,07	4
<b>Motor 5</b>	100	123	117,8	6
<b>Motor 6</b>	50	63	47,5	4
<b>Motor 7</b>	30	39	28,5	4
<b>Motor 8</b>	30	39	24,3	4
<b>Motor 9</b>	100	123	37,8	4
<b>Motor 10</b>	125	155	125,5	4
<b>Motor 11</b>	25	32	24,1	6
<b>Motor 12</b>	100	123	83,5	4
<b>Motor 13</b>	75	93	73,2	4
<b>Motor 14</b>	10	14	5,1	6
<b>Motor 15</b>	60	75	29,2	4
<b>Motor 16</b>	25	32	29	6
<b>Motor 17</b>	25	32	7,3	4
<b>Motor 18</b>	10	14	8,1	4
<b>Motor 19</b>	50	63	29,7	4
<b>Motor 20</b>	1	1,8	2,12	4

<b>Motor</b>	<b>Potência nominal (CV)</b>	<b>Corrente nominal (A)</b>	<b>Corrente aferida (A)</b>	<b>Nº de polos</b>
<b>Motor 21</b>	20	26	5,57	4
<b>Motor 22</b>	15	20	14,51	4
<b>Motor 23</b>	5	7,5	5,8	4
<b>Motor 24</b>	50	63	40,2	4
<b>Motor 25</b>	150	180	83,4	4
<b>Motor 26</b>	60	75	29,7	4
<b>Motor 27</b>	60	75	36,5	4
<b>Motor 28</b>	60	75	34,2	4
<b>Motor 29</b>	30	39	19,1	4
<b>Motor 30</b>	125	155	119,6	4
<b>Motor 31</b>	15	20	11,4	4
<b>Motor 32</b>	15	20	4,7	4

Para desenvolvimento das etapas 4, 6, 7 e 9 foi utilizada a ferramenta Excel da Microsoft para agilidade dos cálculos. Pela etapa 4, calculou-se o percentual de carga de cada motor aplicando a Equação (3.1). Os valores de percentual de carga podem ser conferidos na Tabela (4.2), onde pode-se ver também o rendimento de cada motor. O rendimento foi coletado em leitura do Gráfico 2.1.5.1. conforme a instrução da etapa 5 da metodologia.

Tabela 4.2 – Percentual de carga e rendimento por motor

<b>Motor</b>	<b>Corrente nominal (A)</b>	<b>Corrente aferida (A)</b>	<b>Percentual de carga (%)</b>	<b>Rendimento (%)</b>
<b>Motor 1</b>	123,0	81,99	66,66	93
<b>Motor 2</b>	123,0	78,7	63,98	92,5
<b>Motor 3</b>	3,3	4,1	124,24	93
<b>Motor 4</b>	180	22,07	12,26	78
<b>Motor 5</b>	123	117,8	95,77	94
<b>Motor 6</b>	63	47,5	75,40	94
<b>Motor 7</b>	39	28,5	73,08	94
<b>Motor 8</b>	39	24,3	62,31	93

<b>Motor</b>	<b>Corrente nominal (A)</b>	<b>Corrente aferida (A)</b>	<b>Percentual de carga (%)</b>	<b>Rendimento (%)</b>
<b>Motor 9</b>	123	37,8	30,73	90,5
<b>Motor 10</b>	155	125,5	80,97	94
<b>Motor 11</b>	32	24,1	75,31	94
<b>Motor 12</b>	123	83,5	67,89	93
<b>Motor 13</b>	93	73,2	78,71	94
<b>Motor 14</b>	14	5,1	36,43	91,5
<b>Motor 15</b>	75	29,2	38,93	92
<b>Motor 16</b>	32	29	90,63	94
<b>Motor 17</b>	32	7,3	22,81	87
<b>Motor 18</b>	14	8,1	57,86	92,5
<b>Motor 19</b>	63	29,7	47,14	92
<b>Motor 20</b>	1,8	2,12	117,78	94
<b>Motor 21</b>	26	5,57	21,42	87
<b>Motor 22</b>	20	14,51	72,55	94
<b>Motor 23</b>	7,5	5,8	77,33	94
<b>Motor 24</b>	63	40,2	63,81	93
<b>Motor 25</b>	180	83,4	46,33	92
<b>Motor 26</b>	75	29,7	39,60	91,8
<b>Motor 27</b>	75	36,5	48,67	92
<b>Motor 28</b>	75	34,2	45,60	91,4
<b>Motor 29</b>	39	19,1	48,97	92
<b>Motor 30</b>	155	119,6	77,16	94
<b>Motor 31</b>	20	11,4	57,00	93
<b>Motor 32</b>	20	4,7	23,50	87,5

Conhecendo os valores de percentual de carga, potência nominal, rendimento, e sabendo que o tempo de operação dos motores é de 24 horas e que o período de safra corresponde a 240 dias, foi calculado o consumo de safra (kWh) para cada motor através da Equação (3.2) descrita na etapa 6.

De acordo com o Gráfico 4.1, o custo unitário do quilowatt-hora (R\$/kWh) passou a ser 0,48714 após reajuste de 2017. Com este valor em mãos, pode-se calcular a despesa com os motores em estudo para o período de safra. Os valores de consumo de safra (kWh) e despesa de safra podem ser vistos na Tabela (4.3).

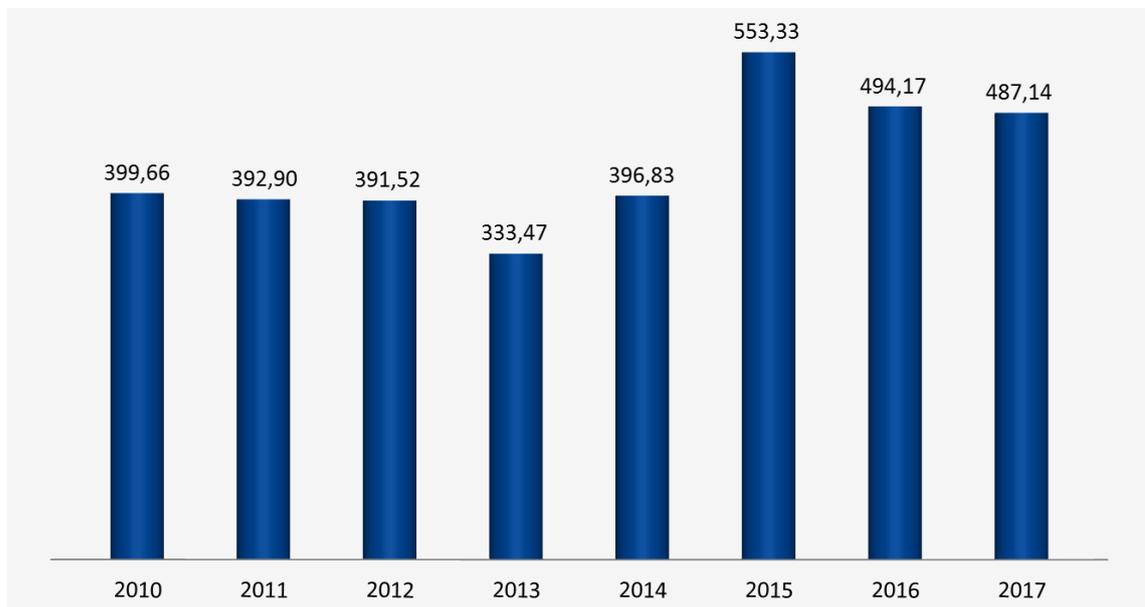


Gráfico 4.1 - Custo Médio da Energia Elétrica para a Indústria no Brasil (Sistema FIRJAN, 2017)

Tabela 4.3 – consumo de safra (kWh) e despesa de safra por motor

<b>Motor</b>	<b>Potência nominal (W)</b>	<b>Percentual de carga (%)</b>	<b>Rendimento (%)</b>	<b>Consumo de safra (kWh)</b>	<b>Despesa por safra (R\$)</b>
<b>Motor 1</b>	54120	66,66	93	223435,97	R\$ 108.844,60
<b>Motor 2</b>	54120	63,98	92,5	215629,49	R\$ 105.041,75
<b>Motor 3</b>	1452	124,24	93	11173,16	R\$ 5.442,89

<b>Motor</b>	<b>Potência nominal (W)</b>	<b>Percentual de carga (%)</b>	<b>Rendimento (%)</b>	<b>Consumo de safra (kWh)</b>	<b>Despesa por safra (R\$)</b>
<b>Motor 4</b>	79200	12,26	78	71710,52	R\$ 34.933,06
<b>Motor 5</b>	54120	95,77	94	317608,85	R\$ 154.719,98
<b>Motor 6</b>	27720	75,40	94	128068,09	R\$ 62.387,09
<b>Motor 7</b>	17160	73,08	94	76840,85	R\$ 37.432,25
<b>Motor 8</b>	17160	62,31	93	66221,42	R\$ 32.259,10
<b>Motor 9</b>	54120	30,73	90,5	105856,71	R\$ 51.567,04
<b>Motor 10</b>	68200	80,97	94	338369,36	R\$ 164.833,25
<b>Motor 11</b>	14080	75,31	94	64977,70	R\$ 31.653,24
<b>Motor 12</b>	54120	67,89	93	227550,97	R\$ 110.849,18
<b>Motor 13</b>	40920	78,71	94	197359,66	R\$ 96.141,78
<b>Motor 14</b>	6160	36,43	91,5	14126,16	R\$ 6.881,42
<b>Motor 15</b>	33000	38,93	92	80439,65	R\$ 39.185,37
<b>Motor 16</b>	14080	90,63	94	78188,94	R\$ 38.088,96
<b>Motor 17</b>	14080	22,81	87	21265,66	R\$ 10.359,35
<b>Motor 18</b>	6160	57,86	92,5	22193,12	R\$ 10.811,16
<b>Motor 19</b>	27720	47,14	92	81817,04	R\$ 39.856,35
<b>Motor 20</b>	792	117,78	94	5715,88	R\$ 2.784,43
<b>Motor 21</b>	11440	21,42	87	16225,99	R\$ 7.904,33
<b>Motor 22</b>	8800	72,55	94	39121,43	R\$ 19.057,61
<b>Motor 23</b>	3300	77,33	94	15637,79	R\$ 7.617,79
<b>Motor 24</b>	27720	63,81	93	109551,48	R\$ 53.366,91
<b>Motor 25</b>	79200	46,33	92	229748,87	R\$ 111.919,86
<b>Motor 26</b>	33000	39,60	91,8	81995,29	R\$ 39.943,19
<b>Motor 27</b>	33000	48,67	92	100549,57	R\$ 48.981,72
<b>Motor 28</b>	33000	45,60	91,4	94832,04	R\$ 46.196,48
<b>Motor 29</b>	17160	48,97	92	52616,35	R\$ 25.631,53
<b>Motor 30</b>	68200	77,16	94	322461,96	R\$ 157.084,12
<b>Motor 31</b>	8800	57,00	93	31066,84	R\$ 15.133,90
<b>Motor 32</b>	8800	23,50	87,5	13613,35	R\$ 6.631,61

Para simular o potencial de economia em kW/ano utilizando um motor corretamente dimensionado no lugar do motor antigo, foi utilizada a ferramenta See+ (software WEG). Uma vez sabendo o potencial de economia utilizando o motor corretamente dimensionado, é possível obter o novo consumo de safra, e assim, a nova despesa, conforme demonstra a Tabela (4.4).

Tabela 4.4 – Valores reajustados após redimensionamento de motores

<b>Motor</b>	<b>Consumo de safra (kWh)</b>	<b>Despesa por safra (R\$)</b>	<b>Economia (kWh/safra)</b>	<b>Novo consumo (kWh/safra)</b>	<b>Nova despesa por safra (R\$)</b>
<b>Motor 1</b>	223435,97	R\$ 108.844,60	28982,76	194453,2	R\$ 94.725,94
<b>Motor 2</b>	215629,49	R\$ 105.041,75	28982,76	186646,7	R\$ 90.923,09
<b>Motor 3</b>	11173,16	R\$ 5.442,89	709,75	10463,41	R\$ 5.097,15
<b>Motor 4</b>	71710,52	R\$ 34.933,06	42142,56	29567,96	R\$ 14.403,74
<b>Motor 5</b>	317608,85	R\$ 154.719,98	29235,22	288373,6	R\$ 140.478,33
<b>Motor 6</b>	128068,09	R\$ 62.387,09	14580,69	113487,4	R\$ 55.284,25
<b>Motor 7</b>	76840,85	R\$ 37.432,25	8842,62	67998,23	R\$ 33.124,66
<b>Motor 8</b>	66221,42	R\$ 32.259,10	8842,62	57378,8	R\$ 27.951,51
<b>Motor 9</b>	105856,71	R\$ 51.567,04	28982,76	76873,95	R\$ 37.448,37
<b>Motor 10</b>	338369,36	R\$ 164.833,25	34779,32	303590	R\$ 147.890,85
<b>Motor 11</b>	64977,70	R\$ 31.653,24	7535,27	57442,43	R\$ 27.982,51
<b>Motor 12</b>	227550,97	R\$ 110.849,18	28982,76	198568,2	R\$ 96.730,52
<b>Motor 13</b>	197359,66	R\$ 96.141,78	21254,03	176105,6	R\$ 85.788,10
<b>Motor 14</b>	14126,16	R\$ 6.881,42	3195,21	10930,95	R\$ 5.324,90
<b>Motor 15</b>	80439,65	R\$ 39.185,37	17541,13	62898,52	R\$ 30.640,39
<b>Motor 16</b>	78188,94	R\$ 38.088,96	7535,27	70653,67	R\$ 34.418,23
<b>Motor 17</b>	21265,66	R\$ 10.359,35	7435,84	13829,82	R\$ 6.737,06
<b>Motor 18</b>	22193,12	R\$ 10.811,16	3145	19048,12	R\$ 9.279,10
<b>Motor 19</b>	81817,04	R\$ 39.856,35	14580,69	67236,35	R\$ 32.753,52
<b>Motor 20</b>	5715,88	R\$ 2.784,43	386,59	5329,29	R\$ 2.596,11
<b>Motor 21</b>	16225,99	R\$ 7.904,33	6109,68	10116,31	R\$ 4.928,06
<b>Motor 22</b>	39121,43	R\$ 19.057,61	4540,75	34580,68	R\$ 16.845,63
<b>Motor 23</b>	15637,79	R\$ 7.617,79	1631,43	14006,36	R\$ 6.823,06

<b>Motor</b>	<b>Consumo de safra (kWh)</b>	<b>Despesa por safra (R\$)</b>	<b>Economia (kW/ano)</b>	<b>Novo consumo (kWh/safra)</b>	<b>Nova despesa por safra (R\$)</b>
<b>Motor 24</b>	109551,48	R\$ 53.366,91	14580,69	94970,79	R\$ 46.264,07
<b>Motor 25</b>	229748,87	R\$ 111.919,86	42142,56	187606,3	R\$ 91.390,54
<b>Motor 26</b>	81995,29	R\$ 39.943,19	17541,13	64454,16	R\$ 31.398,20
<b>Motor 27</b>	100549,57	R\$ 48.981,72	17541,13	83008,44	R\$ 40.436,73
<b>Motor 28</b>	94832,04	R\$ 46.196,48	17541,13	77290,91	R\$ 37.651,49
<b>Motor 29</b>	52616,35	R\$ 25.631,53	8842,62	43773,73	R\$ 21.323,93
<b>Motor 30</b>	322461,96	R\$ 157.084,12	34779,32	287682,6	R\$ 140.141,72
<b>Motor 31</b>	31066,84	R\$ 15.133,90	4540,75	26526,09	R\$ 12.921,92
<b>Motor 32</b>	13613,35	R\$ 6.631,61	4540,75	9072,6	R\$ 4.419,63

A média geral de utilização dos equipamentos com base nos valores de corrente elétrica aferida e corrente nominal é de 57%. Sob o ponto de vista da conservação de energia elétrica, o principal parâmetro a ser observado é a potência nominal do motor, que deve ser a adequada para o serviço a que se destine. Potências nominais muito superiores à realmente necessária resultam em desperdícios de energia, elevação da potência solicitada, redução do fator de potência da instalação elétrica da indústria e maiores perdas nas redes de distribuição de energia e nos transformadores. Deve-se, sempre que possível, escolher o motor de modo que seu carregamento seja no mínimo superior a 50%, dando preferência a que seja maior que 75% (COPEL, 2005).

Os motores 01, 02, 08, 12, 18, 24 e 31, conforme a Tabela 4.1, apresentam percentual de carga variando de 57% a 67%, ou seja, estão subdimensionados. Esses equipamentos necessitam de ter seus motores redimensionados para que atendam a corrente aferida em operação do equipamento, ou seja, a correta demanda de carga.

Outros motores que estão subdimensionados e apresentam percentual de carga de 12% a 49%, são: 04, 09, 14, 15, 17, 19, 21, 25, 26, 27, 28, 29 e 32. O ideal nessa situação, uma vez que, tais motores apresentaram aproveitamento menor de 50%, é que seja feita a substituição dos motores. Vale ressaltar que a utilização racional de energia pode se tornar um diferencial competitivo, onde as empresas estarão aplicando novas formas de economizar energia e assim aplicar em novos produtos e processos (PINTO, 2016).

Alguns dos equipamentos avaliados apresentam percentual de carga entre 72% e 100%, considerado uma faixa de rendimento adequada, são eles: 05, 06, 07, 10, 11, 13, 16, 22, 23 e 30. Os motores que atuam com um índice de rendimento adequado, além de proporcionarem maior economia de energia, também oferecem um rápido retorno sobre o capital investido e refletem uma redução de custo operacional e das emissões de CO<sub>2</sub> (WEG, 2015b).

Os motores 03 e 20 estão sobredimensionados, uma vez que, seus valores em operação ultrapassam o valor de potência nominal de trabalho. O ideal é que esses sejam substituídos por motores com menores potências de 3 e 5 cv, respectivamente. Segundo Nurmberg e Rippel (2013) uma tensão aplicada acima da nominal, prejudica o funcionamento do motor, e aumenta suas perdas, principalmente no ferro.

Através da simulação feita com a aplicação de motores de alto rendimento nos 32 equipamentos analisados, pode-se enxergar a possibilidade de redução do consumo de energia elétrica de aproximadamente 15% por período de safra, conforme demonstra o quadro abaixo.

	Projeto original	Modificação
Custo unitário (R\$/kWh)	R\$ 0,48714	
Horas de operação/dia	24 horas	
Dias de operação/ano	240 dias	
Consumo de safra (kWh)	3.455.970,155	2.943.965,365
Despesa de safra (R\$)	R\$ 1.683.541,30	R\$ 1.434.123,29

Quadro 5.2.1 - Resultados da simulação de aplicação de motores de alto rendimento (próprio autor)

## 6 CONCLUSÃO

Através do presente estudo foram desenvolvidos conhecimentos sobre eficiência energética, rendimento de motores e os ganhos que se pode obter através das técnicas de conservação de energia, tais como o redimensionamento de motores elétricos. O estudo da eficiência energética se tornou indispensável para empresas que buscam por competitividade no mercado e maior rentabilidade em suas cadeias produtivas.

Conforme demonstram os resultados, a empresa em estudo possui uma média de utilização de 57% de motores, sendo que o recomendado pela literatura é de pelo menos 75%. Dos 32 equipamentos avaliados, 10 estão em boas condições de operação, 20 apresentam subutilização e 02 apresentam sobreutilização. Desta forma, 69% dos equipamentos analisados estão fora das condições ideais de operação. Uma das medidas a adotar para obter uma melhoria significativa de eficiência energética na empresa em estudo, é a prática do redimensionamento de motores.

Os resultados apontam que ao ser feito o redimensionamento para os motores em estudo, pode-se obter uma economia de R\$249.418,01 por safra. Certamente, tal valor ainda será pequeno se comparado à economia que se pode obter fazendo um estudo para o restante dos equipamentos de toda planta industrial. A empresa tem possibilidade de agregar valor aos produtos e diminuir custos de produção, através do redimensionamento dos motores.

Sugere-se aos trabalhos conseguintes que se faça o levantamento apurado dos custos referentes às novas instalações em casos de substituição do motor. Tais custos envolvem, principalmente, mão-de-obra (elétrica e mecânica) e adequações quanto aos novos tipos de acoplamentos. Fazer este levantamento seria de extrema importância para obter o valor de retorno sobre o investimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. (2010). Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada (Resolução nº 414, de 9 de setembro de 2010). Brasília: ANEEL

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2006, consulta direta dos autores ([www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br))

AMATO, G. W. , Casca: Agregando Valor ao Arroz, [www.irga.rs.gov.br/arquivos/20050815133443.pdf](http://www.irga.rs.gov.br/arquivos/20050815133443.pdf), em 13.11.2006

ARAÚJO, N. L., “Situação dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil” 2006, [www.cidades.gov.br/index.php?option=content&task=category&id=541](http://www.cidades.gov.br/index.php?option=content&task=category&id=541), em maio 2021

ARAÚJO, Amanda Guerra de. Controle vetorial de um motor de indução trifásico aplicado em sistemas de posicionamento. Dissertação de mestrado, UFPB, 2011. Disponível em: <<http://tede.biblioteca.ufpb.br/bitstream/tede/5315/1/arquivototal.pdf>>.

AZEVEDO, E. M. (2004). Modelo Computacional de Teoria Dos Jogos Aplicado Aos Leilões Brasileiros de Energia Elétrica. Tese de Doutorado, Unicamp.

Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019 / Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2020.

BARNES, Malcolm. Practical Variable Speed Drives and Power Electronics. Elsevier, 2003.

CAMPANA, S.; OLIVEIRA FILHO, D.; SOARES, A.A; OLIVEIRA R.A. Racionalização da potência de motores elétricos em sistemas de irrigação por aspersão convencional e pivô central. Engenharia na Agricultura, Viçosa, 1999.

CHANG, J. I.; LIANG, C-L. Performance evaluation of process safety management systems of paint manufacturing facilities. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 22, n. 4, p. 398- 402, 2009.

COPEL. Manual de Eficiência Energética na Indústria. Mossunguê: CMK, 2005. 155 p.

DEL TORO, V. Fundamentos de máquinas elétricas. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 574 p.

ELETROBRÁS- Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. PROCEL, Rio de Janeiro, 2003.

FERREIRA, C. A., Perrone, F. P. D., Moreira, M. A. R. G., Oliveira, H. L., Pinto, A. B. A., Sobral, A. S., Motta, B. R., Moya, C. H., Spera, M. R., Vilela, L. C. T., Góes, R. R. A., Teixeira, M. V. P., Sobral, R. L.. Atuação da Eletrobrás, através do Procel, na Eficiência Energética de Indústrias Brasileiras. Anais do 8th Latin American Congress on Electricity Generation and Transmission, CLAGTEE, 2009.

FILIPPO FILHO, G. Motor de indução. São Paulo: Érica, 2013.

FREITAS, Gabriel. V. C. Eficiência Energética em Moto de Indução Trifásico Através do uso de Inversor de Frequência PWM. 85 p. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, 2013.

GADELHA, Witor. P.S. Eficiência Energética em Motores Elétricos. 86 p. Centro de Tecnologia e Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2014.

GARCIA, A. G. P. 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.

HELERBROCK, Rafael. "Corrente Alternada"; Brasil Escola, 2018. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/corrente-alternada.htm>. Acesso em 05 de junho de 2021

KOSOW, I.L. Máquinas elétricas e transformadores. 4.ed. Porto Alegre: Globo, 1982.

LIANG, D.; ZHOU, V. Recent market and technical trends in copper rotors for high-efficiency induction motors. In: 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia). IEEE, 2018.

LORENZO, DE. Guia do Usuário Sistema Didático de Acionamento de Motor AC com Inversor de Frequência DLB MAQCA. Brasil, 2018.

LUCA, H. P. Redimensionamento de motores elétricos com foco em eficiência energética. Webinar. Leonardo Energy, 2018

MAMEDE FILHO, J. Instalações Elétricas Industriais. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

MAMEDE FILHO, João - Proteção de sistemas elétricos de potência /João Mamede Filho, Daniel Ribeiro Mamede. - [Reimpr.]. - Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MARQUES, M. C. S.; HADDAD, J.; MARTINS, A. R. S. Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações. Itajubá: Fupai, 2006.

MEDEIROS, Firmino M. Jr., et al. Simulação de Partida de Motores através de Soft-Starter utilizando o ATPDraw. GSI Engenharia e Consultoria LTDA. Itajubá-MG, Brasil, 2015.

MELLO, R. L. C. Eficiência energética em motores elétricos trifásicos de indução. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, 2013.

NURMBERG, F.; RIPPEL, R. PLANO DE MANUTENÇÃO ELÉTRICA PARA MOTORES – FOLEM SETOR CALDEIRA. 2013. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Manutenção Industrial, Universidade Tecnologia Federal do Paraná, Pato Branco, 2013

PAREKH, Rakesh. AC Induction Motor Fundamentals. Microchip, 2003. Disponível em: <[http://ww1.microchip.com/downloads/cn/AppNotes/cn\\_00887a.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/cn/AppNotes/cn_00887a.pdf)>.

PEREIRA, Breno D.B. et al. Estudo de Adicionamento das Chaves de Partidas Elétricas e Eletrônicas para Motores Elétricos. 1º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense - SICT. 9 f. Criciúma-SC, Brasil, 2012.

PINTO, L. M. Desenvolvimento de metodologia para implementação de eficiência energética em sistemas auxiliares de uma planta industrial siderúrgica semi-integrada. 2016. 108 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2016.

PIRES, A.; FERNANDEZ, E.F.; BUENO, J. Política energética para o Brasil: propostas para o crescimento sustentável. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2006.

RAMOS, M. C. do E. S. Metodologia para avaliação e otimização de motores elétricos de indução trifásicos visando a conservação de energia em aplicações industriais. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

REZENDE, P. H. O.; BISPO, D. Estudo da eficiência energética e dimensionamento de motores de indução trifásicos a partir da plotagem de suas curvas características. In: Proceedings of International Conference on Engineering and Computer Education. 2014.

SOUZA, R. C.; CALILI, R. F.; VIEIRA, R. S., FAGUNDES, W. Cartilha de orientação para usuários de motores elétricos reconicionados. Procobre, 2019.

STEPHAN, Richard M. Acionamento, comando e controle de máquinas elétricas. UFRJ, 2008.

VIANA, Augusto Nelson Carvalho et al. Eficiência energética: Fundamentos e aplicações. Campinas: ANNEL, 2012

WEG. Acionamento, Comando e Controle de Máquinas Elétricas. 199 f. Rio de Janeiro-RJ, Brasil. 2016. Disponível em < <https://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-acionamentos-eletricos-ii/apostila-basica>>

WEG. Eficiência Energética (See+). 2021. Disponível em: <<http://www.weg.net/institucional/BR/pt/solutions/energy-efficiency/efficiency-index>>.

WEG, S. A. Motores elétricos: guia de especificação. WEG, Jaraguá do Sul-SC, 2012.

WEG. Eficiência Energética para Pequenos Negócios – Motores Elétricos. 28 f.2015. Rio de JaneiroRJ, Brasil. Disponível em < <https://www.weg.net/institucional/BR/pt/news/produtos-esolucoes/weg-e-sebrae-mato-grosso-promovem-solucoes-para-eficiencia-energetica-em-pequenosnegocios>>

WEG. Guia de aplicação de inversores de frequência. Jaraguá do Sul, 2002.

WEG. WEG acrescenta IR (Índice de Rendimento) no nome de suas linhas de motores elétricos de baixa tensão. 2015b. Disponível em: <<http://www.weg.net/institucional/BR/pt/news/produtos-e-solucoes/weg-acrescenta-ir-indice-de-rendimento-no-nome-de-suas-linhas-de-motores-eletricos-de-baixa-tensao>>.