

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ENGENHARIA DE ENERGIA

**ESTIMATIVA DE DESEMPENHO DO USO DE ENERGIA ELÉTRICA EM UNIDADES  
INDUSTRIAIS BASEADA EM DADOS DA LITERATURA**

por

Jéssica Duarte

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, dezembro de 2021.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE ENERGIA

ESTIMATIVA DE DESEMPENHO DO USO DE ENERGIA ELÉTRICA EM UNIDADES  
INDUSTRIAIS BASEADA EM DADOS DA LITERATURA

por

Jéssica Duarte

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Flávio Antonio Becon Lemos  
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Banca examinadora:

Prof. Dr. Ricardo Augusto Cassel – PMPEP / UFRGS

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha – PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Julio Cezar Mairesse Siluk – PPGEP / UFSM

Porto Alegre, 4 de dezembro de 2021.

**DUARTE, J. ESTIMATIVA DE DESEMPENHO DE USO DE ENERGIA ELÉTRICA EM UNIDADES INDUSTRIAIS BASEADA EM DADOS DA LITERATURA.** 2021. 33 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

## **RESUMO**

A eficiência energética no setor industrial é um fator crítico para o sucesso dos esforços de transição energética. No Brasil, a indústria de transformação é responsável por mais de um terço do consumo nacional de eletricidade e apresenta relevante potencial de economia de energia, muitas vezes negligenciado por seus gestores. Discussões sobre eficiência energética despertam o interesse da indústria na gestão de energia, mas barreiras de informação limitam a exploração de tais oportunidades. Este trabalho propõe um método de avaliação do desempenho do uso de energia elétrica de instalações industriais que oferece um mapeamento de suas principais ineficiências e oportunidades de conservação de energia. O método proposto baseia-se no estabelecimento de indicadores de desempenho e avalia separadamente diferentes usos de energia industrial, considerando sistemas de climatização, iluminação, motores elétricos e sistemas de ar comprimido. A avaliação de cada sistema é decomposta em dados dos equipamentos e padrões de operação, partindo de informações obtidas na unidade industrial avaliada. O desempenho de cada setor quanto ao uso de energia é calculado por método indireto, através da atribuição de perdas de energia em relação a uma instalação de alta eficiência. A metodologia emprega as Melhores Técnicas Disponíveis (MTD) em conjunto com normas técnicas e literatura. A funcionalidade do modelo é testado através da aplicação a uma unidade industrial brasileira. Os resultados sugerem um potencial de economia de energia de 18% em suas instalações. Identificou-se que 74% das oportunidades de economia se encontram no sistema motriz, especialmente os motores de recebimento no armazém B. O estudo de caso sugere que um plano de eficiência energética para esta unidade deve considerar as medidas de substituição dos motores identificados por motores de alta eficiência, aplicação de dispositivos variadores de velocidade, entre outras. Ao cumprir as medidas propostas, a unidade poderia aumentar seu desempenho energético em 15,5%. Espera-se que, por meio da metodologia de avaliação proposta, gestores de diferentes setores industriais possam identificar de forma mais assertiva as prioridades no que tange a melhorias energéticas, auxiliando na definição das estratégias de economia de energia.

**PALAVRAS-CHAVE:** Gestão de energia, Eficiência energética, Perfil energético da indústria, Indicadores de desempenho.

**DUARTE, J. ELECTRIC ENERGY PERFORMANCE ESTIMATION IN INDUSTRIAL UNITS BASED ON LITERATURE DATA.** 2021. 33 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

### **ABSTRACT**

Energy efficiency in the industrial sector is a critical factor for the success of energy transition efforts. In Brazil, the transformation industry is responsible for more than one-third of the national electricity consumption and has an important potential for energy savings, often overlooked by managers. Discussions on energy efficiency increase the industry's interest in energy management, but information barriers limit exploiting such opportunities. This paper proposes a method for assessing the electric energy performance of industrial facilities that provides a mapping of their main inefficiencies and opportunities for energy conservation. The proposed method is based on establishing of performance indicators and separately evaluates different industrial energy uses, considering the HVAC system, the lighting system, electric motors, and the compressed air system. The evaluation of each system is broken down into equipment data and operating patterns, based on information easily obtained from the industrial unit being evaluated. The performance of each energy use is calculated by an indirect method, by assigning energy losses relative to a high-efficiency installation. The method considers Best Available Techniques (BAT) together with considerations of technical standards and academic literature to obtain the energy loss information, and it is applied to a Brazilian industrial facility and estimates an energy savings potential of 18%. The system of greatest opportunity of 74% is its motor system, especially the motors for receiving functions in warehouse B. Thus, an energy efficiency plan for this unit should consider the replacement of the identified motors with high efficiency motors, application of variable speed devices, among other measures. By complying with these measures, the unit could increase its performance by 15.5%. It is expected that, through the proposed assessment, managers from different industrial sectors can properly identify the priorities regarding energy improvements, helping in the definition of energy saving strategies.

**KEYWORDS:** Energy management, Energy efficiency, Industry energy profile, Performance indicators.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	2
2.1	Indicadores de Desempenho.....	2
2.2	Consumos de Energia na Indústria.....	2
	2.2.1 Climatização.....	2
	2.2.2 Iluminação.....	3
	2.2.3 Motores.....	3
	2.2.4 Sistema de Ar Comprimido.....	3
3	MÉTODO.....	3
4	CONSTRUÇÃO DA MODELAGEM.....	4
4.1	Climatização.....	4
	4.1.1 Fatores de Equipamento.....	5
	4.1.2 Fatores de Operação.....	6
4.2	Iluminação.....	7
	4.2.1 Fatores de Equipamento.....	7
	4.2.2 Fatores de Operação.....	8
4.3	Motores Elétricos.....	9
	4.3.1 Fatores de Equipamento.....	9
	4.3.2 Fatores de Operação.....	10
4.4	Sistemas de Ar Comprimido.....	12
	4.4.1 Fatores de Equipamento.....	12
	4.4.2 Fatores de Operação.....	12
4.5	Equacionamento do Desempenho Energético.....	13
5	ESTUDO DE CASO.....	14
5.1	Descrição da Unidade Industrial Analisada.....	14
5.2	Aplicação da Avaliação.....	14
5.3	Análise dos Resultados.....	16
6	CONCLUSÃO.....	20
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	21
	ANEXOS.....	25

# 1 INTRODUÇÃO

É necessário limitar significativamente as emissões antropogênicas de gases do efeito estufa na sociedade para mitigar o ambiente cada vez mais hostil gerado pelas mudanças climáticas (MASSON-DELMOTTE *et al.*, 2021). Dentre as muitas ações necessárias, estudos aprofundados em eficiência energética emergem como um fator crítico para o sucesso da descarbonização da estrutura energética. As instituições e acordos internacionais consideram que modelos de gestão eficientes em recursos são elementos fundamentais a serem desenvolvidos (UN, 2015). Também, a discussão sobre a incorporação de práticas ESG (*Environment, Social, Governance*) em empresas, para desenvolver sua conscientização em relação à sustentabilidade ambiental, social e de governança frente a investidores, vem se tornando cada vez mais importante. Medidas de eficiência energética são consideradas como fator de sustentabilidade ambiental em análises de ESG (BOFFO; PATALANO, 2020), o que evidencia sua importância em processos produtivos.

No Brasil, a participação da indústria de transformação no Produto Interno Bruto (PIB) é de 11,3% (IBGE, 2020), enquanto sua parcela no consumo de eletricidade no âmbito nacional é de 35,9% (EPE, 2020). A discussão sobre o fomento a medidas relativas à eficiência energética é antiga, mas recentemente vem ganhando relevância devido à crescente preocupação com a sustentabilidade. A Confederação Nacional da Indústria considera tais medidas como uma contribuição da indústria brasileira aos mecanismos do Acordo de Paris (CNI, 2019).

Por outro lado, a implementação de estratégias de eficiência energética em empresas enfrenta muitos obstáculos. Na União Europeia, 18,9% das grandes empresas e apenas 4% das pequenas e médias empresas têm um sistema abrangente de eficiência energética (CAGNO; TRIANNI, 2014). No Brasil, o grande potencial técnico de conservação de energia dos ramos industriais intensivos em energia estimado por Bajay, Gorla e Bordoni (2009) ainda não foi explorado (BAJAY; GORLA; BORDONI, 2009; DE MELLO SANTANA; BAJAY, 2016). De acordo com o relatório de ACEEE (2018), o país apresenta um dos piores índices de eficiência energética entre grandes economias mundiais (CASTRO-ALVAREZ *et al.*, 2018).

Questões relacionadas com a falta de informação compõem uma categoria entre as barreiras importantes para a implementação de projetos de eficiência energética (CAGNO; TRIANNI, 2014; HENRIQUES; CATARINO, 2016). A falta de informação sobre padrões de consumo e níveis de medidas de eficiência da fábrica, a falta de conhecimento das oportunidades de economia de energia, e a falta de formação e conhecimento do pessoal técnico (HENRIQUES; CATARINO, 2016) limitam a exploração de tais oportunidades. A indústria e a academia têm desenvolvido diferentes métodos de gestão de eficiência energética, de forma a responder à necessidade de avaliação do perfil de consumo e identificação de oportunidades de economia de energia de diferentes setores industriais. Tais ferramentas possuem o objetivo de estabelecer uma conscientização do consumo nos processos industriais e auxiliares da planta, além de avaliar seus efeitos na produção e na produtividade. Desta forma, servem como um apoio para as empresas lidarem com as barreiras de conhecimento e organizacionais que se evidenciam na implementação de medidas de economia de energia (MENGHI *et al.*, 2019).

Estes estudos são desenvolvidos sob diferentes metodologias e objetivos. De acordo com Menghi *et al.*, os métodos estudados podem ser divididos em três grupos: (I) análise energética, (II) avaliação energética e (III) medidas de economia de energia. Estudos em análise energética (grupo I) buscam investigar sistematicamente como a energia é consumida na planta, através de auditorias de energia e benchmarks ou, ainda, desenvolvem estudos baseados em dados nacionais ou internacionais (MENGHI *et al.*, 2019). Zanardo *et al.* propuseram um modelo de diagnóstico de performance energética de unidades industriais baseado em Indicadores-Chaves de Desempenho (KPI, do inglês *Key Performance Indicators*) e Análise Hierárquica de Processos (AHP) (ZANARDO *et al.*, 2018). O produto *Portfolio Manager* da Energy Star é uma ferramenta de gestão que permite a avaliação de edificações e plantas industriais e apresenta seu desempenho em relação a unidades similares nos Estados Unidos. O produto se baseia em dados nacionais de usos de energia da agência de informação *Energy Information Administration* (EIA) (ENERGY STAR, 2021).

Ainda, estudos do grupo de avaliações energéticas (grupo II) executam avaliações a um nível aprofundado considerando dados históricos e em tempo real de máquinas e processos, baseando-se em métodos estatísticos ou metodologia *lean*. Benedetti *et al.* desenvolveram uma metodologia de gerenciamento de energia por meio de um sistema de KPIs e ferramentas de controle estatístico, a partir de

dados em tempo real, a fim de permitir as empresas a avaliar as mudanças no consumo de energia e encontrar suas causas (BENEDETTI; CESAROTTI; INTRONA, 2017). Finalmente, estudos no grupo de medidas de economia de energia (III) desenvolvem métodos que exploram medidas de economia de energia em setores ou processos específicos. Kluczek (2014), por exemplo, identificou oportunidades para implementar as soluções Melhores Técnicas Disponíveis (MTD) em uma fábrica polonesa (KLUCZEK, 2014).

Diante do contexto apresentado, este trabalho tem o objetivo geral de estabelecer uma avaliação do desempenho do uso de energia elétrica de unidades industriais, que seja baseado em dados acessíveis e que seja aplicável a diferentes setores da indústria. O trabalho estabelece múltiplos indicadores de desempenho que representem a unidade avaliada, desenvolvidos visando a facilidade na obtenção das informações requisitadas. A análise foi segmentada para as diferentes categorias de equipamentos consumidores de energia elétrica, e levou em consideração a condição dos equipamentos instalados, os padrões de operação e sua contribuição no consumo energético final da unidade. A partir dos indicadores, são estimadas as perdas de cada sistema avaliado, de forma a apresentar seu desempenho e o potencial de economia de energia. Os resultados obtidos podem apoiar a tomada de decisões em ambientes fabris ao apresentar as áreas prioritárias para melhorias de eficiência energética da fábrica. A funcionalidade do modelo foi testada para uma aplicação em uma unidade industrial. O trabalho se enquadra no grupo de estudos em análise energética (I).

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Indicadores de Desempenho**

Os indicadores de desempenho são medidas quantificáveis que expressam o nível de sucesso da empresa em relação a uma atividade específica, em relação às metas e objetivos propostos. Possibilitam a avaliação e planejamento sobre o desempenho da operação. Assim, é uma ferramenta de melhoria contínua, que auxilia o controle do processo e a tomada de decisões (BARTZ; SILUK; BARTH, 2011). Os Indicadores-Chave de Resultados (KRI, do inglês *Key Result Indicators*) e os Indicadores-Chave de Desempenho (KPI, do inglês *Key Performance Indicators*) são dois tipos de indicadores (PARMENTER, 2012). Os KRI apresentam os resultados de múltiplas ações que são realizadas no objeto avaliado, apontando se a evolução da organização é de melhoria do desempenho ou não. Seriam avaliados em ciclos mensais ou semestrais. Os KPI representam as medidas críticas de aspecto de desempenho organizacional para o sucesso da organização, em relação aos objetivos propostos, e seriam avaliados diariamente ou semanalmente (PARMENTER, 2012). A implementação desta avaliação se inicia com a identificação dos objetivos da organização, partindo então para a definição e monitoramento dos indicadores de desempenho. Esta avaliação pode ser utilizada para a interpretação de processos complexos de auditoria com o objetivo de redução de consumo de energia, apoiando na definição de metas e cenários comparativos (ZANARDO *et al.*, 2018).

### **2.2 Consumos de Energia na Indústria**

Foram identificadas quatro categorias de equipamentos como relevantes na avaliação de eficiência energética na revisão da literatura sobre os equipamentos consumidores de energia elétrica no ambiente industrial: climatização, iluminação, motores e sistemas de ar comprimido. Estas categorias podem ser avaliadas em diversos setores da indústria. (EIPPCB, 2009; ELEKTRO, 2011; ROCHA, L. R. R.; MONTEIRO, 2005; SANTOS *et al.*, 2006, 2007).

#### **2.2.1 Climatização**

Os sistemas de climatização mantêm os níveis de temperatura e umidade em um ambiente de forma a atender as condições de conforto ou as necessidades de um processo produtivo. Seu consumo de energia é bastante significativo em algumas indústrias, chegando a representar 60% da energia da edificação (SANTOS *et al.*, 2007). O sistema pode ser isolado, constituído de aparelhos de ar-condicionado unitários de único ambiente, como o ar-condicionado de janela ou *split*. Sistemas centralizados com expansão direta são instalações de pequenas a médias capacidades (até 50 TR) (PENA, 2002). Sistemas centralizados com expansão indireta são aplicáveis a edificações de maior porte, tipicamente com carga térmica superior a 1000 kW (285 TR) (MMA, 2017). Não são considerados, na avaliação, os sistemas de aquecimento ou de refrigeração abaixo de 0°C.

### 2.2.2 Iluminação

A iluminação compõe uma parte significativa do consumo mundial de energia elétrica (EIPPCB, 2009). No Brasil, é responsável por 23% do consumo residencial e 44% do comercial, enquanto na indústria representa 1% do consumo (SANTOS *et al.*, 2007). É muito comum os sistemas de iluminação serem ineficientes no Brasil (SANTOS *et al.*, 2007), o que pode ser contornado de automação do sistema e equipamentos eficientes, como as lâmpadas LED, ou mesmo iluminação natural.

### 2.2.3 Motores

Os motores elétricos, amplamente adotados na indústria, são responsáveis por aproximadamente 25% do consumo de energia elétrica no Brasil (SANTOS *et al.*, 2007). Eles estão presentes em diversas máquinas industriais, como bombas, ventiladores, compressores, esteiras transportadoras, trituradores, etc. (EIPPCB, 2009). Os tipos de motores elétricos mais utilizados são os trifásicos e os monofásicos de indução, com potências que variam de valores inferiores a 1 kW até centenas de kW, e são máquinas altamente eficientes (ROCHA, L. R. R.; MONTEIRO, 2005).

### 2.2.4 Sistema de Ar Comprimido

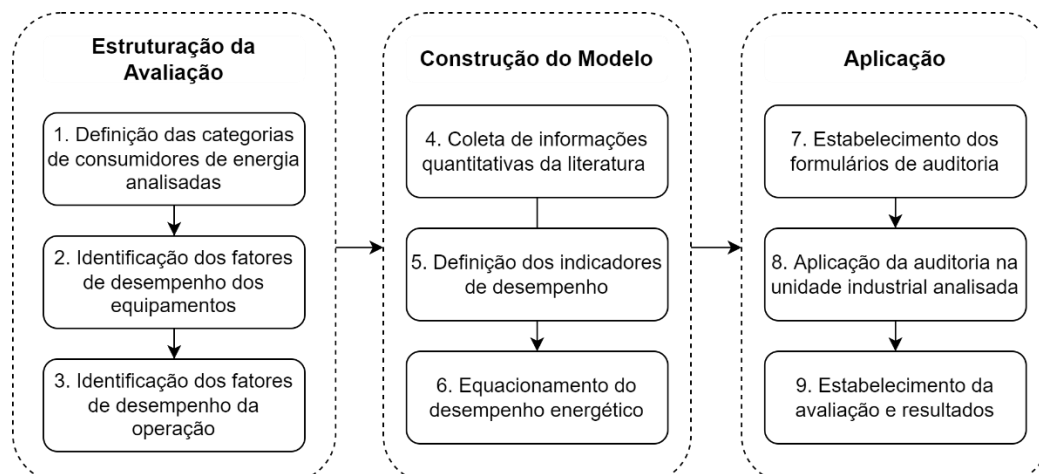
Ar comprimido é utilizado na indústria como forma de transporte e armazenamento de energia. Diversas aplicações utilizam ar comprimido como força motriz, dentre as quais pode-se citar motores pneumáticos, transporte de materiais, ferramentas manuais, sistemas de comando, controle e regulação, etc. (EIPPCB, 2009; SANTOS *et al.*, 2007). Sistemas de ar comprimido representam uma importante parte do consumo de energia em unidades fabris, entre 5% a 25% do consumo total da fábrica (EIPPCB, 2009).

## 3 MÉTODO

A avaliação do desempenho do uso de energia elétrica de unidades industriais proposta neste trabalho está alinhada com as diretrizes da abordagem dos Indicadores de Desempenho. O objetivo geral foi desmembrado em subcategorias, adaptadas para cada categoria de consumo energético. O modelo de diagnóstico em categorias permite a construção de indicadores capazes de informar a situação de cada categoria, apresentando o desempenho e o potencial de economia de energia de cada um. Esta abordagem constitui uma extensão do trabalho desenvolvido por Zanardo *et al.* (ZANARDO *et al.*, 2018), atendo-se a avaliações quantitativas fundamentadas em dados da literatura e favorecendo informações acessíveis da usina.

Tal objetivo foi contemplado através do cumprimento das 9 etapas apresentadas na Figura 3.1.

Figura 3.1. Etapas desenvolvidas durante a concepção do método de avaliação.



Fonte: (O Autor).

As etapas do método são distribuídas em três estágios: a estruturação da avaliação, a construção do modelo e a aplicação. A **estruturação da avaliação** se inicia com uma pesquisa exploratória da literatura acerca da eficiência energética em indústrias de manufatura. Na etapa 1, categorias de sistemas consumidores de energia que estejam presentes em variados setores da indústria e que possibilitem uma avaliação padronizada foram identificadas (Subseção 2.2). As etapas 2 e 3 se baseiam na identificação de

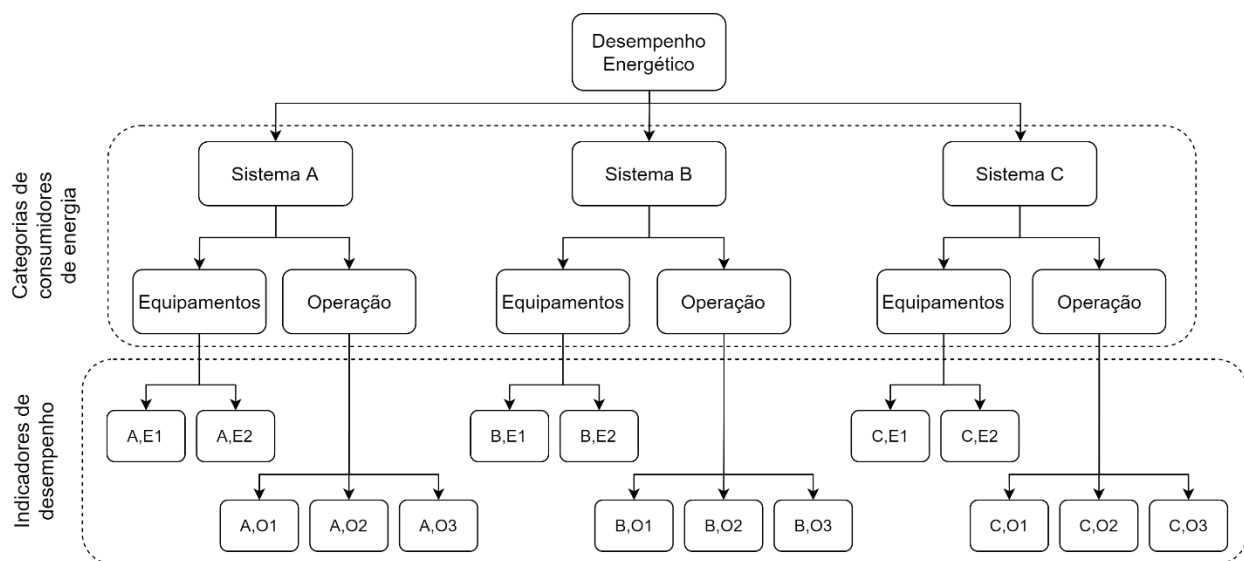


fatores que impactam o desempenho de cada um desses sistemas em relação ao nível de eficiência dos equipamentos instalados e em relação às suas condições de operação, separadamente.

Finalizada a estruturação da avaliação, inicia-se o estágio de **construção do modelo**. Na etapa 4, o aprofundamento da pesquisa bibliográfica identifica informações do impacto energético de cada um dos fatores de desempenho identificados nas etapas 2 e 3. Utilizaram-se relatórios técnicos como os *Best Available Techniques Reference Documents* (BREF) da Comissão Europeia (EIPPCB, 2009), relatórios do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica e relatórios de empresas de diferentes setores industriais. A literatura acadêmica foi consultada através da base de dados Periódicos CAPES da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Este embasamento e as informações permitiram, na etapa 5, a definição dos indicadores de impacto energético para cada fator de desempenho.

Finalmente, a etapa 6 estabelece o equacionamento que concilia os diversos indicadores de desempenho. Desta forma, é possível quantificar o desempenho de uma unidade industrial. A Figura 3.2 ilustra a relação entre estas variáveis.

Figura 3.2. Divisão do desempenho energético da unidade industrial em categorias de consumo de energia (sistemas A, B e C) e indicadores de desempenho de equipamentos (A.E-, B.E-, C.E-) e de operação (A.O-, B.O-, C.O-).



Fonte: (O Autor).

O último estágio da avaliação compreende a **aplicação** do modelo, de forma a testar sua funcionalidade. Sua primeira etapa é o estabelecimento do formulário de auditoria, através do qual são obtidas as informações da unidade industrial analisada para que sejam calculados os índices de desempenho. A etapa 8 constitui o preenchimento do formulário desenvolvido com os dados de equipamentos e operação. Finalmente, na etapa 9 os resultados da aplicação são analisados.

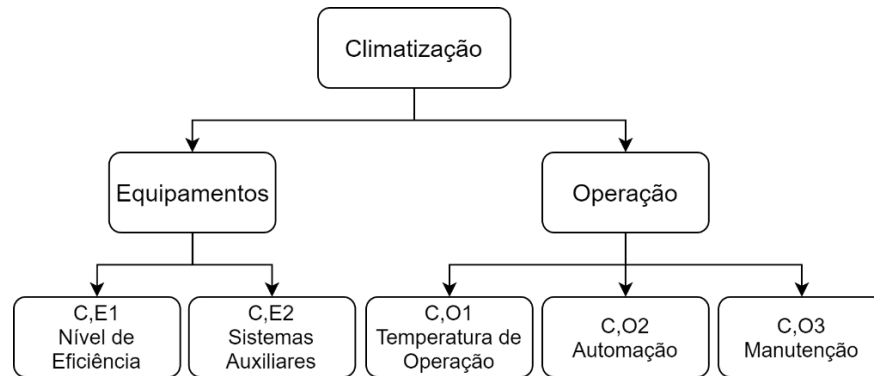
## 4 CONSTRUÇÃO DA MODELAGEM

A etapa inicial na Figura 3.1 é seguida por um aprofundamento da pesquisa bibliográfica e técnica. Os resultados das etapas 2 e 3 da Estruturação da Avaliação e os resultados das etapas 4 a 5 na Construção do Modelo são apresentados para cada categoria, nas Subseções 4.1 a 4.4. Os indicadores desenvolvidos a partir de cada fator de desempenho são apresentados em uma escala de 0 a 1. O valor máximo resultante de um fator de desempenho igual a 1 equivale a um sistema com as condições de mais alta eficiência. A Subseção 4.5 apresenta o equacionamento do desempenho energético da unidade a partir do cálculo dos indicadores.

### 4.1 Climatização

O desempenho da categoria sistema de climatização foi desenvolvido para duas situações: por ambiente climatizado, no caso de sistemas isolados, e para o sistema centralizado. Os fatores de desempenho atribuídos ao equipamento são o seu nível de eficiência e a adoção de sistemas auxiliares. Em relação à operação do sistema, os fatores de desempenho são a temperatura de operação, a existência ou não de automação do sistema e a manutenção. A Figura 4.1 apresenta estas considerações.

Figura 4.1. Fatores de desempenho energético considerados para o sistema de climatização.



Fonte: (O Autor).

#### 4.1.1 Fatores de Equipamento

##### 4.1.1.1 Nível de Eficiência

Para sistemas isolados utilizando aparelhos de ar condicionado tipo janela ou split, a PORTARIA nº 234, de 29 de junho de 2020 do Instituto Nacional de Metrologia (INMETRO) define as classes de eficiência energética (DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2020). É possível obter os requisitos mínimos de eficiência para a classificação do equipamento entre as classes A à F, de acordo com a capacidade do sistema (kW). No caso de sistemas centralizados, o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C) do PROCEL define requisitos mínimos de eficiência para diferentes equipamentos, em função das diferentes classes de eficiência energética (classe A à classe D), diferentes capacidades térmicas (equipamentos de 19 kW até 1055 kW), e tipos de sistemas de ar condicionado como VRF, Multi-split, múltiplos tipos de refrigeradores, entre outros (PROCEL, 2013).

Para estabelecer uma avaliação de desempenho comum sem penalizar sistemas que tenham a eficiência atrelada às suas dimensões, os valores de eficiência são analisados por categorias de capacidade de refrigeração. Foram definidas quatro categorias de capacidade. Para cada uma delas, a Tabela 4.1 apresenta a faixa de eficiência admitida para diferentes equipamentos, de acordo com o INMETRO (DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2020) e PROCEL (PROCEL, 2013).

Tabela 4.1. Maior (classe A) e menor (classe D ou F) coeficiente de eficiência requerido nas diferentes categorias de capacidade.

<b>Categoria de Capacidade</b>	<b>Maior Eficiência</b>	<b>Menor Eficiência</b>
Até 5 TR	5,5 IDRS	2,65 IDRS
5 a 50 TR	3,81 COP	2,4 COP
50 a 400 TR	5,5 COP	3 COP
Acima de 400 TR	6,17 COP	5,2 COP

Fonte: (DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2020; PROCEL, 2013).

O indicador de desempenho do nível de eficiência do equipamento,  $F_{C,E1}$  (Eq. 1) é a razão entre os requisitos de mínima eficiência do equipamento analisado  $R_{Equipamento}$  em relação ao equipamento de maior eficiência  $R_{Maior\ Eficiência}$  na mesma categoria de capacidade.

$$F_{C,E1} = \frac{R_{Equipamento}}{R_{Maior\ Eficiência}} \quad (1)$$

##### 4.1.1.2 Sistemas Auxiliares

No caso de sistemas centralizados, a aplicação de sistemas auxiliares pode também aumentar a eficiência do sistema de climatização. A instalação de um circuito único com fluxo variável nos sistemas existentes pode reduzir o consumo anual de energia em mais de 25% em alguns sistemas (MMA, 2017). A instalação de um Sistema de Ar Exterior Dedicado (DOAS) melhora a qualidade do ar em ambientes com ar-condicionado (ASHRAE, 2019), além de aumentar a eficiência do sistema entre 10 a 15 % (MMA, 2017).

O impacto energético da aplicação de sistemas auxiliares é definido como sendo o valor conservador de 10% do ganho de eficiência. O indicador  $F_{C,E2}$  (Eq. 2) considera tal perda em função do fator de aplicação ( $f_{sa} = 1$ ) ou não ( $f_{sa} = 0$ ) de um circuito único com fluxo variável ou DOAS.

$$F_{C,E2} = 0,9 + 0,1 f_{sa} \quad (2)$$

## 4.1.2 Fatores de Operação

### 4.1.2.1 Temperatura de Operação

Aumentar a temperatura de funcionamento do ar-condicionado em 1°C pode reduzir o consumo de energia em cerca de 5% a 10%, dependendo da diferença de temperatura entre o interior e o exterior (EIPPCB, 2009). A temperatura de referência pode ser definida como a temperatura de conforto determinada por regulação, indicando a possibilidade de redução do consumo. A Tabela 4.2 apresenta as temperaturas de funcionamento do conforto térmico de acordo com (ABNT, 2008).

Tabela 4.2. Temperaturas de Conforto.

Estação do ano	Temperatura (°C)	Umidade Relativa
Verão úmido	22,5 a 25,5	65%
Verão seco	23 a 26	35%
Inverno úmido	21 a 23,5	60%
Inverno seco	21,5 a 24	30%

Fonte: (ABNT, 2008).

O impacto energético do fator temperatura de funcionamento é encontrado conhecendo a temperatura de funcionamento do ar-condicionado estipulada nas diferentes salas da unidade industrial. Estipulou-se que a eficiência do sistema é reduzida em 5% para cada 1°C abaixo da temperatura mais baixa da Tabela 4.2, dependendo a estação do ano. O indicador de desempenho  $F_{C,O1}$  (Eq. 3) considera esta redução sendo  $T_c$  a temperatura de conforto (°C) e  $T_{op}$  a temperatura de operação (°C).

$$F_{C,O1} = 1 - 0,05 (T_c - T_{op}) \quad (3)$$

### 4.1.2.2 Automação

Os impactos da automação e das medidas de controle no consumo de energia do sistema são objeto de múltiplos estudos para o caso de sistemas centralizados (EIPPCB, 2009; FASIUDDIN; BUDAIWI, 2011; JIRU, 2014; MATHEWS *et al.*, 2001). A estratégia de um controle *setback* reduz a frequência com que o sistema de refrigeração opera através da implementação de um cronograma diário, sensores de ocupação ou sensores de CO<sub>2</sub>. A sua aplicação para ventilação atinge até 8% de economia em diferentes cenários de zonas climáticas (JIRU, 2014). A aplicação de um cronograma diário com uma margem de 2 horas e *lead time* pode resultar em economias de energia de 20% (FASIUDDIN; BUDAIWI, 2011). O controle de temperatura baseado em zonas é também relevante no consumo de energia dos sistemas centralizados. Reduz o consumo de energia ao limitar a climatização quando não for necessária em determinadas zonas, atingindo economias de energia de 8% (FASIUDDIN; BUDAIWI, 2011).

Portanto, as medidas de automação do sistema consideradas foram o controle de temperatura baseado em zonas e o controle *setback*, definidos pela instalação de sensores de ocupação, sensores de CO<sub>2</sub>, ou operação em cronograma diário. O impacto no consumo de energia assumido é de 8% e 10%, respectivamente. O indicador de desempenho  $F_{C,O2}$  é dado por

$$F_{C,O2} = 0,82 + 0,08 f_{CZ} + 0,1 f_{CS}, \quad (4)$$

onde  $f_{CZ}$  é o fator da existência ( $f_{CZ} = 1$ ) ou não ( $f_{CZ} = 0$ ) de um controle baseado em zonas.  $f_{CS}$  representa o fator de existência ( $f_{CS} = 1$ ) ou não ( $f_{CS} = 0$ ) de um controle *setback*.

### 4.1.2.3 Manutenção

A manutenção adequada e regular dos sistemas de climatização centralizados evita perdas importantes de energia. Assim, a instalação deveria seguir estritamente um programa de manutenção apropriado para se manter eficiente. A norma ASHRAE 180-2018 (PAXSON *et al.*, 2018) explica como a manutenção deve ser gerida para preservar o estado do sistema, definindo os objetivos da manutenção. Um resumo dos resultados de estudos sobre potenciais economias de energia decorrentes das práticas de

manutenção é encontrado em (IBE, 2012). O relatório estima que o impacto da manutenção sobre a eficiência do sistema varia de 5% a 20% em edifícios comerciais. O valor médio de economia de energia dos estudos é de 15%, sendo adotado neste trabalho.

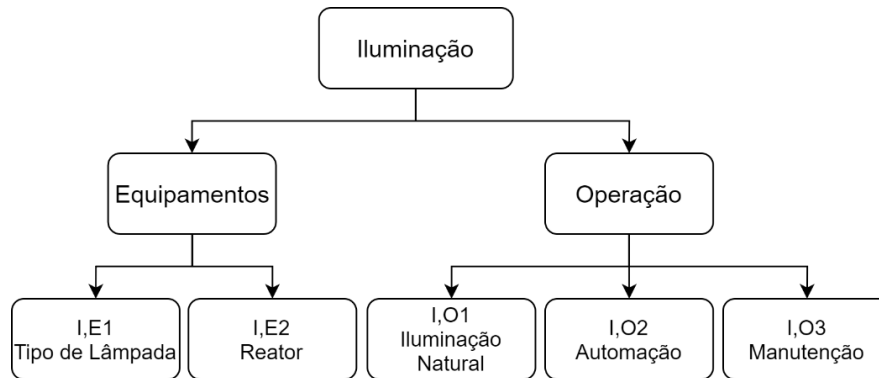
O método propõe implementar a exigência de um programa de manutenção seguindo as Normas ASHRAE em conformidade com as frequências de tarefas, pelo menos trimestralmente. Desta forma, o indicador de desempenho  $F_{C,O3}$  (Eq. 5) para o fator da existência ( $f_M = 1$ ) ou não ( $f_M = 0$ ) de um programa de manutenção apropriado, de acordo com os padrões ASHRAE.

$$F_{C,O3} = 0,85 + 0,15 f_M \quad (5)$$

## 4.2 Iluminação

O desempenho da categoria de iluminação é calculado por cada ambiente iluminado. O desempenho dos equipamentos de iluminação instalados é considerado pelo tipo de lâmpada instalada e tipo dos reatores externos, caso sejam aplicados. Em relação à operação do sistema, os fatores de desempenho são a utilização de luz natural, a automação do sistema e a manutenção. A Figura 4.2 apresenta a organização adotada para o sistema de iluminação.

Figura 4.2. Fatores de desempenho energético considerados para o sistema de iluminação.



Fonte: (O Autor).

### 4.2.1 Fatores de Equipamento

#### 4.2.1.1 Tipos de Lâmpadas

O rendimento da iluminação pode ser estimado considerando o tipo de lâmpadas instaladas. Lâmpadas LED apresentam alto rendimento e vida útil, amplamente instaladas para economia de energia em iluminação. Lâmpadas incandescentes, por outro lado, apresentam altos consumos energéticos e baixa vida útil (COPEL, 2005). O rendimento é representado pelos valores de eficiência luminosa (COPEL, 2005). É possível encontrar um valor para o desempenho relativo entre os diferentes tipos de lâmpadas considerando tanto a eficiência luminosa como sua vida útil média, tendo como parâmetro o resultado para a lâmpada de LED. A Eq. 6 apresenta o fator de desempenho  $F_{I,E1}$ , sendo  $e_{luminosa}$  a eficiência luminosa do tipo de lâmpada,  $t_{\text{útil}}$  o tempo de vida útil do tipo de lâmpada, e sendo  $e_{LED}$  e  $t_{LED}$  a eficiência luminosa e o tempo de vida útil, respectivamente, de uma lâmpada LED.

$$F_{I,E1} = \frac{e_{luminosa} t_{\text{útil}}}{e_{LED} t_{LED}} \quad (6)$$

A Tabela 4.3 apresenta a eficiência luminosa (lm/W) e vida útil média de diferentes tipos de lâmpadas (SCHINAZI *et al.*, 2018), juntamente com o indicador do fator de desempenho de cada tipo.

Tabela 4.3. Desempenho de diferentes tipos de lâmpadas.

Tipo de lâmpada	Eficiência luminosa (lm/W)	Vida útil média (h)	Desempenho
LED	60	32.500	100%
Descarga de alta pressão	84	28.000	100%
Fluorescente compacta	52	8.000	21%
Fluorescente tubular	53	15.500	42%
Incandescente	15	1000	1%

Halógena	15	1125	1%
----------	----	------	----

Fonte: (SCHINAZI *et al.*, 2018).

#### 4.2.1.2 Reatores

Algumas lâmpadas, como lâmpadas fluorescentes, a vapor de mercúrio e a vapor de sódio (COPEL, 2005), necessitam da instalação associada a reatores ligados à seu circuito elétrico (PROCEL, 2011), e podem se apresentar de duas formas: reatores eletromagnéticos ou reatores eletrônicos. Os reatores eletromagnéticos são mais comuns em instalações antigas e apresentam perdas maiores do que os eletrônicos (PROCEL, 2011). Estas perdas variam de acordo com a potência e com o tipo da lâmpada acionada, mas a utilização de um reator eletromagnético invés de um reator eletrônico pode implicar em um impacto 18% maior no consumo da lâmpada (CASTRO; LUCIANO, 2012). Em média, este aumento é de 7%. Desta forma, o indicador de desempenho é calculado como na Eq. 7, sendo  $f_R$  o fator da instalação de um reator eletrônico ( $f_R = 1$ ) ou eletromagnético ( $f_R = 0$ ).

$$F_{I,E2} = 0,93 + 0,07 f_R \quad (7)$$

### 4.2.2 Fatores de Operação

#### 4.2.2.1 Iluminação Natural

O aproveitamento da iluminação natural representa um potencial de economia na indústria (MME, 2007). A instalação de um sistema de relés fotoelétricos identifica a presença de luz natural e controla o número de lâmpadas acesas (COPEL, 2005; PROCEL, 2011). O aproveitamento da luz natural com aplicação de relés fotoelétricos pode gerar economias da ordem de 11% a 17% (HAQ *et al.*, 2014), podendo chegar a 27% em escritórios com sensores de luz (JENNINGS *et al.*, 2000).

Um valor de economia de energia de 11% para o ambiente com o aproveitamento de iluminação natural foi adotado. Ainda, com a aplicação de relés fotoelétricos, é considerada uma adição de 6% de economia, totalizando 17% como estimado por Haq *et al.* (2014). Desta forma, o indicador de desempenho  $F_{I,O1}$  (Eq. 8) depende do fator de aproveitamento da luz natural ( $f_{LN} = 1$ ) ou não ( $f_{LN} = 0$ ), e do fator da instalação de relés fotoelétricos ( $f_{RF} = 1$ ) ou não ( $f_{RF} = 0$ ).

$$F_{I,O1} = 0,83 + 0,11 f_{LM} + 0,06 f_{RF} \quad (8)$$

#### 4.2.2.2 Automação

Outras medidas de automação do sistema podem ser implementadas para aumentar a eficiência energética da iluminação, como os sensores de presença e minuterias. Esses dispositivos otimizam a utilização do sistema de iluminação de acordo com a ocupação do lugar e podem representar economias de energia entre 20% e 30% (HAQ *et al.*, 2014; JENNINGS *et al.*, 2000; WAGIMAN *et al.*, 2020). Todavia, estes percentuais são menores quando reportados por fabricantes como SX Lightning, que informa economia de 15% com sensores e um sistema de controle de alta tecnologia (SX LIGHTNING, [s. d.]).

Um valor de 10% de economia de energia é considerado para os sistemas com automação, em sensores de presença e minuterias. O indicador de desempenho  $F_{I,O2}$  (Eq. 9) depende do fator de instalação ( $f_A = 1$ ) ou não ( $f_A = 0$ ) de dispositivos de automação do sistema.

$$F_{I,O2} = 0,9 + 0,10 f_A \quad (9)$$

#### 4.2.2.3 Manutenção

A manutenção periódica dos sistemas de iluminação pode gerar economias de energia. A limpeza das lâmpadas e luminárias pode aumentar o iluminamento significativamente (COPEL, 2005). De acordo com Santos *et al.* (2007), a manutenção inadequada da limpeza das luminárias compromete, em geral, até 20% da iluminância média no ambiente. Isso pode ser quantificado pelo fator de manutenção, que apresenta a razão da iluminância média no plano de trabalho pela iluminância média em uma instalação nova (SANTOS *et al.*, 2007). A Tabela 4.4 apresenta valores do fator de manutenção para diferentes tipos de ambiente e períodos sem limpeza.

Tabela 4.4. Fator de manutenção para diferentes tipos de ambiente e períodos de limpeza.

Período de uso sem limpeza (meses)	Ambiente limpo	Ambiente médio	Ambiente sujo
---------------------------------------	----------------	----------------	---------------

0	1	1	1
2	0,97	0,92	0,85
4	0,95	0,87	0,76
6	0,93	0,85	0,7
8	0,92	0,82	0,66
10	0,91	0,8	0,63
12	0,9	0,78	0,61
14	0,89	0,77	0,59
16	0,88	0,76	0,57
18	0,87	0,75	0,56
20	0,86	0,74	0,54

Fonte: (SANTOS *et al.*, 2007).

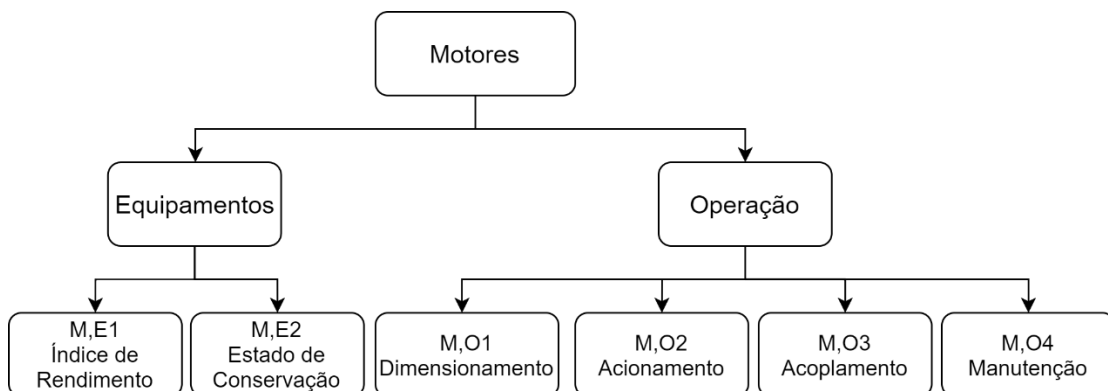
O fator de manutenção é considerado para a avaliação da manutenção dos sistemas de iluminação. O indicador de desempenho é calculado como na Eq. 10, sendo  $F_{I,03}$  o indicador de desempenho,  $f_M$  o fator de manutenção em função do período de uso sem limpeza em meses ( $p$ ) e do tipo de ambiente ( $a$ ), de acordo com a Tabela 4.4.

$$F_{I,03} = f_M(p, a) \quad (10)$$

### 4.3 Motores Elétricos

O desempenho da categoria de sistemas de motores é calculado considerando a situação de cada motor. O desempenho de equipamento é considerado por seu índice de rendimento e seu estado de conservação. Em relação à operação do sistema, os fatores de desempenho são o dimensionamento, acionamento, acoplamento e manutenção, conforme apresentado na Figura 4.3.

Figura 4.3. Fatores de desempenho energético considerados para a categoria de sistemas de motores.



Fonte: (O Autor).

#### 4.3.1 Fatores de Equipamento

##### 4.3.1.1 Índice de Rendimento

Motores elétricos são comumente classificados entre motores padrão ou motores de alto rendimento. Porém, a evolução tecnológica implica que o ano de fabricação do motor também importa na quantificação de seu desempenho. A informação necessária para calcular o desempenho do motor é seu Índice de Rendimento (IR). A partir dele, é possível estimar o rendimento nominal do motor dependendo de sua potência nominal e do número de polos. As classes IR, as normas técnicas que as regulamentaram e os anos em que foram comercializados são apresentados abaixo.

- **Motores de linha padrão (IR1):** Rendimentos nominais mínimos para os diferentes números de polos obtidos no Decreto nº 4.508 de 11 de dezembro de 2002 (CASA CIVIL, 2002), apresentados no Anexo A. Foram definidos em normas nacionais pela primeira vez em 2000 e comercializado até 2010 (FERREIRA, 2016). Eram os motores padrão anteriores a 2010.

- **Motores de alto rendimento (IR2):** Rendimentos nominais mínimos para os diferentes números de polos obtidos na Portaria Interministerial nº 553 de 2005 (MME, 2005), apresentados no Anexo B. Foram definidos em normas nacionais pela primeira vez em 1996 e comercializados até 2019 (FERREIRA, 2016). Eram considerados motores de alto até 2010, e considerados motores padrão até 2019.
- **Motores premium (IR3):** Rendimentos nominais mínimos para os diferentes números de polos obtidos na Portaria Interministerial nº 1, de 29 de junho de 2017 (MME, 2017), apresentados no Anexo C. Foram definidos em normas nacionais pela primeira vez em 2013, e é desde 2019 o índice de rendimento padrão (FERREIRA, 2016). Assim, eram considerados motores de alto rendimento até 2019, e atualmente são os motores padrão.
- **Motores super premium (IR4):** Rendimentos nominais mínimos para os diferentes números de polos obtidos na norma IEC 60034-30-1 (WEG, 2016), apresentados no Anexo D. São definidos em normas internacionais. São os motores de alto rendimento desde 2019.
- **Motores ultra premium (IR5):** Rendimentos nominais mínimos ainda não estabelecidos em normas nacionais. Supera em três níveis os rendimentos mínimos exigidos (FERREIRA, 2016).

A partir da classe IR, da potência nominal e do número de polos, é possível obter o rendimento nominal do motor definido pela respectiva regulação. O desempenho considerado neste trabalho apresenta a relação com o motor de melhor rendimento para a mesma aplicação (Eq. 11).

$$F_{M,E1} = \frac{f_M(IR, p, n)}{f_{IR4}(p, n)} \quad (11)$$

Onde  $f_M$  é o rendimento nominal mínimo para o motor em função da classe IR ( $IR$ ), da potência nominal ( $p$ ) e do número de pólos ( $n$ ), e  $f_{IR4}$  o rendimento nominal mínimo para um motor IR4.

#### 4.3.1.2 Estado de Conservação

Motores que acumulam mais horas de operação têm seu desempenho diminuído pela redução natural de seu estado de conservação. Esse efeito é representado nesse trabalho pela manutenção por rebobinagens. Cada rebobinagem realizada no motor afeta seu rendimento entre 3% a 7,5% (WEG, 2019). Além disso, o impacto da idade do motor pode ser considerado através destes procedimentos. A Tabela 4.5 apresenta uma relação entre a idade do motor e o número de rebobinagens (WEG, 2021a).

Tabela 4.5. Relação entre a idade do motor e o número de rebobinagens.

Idade do motor	Número de rebobinagens
Até 5 anos	0
5 a 13 anos	1
13 a 21 anos	2
21 a 30 anos	3
30 a 38 anos	4
38 a 46 anos	5
Acima de 46 anos	6

Fonte: (WEG, 2021a).

Como apresentado na Eq. 12, o indicador de desempenho  $F_{M,E2}$  considera o número de rebobinagens informada  $n_R$ , ou a estimativa em função da idade do equipamento ( $i$ ).

$$F_{M,E2} = 1 - 0,03 n_R(i) \quad (12)$$

## 4.3.2 Fatores de Operação

### 4.3.2.1 Dimensionamento

O carregamento do motor em relação à potência nominal tem grande impacto no rendimento durante a operação. A Tabela 4.6 apresenta o coeficiente multiplicador de rendimento máximo, no caso de motores de indução trifásicos de até 100 kW (COPEL, 2005). O motor pode ser considerado bem dimensionado para cargas entre 60% e 100% da potência nominal (ELEKTRO, 2011).

Tabela 4.6. Coeficiente multiplicador de rendimento máximo em relação ao carregamento.

Carregamento do motor	Rendimento
100%	94%
90%	98%
80%	99%
75%	100%
70%	100%
60%	96%
50%	94%
40%	88%
30%	77%
20%	60%
15%	45%

Fonte: (COPEL, 2005).

O indicador de desempenho é dado por  $F_{M,01}$ , Eq. 13, sendo  $f_c$  o coeficiente multiplicador de rendimento máximo em função do carregamento ( $c$ ) e da potência nominal ( $p$ ).

$$F_{M,01} = f_c(c, p) \quad (13)$$

#### 4.3.2.2 Acionamento

O uso de dispositivos de partida ou variadores de velocidade, principalmente o soft-starter ou o inversor de frequência, são vantajosos para aplicações de carga variável e contribuem com o bom rendimento de um sistema de motores (EIPPCB, 2009). Com os inversores de frequência, a potência do motor é adaptada para a variação da carga e desperdícios de energia são eliminados (WEG, 2005). Diferentemente dos inversores de frequência, os soft-starters controlam a aceleração da carga no acionamento, permitindo a aceleração gradual da carga até a rotação nominal (WEG, 2021b). A redução no consumo de energia pela aplicação de variadores de velocidade pode chegar até 50% (EIPPCB, 2009), sendo de 15% na maior parte dos casos (SAIDUR *et al.*, 2012). O estudo de caso desenvolvido por (LEITE, 2018) identificou uma redução de 16,5% do consumo de energia elétrica antes e após a instalação de um inversor de frequência em um motor de bomba centrífuga.

A partir destas informações, motores de carga intermitente que não tenham um soft-starter ou inversor de frequência instalados serão considerados tendo uma perda de 15% de desempenho. O indicador de desempenho é calculado como na Eq. 14, sendo  $F_{M,02}$  o indicador de desempenho,  $f_{VV}$  o fator de instalação ( $f_{VV} = 1$ ) ou não ( $f_{VV} = 0$ ) de dispositivo variador de velocidade.

$$F_{M,02} = 0,85 + 0,15 f_{VV} \quad (14)$$

#### 4.3.2.3 Acoplamento

O sistema de transmissão do motor para a carga é uma importante fonte de perdas, chegando até 45% de toda a energia cedida ao motor (EIPPCB, 2009). Cerca de um terço dos motores nos setores industrial e comercial utilizam correias (US DOE, 2012), mas certos tipos de acoplamentos são mais adequados do que outros, oferecendo potenciais economias de energia (US DOE, 2012). A Tabela 4.7 relaciona os rendimentos dos acionamentos por diferentes acoplamentos (CNI, 2009).

Tabela 4.7. Rendimento para diferentes acoplamentos e valor considerado.

Tipo de acoplamento	Faixa de Rendimento	Rendimento considerado
Direto	100%	100%
Embreagem eletromagnética	87% - 98%	92,5%
Polia com correia plana	95% - 98%	96,5%
Polia com correia em V	97% - 99%	98%
Engrenagem	96% - 99%	97,5%
Correia dentada	97% - 98%	97,5%
Acoplamento hidráulico	100%	100%

Fonte: (CNI, 2009).

O indicador de desempenho é  $F_{M,03}$  (Eq. 15), sendo  $f_A$  o rendimento considerado para diferentes acoplamentos ( $a$ ).



$$F_{M,03} = f_A(a) \quad (15)$$

#### 4.3.2.4 Manutenção

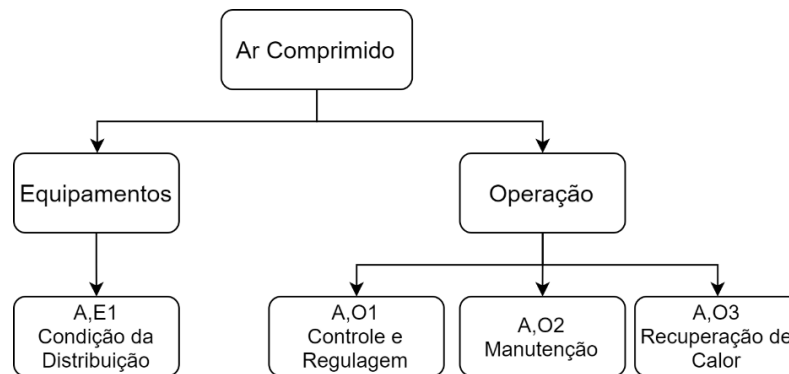
O cumprimento de um programa adequado de manutenção corretiva e preventiva de motores elétricos é a principal forma de evitar as perdas devido a danos nas máquinas (COPEL, 2005). Práticas inadequadas de reparação podem reduzir seu desempenho em 1%, ou até 4% no caso de motores antigos (EIPPCB, 2009). Esse fator foi considerado na Equação 16, sendo  $f_M$  a adoção ( $f_M = 1$ ) ou não ( $f_M = 0$ ) de um programa de manutenção corretivo e preventivo de motores elétricos, gerando um impacto de 2,5%.

$$F_{M,04} = 0,975 + 0,025f_M \quad (16)$$

## 4.4 Sistemas de Ar Comprimido

O desempenho da categoria de sistemas de ar comprimido é calculado para o sistema como um todo. O desempenho de equipamentos foi avaliado pelas condições de conservação do sistema de distribuição. Em relação à operação do sistema, os fatores de desempenho são a adoção de controle e regulagem, a manutenção e recuperação de calor. A Figura 4.4 apresenta estas considerações.

Figura 4.4. Fatores de desempenho energético considerados para a categoria de sistemas de ar comprimido.



Fonte: (O Autor).

### 4.4.1 Fatores de Equipamento

#### 4.4.1.1 Condição do Sistema de Distribuição

As redes de distribuição de ar comprimido devem ser projetadas de modo a minimizar a queda de pressão (ROCHA, C. R.; MONTEIRO, 2005; US DOE, 2004). A redução de 1 bar de pressão de trabalho de compressores resulta em economias de energia na faixa de 6% a 8% (EIPPCB, 2009). O projeto deve considerar que a queda de pressão entre o ponto de geração e o de consumo mais distante não pode ultrapassar o limite de 0,3 bar ou 5% da pressão de geração (ROCHA, C. R.; MONTEIRO, 2005).

Desta forma, se a maior queda de pressão da geração até um uso final for maior que o limite de 0,3 bar, é considerada uma perda de 6% para cada 1 bar excedido. O indicador de desempenho  $F_{A,E1}$  (Eq. 17) depende da pressão excedida em bar  $p_{QP}$  além do limite de queda de pressão.

$$F_{A,E1} = 1 - 0,06 p_{QP} \quad (17)$$

### 4.4.2 Fatores de Operação

#### 4.4.2.1 Controle e Regulagem

Uma situação ideal no controle do sistema de compressores seria a capacidade total do compressor em operação corresponder exatamente à demanda de consumo de ar. Os sistemas de controle fazem a regulagem de carregamento e de modos de operação de um conjunto de compressores, otimizando sua operação (ROCHA, C. R.; MONTEIRO, 2005). Um dos sistemas considerados é o controle eletrônico da velocidade pelos inversores de frequência, que adapta a capacidade do compressor às necessidades de ar (ATLAS COPCO, 2015). A economia de energia pode chegar até 30%, sendo o ganho médio de 15% (EIPPCB, 2009). Ainda, no caso da utilização de um conjunto de compressores, sistemas inteligentes de controle e regulagem trocam dados operacionais com os compressores e controlam seus modos

operacionais, otimizando o desempenho do sistema. A economia média de energia resultante é estimada em 12% (EIPPCB, 2009). O indicador de desempenho  $F_{A,01}$  é calculado pela Eq. 18,  $f_{CE}$  a utilização ( $f_{CE} = 1$ ) ou não ( $f_{CE} = 0$ ) de controle eletrônico da velocidade pelos inversores de frequência, e  $f_{SI}$  a utilização ( $f_{SI} = 1$ ) ou não ( $f_{SI} = 0$ ) de sistemas inteligentes de controle e regulação no caso da utilização de um conjunto de compressores.

$$F_{A,01} = 0,73 + 0,15 f_{CE} + 0,12 f_{SI} \quad (18)$$

#### 4.4.2.2 Manutenção

No que tange as condições de manutenção do sistema de ar comprimido, foram considerados a filtragem de ar e a detecção e reparo de vazamentos. A regularidade na substituição dos filtros de ar tem um importante impacto na eficiência do sistema, sendo que a inadequação eleva em cerca de 2% os custos anuais de energia do sistema ar comprimido (ROCHA, C. R.; MONTEIRO, 2005). Já os vazamentos de ar comprimido são frequentes, e a redução de vazamentos tem o maior potencial de economia de energia do sistema de ar comprimido (ROCHA, C. R.; MONTEIRO, 2005; US DOE, 2004). Uma instalação com pouca manutenção pode ter perdas de cerca de 20% da capacidade de produção de ar comprimido (EIPPCB, 2009). De forma conservadora, a adoção de um programa de detecção e reparo de vazamentos é considerada como economizando 10% de perdas de energia da instalação.

O indicador de desempenho  $F_{A,02}$  (Eq. 19), onde  $f_F$  é a troca regular ( $f_F = 1$ ) ou não ( $f_F = 0$ ) dos filtros do compressor, e  $f_V$  é a adoção ( $f_V = 1$ ) ou não ( $f_V = 0$ ) de um programa de detecção e reparo de vazamentos.

$$F_{A,02} = 0,88 + 0,02 f_F + 0,10 f_V \quad (19)$$

#### 4.4.2.3 Recuperação de calor

Muito da energia elétrica que abastece um compressor é convertida em calor, que é simplesmente perdido ejetado para a sala de máquinas. Para um sistema de múltiplos compressores, essa energia pode ser aproveitada por recuperação de calor (CAGI, 2012). Um sistema bem dimensionado pode recuperar até 90% da energia térmica, aplicado em trabalho por ar ou água aquecidos (EIPPCB, 2009). A recuperação de calor é considerada aumentando em 20% o desempenho do sistema de ar comprimido. O indicador de desempenho  $F_{A,03}$  (Eq. 20) é calculado pela utilização ( $f_{RC} = 1$ ) ou não ( $f_{RC} = 0$ ) de um sistema de recuperação de calor, se for aplicável.

$$F_{A,03} = 0,8 + 0,20 f_{RC} \quad (20)$$

## 4.5 Equacionamento do Desempenho Energético

A etapa 6 da Figura 3.1 define o equacionamento do diagnóstico energético a partir dos indicadores de desempenho. O cálculo do resultado do desempenho de cada componente é considerado como sendo o produto dos diferentes fatores de desempenho. O desempenho resultante é menor que o desempenho de cada fator individualmente, pois a energia perdida é o acúmulo das perdas por cada uma das diferentes causas no equipamento. O resultado pode, todavia, ser igual a 100%, dado que o resultado do desempenho é uma comparação com o *benchmark* da melhor tecnologia disponível para uma determinada condição e demanda. Um desempenho igual a 100% significa que a instalação é ideal em suas condições, de acordo com as referências utilizadas neste trabalho.

O sistema de motores, a iluminação e a climatização do tipo isolada são categorias compostas por múltiplos componentes, sendo respectivamente os motores, os ambientes iluminados e os ambientes climatizados. Nestes casos, o desempenho de cada componente é calculado como apresentado na Equação 21. O desempenho do componente  $i$ ,  $D_i$ , é resultado da multiplicação de todos os seus  $n$  fatores de desempenho de equipamento e  $m$  fatores de desempenho de operação estabelecidos para sua categoria, em porcentagem.

$$D_i = 100\% \prod_n F_{i,En} \prod_m F_{i,Om} \quad (21)$$

O desempenho da categoria composta por estes componentes é calculado pela Equação 22, onde o desempenho da categoria  $s$ ,  $D_s$ , é dado pela razão entre a média ponderada e o consumo energético  $C_i$  do desempenho de cada componente  $D_i$ .

$$D_s = \frac{\sum_i C_i D_i}{\sum_i C_i} \quad (22)$$

Caso o desempenho da categoria de consumo de energia seja calculado diretamente para o sistema como um todo, como a climatização centralizada ou sistema de ar comprimido, o desempenho da categoria  $s$ ,  $D_s$ , é resultado da multiplicação de todos os seus  $n$  fatores de desempenho de equipamento e  $m$  fatores de desempenho de operação, em porcentagem.

$$D_s = 100\% \prod_n F_{s,En} \prod_m F_{s,Om} \quad (23)$$

O cálculo do desempenho  $D_U$  da unidade industrial analisada é apresentado na Equação 24, sendo a razão entre a média ponderada e o consumo energético total  $C_s$  do desempenho de cada categoria  $D_s$ .

$$D_U = \frac{\sum_s C_s D_s}{\sum_s C_s} \quad (24)$$

Este valor, em porcentagem, representa a relação das condições da unidade analisada com uma unidade de *benchmark*, que considera as melhores tecnologias e modos de operação em um sistema similar. Quanto mais próximo o resultado for de 100%, mais as condições da unidade analisada se aproximam do caso idealizado.

## 5 APLICAÇÃO

A aplicação para teste da funcionalidade do modelo iniciou-se na etapa 7 da Fig. 3.1, com o estabelecimento do formulário de auditoria. Foi realizada a coleta de dados que permitiu o diagnóstico energético da unidade industrial na etapa 8 e a avaliação de seus resultados na etapa 9. A aplicação foi realizada em uma unidade de processamento de grãos localizada no estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

### 5.1 Descrição da Unidade Industrial Analisada

A unidade industrial de processamento de grãos analisada neste trabalho apresentava suspeitas de baixo desempenho energético, despertando assim o interesse por parte de sua gestão em realizar o diagnóstico do consumo energético e identificar oportunidades de melhoria. A unidade permitiu o acesso aos dados das instalações. Os equipamentos consumidores de energia se dividem em dois armazéns, pátio externo e ambiente administrativo. São 66 motores instalados nos dois armazéns que têm funções de recebimento, aeração, secagem e drenagem. A iluminação é feita em todos os ambientes da unidade, totalizando 346 lâmpadas do tipo fluorescente tubular e compacta, LED e de descarga de alta pressão. A climatização é do tipo isolada, sendo utilizada apenas nos escritórios do ambiente administrativo, contando com 15 aparelhos Split de classe INMETRO A. O sistema de ar comprimido se restringe à aplicação direta de dois compressores, um para secagem e outro para descarga.

O formulário aplicado no estudo de caso analisado foi organizado em um editor de planilhas e enviado para o responsável na empresa. Após o recebimento, o formulário foi preenchido pela equipe da empresa em menos de uma semana, evidenciando a praticidade do método no quesito obtenção das informações. Os resultados da avaliação dependem da confiabilidade das informações fornecidas pela empresa.

### 5.2 Aplicação da Avaliação

Nesta seção, é apresentada a aplicação detalhada da avaliação em um motor de Recebimento do Armazém B, além de apresentar o resultado de cada categoria de consumo de energia, para chegar à avaliação geral. Os dados fornecidos do motor trifásico identificado como Pré-Limpeza TL040A são apresentados abaixo:

Quadro 5.1. Dados fornecidos do motor identificado como Pré-Limpeza TL040A.

Informação requerida	Dado fornecido
Potência nominal	20 CV

Ano de Fabricação	2003
Número de Polos	-
Velocidade Angular	1170 RPM
Índice de Rendimento	-
Nível de Rendimento	Padrão
Carregamento típico	-
Dimensionamento	Padrão
Tipo de Acionamento	Outro (sem soft-starter ou inversor de freq.)
Tipo de Carga	Intermitente
Rebobinagens	-
Plano de Manutenção Periódica	Não
Tipo de Acoplamento	Direto
Meses de operação por ano	3 horas
Dias de operação na semana	7 horas
Horas de operação por dia	8 horas

Fonte: (O Autor).

Estas informações foram utilizadas para calcular o desempenho do componente Pré-Limpeza TL040A através dos indicadores de Motores, da Figura 4.3. Os fatores de equipamento deste componente foram calculados através das Equações 11 e 12. O fator de índice de desempenho demanda informações da potência nominal do motor, o número de polos e o índice de desempenho. O Quadro 5.1 fornece parte destas informações. Foi estimado que este motor foi construído de acordo com o rendimento nominal mínimo para o padrão IR1, a partir da data de fabricação do motor em 2003 e de seu nível de rendimento ser padrão. Com a velocidade angular de 1170 RPM, foi estimado que o motor é de 6 polos, com escorregamento de 2,5%, através da equação do número de polos e da equação do escorregamento (UMANS, 2014). De acordo com o Anexo A, o rendimento nominal mínimo para motores IR1 de potência 20 CV e 6 polos é 89,5%, e para motores IR4 o rendimento nominal mínimo seria de 92,9%. De acordo com a Equação 11, o resultado do fator de índice de desempenho,  $F_{M,E1}$ , foi de 0,963. Em seguida, o fator de estado de conservação foi encontrado a partir do ano de fabricação. Como este motor tem 18 anos, foi assumido o impacto de duas rebobinagens, de acordo com a Tabela 4.5, e o fator  $F_{M,E2}$  resultou em 0,94.

Os fatores de operação deste componente foram calculados como expresso nas equações 13, 14, 15 e 16. O fator do dimensionamento depende do carregamento típico da máquina, que é desconhecido, mas foi informado como padrão. Assim, o fator de dimensionamento  $F_{M,O1}$  foi de 1, de acordo com a Equação 13. Como este motor tem operação intermitente, mas não aplica nenhum dos dispositivos variadores de velocidade considerados, do tipo soft-starter ou inversor de frequência, a Equação 14 resultou em um fator de desempenho de acionamento  $F_{M,O2}$  igual a 0,85. O fator de desempenho do acoplamento considera o tipo de acoplamento instalado entre motor e carga, que é tipo direto no motor analisado. De acordo com a Tabela 4.7 e Equação 15, isso resultou no fator  $F_{M,O3}$  igual a 1. O fator de manutenção depende do cumprimento de um programa adequado de manutenção corretiva e preventiva de todos os motores, que não é realizado nesta instalação. Assim, de acordo com a Equação 16, o fator  $F_{M,O4}$  foi 0,975.

A partir dessas definições, o motor Pré-limpeza TL040A apresenta o desempenho  $D_{TL040A}$  igual a 74,8%, de acordo com a Equação 21. Este valor representa a consideração de todas as perdas de energia inerentes à não utilização das tecnologias e padrões de operação de maior rendimento apresentado na literatura de eficiência energética. A Tabela 5.1 apresenta os resultados calculados.

Tabela 5.1. Resultados dos fatores de desempenho do motor Pré-Limpeza TL040A.

<b>Fator de Desempenho</b>	<b>Resultado</b>
Índice de Desempenho $F_{M,E1}$	0,963
Estado de Conservação $F_{M,E2}$	0,94
Dimensionamento $F_{M,O1}$	1
Acionamento $F_{M,O2}$	0,85
Acoplamento $F_{M,O3}$	1
Manutenção $F_{M,O4}$	0,975
<b>Desempenho do componente <math>D_{TL040A}</math></b>	<b>74,8%</b>

Fonte: (O Autor).

A avaliação conjunta dos demais 65 motores gerou o desempenho da categoria, aplicando-se as equações de média ponderada 22 com base na estimativa do consumo de energia anual de cada componente. No caso do motor Pré-Limpeza TL040A, o consumo anual de energia foi estimado em 10,7 MWh como resultado da potência nominal integrada no tempo. Todos os motores da unidade resultaram na estimativa de consumo anual total de 609,4 MWh e potência instalada total de 1101 kW. Foi calculado o desempenho do sistema de motores  $D_{Motores}$  foi 84,6%.

Em relação ao sistema de climatização, a aplicação em um sistema isolado é mais simples do que em um sistema de climatização central, sendo utilizadas apenas as equações 1 e 3. São 15 ambientes climatizados por equipamentos tipo Split de nível INMETRO A. As temperaturas de operação são mantidas dentro das recomendações normativas. Aplicando a Equação 22 para o desempenho do sistema de climatização, o resultado foi um desempenho de 100%. O consumo anual estimado de energia foi de 19,20 MWh.

O sistema de iluminação é composto por 346 lâmpadas, sendo 120 lâmpadas fluorescentes tubulares e 47 lâmpadas fluorescentes compactas, de rendimento mais baixo, e 155 lâmpadas LED e 24 de descarga de alta pressão, de rendimento alto. Estas lâmpadas são distribuídas entre quatro ambientes, o Armazém A, Armazém B, Pátio Externo e Escritórios. Existem três reatores externos instalados, dois do tipo eletromagnético e um eletrônico. Os ambientes fazem aproveitamento da luz natural e têm relés fotoelétricos instalados, mas nenhum tem dispositivos de automação do sistema. Ainda, o tempo para a limpeza de lâmpadas e luminárias é de 6 meses. As Equações 6 a 10 foram aplicadas para cada ambiente, e a Equação 22 forneceu o resultado do desempenho do sistema de iluminação de 51,19%. O consumo anual estimado de energia foi de 66,10 MWh.

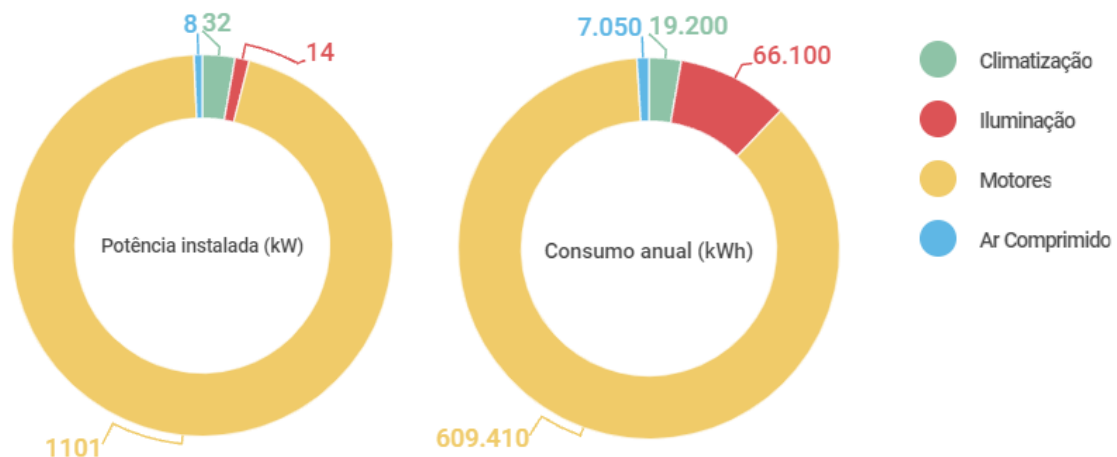
O sistema de ar comprimido da unidade industrial é a aplicação direta de dois compressores, um em secagem e um em descarga. Não existe uma rede de distribuição de ar comprimido além do uso direto, não se fazendo necessário um programa de detecção e reparo de vazamentos. Não há necessidade neste caso de um sistema de controle e regulagem de compressores instalados isoladamente, nem escala para o aproveitamento de energia residual. Ambos os compressores têm demanda de vazão variável, mas nenhum apresenta variadores de velocidade instalados. Não existe troca regular dos filtros dos compressores. A partir destas informações, as equações 18 e 19 foram aplicadas para encontrar os fatores de desempenho do sistema de ar comprimido, e a Equação 23 foi aplicada para encontrar o desempenho resultante de 83,30%. Seu consumo anual de energia foi estimado em 7,05 MWh.

A partir desses resultados, o desempenho da unidade foi estimado pelo cálculo apresentado na Equação 24. O desempenho resultante  $D_U$  é 81,9%.

### 5.3 Análise dos Resultados

A Figura 5.1 apresenta a distribuição da potência instalada e a estimativa de consumo anual de energia em cada categoria de consumo da unidade analisada.

Figura 5.1. Distribuição da potência instalada e consumo anual estimado nas categorias de consumo da unidade analisada.

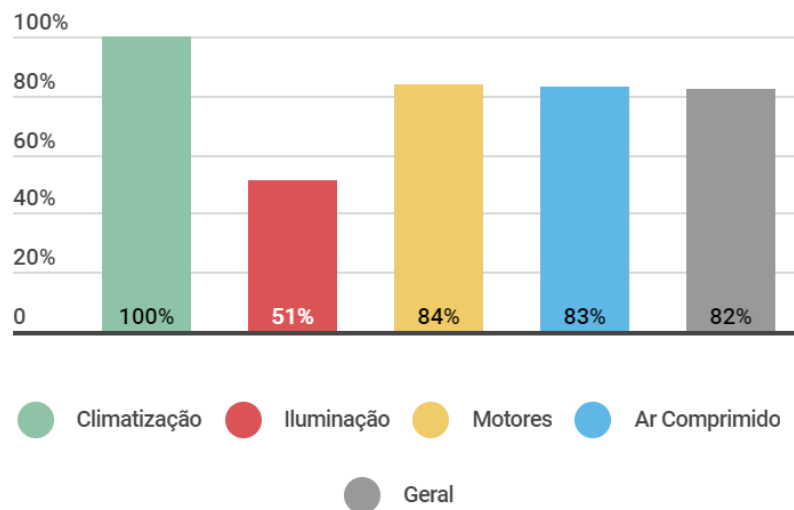


Fonte: (O Autor).

A distribuição evidencia a relevância de cada categoria de equipamentos na utilização de energia da unidade industrial. O sistema de motores é o responsável pelo processamento dos grãos na unidade industrial e isso se reflete em, além de ser o setor de maior potência instalada, ser o maior consumidor de energia, chegando a 87% do consumo anual. O sistema de iluminação tem uma menor potência instalada em relação aos outros setores, mas é utilizado constantemente, tendo um impacto de 9% no consumo. Os sistemas de climatização e ar comprimido têm os menores impactos no consumo de energia da unidade. O impacto do sistema de ar comprimido composto pelos dois compressores de uso direto se limita a 1%, enquanto o consumo de energia pela climatização por Splits nos escritórios durante os meses quentes equivale a apenas 3% do total.

O resultado da avaliação do desempenho energético das instalações de cada categoria de consumo de energia e do desempenho geral estimado da unidade é apresentado na Figura 5.2.

Figura 5.2. Resultado do desempenho estimado em cada categoria de consumo de energia avaliada e do desempenho geral estimado da unidade industrial.

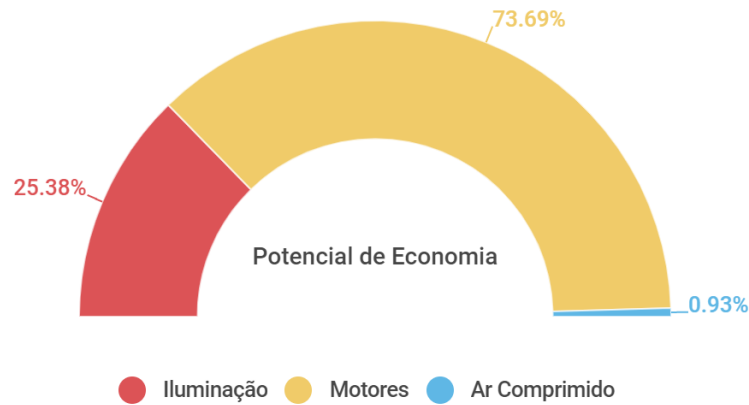


Fonte: (O Autor).

Em relação às tecnologias de mercado consideradas neste trabalho, não há potencial de economia de energia excedente no sistema de climatização, de desempenho 100%. O sistema de iluminação é o sistema de menor desempenho, apresentando o resultado de 51,19%. A instalação de lâmpadas de baixa eficiência e o período para limpeza regular são os fatores de maior impacto no resultado. O sistema de motores apresenta um desempenho resultante de 84,6%. No caso do sistema de ar comprimido, a falta da instalação de variador de velocidade e da troca regular de filtros impactam o desempenho, resultando em 83,30%. O desempenho estimado de cada sistema resulta, finalmente, no desempenho geral estimado da unidade industrial de 81,90%, indicando que existe potencial de economia de energia no sistema de 18,10%.

O desempenho estimado e o consumo de cada sistema consumidor de energia da unidade podem ser associados para uma análise mais detalhada do potencial de economia de energia identificado. O potencial é calculado considerando o potencial teórico de redução de consumo ao substituir os equipamentos e adaptar a operação atual para um sistema com desempenho resultante de 100%. No caso do sistema de climatização, seu desempenho de 100% significa que não há alterações que podem ser consideradas para sua otimização. Porém, essa análise faz-se interessante para os sistemas de desempenho inferior a 100%. Para um potencial de economia de energia total teórico de 127 MWh anual, a Figura 5.3 apresenta a parcela do potencial em cada sistema.

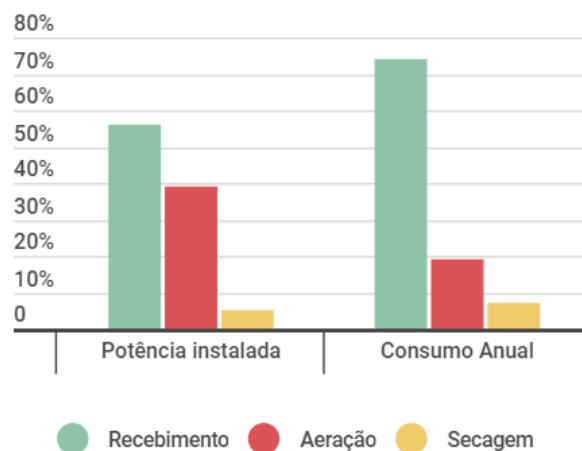
Figura 5.3. Distribuição do potencial de economia de energia nas categorias de consumo da unidade analisada.



Fonte: (O Autor).

Os motores são o sistema com maior potencial de economia de energia na unidade analisada. O potencial de economia de energia nos sistemas de iluminação é significativo, representando um quarto do total, seguido pelo sistema de ar comprimido. Isso indica que medidas como a substituição de lâmpadas e reatores por equipamentos mais eficientes, além de uma manutenção apropriada do sistema, devem ser considerados se a unidade analisada visa investir em sua eficiência energética. O sistema de motores pode ser analisado em mais detalhe, em relação aos motores de diferentes funções e de diferentes armazéns. A Figura 5.4 apresenta a distribuição da potência instalada em relação às funções de recebimento, aeração e secagem. São 47 motores para o recebimento, 15 para a aeração e 3 para a secagem. A função de drenagem é realizada por um motor de potência 2,2 kW.

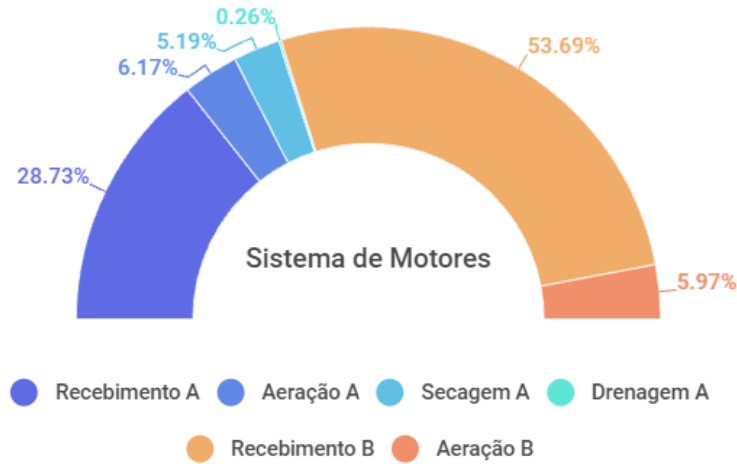
Figura 5.4. Distribuição da potência instalada e do consumo anual estimado em sistema de motores nas diferentes funções utilizadas.



Fonte: (O Autor).

A potência instalada em motores de recebimento e aeração é similar, porém o consumo estimado indica que a operação dos motores de recebimento é mais expressiva. A Figura 5.5 apresenta a distribuição do potencial de economia de energia considerando o consumo e desempenho dos motores de diferentes funções e armazéns.

Figura 5.5. Distribuição do potencial de economia de energia do sistema de motores entre o Armazém A (cor azul) e Armazém B (cor laranja), para as diferentes funções utilizadas.



Fonte: (O Autor).

A observação dos resultados para os armazéns e funções do sistema de motores permite uma compreensão da localização das necessidades de investimento. O potencial de economia de energia é mais alto nos motores de recebimento do Armazém B, apesar de ambos os armazéns e os motores de todas as funções apresentem potenciais expressivos. Foi observado que, em geral, os motores são antigos, apresentando índices de rendimento IR1 ou IR2, então a substituição dos motores de alguma das subdivisões da Figura 5.5 por motores novos de alto desempenho teriam um impacto importante no desempenho energético da unidade industrial. A instalação de variadores de velocidade nos motores de carga intermitente, como no motor Pré-Limpeza TL040A do Quadro 5.1, e a adoção de um plano adequado de manutenção são ainda medidas complementares para que a unidade atinja um nível significativo de eficiência energética.

O Quadro 5.2 apresenta quatro cenários de opções para o planejamento de medidas de economia de energia para a unidade analisada.

Quadro 5.2. Lista de medidas propostas para diferentes objetivos de desempenho da unidade.

Cenário	Desempenho Final	Medidas propostas
Sem alterações	81,9%	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nenhuma.</li> </ul>
Proposta A	90,1%	<ul style="list-style-type: none"> <li>Substituição dos motores de recebimento por motores novos IR4;</li> <li>Instalação de inversores de frequência nos motores de recebimento.</li> </ul>
Proposta B	93,9%	<ul style="list-style-type: none"> <li>Substituição de todos os motores por motores novos IR4;</li> <li>Instalação de inversores de frequência nos motores;</li> <li>Estabelecimento de um plano de manutenção periódica em todos os motores.</li> </ul>
Proposta C	97,4%	<ul style="list-style-type: none"> <li>Substituição de todos os motores por motores novos IR4;</li> <li>Instalação de inversores de frequência nos motores;</li> <li>Estabelecimento de um plano de manutenção periódica em todos os motores;</li> <li>Substituição de todas as lâmpadas por lâmpadas de alto desempenho;</li> <li>Substituição dos reatores por reatores eletrônicos;</li> <li>Automação da iluminação pela instalação de sensores;</li> <li>Instalação de inversores de frequência nos compressores;</li> <li>Adoção de troca regular dos filtros dos compressores.</li> </ul>

Fonte: (O Autor).



O cenário da proposta A seria a renovação do sistema de motores da função de maior potencial de economia de energia da Figura 5.5, de recebimento. Este cenário já apresenta um aumento no desempenho de 8,2% em relação ao cenário sem alterações nas instalações. O cenário da proposta B representa a renovação de toda a instalação do sistema de motores, além do estabelecimento de um plano de manutenção periódica, aumentando o desempenho em 3,9% em relação à proposta A. Ainda, a proposta C adiciona as principais medidas para os sistemas de iluminação e compressores, aumentando o desempenho em 3,5% em relação à proposta B, totalizando 97,4%. O desempenho se aproxima ao ideal de 100%, expressando que as instalações consumidoras de energia da unidade seriam próximas às melhores tecnologias para a eficiência energética.

Uma avaliação de diagnóstico energético é o passo inicial para a tomada de decisões estratégicas por parte dos gestores que visam compreender o uso de energia da unidade industrial e começar um investimento em eficiência energética. O modelo de avaliação proposto busca tornar seus gestores autônomos no acompanhamento das condições de desempenho energético, mas a dependência na confiabilidade das informações fornecidas é sua principal limitação. A aplicação do modelo de estimativa de desempenho de uso de energia elétrica esclarece as oportunidades de redução de consumo de energia e os possíveis ganhos na qualidade do processo industrial, que deve ser associado a uma análise de investimento adequada às especificidades da unidade industrial. Para alcançar seus objetivos de reduções de consumo de energia, a gestão deve aplicar o plano de medidas de economia de energia estabelecido de acordo com o diagnóstico proposto.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho aborda a importância de avaliações de diagnóstico energético na indústria, dentro do contexto de reconhecimento internacional da eficiência energética como essencial na descarbonização. A indústria brasileira apresenta um alto consumo de energia elétrica, mas o país apresenta baixos índices de eficiência e tem grandes potenciais de economia de energia não explorados. A implementação de estratégias de eficiência energética na indústria enfrenta diversos obstáculos, inclusive questões como a falta de informação sobre o consumo e as oportunidades de economia de energia.

A avaliação do desempenho do uso de energia elétrica de unidades industriais desenvolvida neste trabalho visa colaborar nesse campo de estudos, considerando a necessidade de conscientização por parte de gestores e unidades industriais. A avaliação proposta é subdividida em análises apropriadas para diferentes categorias de equipamentos, sendo abordados os sistemas de climatização, de iluminação, de motores e de ar comprimido, e informa as principais ineficiências e oportunidades de melhoria na unidade analisada. Baseando-se na literatura técnica existente, são considerados diferentes fatores de desempenho dos equipamentos instalados e dos padrões de operação.

Um estudo de caso do diagnóstico energético de uma unidade industrial de processamento de grãos é apresentado, explorando suas características de consumo de energia e validando a aplicabilidade da avaliação desenvolvida. Os resultados indicam a estimativa de um desempenho energético de 81,9%, sendo identificadas oportunidades de economia em diferentes sistemas. O sistema de motores representa 74% do potencial de economia de energia na instalação. A avaliação realizada permitiu uma observação das oportunidades entre as diferentes localizações da unidade industrial, apontando as áreas prioritárias para melhorias de eficiência. Três diferentes propostas de medidas de eficiência energética foram apresentadas, considerando a renovação das instalações de motores, da iluminação e medidas no sistema de ar comprimido. Ao aplicar as medidas propostas, a unidade poderia aumentar seu desempenho até a marca de 97,4%, tornando-se 15,5% mais eficiente energeticamente.

O método proposto neste trabalho permite avaliar unidades industriais de diversos setores, identificando as principais oportunidades de melhoria no gerenciamento energético, sendo uma ferramenta de apoio a decisões sobre investimentos. O método evidencia o impacto que medidas de economia de energia podem causar na unidade, constituindo uma ferramenta de mapeamento e conscientização que deve ser associado a um estudo de investimento para que seja estabelecido um plano de medidas de economia de energia. Tais medidas devem ser colocadas em prática e ter seus resultados acompanhados posteriormente para garantir os resultados, e estabelecer uma estratégia energética na unidade industrial.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **NBR 16 401: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários Parte 2: Parâmetros de conforto térmico**Brasil: [s. n.], 2008. p. 11.
- ASHRAE. **Advanced Energy Design Guide for Small to Medium Office Buildings Achieving Zero Energy**. Atlanta: [s. n.], 2019.
- ATLAS COPCO. **Manual do Ar Comprimido**. 3. ed. Wilrijk: Atlas Copco Airpower NV, 2015.
- BAJAY, S. V.; GORLA, F. D.; BORDONI, O. F. J. G. Os Segmentos Industriais Energo-Intensivos De Maiores Potenciais Técnicos De Conservação De Energia No Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, [s. l.], v. 15, p. 89–107, 2009.
- BARTZ, T.; SILUK, J. C. M.; BARTH, L. E. Importância da mensuração de desempenho industrial na indústria : um estudo de caso. **REBRAE**, [s. l.], p. 91–104, 2011.
- BENEDETTI, M.; CESAROTTI, V.; INTRONA, V. From energy targets setting to energy-aware operations control and back: An advanced methodology for energy efficient manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 167, p. 1518–1533, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.213>
- BOFFO, R.; PATALANO, R. **ESG Investing : Practices, Progress and Challenges**OECD Paris. Paris: [s. n.], 2020. Available at: <https://www.oecd.org/finance/ESG-Investing-Practices-Progress-Challenges.pdf>.
- CAGI. **Technical Brief – Heat Recovery From Industrial Compressed Air Systems**. Cleveland: [s. n.], 2012. Available at: <https://www.cagi.org/news/assets/HeatRecoveryTechnicalBrief.pdf>
- CAGNO, E.; TRIANNI, A. Evaluating the barriers to specific industrial energy efficiency measures: An exploratory study in small and medium-sized enterprises. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 82, p. 70–83, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.057>
- CASA CIVIL. **Decreto Número 4.508, 11 de dezembro de 2002**Brasil: [s. n.], 2002. p. 5.
- CASTRO-ALVAREZ, F. *et al.* **The 2018 International Energy Efficiency Scorecard**. Washington: [s. n.], 2018.
- CASTRO, F. N. de; LUCIANO, B. A. Eficiência energética em sistemas de iluminação pública. **O Setor Elétrico**, [s. l.], 2012.
- CNI. **Acoplamento Motor Carga: Guia Básico**. Brasília: Confederação Nacional da Indústria, 2009.
- CNI. **Contribuição da Indústria ao Mecanismo de Desenvolvimento Sustentável no Acordo de Paris/Confederação Nacional da Indústria**. Brasília: [s. n.], 2019.
- COPEL. **Manual de Eficiência Energética na Indústria**. Mossunguê: [s. n.], 2005. Available at: <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>.
- DE MELLO SANTANA, P. H.; BAJAY, S. V. New approaches for improving energy efficiency in the Brazilian industry. **Energy Reports**, [s. l.], v. 2, p. 62–66, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2016.02.001>
- DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. **PORTARIA Nº 234, DE 29 DE JUNHO DE 2020**Brasil: [s. n.], 2020. p. 9.
- EIPPCB. **Reference document on Best Available Techniques for Energy Efficiency**. [S. l.: s. n.], 2009. Available at: [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/ENE\\_Adopted\\_02-2009.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/ENE_Adopted_02-2009.pdf).
- ELEKTRO. **Manuais Elektro de Eficiência Energética: Segmento Industrial Sistemas Motrizes**. [S. l.: s. n.], 2011.
- ENERGY STAR. **How the 1-100 ENERGY STAR Score is Calculated**. [S. l.], 2021. Available at:

[https://www.energystar.gov/buildings/benchmark/understand\\_metrics/how\\_score\\_calculated](https://www.energystar.gov/buildings/benchmark/understand_metrics/how_score_calculated). Acesso em: 4 nov. 2021.

EPE. **Balço Energético Nacional 2020: Ano base 2019**. [S. l.]: Empresa de Pesquisa Energética, 2020.

FASIUDDIN, M.; BUDAIWI, I. HVAC system strategies for energy conservation in commercial buildings in Saudi Arabia. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 43, n. 12, p. 3457–3466, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.004>

FERREIRA, C. A. **Motor Elétrico Premium**. 1. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2016. *E-book*.

HAQ, M. A. U. *et al.* A review on lighting control technologies in commercial buildings, their performance and affecting factors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 33, p. 268–279, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.090>

HENRIQUES, J.; CATARINO, J. Motivating towards energy efficiency in small and medium enterprises. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 139, n. 2016, p. 42–50, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.026>

IBE. **Energy Savings from Maintenance Johnson Controls**. Washington: [s. n.], 2012.

IBGE. **Indicadores IBGE - Contas nacionais trimestrais**. [S. l.]: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020. v. 8 *E-book*.

JENNINGS, J. D. *et al.* Comparison of control options in private offices in an advanced lighting controls testbed. **Journal of the Illuminating Engineering Society**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 39–60, 2000. Available at: <https://doi.org/10.1080/00994480.2000.10748316>

JIRU, T. E. Combining HVAC energy conservation measures to achieve energy savings over standard requirements. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 73, p. 171–175, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.009>

KLUCZEK, A. Application of best available techniques in an enterprise producing heating devices. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 83, p. 444–453, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.056>

LEITE, F. A. **Comparativo entre variadores de velocidade e inversores de frequência**. 60 f. 2018. - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, [s. l.], 2018.

MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* IPCC, 2021: Summary for Policymakers. *In: CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS. CONTRIBUTION OF WORKING GROUP I TO THE SIXTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE*. [S. l.]: Cambridge University Press, 2021. p. 42. *E-book*.

MATHEWS, E. H. *et al.* HVAC control strategies to enhance comfort and minimise energy usage. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 33, n. 8, p. 853–863, 2001. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00075-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00075-5)

MENGHI, R. *et al.* Energy efficiency of manufacturing systems: A review of energy assessment methods and tools. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 240, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118276>

MMA. **Ar Condicionado: Guia prático sobre sistemas de água gelada**. Brasília: [s. n.], 2017.

MME. **PNE 2030 - Eficiência energética**. Brasília: [s. n.], 2007.

MME. **Portaria Interministerial Número 1, 29 de junho de 2017** *Diário Oficial da União*, Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2017. p. 1.

MME. **Portaria Interministerial Número 553, 8 de dezembro de 2005**. o Aprovar o Programa de Metas de motores elétricos de indução trifásicos, na forma constante do Anexo à presente Portaria. Art. 2 o Esta Portaria entra em vigor na data de sua publicação. Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2005. p. 3.

PARMENTER, D. **Key performance indicators for government and non profit agencies : implementing winning KPIs**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012.

PAXSON, T. L. *et al.* **ANSI/ASHRAE/ACCA Standard 180-2018: Standard Practice for Inspection and Maintenance of Commercial Building HVAC Systems**. [S. l.: s. n.], 2018.

PENA, S. M. **Sistemas De Ar Condicionado E Refrigeração Procel Programa Nacional De Conservação De Energia Elétrica**. [S. l.: s. n.], 2002.

PROCEL. **MANUAL DE ILUMINACAO - Manual de Iluminação**. [S. l.: s. n.], 2011.

PROCEL. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**. Brasília: [s. n.], 2013.

ROCHA, C. R.; MONTEIRO, M. A. G. **Eficiência energética em sistemas de ar comprimido**. Brasília: [s. n.], 2005.

ROCHA, L. R. R.; MONTEIRO, M. A. G. **Gestão Energética**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2005.

SAIDUR, R. *et al.* Applications of variable speed drive ( VSD ) in electrical motors energy savings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 543–550, 2012. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.020>

SANTOS, A. H. M. *et al.* **Conservação de energia: Eficiência energética de equipamentos e instalações**. Itajubá: [s. n.], 2006.

SANTOS, A. H. M. *et al.* **Eficiência energética : teoria e prática**. 1. ed. Itajubá: [s. n.], 2007.

SCHINAZI, A. *et al.* **Guia interativo de eficiência energética em edificações**. [S. l.]: Mitsidi, 2018. *E-book*.

SX LIGHTNING. **Automação - Conectividade Indoor**. [S. l.], [s. d.]. Available at: <https://sxlighting.com.br/solucao/automacao/>. Acesso em: 21 out. 2021.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: [s. n.], 2014.

UN. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. [S. l.]: Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015, 2015.

US DOE, D. of E. **Energy Tips : Replace V-Belts with Notched or Synchronous Belt Drives**. [S. l.: s. n.], 2012.

US DOE, D. of E. **Energy Tips: Minimize Compressed Air Leaks**. [S. l.: s. n.], 2004.

WAGIMAN, K. R. *et al.* A new optimal light sensor placement method of an indoor lighting control system for improving energy performance and visual comfort. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 30, n. August 2019, p. 101295, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101295>

WEG. **Guia de Aplicação: Inversores de Frequência**. 3. ed. Jaraguá do Sul: [s. n.], 2005.

WEG. **Requisitos de Eficiência para Motores de Baixa Tensão**. [S. l.: s. n.], 2016.

WEG. **SEE+ Software**. [S. l.], 2021a. Available at: <https://www.weg.net/see+/pages/regua.jsp>.

WEG. **SOFT-STARTERS: COMO ESCOLHER O MODELO IDEAL PARA UMA APLICAÇÃO?**. [S. l.: s. n.], 2021b.

WEG. **Uso Eficiente da Energia Elétrica: Motores elétricos, inversores de frequência e geração solar**. [S. l.: s. n.], 2019. Available at: [https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms/files/92176/1580492002Cartilha\\_Weg\\_versaoWE3\\_INTERATIVA.pdf](https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms/files/92176/1580492002Cartilha_Weg_versaoWE3_INTERATIVA.pdf).

ZANARDO, R. P. *et al.* Energy audit model based on a performance evaluation system. **Energy**, [s. l.], v.

154, p. 544–552, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.179>

## ANEXOS

**ANEXO A** – Dados da classe IR1 do Decreto nº 4.508 de 11 de dezembro de 2002.

Tabela A.1. Rendimentos nominais mínimos para a classe IR1 para os diferentes números de polos e potência nominal.

<b>Potência nominal (kW)</b>	<b>2 polos</b>	<b>4 polos</b>	<b>6 polos</b>	<b>8 polos</b>
0,75	77%	78%	73%	66%
1,1	78,5%	79%	75%	73,5%
1,5	81%	81,5%	77%	77%
2,2	81,5%	83%	78,5%	78%
3	82,5%	83%	81%	79%
3,7	84,5%	85%	83,5%	80%
4,4	85%	85,5%	84%	82%
5,5	86%	87%	85%	84%
7,5	87,5%	87,5%	86%	85%
9,2	87,5%	87,5%	87,5%	86%
11	87,5%	88,5%	89%	87,5%
15	88,5%	89,5%	89,5%	88,5%
18,5	89,5%	90,5%	90,2%	88,5%
22	89,5%	91%	91%	90,2%
30	90,2%	91,7%	91,7%	90,2%
37	91,5%	92,4%	91,7%	91%
45	91,7%	93%	91,7%	91%
55	92,4%	93%	92,1%	91,5%
75	93%	93,2%	93%	92%
90	93%	93,2%	93%	92,5%
110	93%	93,5%	94,1%	92,5%
132	93,5%	94,1%	94,1%	
150	94,1%	94,5%	94,1%	
185	94,1%	94,5%		

Fonte: (CASA CIVIL, 2002).

**ANEXO B** – Dados da classe IR2 da Portaria Interministerial nº 553 de 2005.

Tabela B.1. Rendimentos nominais mínimos para a classe IR2 para os diferentes números de polos e potência nominal.

<b>Potência nominal (kW)</b>	<b>2 polos</b>	<b>4 polos</b>	<b>6 polos</b>	<b>8 polos</b>
0,75	80%	80,5%	80%	70%
1,1	82,5%	81,5%	77%	77%
1,5	83,5%	84%	83%	82,5%
2,2	85%	85%	83%	84%
3	85%	86%	85%	84,5%
3,7	87,5%	87,5%	87,5%	85,5%
4,4	88%	88,5%	87,5%	85,5%
5,5	88,5%	89,5%	88%	85,5%
7,5	89,5%	89,5%	88,5%	88,5%
9,2	89,5%	90%	88,5%	88,5%
11	90,2%	91%	90,2%	88,5%
15	90,2%	91%	90,2%	89,5%
18,5	91%	92,4%	91,7%	89,5%
22	91%	92,4%	91,7%	91%
30	91,7%	93%	93%	91%
37	92,4%	93%	93%	91,7%
45	93%	93,6%	93,6%	91,7%
55	93%	94,1%	93,6%	93%
75	93,6%	94,5%	94,1%	93%
90	94,5%	94,5%	94,1%	93,6%
110	94,5%	95%	95%	93,6%
132	94,7%	95%	95%	94,5%
150	95%	95%	95%	94,5%
185	95,4%	95%	95%	95%

Fonte: (MME, 2005).

**ANEXO C – Dados da classe IR3 da Portaria Interministerial No- 1, de 29 de junho de 2017.**

Tabela C.1. Rendimentos nominais mínimos para a classe IR3 para os diferentes números de polos e potência nominal.

<b>Potência nominal (kW)</b>	<b>2 polos</b>	<b>4 polos</b>	<b>6 polos</b>	<b>8 polos</b>
0,12	62%	66%	64%	59,5%
0,18	65,6%	69,5%	67,5%	64%
0,25	69,5%	73,4%	69%	68%
0,37	73,4%	78,2%	75,3%	72%
0,55	76,8%	79%	79,5%	74%
0,75	80,5%	83,5%	82,5%	75,5%
1,1	84%	86,5%	87,5%	78,5%
1,5	85,5%	86,5%	88,5%	84%
2,2	86,5%	89,5%	89,5%	85,5%
3	88,5%	89,5%	89,5%	86,5%
3,7	88,5%	89,5%	89,5%	86,5%
4,4	88,5%	89,5%	89,5%	86,5%
5,5	89,5%	91,7%	91%	86,5%
7,5	90,2%	91,7%	91%	89,5%
9,2	91%	92,4%	91,7%	89,5%
11	91%	92,4%	91,7%	89,5%
15	91%	93%	91,7%	90,2%
18,5	91,7%	93,6%	93%	90,2%
22	91,7%	93,6%	93%	91,7%
30	92,4%	94,1%	94,1%	91,7%
37	93%	94,5%	94,1%	92,4%
45	93,6%	95%	94,5%	92,4%
55	93,6%	95,4%	94,5%	93,6%
75	94,1%	95,4%	95%	93,6%
90	95%	95,4%	95%	94,1%
110	95%	95,8%	95,8%	94,1%
132	95,4%	96,2%	95,8%	94,5%
150	95,4%	96,2%	95,8%	94,5%
185	95,8%	96,2%	95,8%	95%
220	95,8%	96,2%	95,8%	95%
260	95,8%	96,2%	95,8%	95%
300	95,8%	96,2%	95,8%	95%
330	95,8%	96,2%	95,8%	95%
370	95,8%	96,2%	95,8%	95%

Fonte: (MME, 2017).



**ANEXO D** – Dados da classe IR4 da Norma IEC 60034-30-1.

Tabela D.1. Rendimentos nominais mínimos para a classe IR4 para os diferentes números de polos e potência nominal.

<b>Potência nominal (kW)</b>	<b>2 polos</b>	<b>4 polos</b>	<b>6 polos</b>	<b>8 polos</b>
0,12	66,5%	69,8%	64,9%	62,3%
0,18	70,8%	74,7%	70,1%	67,2%
0,2	71,9%	75,8%	71,4%	68,4%
0,25	74,3%	77,9%	74,1%	70,8%
0,37	78,1%	81,1%	78%	74,3%
0,4	78,9%	81,7%	78,7%	74,9%
0,55	81,5%	83,9%	80,9%	77%
0,75	83,5%	85,7%	82,7%	78,4%
1,1	85,2%	87,2%	84,5%	80,8%
1,5	86,5%	88,2%	85,9%	82,6%
2,2	88%	89,5%	87,4%	84,5%
3	89,1%	90,4%	88,6%	85,9%
4	90%	91,1%	89,5%	87,1%
5,5	90,9%	91,9%	90,5%	88,3%
7,5	91,7%	92,6%	91,3%	89,3%
11	92,6%	93,3%	92,3%	90,4%
15	93,3%	93,9%	92,9%	91,2%
18,5	93,7%	94,2%	93,4%	91,7%
22	94%	94,5%	93,7%	92,1%
30	94,5%	94,9%	94,2%	92,7%
37	94,8%	95,2%	94,5%	93,1%
45	95%	95,4%	94,8%	93,4%
55	95,3%	95,7%	95,1%	93,7%
75	95,6%	96%	95,4%	94,2%
90	95,8%	96,1%	95,6%	94,4%
110	96%	96,3%	95,8%	94,7%
132	96,2%	96,4%	96%	94,9%
160	96,3%	96,6%	96,2%	95,1%
200	96,5%	96,7%	96,3%	95,4%
250	96,5%	96,7%	96,5%	95,4%
315	96,5%	96,7%	96,6%	95,4%

Fonte:(WEG, 2016).