

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TECNOLOGIA**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**RAFAEL ZANARDI**

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SISTEMA  
DE CIRCULAÇÃO DE AR DE UMA CABINE DE PINTURA**

**CAXIAS DO SUL**

**2023**

**RAFAEL ZANARDI**

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SISTEMA DE  
CIRCULAÇÃO DE AR DE UMA CABINE DE PINTURA**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica na área do conhecimento em Ciências Exatas e Engenharias da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Me. André Bernardes Michel

**CAXIAS DO SUL**

**2023**

**RAFAEL ZANARDI**

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO  
SISTEMA DE CIRCULAÇÃO DE AR DE UMA CABINE DE PINTURA**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica na área do conhecimento em Ciências Exatas e Engenharias da Universidade de Caxias do Sul.

**Aprovado(a) em 28/06/2023**

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Me. André Bernardes Michel  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Me. Cesar Augusto Bernardi  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Profa. Me. Danusia de Oliveira de Lima  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

**CAXIAS DO SUL**

**2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, a Deus por me agraciado com essa oportunidade de cursar a faculdade e poder ter realizado um dos meus sonhos.

Aos meus pais, pela dedicação e carinho doado e aos ensinamentos prestados, que propuseram o meu crescimento pessoal.

A todos meus familiares, que sempre estiveram comigo, motivando e celebrando cada vitória, em especial meu irmão.

Ao coordenador do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade de Caxias do Sul, professor Cesar Augusto Bernardi, pela disponibilidade e atenção, sempre que solicitado.

Ao meu orientador, professor André Bernardes Michel pelas suas orientações neste trabalho, além dos conhecimentos passados.

Aos professores e colegas que se dedicaram a dividir seus conhecimentos durante toda graduação, que com certeza contribuíram para minha vida profissional.

A Marcopolo SA, em especial o setor de manutenção que proporcionou os recursos necessários e a todos que me auxiliaram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

Por fim, mas mais importante, um agradecimento especial a minha esposa, CARLA pelo incentivo e amor incondicional sempre prestado neste tempo que estamos juntos, pela sua paciência nos momentos difíceis em que não pude me doar o quanto você merecia. TI AMO!!!!

## RESUMO

A energia elétrica é atualmente um componente essencial da vida humana, pois está ligada direta ou indiretamente a quase todas as atividades que são realizadas pela população, sendo assim, o seu uso eficiente é um tema que vem ganhando cada vez mais espaço. Pensando nisso, o setor industrial, por ser o maior e possuir um grande potencial de otimização, precisa de mais investimentos na melhoria da eficiência energética. Em virtude disso, este trabalho teve por objetivo avaliar as possíveis formas de redução no consumo de energia elétrica, através da utilização de tecnologias mais eficientes, aplicadas a um estudo de caso, voltado para uma indústria do ramo metalúrgico, mais precisamente em uma cabine de pintura, com a proposta de alteração nos seus subsistemas, com ênfase na exaustão, insuflamento e iluminação. Estes subsistemas por sua vez, foram avaliados individualmente para que pudessem ser implementadas tecnologias distintas, mas que possuam redução no consumo de energia, e para tal foi definido que seria implementado no sistema de insuflamento uma redução na velocidade do motor, com aumento no damper de entrada da captação de ar limpo, pois não se poderia alterar a pressão interna que depende do fluxo de ar de entrada e saída. No sistema de exaustão, como não era possível reduzir o fluxo de ar pois impactaria diretamente na saúde do pintor e na qualidade da pintura do veículo, foi mantido a velocidade fixa dos motores e efetuada a substituição do motor original da marca Voges e modelo VTOP com parâmetro de rendimento de 91,4%, por outros com parâmetro de eficiência superiores, sendo estes da marca Weg. O primeiro foi do modelo IR3 Super Premium com rendimento de 92,7%, atingindo um ganho energético de 10,39%, e o segundo de uma tecnologia síncrona, do modelo WMagnet, com rendimento de 93,8%, e um ganho energético de 15,01%. Já para o terceiro subsistema, sendo esse o de iluminação, foi efetuada a substituição do modelo de luminárias fluorescentes da marca Philips modelo T10Plus, por outro com tecnologia LED da marca Lumalux modelo PJ-48, garantindo assim, uma adequação do nível de iluminância da cabine e um maior conforto e segurança para os funcionários que a utilizam. Mas para atingir este objetivo que é uma premissa da NBR 8995-1, teve que se exceder a potência instalada em 472,39 kWh mensal, não sendo possível manter um ganho energético neste caso, elevando seu consumo em 18,61%.

**Palavras-chave:** Energia elétrica, Eficiência energética, Exaustão, Insuflamento, Iluminação.

## ABSTRACT

*Electric energy is currently an essential component of human life, as it is directly or indirectly linked to almost all activities carried out by the population, therefore, its efficient use is a topic that has been gaining more and more space. With that in mind, the industrial sector, as it is the largest and has great potential for optimization, needs more investment in improving energy efficiency. As a result, this work aimed to evaluate the possible ways of reducing the consumption of electricity, through the use of more efficient technologies, applied to a case study, focused on a metallurgical industry, more precisely in a cabin of painting, with the proposal to change its subsystems, with emphasis on exhaustion, supply and lighting. These subsystems, in turn, were evaluated individually so that different technologies could be implemented, but that have a reduction in energy consumption, and for that it was defined that a reduction in the engine speed would be implemented in the supply system, with an increase in the damper of clean air capture inlet, as the internal pressure could not be changed, which depends on the inlet and outlet air flow. In the exhaust system, as it was not possible to reduce the air flow as it would have a direct impact on the painter's health and the quality of the vehicle's painting, the engines were kept at a fixed speed and the original engine of the Voges brand and VTOP model was replaced with yield parameter of 91.4%, by others with higher efficiency parameters, these being the Weg brand. The first was the IR3 Super Premium model with an efficiency of 92.7%, reaching an energy gain of 10.39%, and the second of a synchronous technology, the WMagnet model, with an efficiency of 93.8%, and an energy gain of 15.01%. As for the third subsystem, which is the lighting one, the Philips model T10 Plus fluorescent lighting model was replaced by another one with Lumalux model PJ-48 LED technology, thus ensuring an adequacy of the illuminance level of the cabin, thus ensuring greater comfort and safety for the employees who use it. But to achieve this objective, which is a premise of NBR 8995-1, the installed power had to be exceeded by 472.39 kWh per month, not being possible to maintain a energy gain in this case, increasing its consumption by 18.61%.*

**Keywords:** Electricity, Energy efficiency, Exhaustion, Insufflation, Lighting.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oferta interna de energia elétrica.....	18
Figura 2 – Projeção de consumo de energia.....	20
Figura 3 - Comparativo de consumo elétrico por setor .....	20
Figura 4 - Consumo de energia por subsetores da indústria.....	21
Figura 5 - Ganhos de Eficiência Energética por Setor .....	23
Figura 6 - Cabine <i>Crossdraft</i> .....	29
Figura 7 - Cabine <i>Semi-Downdraft</i> .....	29
Figura 8 - Cabine <i>Side-Downdraft</i> .....	30
Figura 9 - Cabine <i>Downdraft</i> .....	30
Figura 10 - Diagrama do inversor de frequência.....	36
Figura 11 - Modelos de onda.....	36
Figura 12 - Modelo de onda inversor PWM.....	37
Figura 13 - Tipos de Ventiladores .....	40
Figura 14 – Fluxograma .....	47
Figura 15 - Diagrama de funcionamento.....	48
Figura 16 e 17 - Filtros 1° e 2° estágio e motor e ventilador do insuflamento.....	48
Figura 17 - Medidor de diferencial de pressão .....	49
Figura 18 - Sistema de exaustão .....	49
Figura 19 - Iluminação da cabine .....	50
Figura 20 - Sistema de bombeamento de água.....	51
Figura 21 - Sistema de umidificação .....	51
Figura 22 - Sistema de malha fechada.....	52
Figura 23 - Projeto de iluminação no software.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potencial hídrico brasileiro.....	19
Tabela 2 - Participação das regiões no potencial inventariado.....	19
Tabela 3 - Custos da energia elétrica.....	56
Tabela 4 - Parâmetros do motor do insuflamento a 100% da velocidade .....	60
Tabela 5 - Parâmetros por faixa de rotação .....	60
Tabela 6 - Parâmetros do motor do insuflamento a 80% da velocidade .....	61
Tabela 7 - Parâmetros por faixa de rotação .....	61
Tabela 8 - Parâmetros do motor do insuflamento a 94% da velocidade .....	62
Tabela 9 - <i>Payback</i> descontado do insuflador .....	62
Tabela 10 - Comparação entre propostas .....	63
Tabela 11 - Parâmetros motor original na exaustão .....	64
Tabela 12 - Parâmetros motor IR3 na exaustão.....	64
Tabela 13 - <i>Payback</i> descontado do exaustor super premium.....	65
Tabela 14 - Parâmetros motor WMagnet na exaustão.....	65
Tabela 15 - <i>Payback</i> descontado do exaustor Wmagnet .....	66
Tabela 16 - Comparação da exaustão .....	67
Tabela 17 - Dados da lâmpada fluorescente .....	67
Tabela 18 - Dados da lâmpada LED.....	69
Tabela 19 - Iluminância projeto inicial.....	69
Tabela 20 - Iluminância projeto final .....	70
Tabela 21 - Comparação da iluminação .....	70



## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Velocidade síncrona de motores .....	31
Equação 2 – Escorregamento do motor .....	33
Equação 3 – Rendimento do Motor .....	34
Equação 4 – Cálculo da iluminância .....	44
Equação 5 – Cálculo do consumo energético .....	54
Equação 6 – Cálculo de correção do fator de potência .....	55
Equação 7 – Cálculo do valor presente .....	55
Equação 8 – Cálculo do payback.....	56
Equação 9 – Tamanho da malha de medição .....	58
Equação 10 – Numero de pontos da malha .....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	American National Standards Institute
BEN	Balanco Energético Nacional
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CLP	Controlador Lógico Programável
CNI	Confederação Nacional da Indústria
DC	Tensão contínua
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FEG	Ventilator Efficiency Gauge
FP	Fator de potência
FU	Fator de Uniformidade
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt-hora
IEA	Agência Internacional de Energia
IHM	Interface Homem Máquina
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
IRC	Índice de Reprodução de Cores
kVA	Quilovoltampere
kVAr	Potência Resistiva
kW	Quilowatt

kWh	Quilowatt-hora
LED	Diodo Emissor de Luz
mmH2O	Milímetros Coluna de Água
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PEE	Programa de Eficiência Energética
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PWM	Modulação por Largura de Pulso
RMS	Raiz Média Quadrada
RPM	Rotação por Minuto
SGE	Sistema de Gestão de Energia
TCC	Temperatura de Cor Correlata
Tep	Toneladas equivalentes de petróleo
TWh	Terawatt-hora

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampere
cv	Cavalo Vapor
$\phi$	Fluxo luminoso
f	Frequência
°	Grau
°C	Graus Celsius
Hz	Hertz
E	Iluminância
I	Intensidade Luminosa
K	Kelvin
L	Luminância
%	Porcentagem
R\$	Real brasileiro
lux	Unidade de iluminância
V	Volts
W	Watt

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO .....	15
1.2 OBJETIVO GERAL.....	15
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
1.4 LIMITAÇÕES DO TRABALHO .....	16
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	17
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
2.1 ESTUDO DA ENERGIA ELÉTRICA.....	18
<b>2.1.1 Estudo da energia elétrica na indústria.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.2 Eficiência energética.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.3 Métodos de eficiência energética aplicados na indústria .....</b>	<b>24</b>
2.2 A INCLUSÃO DA PINTURA NA INDÚSTRIA.....	25
2.3 SISTEMAS DE PINTURA INDUSTRIAL .....	26
2.4 CONCEITO DE FUNCIONAMENTO DA CABINE DE PINTURA INDUSTRIAL .....	26
<b>2.4.1 Tipos de cabines de pintura .....</b>	<b>27</b>
<b>2.4.2 A cabine de pintura úmida e seus subsistemas .....</b>	<b>27</b>
2.4.2.1 Sistema de filtragem com água.....	28
2.4.2.2 Sistema de insuflamento e exaustão .....	28
2.5 EQUIPAMENTOS DA CABINE DE PINTURA ÚMIDA .....	30
<b>2.5.1 Motor elétrico.....</b>	<b>31</b>
2.5.1.1 Motor elétrico síncrono .....	31
2.5.1.2 Motor elétrico assíncrono .....	32
2.5.1.3 Perdas no motor elétrico .....	33
2.5.1.4 Motor de alto rendimento .....	34
2.5.1.5 Eficiência do motor .....	34
<b>2.5.2 Inversor de frequência .....</b>	<b>35</b>
2.5.2.1 Inversor com onda quadrada.....	36
2.5.2.2 Inversor com modulação por largura de pulso (PWM) .....	37
2.5.2.3 Inversor com controle escalar .....	37
2.5.2.4 Inversor com controle vetorial.....	38

2.5.2.5 Vantagens e desvantagens do inversor de frequência .....	39
<b>2.5.3 Ventilador centrífugo .....</b>	<b>39</b>
2.5.3.1 Tipos de ventilador centrífugo.....	40
2.5.3.2 Eficiência de ventiladores centrífugos.....	41
<b>2.5.4 Bomba de circulação .....</b>	<b>42</b>
2.5.4.1 Eficiência da bomba de circulação .....	43
<b>2.5.5 Sistema de iluminação .....</b>	<b>43</b>
2.5.5.1 Lâmpadas fluorescentes tubulares .....	45
2.5.5.2 Lâmpadas LED .....	46
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>47</b>
3.1 SISTEMA EXISTENTE .....	47
3.2 SISTEMA PROPOSTO.....	52
3.3 ENSAIOS .....	53
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>59</b>
4.1 SISTEMA DE INSUFLAMENTO.....	59
<b>4.1.1 Sistema existente .....</b>	<b>59</b>
<b>4.1.2 Sistema proposto.....</b>	<b>60</b>
<b>4.1.3 Comparação entre sistemas .....</b>	<b>63</b>
4.2 SISTEMA DE EXAUSTÃO .....	63
<b>4.2.1 Sistema existente .....</b>	<b>63</b>
<b>4.2.2 Sistema proposto.....</b>	<b>64</b>
<b>4.2.3 Comparação entre sistemas .....</b>	<b>66</b>
4.3 SISTEMA DE ILUMINAÇÃO .....	67
<b>4.3.1 Sistema existente .....</b>	<b>67</b>
<b>4.3.2 Sistema proposto.....</b>	<b>68</b>
<b>4.3.3 Comparação entre sistemas .....</b>	<b>70</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>71</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>73</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A eficiência energética é necessária em todos os segmentos de consumo energético, pois através da aplicação de métodos de consumo eficazes se consegue reduzir o consumo energético global contribuindo para que o sistema elétrico não entre em colapso por falta de potencial energético. Além disso, o impacto socioeconômico para a população para manter a matriz energética através de fontes não renováveis de energia é alto, isso sem levar em conta o grande impacto negativo que é proporcionado para o meio ambiente.

### 1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Este trabalho foi desenvolvido pois o consumo de energia elétrica da empresa apresenta um custo elevado e pensando em reduzir esse consumo foi efetuada uma avaliação nos seus departamentos, onde foi evidenciado que o departamento de pintura, por se tratar de um dos primeiros setores da empresa a ser construído, e não ter sido modernizado, concentra uma grande quantidade de motores de indução com idades elevadas, além dos mesmos já terem sido rebobinados por diversas vezes. Outro fator determinante para esta escolha foi o fato destes motores serem utilizados para exaustão e insuflamento de ar, permanecendo assim ligados por longos períodos, contribuindo assim em uma maior redução mensal no consumo de energia elétrica.

### 1.2 OBJETIVO GERAL

Este projeto teve como objetivo, promover a efficientização energética de uma cabine de pintura de carrocerias de ônibus, na empresa Marcopolo, através de alterações nos seus equipamentos, de exaustão e insuflamento, além da alteração na iluminação da área de trabalho, avaliando-se a redução de consumo de energia e demanda de potência.

### 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o cumprimento do objetivo geral foram definidos alguns objetivos específicos que estão elencados da seguinte forma:

- Análise nos subsistemas da cabine de pintura com a possibilidade de ganhos em eficiência energética, através da redução de velocidades em motores;
- Análise para substituição dos motores antigos por outros com maior eficiência e novas tecnologias;
- Estudo para substituição das luminárias do equipamento;
- Medir o consumo de energia elétrica antes e após as alterações propostas, a fim de comparar os resultados encontrados;
- Estudo de viabilidade econômica;

### 1.4 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Neste trabalho será abordado a alteração automática da velocidade do motor responsável pelo sistema de insuflamento, permitindo que seja mantida a vazão de ar através do ajuste na angulação das pás. Será mantido o sistema de exaustão com velocidade nominal dos motores para que não haja perda de qualidade da cabine sendo possível apenas a substituição de motores por outros de mesmas características físicas.

Além disso, serão substituídas as luminárias da cabine, pois as existentes são de tecnologia obsoleta, já com o modelo descontinuado pelo fabricante, para outras de tecnologias atuais e com maior eficiência. É preciso que este novo modelo já seja utilizado na empresa para facilitar sua substituição futura sem a necessidade de aumentar o estoque acarretando maior custo e maior área de armazenagem. Além disso, os pontos de energia disponíveis na cabine de pintura, para o sistema de iluminação, serão mantidos a fim de evitar investimento de material e mão de obra e alteração no projeto elétrico.



## 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é composto por cinco capítulos, onde:

- O capítulo 1, Introdução, apresenta um conteúdo introdutório sobre os assuntos do trabalho desenvolvido.
- O capítulo 2, Referencial Teórico, apresenta um estudo teórico sobre a eficiência energética e sobre sistemas de pintura industrial, com seus equipamentos e subequipamentos que serão alvo das ações de eficiência energética propostos por este estudo.
- O capítulo 3, Metodologia, apresenta a situação atual do processo de pintura e as atividades que serão desenvolvidas para melhorar a eficiência do sistema estudado.
- O capítulo 4, Resultados, apresenta os resultados encontrados na situação original e após as alterações sugeridas no capítulo anterior.
- O capítulo 5, Conclusão, apresenta a conclusão que foi obtida com base no comparativo dos resultados apresentados e sugestão para uma possível continuação deste trabalho.

Ao final serão apresentados os Apêndices A – Orçamentos dos equipamentos e Apêndices B – Relatórios do software DIALUX, além das referências utilizadas no trabalho.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

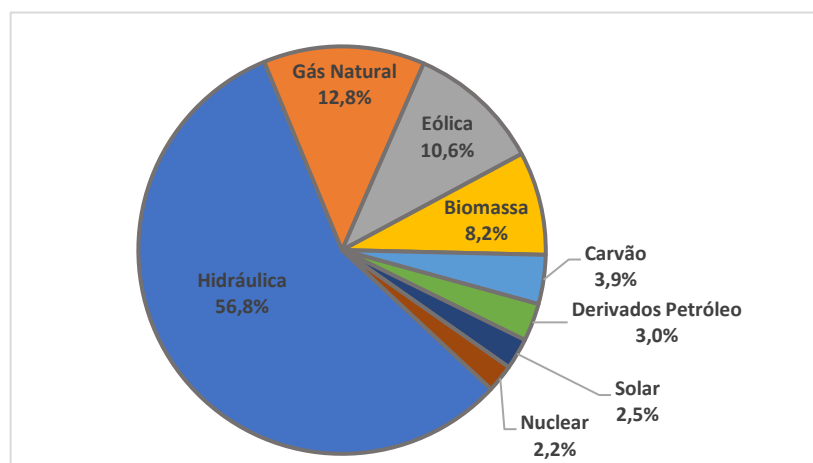
Neste capítulo, serão abordados os dados sobre o consumo da energia elétrica do Brasil, bem como o seu impacto nos diversos setores da economia, com ênfase no ramo industrial. Em seguida, é detalhado através de fundamentos e definições, os possíveis benefícios atrelados à eficiência energética.

Sucessivamente, são analisadas algumas metodologias aplicadas para o sistema de pintura veicular e seus principais equipamentos, com enfoque nas cabines de pintura úmidas, por se tratar do assunto principal do estudo. Por fim, é realizado uma análise das técnicas de eficiência energéticas que serão propostas neste trabalho.

### 2.1 ESTUDO DA ENERGIA ELÉTRICA

A oferta de geração elétrica brasileira é oriunda de diversas fontes de energia, sendo elas renováveis (hídrica, eólica, solar, biodiesel e derivados de cana) e não renováveis (petróleo, gás natural, nuclear), conforme visto no Balanço Energético Nacional (BEN), divulgado em 2022, presente na Figura 1. Segundo a EPE (2021), pode se dizer que o Brasil é um país com alto índice de geração através de fontes renováveis chegando à média acima de 40% nos últimos 20 anos. Ocorreu uma redução entre 2011 e 2014, com o agravamento da crise hídrica, devido à falta de chuvas, o que foi suprido com o aumento de outras fontes chegando em 2020 ao valor de 48% da matriz energética gerada através das fontes renováveis.

**Figura 1 - Oferta interna de energia elétrica**



Fonte: EPE (2022).

O consumo de eletricidade por sua vez, se levado em conta o mesmo período, teve um acréscimo de 14%. Esta taxa de crescimento do consumo nas próximas décadas obrigará o Brasil a deixar de investir na sua principal fonte geradora hidrelétrica, que de acordo com EPE (2022), já está com 62% do potencial hidrelétrico inventariado, como apresentado na Tabela 1 e o restante mesmo tendo alto potencial de geração, se encontra distante dos grandes centros urbanos, sendo visto na Tabela 2, além de possuir fatores socioambientais cruciais que precisam ser levados em consideração.

**Tabela 1 - Potencial hídrico brasileiro**

Etapa	UHEs	Projetos < 30MW	Total	Participação
Construção e operação	102	6	108	62%
Potencial hidrelétrico inventariado	52	16	68	38%
Potencial hidrelétrico brasileiro	154	22	176	100%

Fonte: Adaptado de EPE (2022).

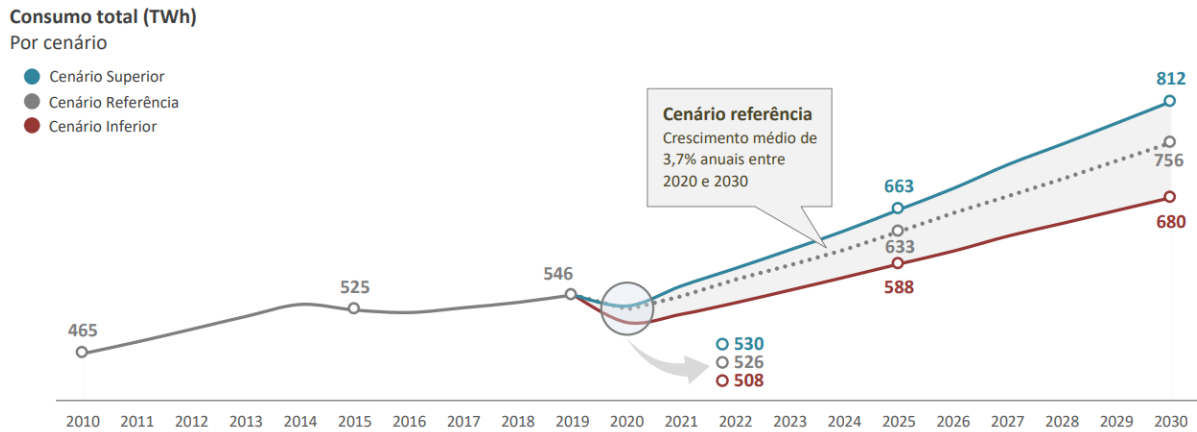
**Tabela 2 - Participação das regiões no potencial inventariado**

Região hidrográfica	Potencial Inventariado - UHEs (GW)	Participação
Amazônica	33	64%
Tocantins - Araguaia	7,9	15%
Paraná	2,9	6%
Uruguai	2,8	5%
Outras	5,4	10%

Fonte: Adaptado de EPE (2022).

Atrelado a isso, tem o risco dessa fonte vir a passar novamente por dificuldades de abastecimento como ocorridas em 2001/2002 e 2014/2015, em consequência da falta de chuvas. Com um aumento do uso da eletricidade em 2030, conforme projeção apresentada na Figura 2, a eletricidade deverá ser oriunda de outras fontes renováveis que já vem sendo desenvolvidas.

**Figura 2 – Projeção de consumo de energia**

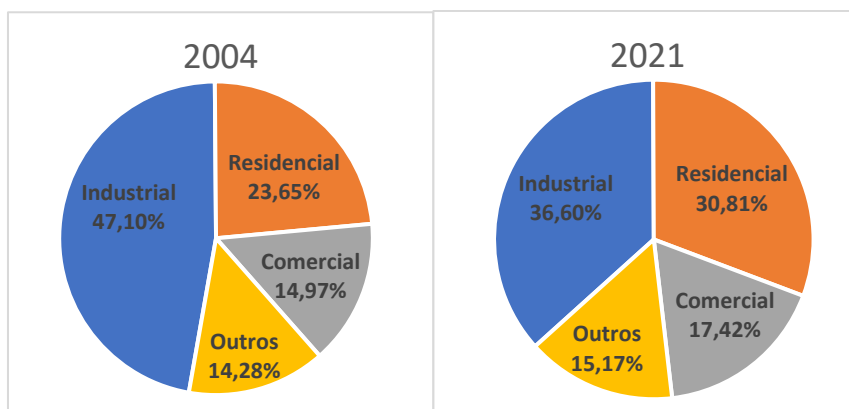


Fonte: EPE (2022).

### 2.1.1 Estudo da energia elétrica na indústria

A Empresa de Pesquisa Energética relata que o setor industrial era responsável pelo consumo de 47,1% da energia elétrica total do país em 2004. Esse setor teve seu consumo reduzido durante os 17 anos seguintes, chegando ao índice de 36,6% no ano de 2021, conforme ilustrado na Figura 3 EPE (2022).

**Figura 3 - Comparativo de consumo elétrico por setor**

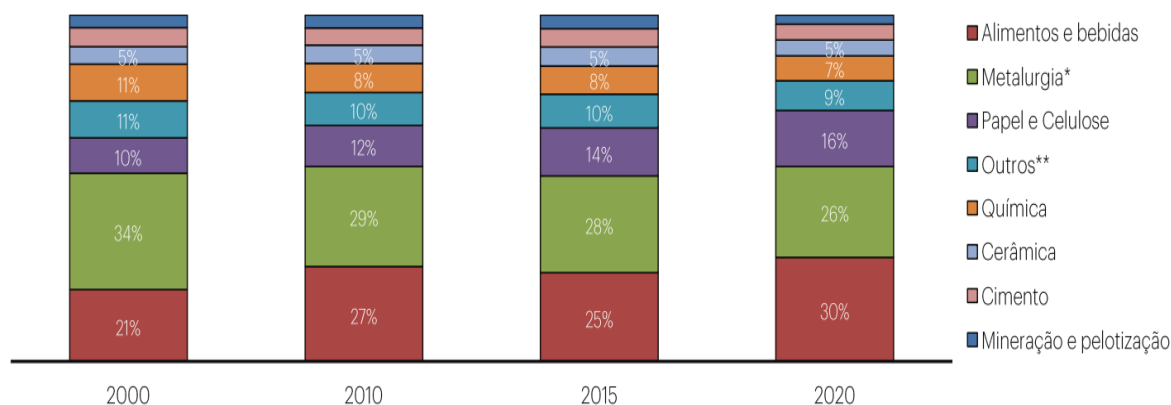


Fonte: EPE (2022).

Esse consumo industrial de energia concentra-se relativamente em poucos setores, e sua distribuição ocorre conforme a disposição da Figura 4. A atividade industrial no Brasil responde por parcelas expressivas do consumo de eletricidade, como visto anteriormente, além de apontar

para potencial eficiência energética a ser melhor aproveitada, pois setores competitivos como indústria dependem diretamente da sua eficiência energética voltada aos processos internos fazendo com que os produtos consigam manter uma boa margem de resultado evitando sua inviabilidade.

**Figura 4 - Consumo de energia por subsetores da indústria**



Fonte: EPE (2022).

Mesmo com a tendência de queda, houve um crescimento de 4,2% no consumo final de eletricidade no país em 2021. Segundo EPE (2022) “Os setores que mais contribuíram para este avanço em valores absolutos foram o Industrial que aumentou o seu consumo em 15,0 TWh (+7,5%), seguido pelo Comercial que cresceu 4,8 TWh (+5,7%), pelo Agropecuário, com incremento de 1,4 TWh (+4,2%) e pelo Residencial, que cresceu em 1,6 TWh (+1,1%)”. Dentro do ramo industrial, o segmento de Alimentos e Bebidas foi o único que apresentou um recuo, de 10,5%. Todos os demais segmentos industriais registraram um aumento de consumo energético em 2021.

De acordo com EPE (2022), a demanda industrial deve aumentar, mas com menores taxas, graças à substituição de plantas fabris mais antigas e menos eficientes por outras mais modernas e eficazes, mesmo assim irá de 85 milhões para 189 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep) entre 2015 e 2050. A eficiência energética deve ser responsável por uma redução de 18% na demanda de energia até 2050 e esses ganhos de eficiência são obtidos através de substituição de equipamentos, novas tecnologias, gestão de energia e políticas públicas.

### 2.1.2 Eficiência energética

A Eficiência Energética é o pilar para a implementação de uma política energética sustentável, sendo definida como um conjunto de ações que tem como objetivo principal economizar as energias oriundas de fontes renováveis e reduzir a utilização de energia atrelada a uma fonte de energia não renovável (PEREIRA, 2009).

Para Godoi (2011), eficiência energética é racionalização de energia: “ações ou medidas comportamentais, tecnológicas e econômicas, as quais, ao serem realizadas sobre sistemas e processos de conversão/produção, resultem em diminuição da demanda energética, sem prejuízo da quantidade ou da qualidade dos bens e serviços produzidos”.

A eficiência energética força a implementação de estratégias e ações para combater o desperdício de energia ao longo do processo de transformação e ao longo da cadeia de valor relevante. Na prática, o objetivo primordial de um projeto de eficiência energética é aumentar ou manter a gama de produtos e/ou serviços oferecidos, reduzindo o consumo de energia em comparação com períodos anteriores (GOUVEIA, 2008).

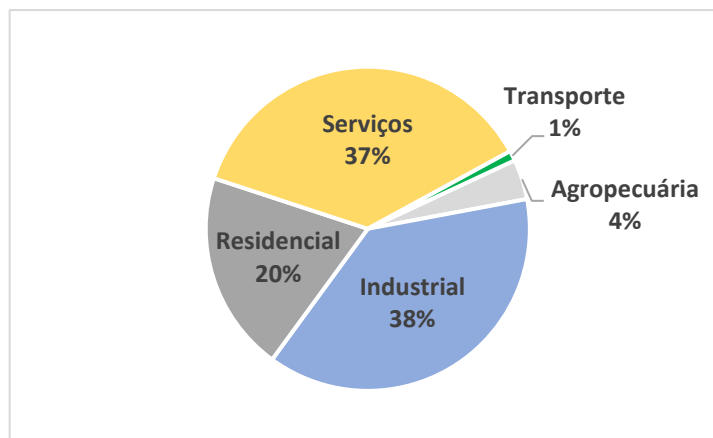
Esse processo de eficiência energética segundo (EPE, 2022), surgiu através de uma iniciativa do governo federal para transformar o mercado, reduzir o consumo de energia, estimulando o desenvolvimento de novas tecnologias, assim aplicado em alguns programas como:

- Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE): tem o objetivo de promover o uso eficiente de energia elétrica fornecendo as informações sobre a eficiência energética dos equipamentos, através de uma etiqueta, que dessa forma pode ser escolhido o equipamento mais eficiente na hora da compra. Essa etiqueta também estimula a fabricação de produtos cada vez mais eficientes (EPE, 2022).
- Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL): tem como sua principal finalidade indicar ao consumidor, através do selo Procel, os produtos que apresentam os melhores níveis de eficiência energética dentro da sua categoria, proporcionando economia na conta de eletricidade e acarretando menos impactos no meio ambiente e garantindo a competitividade entre os fabricantes para que seus produtos obtenham este selo, beneficiando a sociedade em geral (EPE, 2022).

- O Programa de Eficiência Energética (PEE): é um programa do Governo regido por Leis Federais, que obriga todas as Concessionárias de Energia Elétrica a destinar 0,5% do seu faturamento anual para financiar projetos de eficiência energética. O objetivo é promover o uso eficiente da energia elétrica em todos os setores da economia, por meio de projetos que demonstrem a importância e a viabilidade econômica de melhoria da eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais de energia (EPE, 2022).

Além destes programas, para atender ao processo competitivo global e se manter saudável no mercado, a sociedade exige a minimização dos custos, que pode ser atingido através da redução do desperdício de energia elétrica, nos diversos setores como: industrial, comercial e residencial. Segundo EPE (2022), os ganhos com essa eficiência energética são distribuídos como está disposto na Figura 5, onde pode ser visto que o setor industrial é o que mais ganhos propiciou. Isto vem sendo feito diminuindo-se as perdas de energia no processo produtivo, especificando-se equipamentos com máxima eficiência e operando-os o mais próximo da sua condição ideal.

**Figura 5 - Ganhos de Eficiência Energética por Setor**



Fonte: EPE (2022).

Além disso, a fim de entender melhor as mudanças que estão ocorrendo com o passar do tempo, no uso de eletricidade no Brasil, foi realizado um estudo elencando os principais equipamentos consumidores de energia elétrica, sendo os motores no setor industrial e iluminação e ar-condicionado nos setores comercial e público. Através destas informações, iniciaram-se os projetos particulares voltados na melhor empregabilidade da energia elétrica.

### 2.1.3 Métodos de eficiência energética aplicados na indústria

A ênfase dos programas de eficiência energética precisa ser ajustada para refletir a demanda real do mercado brasileiro. Já existem iniciativas voltadas para a indústria, como PROCEL Indústria e PROESCO, mas ainda precisam ser ampliadas (GODOI, 2011). O projeto legislativo PL 3672 foi introduzido em 2012 e transformado em lei em 2016 com a intenção de alterar o PL 9.991 para que a aplicação de recursos para programas de eficiência energética priorize iniciativas da indústria nacional. Apesar das dificuldades mencionadas, Godoi (2011) afirma que um fator que incentiva os projetos de eficiência energética na indústria é o preço da energia, que é inflacionado por diversos impostos e pressiona os custos de produção brasileiros. Isso força as empresas privadas a buscarem menos consumo, e processos mais eficazes.

Segundo a CNI (2009), um estudo realizado pela Confederação Nacional da Indústria examinou 63 programas de eficiência energética industrial. Algumas das conclusões foram que 62 % apoiam a substituição de equipamentos e alteração de processos industriais, 82% dos programas contam com algum tipo de incentivo financeiro ou fiscal para ações de eficiência energética e 94% dos programas relacionam ganhos de eficiência com ganhos ambientais. Além disso, de acordo com este relatório, as principais ferramentas utilizadas incluem a redução de impostos, o desenvolvimento de recursos humanos e a contratação especializada de diagnósticos energéticos.

Com relação a estes estudos, pode ser visto que a gestão da energia é algo essencial definida por Schulze et al. (2015), como: “(...)atividades sistemáticas, procedimentos e rotinas em uma companhia industrial incluindo elementos de planejamento/estratégia, implementação/operação, controle, organização e cultura, envolvendo tanto processos de produção quanto de suporte, com o objetivo de continuamente reduzir o consumo de energia na empresa e seus custos relacionados” (SCHULZE et al., 2015, p. 26).

Já Godoi (2011) concentrou -se em 217 projetos de eficiência energética financiados pela Lei nº 9.991, que atingiram a marca de R\$ 161 milhões em investimentos e atingiram uma economia de 626 GWh. No entanto, o balanço energético entre 1984 e 2004 mostra que ainda há espaço para a pesquisa de processos e equipamentos mais eficientes. De acordo com o PROCEL (2006), a eficiência energética pode ser medida pelo equilíbrio entre a energia fornecida e a energia efetivamente utilizada para a realização de um determinado processo.



Backlund et al. (2012) afirmam que combinar investimentos em novas tecnologias com a promoção de um sistema de gestão de energia (SGE) eficaz, é uma forma viável de aumentar a eficiência energética econômica. Esse conceito é sustentado pelo IEA (2012), que afirma que a implantação de um SGE é uma das formas mais efetivas de redução de consumo e custos. Quando uma empresa não gerencia ativamente seu uso de energia e não tem um plano para isso, é significativamente menos eficiente em termos de energia do que poderia ser.

Na indústria, o maior consumidor de energia são os sistemas motrizes, portanto Stoffel (2015) em seu estudo sobre a eficácia dos motores nos processos, chegou à conclusão de que o uso de motores de alta eficiência, motores com velocidade variável quando apropriado e a otimização do sistema eram todos necessários. Concordando com isso, CNI (2009) informou que o uso de controles eletrônicos de velocidade para motores elétricos deve ser realizado sempre que possível para maximizar a eficiência energética do processo. Em sistemas de bombeamento de fluidos é importante verificar a presença de vazões nominais excedidas, além de válvulas de fluxo restritas ou fechadas, pois esses dois fatores juntos, são o que tornam baixas as eficiências do processo.

Segundo Waide e Brunner (2011), processos com variações significativas na vazão necessária são candidatos ideais para o uso de inversores de frequência, que são dispositivos eletrônicos com a função de variar a velocidade do motor elétrico, por meio da variação da frequência entregue pela rede elétrica, e que processos que funcionam de forma não contínua devem operar em sua vazão máxima pelo menor período possível. Embora a maioria dos motores tenha níveis de eficiência acima de 90%, eles são frequentemente sobre dimensionados e operam abaixo dos parâmetros projetados, o que com tecnologias e comportamentos operacionais otimizados citados acima podem aumentar a eficiência de um processo envolvendo motores elétricos para números razoáveis. Eles estimaram que otimizando motores elétricos seria possível economizar cerca de 322 TWh até 2030 no setor industrial.

## 2.2 A INCLUSÃO DA PINTURA NA INDÚSTRIA

A pintura é uma camada protetora que pode ou não conter pigmentação, segundo Schneberger (1989). Na maioria das vezes, as técnicas de pintura são empregadas para conferir

valor estético e proteção a um determinado produto. Se a proteção estiver comprometida, a pintura pode prevenir ou retardar processos de corrosão, ou outros efeitos relacionados ao intemperismo (DRUMOND, 2013).

A tinta automotiva é composta por uma parte solúvel, no qual se enquadram os solventes ou a água, e outra parte sólida formada pelos aditivos, resinas e pigmentos. Estes podem conter apenas tinta para as pinturas sólidas, partículas de alumínio para pinturas metálicas e pigmentos de pérola para pinturas perolizadas (ARTCOATING, 2022).

Segundo Instacarro (2022), antes da década de 40, a indústria automotiva já utilizava o processo de pintura em veículos, porém eles eram pintados à mão e com pincel, utilizando apenas o pigmento de cor preta, pois as outras cores demoravam a secar e desbotavam com maior facilidade. A partir da segunda guerra mundial, no ano de 1945, as montadoras aumentaram a produção e necessitaram prover de métodos mais eficazes, sendo assim, surgiu o processo de pintura spray com utilização de pistolas de pintura.

### 2.3 SISTEMAS DE PINTURA INDUSTRIAL

Com a inclusão do processo de pintura spray, uma série de problemas que até antes eram desconhecidos, foram causados através pela pulverização de tintas. Neste processo de pintura são criadas minúsculas partículas de tinta que ficam suspensas no ar e têm o potencial de afetar o pintor através do acesso aos sistemas digestivo e respiratório (TECH-AIR, 2018).

Segundo Feng e Mears (2015), a área de pintura responde por cerca de 60 % da energia utilizada por uma fábrica automotiva. Já Castro (2015) constata que 39 % da energia elétrica e 57% do ar comprimido são destinados a esse setor da indústria automotiva.

### 2.4 CONCEITO DE FUNCIONAMENTO DA CABINE DE PINTURA INDUSTRIAL

Silva e Almeida (2012), definem as cabines de pintura em um equipamento fechado, com apenas a abertura frontal, dispostos de sistema de filtragem de ar. Possuem como principal função evitar a emissão de partículas de tinta no ar externo a cabine, durante o processo de

pintura, além de garantir que impurezas não se depositem sobre os veículos, fazendo com que a qualidade seja atendida.

Segundo (ACCI, 2018), o objetivo da cabine de pintura é manter limpo o ambiente ao seu redor e criar o fluxo de ar ideal, para que o excesso de tinta seja direcionado para filtragem ou lavagem, antes de ser disperso na atmosfera. Para evitar a entrada de poeiras, a cabine é mantida sob pressão positiva.

O objetivo das cabines de pintura é manter um ambiente limpo, evitando a entrada de contaminantes e a perda de tinta por aspensão no ambiente. Para uma maior qualidade a temperatura interna deve ser mantida em torno de 25°C e o nível de umidade em aproximadamente 60%. Esses parâmetros são controlados pela pulverização de água, para aumentar a quantidade de umidade presente no ambiente, e pelo sistema de aquecimento, através de um queimador alimentado por gás natural, para controle da temperatura, quando existentes (GNECCO, 2003).

#### **2.4.1 Tipos de cabines de pintura**

De acordo com (ACCI, 2018), uma cabine de pintura líquida pode ter um sistema de filtragem úmida ou seca, e o fluxo de ar pode ser *crossdraft* (horizontal) ou *downdraft* (vertical). A cabine de pintura também pode ser aberta ou fechada, com insuflação de ar filtrado ou mesmo climatizado, com controle de umidade e temperatura. Cada tipo de cabine de pintura possui seu próprio sistema de filtragem de *overspray* específico, projetado especificamente para aquele tipo de cabine.

#### **2.4.2 A cabine de pintura úmida e seus subsistemas**

Segundo Gnecco (2003), a cabine de pintura úmida é a excelência quando o assunto é a qualidade da filtragem do ar, através do seu processo de cortina de água, garantindo assim o acabamento do serviço prestado. A cabine de pintura úmida é composta por dois grandes

subsistemas que são descritos como: sistema de filtragem com água e sistema de insuflamento e exaustão, que serão abordados com mais detalhes na sequência.

#### 2.4.2.1 Sistema de filtragem com água

Nesse sistema de filtragem, a água se mantém em circulação através de um sistema de bombas, que tem a finalidade de manter uma cortina d'água diante do sistema de exaustão, fazendo com que os particulados ao passarem pela água sejam retidos. Essa água passa por um tratamento com coagulação química, no qual não necessita de energia elétrica, antes de retornar, a fim de não saturar e manter a eficiência de absorção. Esse sistema pode alcançar eficiência de remoção de 95 a 98% (KHAN; GHOSHAL, 2000).

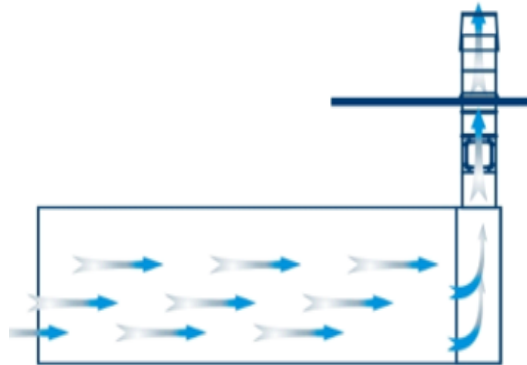
O processo de transferência de compostos de uma fase gasosa para uma fase líquida usando a água é conhecido como absorção por filtragem úmida. Nesse procedimento, os poluentes das fases gasosa e sólida são transferidos simultaneamente para a fase líquida por meio de absorção física, ficando então retidos na água. A solubilidade do poluente no absorvente líquido, a área disponível para contato, a concentração do poluente nas fases gasosa e líquida e a razão entre a pressão do gás e a pressão do líquido são todos fatores da absorção na cortina de água (CETESB, 2017).

#### 2.4.2.2 Sistema de insuflamento e exaustão

De acordo com (ACCI, 2018), os modelos de sistema de filtragem internos existentes para cabines de pintura com suas particularidades estão descritos abaixo:

- Fluxo horizontal (*Crossdraft*): é o mais inicial, pois resulta da configuração mais simples, que consiste em apenas uma câmara de exaustão horizontal com filtro e exaustor acoplado, sendo apresentado na Figura 6. Esse modelo causa má qualidade e desconforto ao trabalhador.

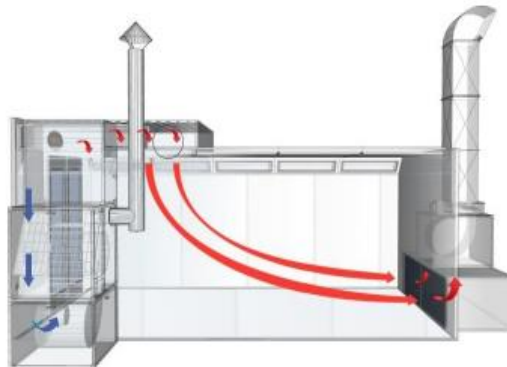
**Figura 6 - Cabine *Crossdraft***



Fonte: FINISHING ACADEMY (2011).

- Fluxo semi-horizantal (*Semi-Downdraft*): é um sistema onde o ar é introduzido na cabine pelo teto com fluxo vertical através de um ventilador para sair na horizontal, criando turbulência no interior e fazendo com que as sujeiras incidam no veículo, sintetizado a partir da Figura 7.

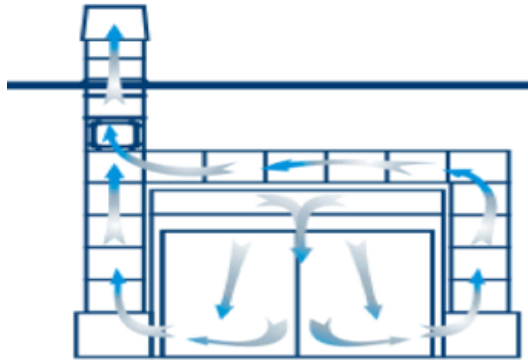
**Figura 7 - Cabine *Semi-Downdraft***



Fonte: MANNELLI (2016).

- Fluxo descendente lateral (*Side-Downdraft*): são semelhantes às cabines semi-horizontais, pois extraem o ar lateral com filtros que são mais baixos nas laterais, como visto na Figura 8. Dado que qualquer possível particulado é facilmente removido da área de trabalho, esse tipo de fluxo gera excelentes níveis de acabamento.

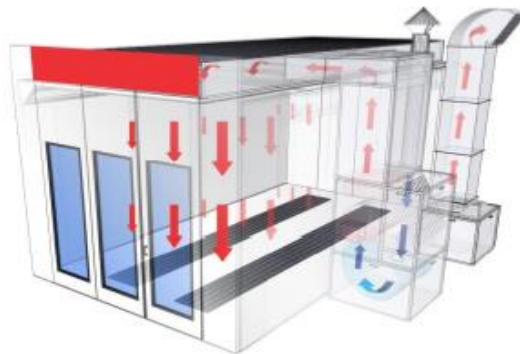
**Figura 8 - Cabine *Side-Downdraft***



Fonte: FINISHING ACADEMY (2011).

- Fluxo descendente (*Downdraft*): são as mais populares por produzirem os melhores resultados, permitindo um grande fluxo de ar muito estável através das superfícies de pintura. Este sistema também se destaca em termos de qualidade final, porque o fluxo descendente constante causa um efeito depressor nas impurezas presentes, garantindo que se acumulem no solo da cabine, conforme detalhes apresentados na Figura 9.

**Figura 9 - Cabine *Downdraft***



Fonte: MANNELLI (2016).

## 2.5 EQUIPAMENTOS DA CABINE DE PINTURA ÚMIDA

Como visto anteriormente a cabine de pintura úmida de fluxo descendente é composta por dois subsistemas. Estes subsistemas por sua vez serão divididos em alguns equipamentos

principais, que são responsáveis pelo seu funcionamento como: motores elétricos, ventiladores e bombas, que serão mais bem abordados na sequência deste trabalho.

### 2.5.1 Motor elétrico

Motores elétricos são dispositivos utilizados para promover a rotação de um eixo, consumindo energia elétrica. Motores com corrente alternada recebem tensão alternada da rede no estator, que por sua vez cria um campo magnético que induz uma corrente no rotor, fazendo com que o rotor gire, como resultado da interação entre os campos magnéticos do estator e rotor (WEG, 2017).

O estator possui três bobinas espaçadas em um ângulo de 120 graus cada, que criam um campo magnético giratório, à medida que a corrente passa por elas. Este campo induz tensão no rotor, que por sua vez produz correntes, que estabelecem um segundo campo magnético (que também é rotativo), em resposta ao primeiro. Devido à sua propensão ao alinhamento, os dois campos provocam o surgimento do conjugado eletromagnético (torque), que força a rotação da parte móvel do motor (rotor) (KOSOW, 1982).

A velocidade do campo magnético girante, também chamada síncrona é oriunda da Equação 1:

$$N_s = \frac{120 * f}{P} \quad (1)$$

*N<sub>s</sub>* = Velocidade síncrona (RPM)

*f* = Frequência da tensão elétrica de alimentação (Hz)

*P* = Número total de polos por fase

#### 2.5.1.1 Motor elétrico síncrono

Devido à construção física do motor síncrono ser mais simples, não possuir bobinas elétricas, fazendo com que essa característica estrutural torna este motor capaz de operar em altas densidades de corrente com baixas densidades de temperatura (BOGLIETTI, A. et al., 2006). Além disso, com menor temperatura, as perdas causadas pela dissipação de energia no

rotor se tornam inexistentes, tornando os modelos de máquinas elétricas mais simples e eficientes (BOLDEA, I. et al., 2014). A diferença entre a rotação relativa dos eixos diretos e a quadratura serve de base para o princípio de funcionamento do motor síncrono e conforme Fitzgerald (2006, p.529) “antes da aplicação em larga escala dos acionamentos baseados em eletrônica de potência para controlar máquinas CA, os motores CC eram de longe as máquinas escolhidas em aplicações que necessitassem de flexibilidade de controle”.

#### 2.5.1.2 Motor elétrico assíncrono

Segundo Fitzgerald (1975), quando uma carga é acionada por um motor de indução, sua resistência conjugada provoca uma redução na velocidade do rotor, ampliando a distância entre a velocidade do rotor e a do campo girante (escorregamento). O aumento do escorregamento faz com que a demanda de potência elétrica da rede, as correntes e os conjugados também aumentem, possibilitando que o motor responda satisfatoriamente ao aumento da carga.

Souza (2018), concorda com Fitzgerald, e define o motor de indução assíncrono como um dispositivo que opera a uma velocidade ligeiramente mais lenta que a síncrona. Esta pequena diferença é o resultado da velocidade do rotor ser ligeiramente inferior à velocidade do campo magnético rotativo. A cada aumento de peso mecânico no eixo, uma mudança de velocidade é induzida, fenômeno conhecido como escorregamento e pode ser obtido através da Equação 2.

$$S = \frac{(Ns - Nr)}{Ns} \quad (2)$$

*S = Escorregamento (expresso em percentual se multiplicado por 100)*

*Ns = Velocidade síncrona do campo magnético girante (RPM)*

*Nr = Velocidade do rotor (RPM)*

De acordo com (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003), os motores elétricos de corrente alternada normalmente têm rotações fixas que são determinadas pela frequência de



alimentação da rede, que geralmente é de 50 ou 60 Hz. Porém, utilizando inversores de frequência, é possível alterar a frequência de alimentação do motor para alterar sua rotação.

### 2.5.1.3 Perdas no motor elétrico

Como a finalidade de um motor de indução é converter energia elétrica em trabalho mecânico e esse processo de conversão de energia em dispositivos eletromecânicos não é perfeito, isso resulta em uma parcela de energia perdida. Essas perdas de um motor industrial, que ocorrem durante a operação, são dissipadas como calor. A situação ideal seria que o motor não tivesse perdas, mas isso não é real. As perdas, juntamente com o sistema de refrigeração do motor, são diretamente responsáveis pelo aumento de temperatura da máquina (SILVA, 2013).

- **PERDAS POR EFEITO JOULE:** as perdas por efeito joule variam com o peso no eixo e em proporção quadrática com a variação da corrente, pois estão ligadas pelo aquecimento gerado devido a circulação de corrente nos condutores do estator e rotor. São responsáveis por uma parcela de 55 % das perdas totais (ANDREAS, JC; 1982).
- **PERDAS POR ATRITO E VENTILAÇÃO:** as perdas mecânicas representam 9% de todas as perdas e podem surgir por atrito e ventilação, assim as perdas geradas por atrito decorrem de falhas no conjunto rotacional dos motores, sendo eles rolamentos e mancais. Já as perdas por ventilação estão relacionadas aos ventiladores, que normalmente são acoplados ao eixo do motor para refrigeração (SILVA, 2013).
- **PERDAS NO FERRO POR HISTERESE E FOUCAULT:** dado que o motor opera em frequência constante, as perdas por histerese ocorrem principalmente no estator e estão diretamente correlacionadas com a tensão aplicada. Já a circulação das correntes induzidas no interior do material magnético gera as perdas de Foucault, cujas variam de forma quadrática com a tensão aplicada. Essas perdas podem variar de 20% a 36% para um motor com carga nominal (ANDREAS, JC; 1982).

#### 2.5.1.4 Motor de alto rendimento

A principal característica desses motores são as melhorias nos pontos de maior perda vistos anteriormente, que implicam em aumentar a quantidade de cobre nas bobinas do rotor, ampliar as barras do rotor e otimizar o desenho das ranhuras, para reduzir perdas por efeito Joule. Outras melhorias incluem a redução da intensidade do campo magnético, e o uso de material magnético de alta qualidade, para reduzir as perdas de ferro e Foucault, além de utilizar rolamentos mais adequados e otimizar o projeto do ventilador, reduzindo as perdas mecânicas (PROCEL, 2007).

Segundo a NBR 5383-1 (2002), a razão entre a potência de saída e a potência ativa de entrada, define o rendimento de um motor elétrico, expressado em porcentagem, sendo representado pela Equação 3.

$$n = \frac{P_m}{P_e} * 100 \quad (3)$$

$n$  = Rendimento (%)

$P_m$  = Potência Mecânica de Saída (kW)

$P_e$  = Potência Elétrica de Entrada (kW)

Segundo Thies (2016), o rendimento nominal dos motores de indução trifásicos é definido como “[...] a porcentagem da potência de entrada convertida em potência mecânica”. O motor atinge a mais alta eficiência operacional dentro da faixa de 80% a 110% da carga nominal. Com base nisso, deve - se sempre evitar que o motor opere em um nível de potência muito abaixo da sua capacidade nominal, pois acarreta baixo rendimento e baixo fator de potência. Embora possam não ser as respostas definitivas para todas as questões energéticas relacionadas aos motores industriais, os motores de alto rendimento se apresentam como uma ótima alternativa para economia de energia em sistemas motrizes.

#### 2.5.1.5 Eficiência do motor

Uma máquina eficaz em sua essência é o motor elétrico trifásico, pois sua curva de rendimentos revela um patamar amplo que abrange uma faixa de 50% a 100% das cargas com

rendimentos elevados. Esse comportamento é difícil de ver em outras concepções de máquinas, como hidráulica ou térmica, onde a potência declina rapidamente, ao operar fora das condições nominais (PROCEL, 2007).

Uma parte significativa dos problemas de eficiência, encontrados na maioria das aplicações, são causados por superdimensionamento ou uso de um motor com potência significativamente maior do que a necessária para a ativação da carga. De acordo com um estudo do Departamento Americano de Energia, mais de 40% dos motores instalados na indústria operam com 40% ou menos de sua capacidade nominal, levando a uma aplicação ineficiente (HURST, 2007).

### 2.5.2 Inversor de frequência

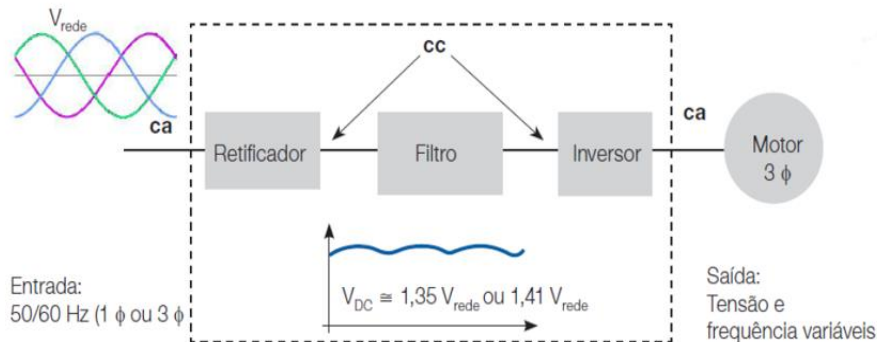
Reconhecendo que a velocidade de rotação do rotor é proporcional ao número de ciclos que a corrente e a tensão completam em um determinado período, é possível alterar a frequência de alimentação do motor para valores controlados por dispositivos eletrônicos, denominados inversores de frequência. Afetam diretamente a velocidade do rotor e, conseqüentemente, o eixo do motor (PROCEL, 2007). Os inversores de frequência funcionam por meio de retificadores e inversores de tensão de entrada, conforme Figura 10, onde primeiro as fases da entrada são retificadas para tensão contínua e passam através de um filtro ou link DC, onde então ocorre a regulação desta tensão pelo conversor, que fornece a tensão alterada de saída com amplitude controlada (WEG, 2016).

Segundo Mohan et al (2002), os inversores de frequência, são dispositivos eletrônicos que transformam a tensão da rede em contínua e após possibilitam a variação da amplitude e frequência da rede. Além disso, os inversores ajustam a frequência dos motores elétricos de forma a manter, no mínimo, sua condição de 100 % da carga nominal (WEIGAND et al., 1996).

Mesmo atendendo a carga nominal, também é necessário que se dê atenção para a magnitude da redução de velocidade, pois a maioria dos motores assíncronos requerem refrigeração forçada. Quando esta velocidade é reduzida, a quantidade de ar que esfria o motor elétrico também é reduzida, isso pode em alguns casos, chegar a 50% da rotação nominal sem prejuízo (KRIEL; JOUBERT; MARAIS, 2013), porém aconselha-se que a classe do motor seja verificada para que seja compatível com os efeitos do aumento de temperatura. Contudo, para

Franchi (2013, p.20) “o inversor de frequência, junto com o motor CA, torna-se a melhor solução para controle e acionamentos de motores em processos industriais”. Sendo assim para sua implementação deve-se avaliar os dois tipos existentes.

**Figura 10 - Diagrama do inversor de frequência**

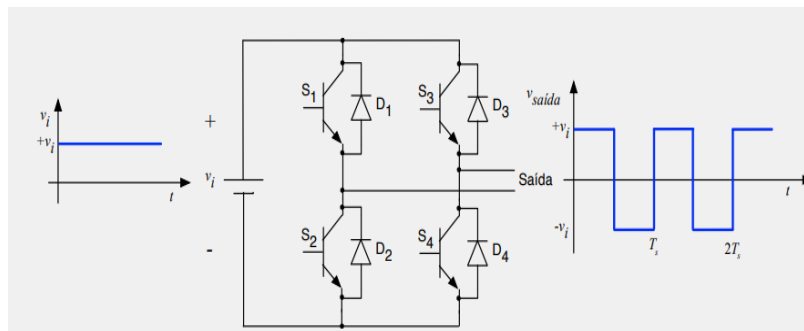


Fonte: WEG (2010).

### 2.5.2.1 Inversor com onda quadrada

Os inversores dotados desta configuração, possuem o *hardware* mais simples, sendo sua principal vantagem, o baixo custo, sendo utilizado para aplicações simples. Com este tipo de inversor, a tensão contínua é controlada para regular a amplitude da onda senoidal, cabendo ao inversor regular apenas a frequência da onda senoidal e gerando uma onda quadrada na tensão da saída, como visto na Figura 11 (MOHAN, 2003).

**Figura 11 - Modelos de onda**



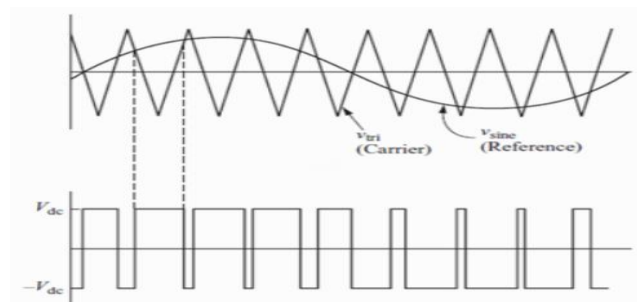
Fonte: AHMED (2000).

### 2.5.2.2 Inversor com modulação por largura de pulso (PWM)

Segundo Boldea (2014), os inversores com modulação por largura de pulso são os mais utilizados para aplicações em motores de baixa tensão, principalmente devido à sua relação custo-benefício favorável. O controle do inversor PWM ocorre tanto na frequência como na tensão de saída para a carga (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003).

Para Pomilio (2006), o inversor funciona a uma frequência constante, mas altera o tempo de funcionamento das chaves de potência e o sinal de comando é muitas vezes obtido comparando um sinal de controle com uma onda periódica. De acordo com essa informação, WEG (2016), define que o inversor para obter uma onda senoidal de frequência controlada, estratifica duas outras ondas, sendo uma triangular e outra senoidal. A onda senoidal de controle se comporta de maneira semelhante à onda senoidal desejada do inversor e é comparada a uma onda triangular de amplitude e frequência constante, que representa a frequência de comutação do inversor, onde uma onda digital pulsada é produzida pela sobreposição das ondas triangulares e senoidais, que pode ser visto através da Figura 12.

**Figura 12 - Modelo de onda inversor PWM**



Fonte: HART, (2010).

### 2.5.2.3 Inversor com controle escalar

O controle escalar é amplamente utilizado na indústria, devido à sua simplicidade, e grande parte das aplicações não requer alta precisão ou grande velocidade (SANTOS et al., 2014). Além de ter respostas mais lentas às variações de velocidade, o modo escalar carece de alta precisão (PAIXÃO, 2009).

Cortes (2010), por sua vez, afirma que “o controle escalar utiliza a velocidade do motor como sinal para fazer variar a tensão e a frequência e disparar os transistores”. Sendo assim, o seu principal benefício é a relação contínua entre tensão e frequência de operação, fazendo com que em algumas aplicações, onde a velocidade precisa ser ajustada, a tensão é então ajustada proporcionalmente para manter a relação  $V/f$  constante (SANTOS et al., 2014).

A ideia por trás do controle escalar é aplicar uma relação tensão/frequência específica ( $V/f$ ) ao motor, durante todas as fases de operação, para manter um fluxo e torque aproximadamente constantes. Sendo a faixa de variação de velocidade pequena, o seu uso nos motores de indução convencionais é na maioria das vezes sem sistema de controle em malha fechada (WEG, 2016).

Segundo Oenning (2011), o controle com inversores também pode ser utilizado em aplicações industriais complexas. Embora este método seja, sem dúvida, mais eficaz no contexto de uso de energia, procedimentos complexos de controle e automação podem estar ligados ao controle de rotação de bombas para alcançar um nível de controle mais preciso.

#### 2.5.2.4 Inversor com controle vetorial

O objetivo do método de controle vetorial é controlar a corrente do motor, a partir da decomposição do mesmo em dois vetores: um responsável pelo fluxo de torque do motor e outro pela magnetização do estator. Como resultado, o inversor tem um controle preciso sobre o torque e a velocidade do motor (WEG, 2016). Por sua vez, “esses inversores podem controlar a velocidade e o conjugado do motor, tomando como referência a corrente do próprio motor, sendo mais empregados no controle fino de velocidade dos motores” (CÔRTEZ, 2010, p.84). Permite a representação de grandezas elétricas instantâneas, com base nas equações dinâmicas da máquina e com grandezas relacionadas ao fluxo do rotor. Em outras palavras, o controle visualiza o motor de indução como um motor contínuo com regulagem independente de torque e fluxo (WEG, 2016).

### 2.5.2.5 Vantagens e desvantagens do inversor de frequência

Um benefício de controlar a velocidade de um motor elétrico é a prevenção de picos de tensão ao ligar o motor, o que é feito através do controle de acionamento. Segundo Mesquita (2015, p. 24), “como as partidas e paradas bruscas são reduzidas por rampas de aceleração e frenagem, o impacto nos componentes mecânicos é minimizado”. Outro benefício é que um sistema com inversor, que opere de acordo com os requisitos operacionais, terá uma melhor preservação dos equipamentos e acessórios, prolongando sua vida útil e reduzindo os custos de manutenção (LEITE, 2018, p.31).

Problemas relacionados à harmônicos também devem ser investigados e resolvidos ou amenizados para parâmetros aceitáveis, através de filtros (BOLDEA, 2014). Esses harmônicos são gerados pelas frequências não lineares dos inversores e podem vir a danificar os equipamentos (MAHESWARAN et al; 2012). Além disso, ocorre a redução do rendimento devido às perdas decorrentes dos harmônicos e aumento do nível de ruído, em função da frequência (MORAES; MIRANDA, 2014).

### 2.5.3 Ventilador centrífugo

Segundo Jorgensen (1999), um ventilador é um dispositivo que gera um fluxo constante de ar, através da rotação de um impelidor, montado sob uma carcaça estacionária, e tem um ótimo ponto de operação, atendendo a uma faixa com pressão e velocidade pré-determinadas em uma determinada rotação do rotor onde seu desempenho será máximo. Para Henn (2006), o ventilador é uma máquina que produz um diferencial de pressão no fluido, facilitando a troca de energia entre o fluido e o sistema mecânico.

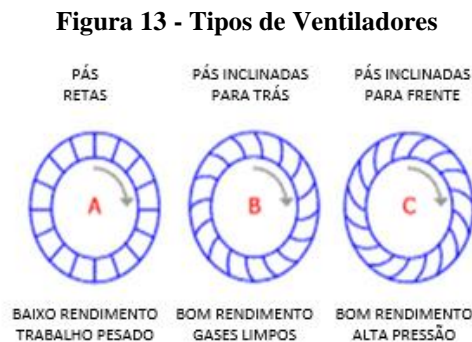
Na configuração axial, o fluxo é paralelo ao eixo do rotor e direto a uma tubulação ou ao ambiente. Em ambientes domésticos, esse tipo de ventilador é típico. Sua principal característica é o fornecimento de alta pressão a pequenos diferenciais de pressão (MOREIRA, 2006). Já no caso dos ventiladores centrífugos, o fluido entra axialmente no rotor e é impulsionado no sentido centrífugo, sendo necessário o uso de um eixo para direcionar a

descarga do fluido. A principal característica desse tipo de ventilador é a produção de pás menores em altas pressões (FRANÇA, 1999).

Os ventiladores são tipicamente acionados por um motor elétrico, que pode ser montado diretamente no rotor, garantindo assim uma montagem mais compacta e rotação constante ou pode ser conectado através de correias, acoplamento flexível ou caixa de transmissão, proporcionando flexibilidade para a mudança de rotação do impulsor, além disso, garante que o motor não tenha contato com o fluido que está sendo transportado (NIOSH et al; 1998).

### 2.5.3.1 Tipos de ventilador centrífugo

Os ventiladores centrífugos podem apresentar algumas alterações construtivas que influenciam na sua utilização e eficiência, conforme a Figura 13, sendo apresentados abaixo.



Fonte: Adaptado de MACINTYRE (1990).

- **VENTILADOR CENTRÍFUGO COM PÁS RETAS RADIAIS:** é mais durável e fácil de limpar automaticamente, mas devido às condições de escoamento não tangencial, apesar de serem rotores de construção mais simples, estes possuem eficiência relativamente baixa. Este ventilador pode ser utilizado para operações de moagem, expulsão de vapores corrosivos e até materiais abrasivos.



- **VENTILADOR CENTRÍFUGO COM PÁS CURVADAS PARA FRENTE:** este ventilador possui pás que são voltadas para a frente, ou no sentido de rotação. É utilizado com gases isentos de material particulado sólido e tem um desempenho máximo de 65%, é mais compacto e pode ser usado em espaços com limitação física, pois essa característica leva a grandes ângulos de pás e aumento de sua vazão, que são maiores que os de qualquer outro ventilador centrífugo de mesmo tamanho e velocidade (FRANÇA, 1999). São os ventiladores mais utilizados em sistemas de ar-condicionado, pois é possível grande vazão com baixa rotação e conseqüentemente baixo ruído (VIANA, 2002).

Segundo França (1999), a potência aumenta continuamente à medida que a vazão aumenta, necessitando de cuidadosa consideração na determinação do ponto de operação do sistema ventilador motor e na escolha do motor elétrico. Se a vazão resultante for significativamente maior do que a projetada, podem ocorrer danos ao equipamento.

- **VENTILADOR CENTRÍFUGO COM PÁS CURVADAS PARA TRÁS:** tem o maior rendimento de todos os citados, atingindo a ordem de 85% de rendimento (MCKERVEY, 1993). É possível obter uma corrente de ar mais consistente e com menos turbulência através do impelidor utilizando as pás com perfil aerodinâmico, sendo silencioso quando você está trabalhando em seu ponto operacional efetivo (MESQUITA, 1988). Uma característica notável de sua curva de potência é que seu valor de pico ocorre em um ponto equivalente a 70-80% de seu potencial máximo. Segundo França, “esse ventilador nunca terá problemas de sobrecarga devido a um projeto incorreto ou operação insuficiente do sistema de ventilação”.

#### 2.5.3.2 Eficiência de ventiladores centrífugos

Segundo HENN (2006), a energia só pode ser transformada, não podendo ser criada ou destruída, portanto, suas perdas são processos irreversíveis onde a energia mecânica é convertida em outras formas, como calor, energia interna ou atrito. Sendo assim a potência

utilizada pelo motor elétrico que aciona o ventilador é a total já com a soma das potências necessárias para realizar o trabalho no fluido.

De acordo com as leis dos ventiladores, um ventilador submetido a uma variação rotacional sofrerá alterações proporcionais ao volume, alterações de pressão quadrática e alterações de potência cúbica (MESQUITA, 1988). Para regulamentar as questões de eficiência envolvendo ventiladores foi publicada em 2010 a AMCA 205 (Classificação de Eficiência Energética em Ventiladores) com revisão de 2012 reconhecida pela ANSI.

Para Ivanovich (2014) “A AMCA 205 tem dois elementos chaves, primeiro a nova métrica de eficiência chamada Ventilator Efficiency Gauge (FEG)”, que significa relacionar o tamanho do rotor com a eficiência geral do ventilador e determinar o nível de FEG. Outro elemento segundo ele é “os ventiladores devem ser dimensionados/selecionados para operar dentro de 15 pontos percentuais do total de eficiência nominal de pico do ventilador”, mostrando que mesmo um ventilador de alto desempenho não funcionará bem se for usado no local errado do ponto de uso.

#### 2.5.4 Bomba de circulação

Bombas são dispositivos mecânicos usados para mover líquidos de um local para outro durante um processo específico. Para isso, necessitam de uma fonte externa de energia, que muitas vezes vem de motores elétricos. Sem dúvida, dentre os diversos modelos de construção, um dos mais populares é o uso de bombas centrífugas (OENNING, 2011), que utilizam a força centrífuga aplicada ao líquido pela rotação de um rotor para impulsionar o produto.

Quando o rotor se move, o líquido fica sujeito à força centrífuga e é forçado em direção à borda do caracol, e assim forma - se uma zona de baixa pressão na entrada da bomba, que se conectada a um reservatório, funciona succionando o líquido. Por outro lado, à medida que o rotor avança, o líquido no perímetro do caracol é forçado em direção à saída, o fazendo se mover (MATTOS e FALCO, 1998).

#### 2.5.4.1 Eficiência da bomba de circulação

A operação abaixo do ponto máximo de operação da combinação motor-bomba resulta em menor eficiência operacional tanto da bomba quanto do motor elétrico, além de maior consumo de energia. De acordo com Mohan, Undeland e Robbins (2003), a quantidade de energia elétrica necessária pela bomba para alimentar o motor é proporcional ao cubo da velocidade com que ele gira. Portanto, reconhece-se o enorme potencial de redução do consumo de energia elétrica com a redução da rotação das bombas.

O controle de fluxo em sistemas ineficientes é normalmente realizado de duas maneiras: inserindo uma válvula de redução do fluxo ou uma válvula de recirculação, porém em ambos os métodos, há um gasto significativo de desperdício de energia. O modelo com recirculação é menos prejudicial porque não altera a curva do sistema e não interfere no desempenho da bomba, mas requer mais energia elétrica do que o sistema realmente precisa. Já o modelo com válvula de controle de fluxo, altera a curva do sistema, gerando danos adicionais como perdas de carga e aumento de vazamentos, além de uma redução da vida útil dos componentes do sistema como resultado do aumento das cargas radiais e axiais nas bombas e, conseqüentemente, nos motores (OENNING, 2011).

#### 2.5.5 Sistema de iluminação

É crucial mostrar o que alguns especialistas acreditam referente ao conceito de iluminação, portanto para Mamede Filho (2007), a luz "[...] é uma fonte de radiação que emite ondas eletromagnéticas em diferentes comprimentos, sendo que apenas algumas ondas de comprimento de onda definido são visíveis ao olho humano " (MAMEDE FILHO, 2007).

Já OSRAM afirma que uma quantidade suficiente de luz não é o único requisito, ao contrário, também é preciso ter um bom planejamento de iluminação do ambiente e evitar contrastes excessivos, como reflexos indesejáveis. Dessa maneira é possível reduzir a quantidade de esforço físico necessário pelo olho para se ajustar as condições impostas para o trabalho.

A NBR ISO 8995-1, especifica os requisitos de iluminação para locais de trabalho interno, fazendo com que as pessoas desempenhem suas tarefas de maneira eficiente, com conforto e segurança, durante o período de trabalho. Desta maneira, uma seleção de termos e definições relacionadas com a iluminação são descritos abaixo:

**Fluxo Luminoso ( $\phi$ ):** É toda a quantidade de radiação da fonte de luz que o olho humano pode ver entre 380 nm e 780 nm. A unidade de medida é o lúmen (lm) (SCHUBERT, 2006).

**Intensidade Luminosa ( $I$ ):** Refere - se à quantidade de luz emitida em uma direção específica, é expresso em candela (cd) (SCHUBERT, 2006). Adicionalmente, Mamede Filho descreve a intensidade luminosa como “[...] a potência de radiação visível que uma determinada fonte de luz emite numa direção específica” (MAMEDE FILHO, 2007).

**Iluminância ( $E$ ):** É a razão do fluxo luminoso incidente numa superfície pela sua própria área (ABNT, 2013) e sua unidade de medida é o Lux, apresentado através da Equação 4. Colaborando com essa afirmação, Costa (2004) refere-se à quantidade de luz presente em uma área e pode ser medida com o uso de um luxímetro. Esta iluminação pode não ser a mesma em todos os pontos da área, porque o fluxo luminoso não é distribuído uniformemente, assim existem normas que definem o valor mínimo para os ambientes diferenciados pela atividade exercida e relacionados ao conforto visual (COSTA, 2004).

$$E = \frac{\Phi}{S} \quad (4)$$

$E$  = Iluminância (Lux)

$\phi$  = Fluxo luminoso (Lúmen)

$S$  = Área da superfície (m<sup>2</sup>)

**Luminância ( $L$ ):** É a sensação de claridade recebida pelos olhos através da reflexão dos raios de luz em uma superfície, ou seja, em outras palavras, é a intensidade luminosa emanada pela superfície. Sua unidade é a candela por metro quadrado (cd/m<sup>2</sup>) (COSTA, 2004). Conforme Mamede Filho, a luminância é entendida como: “[...] a medida da sensação de claridade

provocada por uma fonte de luz ou superfície iluminada e avaliada pelo cérebro.” (MAMEDE FILHO, 2007).

**Temperatura de Cor Correlata (TCC):** É a temperatura de um corpo negro cuja cor é percebida como sendo a mais próxima possível, nas condições de visão especificadas, da cor do estímulo dado no mesmo brilho. Sua unidade é o Kelvin (K) (ABNT, 2013). Quanto maior a temperatura da cor, mais clara a cor da luz, assim uma “luz quente” aparece na cor âmbar e tem uma temperatura menor ou igual a 3000 K e já uma “luz fria” aparece azul-violeta e tem uma temperatura de cor de 6000 K ou acima. Como referência de temperatura se utiliza a luz natural com temperatura de cor de 5800K que é a emitida pelo sol ao meio-dia.

**Índice de Reprodução de Cores (IRC):** É uma avaliação quantitativa do grau de semelhança entre a cor psicológica de um objeto iluminado pela fonte de iluminação do experimentador e a cor do mesmo objeto iluminado pela fonte de referência (ABNT, 2013). Em outras palavras, ele mede o quão bem a cor real de um objeto ou superfície corresponde à sua aparência quando iluminada. Como regra, a luz artificial deve permitir que os olhos humanos percebam as cores com precisão ou o mais próximo possível da luz natural. Lâmpadas com 100% IRC exibem as cores com precisão e fidelidade e quanto mais o índice cai, pior é a reprodução das cores (COSTA, 2004).

#### 2.5.5.1 Lâmpadas fluorescentes tubulares

As lâmpadas fluorescentes de descarga comerciais surgiram em 1930, porém só atingiram seu auge em 1970. Elas utilizam gases por onde passará a corrente elétrica, fazendo com que emitam radiação eletromagnética com comprimentos de onda que vão do ultravioleta ao infravermelho (AGUILLERA, 2015)

Para Mamede Filho (2007), estas lâmpadas possuem em sua construção o gás argônio de baixa pressão, além do tubo ser revestido com um material à base de fósforo que converte em radiação visível a radiação ultravioleta, sendo visto em detalhe na Figura 14, produzindo assim um branco mais uniforme. O tempo necessário para que esta lâmpada obtenha 100% do seu fluxo total pode vir a levar alguns segundos, tendo em vista que este não é um processo instantâneo, obedecendo assim um aumento gradativo do seu fluxo luminoso.

Segundo Kennedy (2000), as lâmpadas fluorescentes possuem ainda uma eficiência energética de 60 lúmens por Watt. Devido ao seu amplo uso e variedade de tamanhos e formatos, as lâmpadas fluorescentes são encontradas em residências, comércios e indústrias, além de serem produzidas em temperaturas de cor que variam de 3000 K a 8000 K, possuem um IRC que pode variar de 70 a 90 e podem durar em média 7500 horas, dependendo de quantas ativações são feitas enquanto a lâmpada está em uso (GOEKING, 2009).

#### 2.5.5.2 Lâmpadas LED

A sigla LED é uma designação em inglês de *Light Emmiting Diode* ou simplesmente diodo emissor de luz, que refere -se a um pequeno chip semicondutor que emite luz através de um processo físico chamado fotoluminescência (MARTINHO, 2012). Com isso, quando um material é exposto a uma corrente elétrica ou entra em contato com um poderoso campo elétrico, ocorre a fotoluminescência. Essa ação ocorre em temperatura ambiente, porém o fenômeno de incandescência só ocorre acima de 750°C (MARTINHO, 2012).

Em contrapartida, Aguillera (2015) explica que os LEDs são dispositivos eletrônicos semicondutores formados por duas partes conhecidas como ânodo e cátodo que quando polarizado diretamente, funciona como um condutor, permitindo o fluxo de corrente elétrica. Já em seu interior, o dispositivo passa por um processo conhecido como lacuna de recombinação de elétrons, a qual é responsável pela liberação de energia na forma de luz e outra parte na forma de calor que é dissipada na junção do dispositivo.

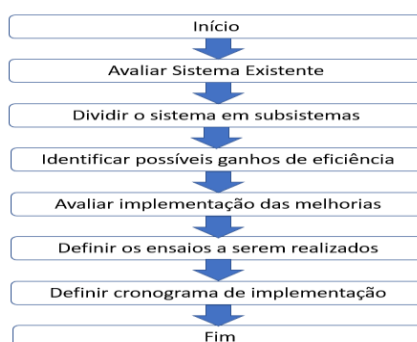
As lâmpadas LED têm sua capacidade e qualidade de iluminação comparáveis às das lâmpadas incandescentes, sendo que uma lâmpada LED de 7W fornece iluminação equivalente a uma lâmpada fluorescente compacta de 15W ou uma incandescente de 60W. No entanto, seu consumo energético é muito menor e se utilizada, pode reduzir os gastos com energia elétrica em até 70% se mantida a mesma comparação (LEDOBRASIL, 2022).

Outro benefício é o fato de as lâmpadas de LED se destacarem pela durabilidade, que em geral, possui vida útil de 50.000 horas. Sendo assim significa que é possível economizar a compra de 5 lâmpadas fluorescentes que seriam necessárias para durarem toda a sua vida útil da lâmpada LED (LEDOBRASIL, 2022).

### 3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo foi baseada no referencial teórico, afim de garantir uma melhor eficiência energética aplicada na cabine de pintura, alvo deste estudo. Para tal seguiu-se o fluxograma da Figura 14, onde através deste se consegue, mensurar e avaliar as ações que foram implementadas, com a premissa de garantir o objetivo geral do trabalho.

**Figura 14 – Fluxograma**



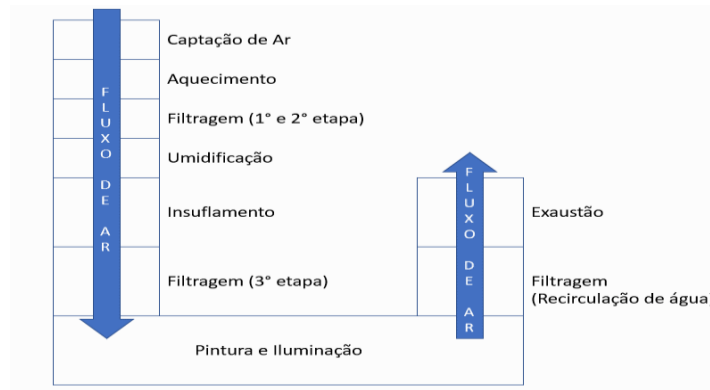
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para mensurar a eficiência energética, foi utilizado para o cálculo do consumo de energia, os dados oriundos de duas formas de medição distintas, onde para motores trifásicos, utilizou-se um analisador de energia modelo RE-6000 da marca Embrasul, coletando seus dados por um período de 2 horas e com integralizações a cada segundo. Já para as luminárias, os dados foram apurados através de medições instantâneas durante um período de uma hora com medições integralizadas a cada 15 minutos, através de um multímetro e amperímetro, ambos com medição True RMS e precisão de 3 casas decimais, pois após verificar as especificações técnicas do analisador de energia, da empresa, foi avaliado que este não é indicado para correntes de fase inferiores a 10A.

#### 3.1 SISTEMA EXISTENTE

A cabine de pintura de carrocerias de ônibus da marca DURR, situada no setor de pintura automotiva, da empresa Marcopolo, em Caxias do Sul, é composta por seus subsistemas, que ficam dispostos conforme a Figura 15. Estes subsistemas, por sua vez, possuem algumas particularidades, que serão melhor explanadas na sequência.

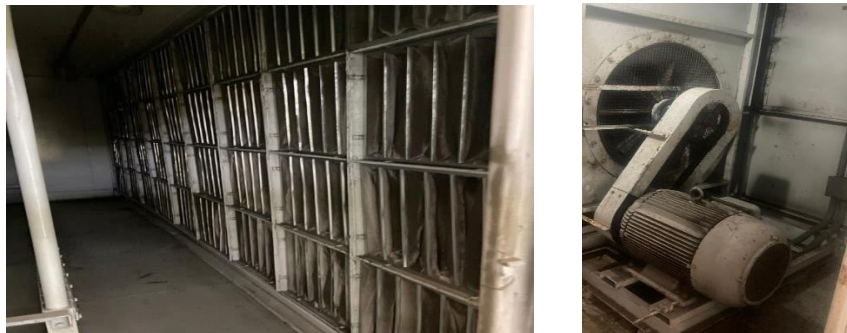
**Figura 15 - Diagrama de funcionamento**



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Sistema de insulamento: É responsável por insuflar o ar que é captado por um duto externo, através de um ventilador centrífugo, apresentado na Figura 17, com sistema de *damper* (dispositivo mecânico instalado na tubulação de ar, o qual possibilita a regulação da sua vazão interna), acoplado a um motor elétrico de indução com a potência de 125cv. O ar que é captado do meio externo, passa por um sistema triplo de filtragem onde os filtros de 1º e 2º estágios são do tipo bolsa, conforme demonstra a Figura 16. O ar limpo, após a passagem pelo 3º estágio de filtragem, estágio esse composto por filtros do tipo *plenum*, é direcionado para o interior da cabine pelo seu teto, fazendo com que o fluxo interno seja vertical (*dowdraft*)

**Figura 16 e 17 - Filtros 1º e 2º estágio e motor e ventilador do insuflamento**



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

- Sistema de exaustão: Como o próprio nome já indica, fica responsável pela exaustão de todas as impurezas presentes no interior da cabine, sendo estas oriundas do processo de pintura, bem como oriundas do ambiente externo, sendo elas carregadas para seu interior. Para minimizar as impurezas externas, o sistema de exaustão permanece levemente negativo, fazendo com que seu diferencial de pressão esteja na faixa de 0,1



a 0,2 mmH<sub>2</sub>O, esse ajuste é manual, pois o medidor de diferencial de pressão é apenas visual sem interação com o painel da cabine, visto na Figura 18. Esse sistema é composto por seis conjuntos de ventiladores centrífugos, apresentado na Figura 19, acoplados a motores elétricos, com partida direta. Cada conjunto possui 2 motores com as rotações invertidas, totalizando 12 motores com a seguinte configuração:

*Marca: WEG*

*Potência Nominal: 10 CV*

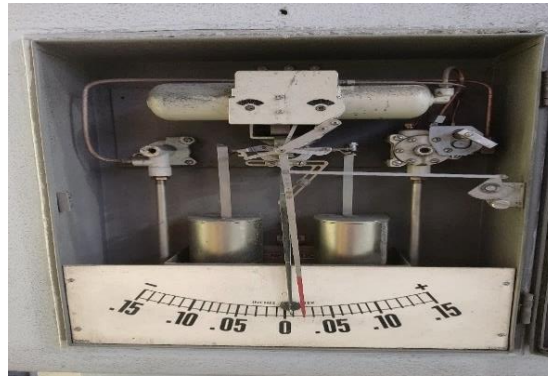
*Velocidade nominal: 1760 RPM*

*Tensão Nominal: 220/380V, conexão em estrela*

*Fator de Potência: 0,86*

*Rendimento: 91%*

**Figura 17 - Medidor de diferencial de pressão**



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

**Figura 18 - Sistema de exaustão**



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

- Sistema de iluminação: para o sistema de iluminação, a cabine conta com 44 luminárias fixadas nas laterais e dispostas na parte externa, conforme a Figura 20, evitando assim

serem projetadas, com tecnologia a prova de explosão. As luminárias ficam voltadas para seu interior através da parede de vidro e são compostas por quatro lâmpadas fluorescentes de 40 W cada, alimentadas através de reatores eletromagnéticos, com as seguintes características:

Lâmpadas fluorescentes: Philips T10 Plus	Reator: Intral POUP AFP-6F
Potência elétrica: 40W	Tensão elétrica: 220 V
Fluxo luminoso: 2700 lúmens	Corrente elétrica: 0,34 A
Temperatura de cor: 5000K	Fator de potência: 0,97
	THD: 20%

**Figura 19 - Iluminação da cabine**



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

- Sistema de circulação de água: neste sistema, a água tem o papel de filtrar as impurezas presentes no ar, que é exaurido através do sistema de exaustão, assim o ar precisa atravessar uma cortina de água, oriunda da sua queda a partir de uma estrutura, gerando assim uma restrição as partículas de tinta. A vazão da água que retorna para a cabine é definida pela regulagem de dois registros limitadores de fluxo instalados um em cada bomba centrífuga, que por sua vez fica acoplada a motores elétricos de 25 cv, que podem ser vistos na Figura 21, partidos através de uma chave *soft starter*.

**Figura 20 - Sistema de bombeamento de água**



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

- Sistema de controle de temperatura: o controle da temperatura é efetuado por um queimador a gás, instalado na captação de ar da cabine. A temperatura ideal para o processo de pintura deve ficar entre 20 e 25 graus celsius, portanto para que seja possível tal controle é feito o uso de um controlador de temperatura.
- Sistema de controle de umidade: A fim de garantir a umidade, esse sistema conta com uma bomba de água centrífuga de 3 cv, conectada a um reservatório de água, e ligada uma árvore de bicos que fazem com que a água seja vaporizada através da pressão da bomba. Essa névoa está alocada depois do sistema de aquecimento e filtragem, mas ainda dentro da casa de ar, sendo acionada de forma automática quando necessário através de leitura da umidade interna. O sistema completo pode ser visto na Figura 22.

**Figura 21 - Sistema de umidificação**



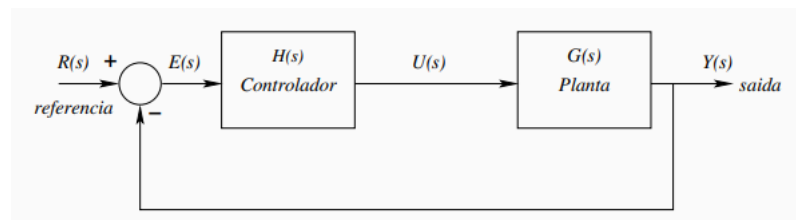
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

### 3.2 SISTEMA PROPOSTO

Através do estudo do material acima descrito, foi avaliada a alteração em três subsistemas que possuem possibilidade de ganho energético, listadas abaixo. Já com relação ao restante dos sistemas, estes não serão abortados neste trabalho, podendo servirem de estudos futuros.

- Sistema de insuflamento: avaliar a substituição do sistema de controle do motor elétrico para utilização de um inversor de frequência, podendo assim abrir o sistema de *damper*, que tem a função de restringir a passagem do ar para utilização na frequência nominal da rede. O inversor assim pode operar em uma faixa inferior de rotação mantendo a vazão de ar com valor estipulado no projeto inicial. Para isso, será necessário a inclusão de um sensor de diferencial de pressão analógico, além da alteração do programa do controlador lógico programável (CLP), que fará o ajuste automático da velocidade do motor, trabalhando em malha fechada com o sinal de entrada do sensor, conforme apresentado na Figura 22.

**Figura 22 - Sistema de malha fechada**



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

- Sistema de exaustão: para este sistema foi estudada a possibilidade da troca de motores por outros com maior eficiência, a serem dimensionados, já que não se pode reduzir a quantidade de exaustão projetada, para que não ocorra perda de qualidade no processo de pintura, além de perder eficiência na exaustão, gerando acúmulo de material suspenso no ar interno, o que afetaria a saúde ocupacional dos pintores, bem como impactos no meio ambiente e qualidade do produto a ser fabricado.

Para tal, as atividades executadas, seguem a seguinte sequência lógica:

- Define-se os modelos de motor com tecnologias mais eficientes, através dos dados de potência e dimensional coletados anteriormente no motor original;
- Adquire-se um motor de cada modelo para avaliar o resultado dos testes práticos;
- Sistema de iluminação: a metodologia adotada para efficientização do sistema de iluminação foi baseada na substituição tecnológica do conjunto luminária, lâmpada e reator, pois os sistemas mais modernos conseguem produzir a mesma quantidade de luz, utilizando menos energia. De acordo com a característica do ambiente, os modelos de luminárias utilizadas foram do tipo industrial. Seguindo essa metodologia, foi sugerida a substituição do ultrapassado sistema de luminárias, de baixo desempenho, composto por 4 fluorescentes com a potência das lâmpadas de 40 W, utilizando reatores eletrônicos, por um novo sistema de luminárias LED. Será efetuado o projeto para a troca das lâmpadas fluorescentes por lâmpadas com tecnologia LED, com o auxílio do software DIALUX, garantindo assim os padrões mínimos de luminosidade estabelecidos para a tarefa de pintura de acabamento e priorizando além disso a redução do consumo energético.

### 3.3 ENSAIOS

- Sistema de insuflamento:

Neste ensaio, pretende-se verificar o ganho de eficiência energética do sistema de ventilação, quando submetido ao controle de vazão de ar, por meio da regulagem de velocidade do motor de insuflamento, com o uso de um inversor de frequência em substituição ao *dampner*. Para a realização do ensaio procede-se da seguinte forma:

- Abre-se as portas de acesso lateral da cabine;
- Aciona-se o sistema de insuflamento (motor e ventilador) através do sistema de partida *soft- starter*;
- Aciona-se o sistema de exaustão (motores e ventiladores) através do sistema de partida direta;

- Fecha-se as portas laterais;
- Verifica-se o diferencial de pressão da cabine;
- Ajusta-se o *damper* para que o diferencial de pressão esteja entre 0,1 e 0,2 mmH<sub>2</sub>O;
- Registra-se o consumo de energia através de um analisador de energia modelo RE-6000 da marca Embrasul, durante o período de 2 horas (período necessário para pintura de um ônibus), sendo as medições integralizadas a cada segundo;
- Efetua-se o desligamento do sistema;

Após a realização do procedimento acima, é efetuado a substituição da chave de partida *soft-starter*, pelo inversor de frequência no painel elétrico e efetuado a parametrização dele, com os dados do motor, utilizando controle vetorial e com ajuste de velocidade de forma manual via IHM (interface homem máquina). Será alterado também a posição do *damper*, para que com uma abertura parcial, resulte em um aumento na vazão de entrada e conseqüentemente o motor possa reduzir a velocidade de trabalho.

Para esta etapa de ensaio será definido uma redução inicial de 20% na velocidade do motor, para que não impacte em sobreaquecimento, devido a refrigeração ser autoventilada, reduzindo assim a sua vida útil. A avaliação da melhor faixa de trabalho do motor se dá através do cálculo da potência ativa, sendo levantadas através de medições instantâneas efetuadas através de multímetro digital e de um alicate amperímetro, ambos da marca Fluke e com tecnologia True RMS.

Após a instalação do inversor, será efetuada também a alteração no programa do CLP para que seja possível o ajuste automático da velocidade do motor através de uma malha de comunicação fechada com a leitura do sensor de diferencial de pressão. Após esta alteração será realizado o seguinte teste para confirmar a funcionalidade do controle:

- Abre-se as portas de acesso lateral da cabine;
- Aciona-se o sistema de insuflamento (motor e ventilador) através do sistema de partida com inversor de frequência;

- Aciona-se o sistema de exaustão (motores e ventiladores) através do sistema de partida direta;
- Fecha-se as portas laterais;
- Verifica-se o diferencial de pressão da cabine;
- Após estabilização da velocidade do motor será efetuado a abertura das portas laterais, simulando saturação dos filtros, devendo aumentar a velocidade do motor para compensar a perda de vazão.
- Registra-se novamente o consumo de energia após a alteração, através de um analisador de energia modelo RE-6000 da marca Embrasul, durante o período de 2 horas (período necessário para pintura de um ônibus), sendo as medições integralizadas a cada segundo;
- Deduz-se através dos parâmetros coletados o consumo de energia do motor através do cálculo teórico utilizando a Equação 5;

$$P_{cons} = P_{med} * Qnt_{horas} \quad (5)$$

$P_{cons}$  = Potência consumida mensal (kWh)

$P_{med}$  = Potência consumida média (kW)

$Qnt_{horas}$  = Quantidade de horas em operação no mês (h)

- Avalia a necessidade da inclusão de cargas capacitivas para a correção do fator de potência, utilizando a Equação 6 e através do resultado estima-se o custo de implementação;

$$Q_c = P_a * (\tan \alpha_a - \tan \alpha_c) \quad (6)$$

$Q_c$  = Potência capacitiva necessária (kVAr)

$P_a$  = Potência ativa consumida (kW)

$\tan \alpha_a$  = Tangente do ângulo atual

$\tan \alpha_c$  = Tangente do ângulo corrigido

- Avalia-se o fluxo de caixa anual descontado, com o cálculo para valor presente, através da Equação 7, com a substituição do inversor no sistema de insuflamento. Para este cálculo foi prevista uma vida útil estimada de 12 anos para o inversor e uma taxa de juros de 15%, sendo superior ao dobro da média da poupança dos últimos 10 anos no Brasil, que foi de 5,91%. Com relação a economia aplicada, seus custos foram calculados utilizando os valores de demanda e consumo da empresa, oriundos do contrato de comercialização no mercado livre, conforme Tabela 3 corrigidos pela IPCA. Para tal foi então acrescido uma correção de 10% do valor, sendo a média dos últimos 10 anos o valor de R\$ 6,06%, e entendendo que este contrato será renovado nos mesmos moldes durante este período.

$$P = F * (1 + i)^{-n} \quad (7)$$

$P$  = Valor presente (R\$)

$F$  = Valor futuro (R\$)

$i$  = Taxa de juros (%)

$n$  = Tempo (anos)

**Tabela 3 - Custos da energia elétrica**

HORÁRIO	DEMANDA (R\$/kW)	TUSD (R\$/kWh)	TE (R\$/kWh)
PONTA	9,05	0,08518	0,238
FORA PONTA	7,70	0,08518	0,238

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

- Após este cálculo, obtém-se *payback* descontado, utilizando a Equação 8, onde pode ser avaliado economicamente qual o retorno financeiro.

$$Saldo = A - P_a \quad (8)$$

$Saldo$  = Valor restante (R\$)

$A$  = Saldo ano anterior (R\$)

$P_a$  = Valor presente anual (R\$)



- Sistema de exaustão:

Neste ensaio, pretende-se verificar o ganho de eficiência energética do sistema de exaustão por meio da substituição dos motores originais por motores de alto rendimento e motores com imãs permanentes.

Para a realização do ensaio procede-se da seguinte forma:

- Desliga-se um dos motores do conjunto do sistema de exaustão (2 motores e 2 ventiladores) e efetua-se a vedação do alojamento onde ele se encontrava para que não haja interferência externa na análise que está sendo efetuada;
- Efetua-se a partida do motor elétrico que está em teste através do sistema de partida direta;
- Avalia-se o consumo de energia através de um analisador de energia modelo RE-6000 da marca Embrasul durante um período de 2 horas com medições integralizadas a cada segundo;
- Desliga-se o sistema para substituição do motor, pelo novo modelo;
- Instala-se o novo motor;
- Efetua novamente a partida do sistema e avalia-se o consumo de energia através de um analisador de energia modelo RE-6000 da marca Embrasul.
- Repete os últimos passos para o terceiro motor a ser avaliado;
- Efetua-se o cálculo do consumo de energia para cada tipo de motor aplicado, através da Equação 5;
- Calcula-se com a Equação 6 a correção do fator de potência para adequação se necessário e o custo de implementação;
- Calcula-se o *payback* de cada modelo proposto, da mesma forma que no sistema de insuflamento, para a instalação dos outros 11 motores restantes na cabine, utilizando a Equação 8.

- Sistema de iluminação:

O consumo energético da cabine será avaliado através de dados de consumo de energia levantados em um laboratório de eletrônica do setor de manutenção da empresa, para cada modelo de luminária, resultando assim num levantamento mais preciso e com menos interferências externas. Foi optado por esta alternativa, pois o sistema de iluminação existente já apresenta luminárias queimadas e de marcas diferentes devido ao fato da dificuldade de aquisição, tendo em vista que esta tecnologia não está mais sendo comercializada.

A estimativa de iluminância será realizada através do cálculo executado pelo software, com plano de tarefa simulado na posição onde fica a lateral do ônibus a ser pintado e no seu teto. Após este passo, será efetuada a compra das luminárias e conseqüentemente a instalação delas na cabine de pintura. Com a conclusão da instalação, será efetuada a medição dos pontos obtidos através da malha, a fim de confrontar com as informações de iluminância obtidas pelo *software* e comparativo com o sistema existente. Sendo executado da seguinte forma:

- Define-se através da Equação 9 a malha de medições a ser utilizada;

$$p = 0,2 * 5^{\log_{10} * d} \quad (9)$$

$p$  = Tamanho da malha, expresso em metros (m);

$d$  = Maior dimensão da superfície de referência, expressa em metros (m);

- Define-se o número de pontos a serem medidos em cada área de tarefa, através da Equação 10;

$$n = \frac{d}{p} \quad (10)$$

$n$  = Número de pontos de cálculo considerando a malha  $p$ .

$p$  = Tamanho da malha, expresso em metros (m);

$d$  = Maior dimensão da superfície de referência, expressa em metros (m);

- Efetua-se a medição dos pontos com a cabine de pintura limpa, através do uso do luxímetro;
- Efetua-se o cálculo do consumo de energia para o novo sistema de luminárias, através da Equação 5;
- Calcula-se a correção do fator de potência para adequação se necessário com a Equação 6 e o custo de implementação;
- Calcula -se o *payback* descontado da nova instalação, utilizando a Equação 8.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo, serão abordados os resultados dos ensaios e medições que foram explanados no capítulo anterior. Foi levado em consideração tanto o sistema existente, quanto as alterações executadas, sendo assim divididos da seguinte forma:

### 4.1 SISTEMA DE INSUFLAMENTO

Para o sistema de insuflamento os resultados serão apresentados dividindo-se nos seguintes tópicos:

#### 4.1.1 Sistema existente

A medição de consumo energético para o motor existente foi obtida através da análise efetuada no dia 14 de janeiro de 2023, durante um ciclo de pintura de um ônibus. O período aproximado é de duas horas, resultando nos dados da Tabela 4.

**Tabela 4 - Parâmetros do motor do insuflamento a 100% da velocidade**

Grandeza elétrica	Fase A	Fase B	Fase C	Total
Tensão elétrica (V)	221,25	220,83	222,46	221,51
Corrente elétrica (A)	98,61	93,96	98,07	96,88
Potência ativa média (kW)	16,62	15,75	16,69	49,06
Potência reativa média (kVAr)	14,70	14,09	15,07	43,85
Potência aparente média (kVA)	21,82	20,75	21,82	64,38
Fator de potência	0,762	0,759	0,765	0,762
Ângulo (Rad)	0,739	0,746	0,762	
Quantidade total de motores				1
Tempo de utilização mensal (h)				387,2

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

De posse dos resultados acima utilizou-se o valor médio de potência ativa encontrado no teste, que é de 49,06kW, para definir o consumo mensal deste sistema de insuflamento da cabine de pintura, que trabalha de forma contínua durante dois turnos de trabalho, resultando num período médio mensal de 387,2 horas. O consumo de energia foi calculado utilizando a Equação 6, chegando ao valor de 18.996,03 kWh mensal.

#### 4.1.2 Sistema proposto

Neste caso, foi implementado a alteração do sensor de medição para o modelo eletrônico e analógico, sendo seu sinal enviado para a entrada do CLP que comanda a cabine de pintura. Assim, com a alteração no bloco de controle, responsável pelo acionamento do motor, foi possível regular a velocidade de trabalho do motor elétrico e através deste ajuste, pode-se efetuar as leituras de tensão e corrente elétrica. De posse das medições chegou-se na Tabela 5, onde são expressos os valores médios de tensão e corrente do motor, no ensaio realizado para cada faixa de velocidade.

**Tabela 5 - Parâmetros por faixa de rotação**

VELOCIDADE (%)	VF média (V)	IF média (A)
100	222,68	95,90
99	222,55	95,17
98	222,35	94,67
97	222,41	93,83
96	222,48	93,47
95	222,55	92,77
94	222,63	92,67
93	222,64	94,53
92	222,63	95,30
91	222,80	96,27
90	223,12	98,47
89	223,30	99,00
88	223,32	102,57
87	223,29	104,40
86	223,24	107,60
85	223,19	110,93
84	223,32	114,30
83	223,31	118,73
82	223,17	122,80
81	222,91	127,40
80	222,94	132,30

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O consumo de energia foi calculado para a velocidade de 944 rpm, sendo essa 80% da nominal, que é a posição de ajuste do *damper*, estipulada neste trabalho. Foi utilizada para o cálculo a potência média de 58,20 kW, apresentado na Tabela 6, calculado o valor de 22.535,04 kWh, como seu consumo mensal, o que impacta num acréscimo de 18,63% no consumo. Por este motivo não foi efetuado os cálculos de viabilidade econômica. A correção do fator de potência foi executada com base na Equação 7, onde foi calculado o valor de 17,14 kVAr como sendo necessário para que o motor voltasse aos valores originais, e o custo de implementação desta correção foi calculado para a quantidade de 20kVAr com base no orçamento de material, e serviço com o valor de R\$ 2.984,72. Através da Tabela 4 foi avaliado que a melhor faixa para economia de energia fica a 94% da sua velocidade nominal.

**Tabela 6 - Parâmetros do motor do insuflamento a 80% da velocidade**

Grandeza elétrica	Fase A	Fase B	Fase C	Total
Tensão elétrica (V)	223,13	222,06	223,64	222,94
Corrente elétrica (A)	132,96	130,81	133,14	132,30
Potência ativa média (kW)	19,40	18,82	19,98	58,20
Potência reativa média (kVAr)	22,44	22,12	22,07	66,63
Potência aparente média (kVA)	29,67	29,05	29,78	88,49
Fator de potência	0,654	0,648	0,671	0,658
Ângulo (Rad)	0,858	0,866	0,835	
Quantidade total de motores				1
Tempo de utilização mensal (h)				387,2

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

De posse desta informação, foi definido este como sendo o novo valor a ser ajustado no CLP. Para tal velocidade, foi necessária uma nova regulagem do *damper*, garantindo assim a pressão de trabalho especificada, e os novos parâmetros por faixa de velocidade apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7 - Parâmetros por faixa de rotação**

VELOCIDADE (%)	VF média (V)	IF média (A)
100	220,15	97,06
99	220,73	96,22
98	220,51	95,16
97	220,85	94,68
96	220,28	93,79
95	220,19	92,91
94	220,58	92,53

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Conforme a nova posição de ajuste do *damper* foram definidos novamente os valores de base para os cálculos que estão descritos na Tabela 8 e o consumo de energia foi novamente calculado, desta vez com o valor de potência ativa de 41,31 kW, resultando em um consumo mensal de 15.995,23 kWh. Nessa situação, o valor para a correção do fator de potência foi de 10,04 kVAr e seu custo estimado para implementação ficou de R\$ 1.332,82.

**Tabela 8 - Parâmetros do motor do insuflamento a 94% da velocidade**

Grandeza elétrica	Fase A	Fase B	Fase C	Total
Tensão elétrica (V)	220,63	220,17	220,93	220,58
Corrente elétrica (A)	92,72	91,89	92,97	92,53
Potência ativa média (kW)	13,89	13,29	14,13	41,31
Potência reativa média (kVAr)	15,01	15,25	14,90	45,16
Potência aparente média (kVA)	20,46	20,23	20,54	61,23
Fator de potência	0,679	0,657	0,688	0,675
Ângulo (Rad)	0,824	0,854	0,812	
Quantidade total de motores				1
Tempo de utilização mensal (h)				387,2

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O cálculo do *payback* foi executado conforme os moldes apresentados no ensaio, e demonstrado na Tabela 9, ficando definido que seu retorno é de 7 anos a partir do investimento inicial, que é composto pelo valor do inversor (R\$ 62.942,29) e o valor do sensor de diferencial de pressão analógico (R\$ 806,28).

**Tabela 9 - Payback descontado do insuflador**

Período	Investimento	Redução consumo	Valor Presente	Acumulado
0	-R\$ 63.748,57	R\$ -	R\$ -	-R\$ 63.748,57
1		R\$ 13.196,05	R\$ 11.474,83	-R\$ 52.273,74
2		R\$ 14.515,66	R\$ 10.975,92	-R\$ 41.297,82
3		R\$ 15.967,22	R\$ 10.498,71	-R\$ 30.799,11
4		R\$ 17.563,95	R\$ 10.042,24	-R\$ 20.756,87
5		R\$ 19.320,34	R\$ 9.605,62	-R\$ 11.151,24
6		R\$ 21.252,37	R\$ 9.187,99	-R\$ 1.963,25
7		R\$ 23.377,61	R\$ 8.788,51	R\$ 6.825,26
8		R\$ 25.715,37	R\$ 8.406,40	R\$ 15.231,66
9		R\$ 28.286,91	R\$ 8.040,91	R\$ 23.272,56
10		R\$ 31.115,60	R\$ 7.691,30	R\$ 30.963,86
11		R\$ 34.227,16	R\$ 7.356,90	R\$ 38.320,76
12		R\$ 37.649,88	R\$ 7.037,03	R\$ 45.357,79

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

### 4.1.3 Comparação entre sistemas

A fim de simplificar a forma de apresentação dos resultados obtidos no sistema de insuflamento foi elaborada a Tabela 10. Pode-se verificar o consumo em cada situação, possuindo um acréscimo de 18,63% com velocidade ajustada para 80% da nominal e gerando uma economia de energia elétrica mensal de 15,80%, quando o motor foi ajustado para operar na sua melhor faixa de utilização, que é de 94%.

**Tabela 10 - Comparação entre propostas**

	Potência ativa média (kW)	Consumo mensal (kWh)	Redução (%)	Correção FP (kVAr)
Motor com velocidade 100%	49,06	18996,03		
Motor com velocidade 94%	41,31	15995,23	15,80%	10,04
Motor com velocidade 80%	58,20	22535,04	-18,63%	17,14

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

## 4.2 SISTEMA DE EXAUSTÃO

### 4.2.1 Sistema existente

A medição de um dos motores originais da cabine de pintura, teve início pela escolha do motor, que foi definido por ser o da posição 8, por se tratar de uma posição de fácil acesso para futuras substituições. Para tal, foram seguidos os procedimentos recomendados no ensaio, a fim de desligar o motor que faz conjunto com ele no sistema de exaustão, e após a vedação na caixa de ar. Posteriormente, foi instalado o analisador de energia durante um ciclo de pintura, e colhendo-se o relatório dos dados apresentados pelo analisador, chegou-se na Tabela 11.

**Tabela 11 - Parâmetros motor original na exaustão**

Grandeza elétrica	Fase A	Fase B	Fase C	Total
Tensão elétrica (V)	219,43	219,15	220,39	219,66
Corrente elétrica (A)	10,59	10,28	11,12	10,66
Potência ativa média (kW)	1,715	1,650	1,764	5,129
Potência reativa média (kVAr)	1,563	1,526	1,686	4,775
Potência aparente média (kVA)	2,321	2,248	2,441	7,010
Fator de potência	0,739	0,734	0,723	0,732
Tempo de utilização teste (h)				1,71
Quantidade total de motores				12
Tempo de utilização mensal (h)				387,2

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com base nos dados da Tabela 5 e o tempo de utilização da cabine de pintura, calculou-se o consumo mensal de 1.986,34 kWh.

#### 4.2.2 Sistema proposto

Neste caso, foi substituído o motor original da posição de número 8, por outro com rendimento superior, da marca WEG modelo IR3 Super Premium e colocado para operação. Chegou-se ao levantamento de dados expresso na Tabela 12.

**Tabela 12 - Parâmetros motor IR3 na exaustão**

Grandeza elétrica	Fase A	Fase B	Fase C	Total
Tensão elétrica (V)	215,06	215,47	215,73	215,42
Corrente elétrica (A)	11,34	11,6	12,44	11,79
Potência ativa média (kW)	1,457	1,483	1,656	4,596
Potência reativa média (kVAr)	1,955	2,011	2,111	6,077
Potência aparente média (kVA)	2,439	2,499	2,683	7,621
Fator de potência	0,598	0,593	0,617	0,603
Tempo de utilização teste (h)				6,05
Quantidade total de motores				12
Tempo de utilização mensal (h)				387,2

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

De posse destes dados, o consumo energético mensal foi calculado da mesma forma que o motor original, e baseado no mesmo período de operação, sendo esse consumo resultando no valor de 1.779,57 kWh. O cálculo para correção do fator de potência foi efetuado apresentando a necessidade de inclusão de 1,80 kVAr, tendo o seu custo estimado de R\$ 560,03 para cada motor instalado. Neste modelo de motor o



payback descontado foi calculado e representado na Tabela 13, atingindo o tempo de retorno de 17 anos.

**Tabela 13 - Payback descontado do exaustor super premium**

Período	Investimento	Redução consumo	Valor Presente	Acumulado
0	-R\$ 10.323,19	R\$ -	R\$ -	-R\$ 10.323,19
1		R\$ 907,56	R\$ 789,18	-R\$ 9.534,01
2		R\$ 998,31	R\$ 754,87	-R\$ 8.779,14
3		R\$ 1.098,14	R\$ 722,05	-R\$ 8.057,09
4		R\$ 1.207,96	R\$ 690,65	-R\$ 7.366,44
5		R\$ 1.328,75	R\$ 660,63	-R\$ 6.705,81
6		R\$ 1.461,63	R\$ 631,90	-R\$ 6.073,91
7		R\$ 1.607,79	R\$ 604,43	-R\$ 5.469,48
8		R\$ 1.768,57	R\$ 578,15	-R\$ 4.891,33
9		R\$ 1.945,43	R\$ 553,01	-R\$ 4.338,32
10		R\$ 2.139,97	R\$ 528,97	-R\$ 3.809,35
11		R\$ 2.353,97	R\$ 505,97	-R\$ 3.303,38
12		R\$ 2.589,37	R\$ 483,97	-R\$ 2.819,41
13		R\$ 2.848,30	R\$ 532,37	-R\$ 2.287,04
14		R\$ 3.133,13	R\$ 585,61	-R\$ 1.701,44
15		R\$ 3.446,45	R\$ 644,17	-R\$ 1.057,27
16		R\$ 3.791,09	R\$ 708,58	-R\$ 348,69
17		R\$ 4.170,20	R\$ 779,44	R\$ 430,75

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Além deste teste, como havia sido comentado anteriormente, foi realizado um outro teste no mesmo local e com o mesmo conjunto de ventilador centrífugo, a fim de evitar interferências externas nos resultados. Esse teste utilizando um motor síncrono com tecnologia de ímãs permanentes no induzido, e seus resultados são expressos pela Tabela 14.

**Tabela 14 - Parâmetros motor WMagnet na exaustão**

Grandeza elétrica	Fase A	Fase B	Fase C	Total
Tensão elétrica (V)	226,28	226,81	227,16	226,75
Corrente elétrica (A)	7,37	6,72	7,51	7,20
Potência ativa média (kW)	1,484	1,357	1,518	4,359
Potência reativa média (kVAr)	0,760	0,695	0,778	2,233
Potência aparente média (kVA)	1,668	1,524	1,706	4,898
Fator de potência	0,89	0,89	0,89	0,890
Tempo de utilização teste (h)				2
Quantidade total de motores				12
Tempo de utilização mensal (h)				387,2

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O consumo de energia mensal deste, também foi calculado da mesma forma, onde chegou-se ao resultado de 1.687,80 kWh, sendo que nesta situação não será necessária a correção do fator de potência, pois neste motor o parâmetro é superior ao original. Já através do cálculo do *payback* para este modelo de motor, resultou-se a Tabela 15. O tempo de retorno do investimento, como pode ser visto através do *payback* descontado é de 23 anos, tornando assim um investimento inviável, pois excede até mesmo sua estimativa de vida útil.

**Tabela 15 - Payback descontado do exaustor Wmagnet**

Período	Investimento	Redução consumo	Valor Presente	Acumulado
0	-R\$ 23.499,86	R\$ -	R\$ -	-R\$ 23.499,86
1		R\$ 1.311,11	R\$ 1.140,10	-R\$ 22.359,76
2		R\$ 1.442,23	R\$ 1.090,53	-R\$ 21.269,23
3		R\$ 1.586,45	R\$ 1.043,12	-R\$ 20.226,11
4		R\$ 1.745,09	R\$ 997,76	-R\$ 19.228,35
5		R\$ 1.919,60	R\$ 954,38	-R\$ 18.273,97
6		R\$ 2.111,56	R\$ 912,89	-R\$ 17.361,08
7		R\$ 2.322,72	R\$ 873,20	-R\$ 16.487,88
8		R\$ 2.554,99	R\$ 835,23	-R\$ 15.652,65
9		R\$ 2.810,49	R\$ 798,92	-R\$ 14.853,74
10		R\$ 3.091,54	R\$ 764,18	-R\$ 14.089,55
11		R\$ 3.400,69	R\$ 730,96	-R\$ 13.358,60
12		R\$ 3.740,76	R\$ 699,18	-R\$ 12.659,42
13		R\$ 4.114,84	R\$ 669,09	-R\$ 11.990,33
14		R\$ 4.526,32	R\$ 640,00	-R\$ 11.350,33
15		R\$ 4.978,96	R\$ 612,60	-R\$ 10.737,72
16		R\$ 5.476,85	R\$ 586,66	-R\$ 10.151,06
17		R\$ 6.024,54	R\$ 562,03	-R\$ 9.599,03
18		R\$ 6.626,99	R\$ 538,63	-R\$ 9.080,40
19		R\$ 7.289,69	R\$ 516,50	-R\$ 8.593,90
20		R\$ 8.018,66	R\$ 495,74	-R\$ 8.139,16
21		R\$ 8.820,53	R\$ 476,62	-R\$ 7.712,54
22		R\$ 9.702,58	R\$ 459,48	-R\$ 7.313,06
23		R\$ 10.672,84	R\$ 444,83	-R\$ 6.948,23

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

#### 4.2.3 Comparação entre sistemas

Para facilitar a visualização dos resultados, foi apresentado a Tabela 16 na sequência, onde pode ser visto a redução de cada modelo.

**Tabela 16 - Comparação da exaustão**

	Potência ativa média (kW)	Consumo mensal (kWh)	Redução (%)	Correção FP (kVAr)
Motor original	5,129	1985,95		
Motor Alto Rendimento	4,596	1779,57	10,39%	1,8
Motor Síncrono	4,359	1687,80	15,01%	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

### 4.3 SISTEMA DE ILUMINAÇÃO

#### 4.3.1 Sistema existente

Os dados para o cálculo do consumo energético neste sistema foram obtidos através do levantamento efetuado em laboratório na luminária de tecnologia fluorescente. Foram gerados como resultados os valores da Tabela 17.

**Tabela 17 - Dados da lâmpada fluorescente**

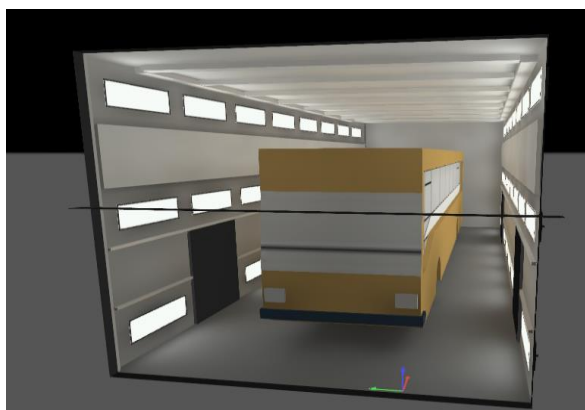
Grandeza elétrica	Lâmpada fluorescente
Tensão elétrica (V)	219,63
Corrente elétrica (A)	0,68
Potência ativa média (kW)	0,149
Potência reativa média (kVAr)	0,041
Potência aparente média (kVA)	0,155
Fator de potência	0,965

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

De posse dos mesmos e com o período de utilização da cabine definido anteriormente, pode ser calculado o consumo mensal por luminária que foi de 57,69 kWh. Levando-se em consideração que a quantidade de luminárias instaladas é de 44 unidades, o seu consumo total mensal será de 2.538,48 kWh.

O índice de iluminamento da cabine de pintura, para esta situação foi definido apenas através do software Dialux. Baseou-se na posição original das luminárias e da cabine, sendo visto na Figura 23.

**Figura 23 - Projeto de iluminação no software**



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Através do relatório do software, mostrado no Apêndice 1, o valor para a iluminância na superfície lateral do ônibus foi de 356 lux e para o seu teto foi de 250 lux. Já com relação ao fator de uniformidade da iluminância foi de 0,57 para a lateral e 0,76 para o teto. Já com relação a medição de iluminância em loco, não pode ser realizada pois a cabine apresentava lâmpadas queimadas e outras que foram substituídas por outras com especificações diferentes. Como fator comparativo foi utilizado os valores que haviam sido arquivados no setor de segurança do trabalho, onde para esta cabine o histórico de medição apresenta o valor aproximado de 300 lux no seu interior.

#### 4.3.2 Sistema proposto

Para tal, foi definido um dos modelos de luminária Led já existente na empresa. O fator determinante para esta escolha foi a abertura angular que é de 120 graus. Os outros possuem 90 e 60 respectivamente, assim pode-se garantir uma maior homogeneidade no índice de iluminância da área da tarefa, tendo em vista que ela se encontra a 1,5 metros do ponto de luz, e como comentado anteriormente, a posição das luminárias foi mantida para evitar custos extras de reposicionamento.

O resultado da iluminância foi estipulado através do relatório do *software* DIALUX, e o valor indicado para a superfície lateral do ônibus foi de 623 lux e para o seu teto foi de 400 lux. Seu fator de uniformidade foi de 0,53 e 0,76 respectivamente. Já seu consumo energético foi apurado da mesma forma que para o teste das lâmpadas fluorescentes. O resultado foi expresso na Tabela 18.

**Tabela 18 - Dados da lâmpada LED**

Grandeza elétrica	Lâmpada led Lumimax
Tensão elétrica (V)	220,33
Corrente elétrica (A)	0,247
Potência ativa média (kW)	0,054
Potência reativa média (kVAr)	0,008
Potência aparente média (kVA)	0,055
Fator de potência	0,989

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O consumo de energia pode ser calculado da mesma forma que o conjunto de lâmpadas fluorescentes, onde o consumo mensal por luminária foi 20,91 kWh. Para a quantidade de 88 unidades, especificada no projeto, calculou-se um consumo mensal de 1.839,97 kWh, não sendo necessária a correção do fator de potência.

Para os resultados da medição foi inicialmente calculado o tamanho da malha de pontos a serem medidos através da Equação 8, apresentando o valor de 1,26 metros e após o número de pontos a serem medidos na Equação 9, sendo 11 pontos. Através dos dados coletados nos pontos estipulados pela malha e apresentados na Tabela 19, pode-se chegar no valor médio medido para a superfície lateral de 584,64 lux e para a superfície do teto o valor de 362,77 lux, o que representa uma diferença total de 7,0% entre o projeto e a medição.

**Tabela 19 - Iluminância projeto inicial**

		1,17	2,34	3,51	4,68	5,85	7,02	8,19	9,36	10,5	11,7	12,9	Média (lux)	FU
Lateral	4,4	570	550	573	551	601	539	571	524	550	547	526	584,64	0,61
	3,3	493	577	521	454	608	500	623	598	600	617	580		
	2,2	622	480	770	700	620	788	706	804	586	850	813		
	1,1	500	359	492	530	633	526	625	550	372	580	545		
Teto	0,83	268	395	381	379	394	380	391	377	388	386	287	362,77	0,74
	1,67	285	362	397	351	374	362	386	382	369	392	295		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Como verificado anteriormente, a iluminância e o fator de uniformidade ficaram abaixo do exigido por norma, para essa correção, foi proposto o acréscimo de mais 56 luminárias, e após efetuado novamente a sequência de testes, chegou-se em uma iluminância para a lateral do veículo de 956 lux e para o teto de 760 lux. Além disso, o fator de uniformidade para as superfícies ficou em 0,60 e 0,73 respectivamente, e com relação aos valores de consumo energético mensal da nova configuração, foi de 3.010,87 kWh.

Este segundo projeto é o único que atende os requisitos necessários mínimos de iluminância exigidos por norma, para a atividade a ser executada (750 lux), sendo desta forma implementado, mesmo que com acréscimo no consumo energético e não tendo *payback*. Após a sua implementação o valor médio calculado através das medições executadas, foi de 840,41 lux na superfície lateral e 725,55 lux no teto do veículo, conforme a Tabela 20, contabilizando uma diferença média total de 9,66%.

**Tabela 20 - Iluminância projeto final**

		1,17	2,34	3,51	4,68	5,85	7,02	8,19	9,36	10,5	11,7	12,9	Média (lux)	FU
Lateral	4,4	968	1015	993	1008	965	1045	1017	917	967	998	971	840,41	0,68
	3,3	712	742	662	680	736	725	694	645	679	720	710		
	2,2	775	809	938	951	930	962	983	928	957	930	745		
	1,1	757	575	817	696	820	863	842	860	632	699	940		
Teto	0,83	585	648	718	739	797	757	813	794	868	819	672	725,55	0,73
	1,67	529	636	692	650	809	733	728	725	766	786	698		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

#### 4.3.3 Comparação entre sistemas

Da mesma forma que nos sistemas anteriores, os resultados comparativos foram expressos na Tabela 21. Cabe ressaltar que o consumo energético para a única proposta que atendeu os requisitos normativos ficou acima do inicial em 18,61%.

**Tabela 21 - Comparação da iluminação**

	Potência ativa média (kW)	Consumo mensal (kWh)	Redução (%)	Iluminância projeto (lux)	Iluminância medida (lux)	Diferença (%)
Fluorescente 44 Luminárias	57,69	2538,48		326	300	8%
				250	0	0%
LED 88 Luminárias	20,91	1839,97	27,52%	623	584,64	6%
				400	362,77	9%
LED 144 Luminárias	20,91	3010,87	-18,61%	956	840,41	12%
				760	725,55	5%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

## 5 CONCLUSÃO

Por meio deste trabalho foram desenvolvidas propostas de efficientização energética para uma cabine de pintura, sendo que a forma de redução no consumo de energia, por meio do controle de velocidade do motor de insuflamento, com o auxílio do inversor de frequência, se mostrou viável, pois seu consumo teve redução de 15,8%, quando ajustado para a faixa de 94% da sua velocidade nominal, além de possuir um *payback* de 7 anos. Porém se a redução de velocidade for maior, o conjunto passa a aumentar seu consumo, atingindo níveis maiores do que na própria rotação nominal, isso ocorre devido ao fato de o motor necessitar aumentar o campo magnético induzido para manter o torque no eixo.

Com relação a proposta de troca de tecnologias nos motores de exaustão, ficou claro que mesmo substituindo o motor antigo, por um de alto rendimento e conseguindo uma redução de 10,53% no consumo, o seu investimento é inviável, pois o *payback* é superior à sua vida útil. Mas se for analisar o contexto atual, de preocupação com os recursos do país, sugere-se que seja efetuada a substituição gradual dos motores quando estes vierem a sofrer alguma avaria e for necessário um gasto para sua reparação.

No mesmo viés anterior, a tecnologia de motor síncrono também não compensa, mesmo atingindo uma maior redução e uma melhora no fator de potência da empresa, pois seu *payback* também supera a sua vida útil. Neste caso, foi verificado que o grande agravante é ainda o seu alto custo, que acaba sendo potencializado com a necessidade de se ligar este motor em um inversor que possua essa função, pois no teste realizado foi necessário a parametrização das indutâncias construtivas do motor. Além disso, esse motor operou com o seu torque em 60%, portanto pode vir a ser viável o teste com um motor desta mesma tecnologia, mas com a potência de 5kW, sugestão para um próximo trabalho.

Já com relação ao sistema de iluminação, não houve ganhos energéticos, pois os níveis de iluminância originais estavam abaixo do recomendado e com a substituição das lâmpadas no primeiro projeto, mesmo com a melhora nos níveis, este não atendeu a norma de referência, portanto, a redução não deveria ser implementada. A partir disso, foi necessário aprimorar o projeto para garantir os níveis mínimos estabelecidos pela norma NBR ISSO 8995-1, e com isso o consumo foi superior em 18,61%. Com a implementação do novo modelo de luminárias, a cabine melhorou sua iluminância garantindo assim um nível aceitável para que as pessoas que a utilizam, reduzindo assim problemas de saúde

ocupacional, além de melhorar a qualidade do serviço executado, que conseqüentemente impacta numa melhor qualidade na pintura.

Como sugestão de trabalhos futuros fica:

Utilização da tecnologia de motor síncrono em um processo que seja possível a redução da velocidade de trabalho, para atingir eficiência energética;

Análise de redução energética com redução da potência elétrica de motores de indução com base na sua carga mecânica aplicada.



## REFERÊNCIAS

- ACCI INSTALAÇÕES DE PINTURA INDUSTRIAL, São Paulo. Cabine de pintura automotiva. 2018. Disponível em: <http://www.acciindustrial.com.br/cabine-pintura-automotiva>. Acesso em: 10 ago. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Relação de projetos de eficiência energética cadastrados na ANEEL por empresa. Brasília: ANEEL, 2010. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/eficienciaenergetica>. Acesso em 03/09/2022.
- AGUILLERA, M. A. Revista O Setor Elétrico. 110 ed. São Paulo: Atitude Editorial Publicações Técnicas, 2015, Março 2015. ISSN 1983 – 0912
- ANDREAS, J.C.; (1982) “Energy Efficient Electric Motors Selection and Applications”, Marcel Dekker Inc, New York.
- AHMED, A. Eletrônica de potência. São Paulo: Prentice Hall, 2000
- ARTCOATING. Especial pintura automotiva. Disponível em <https://www.artcoating.com.br/especial-pintura-automotiva>. Acessado em setembro 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8995. Iluminação de ambientes de trabalho. Rio de Janeiro, 2013. 46p
- BACKLUND S., THOLLANDER P., PALM J., OTTOSSON M. Extending the energy efficiency gap, Energy Policy, 51, p. 392-396, 2012.
- BOGLIETTI, A. et al. Thermal analysis of induction and synchronous reluctance motors. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 42, n. 3, p. 675–680, May 2006.
- BOLDEA, I. et al. Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanente magnets: An overview. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 61, n. 10, p. 5696–5711, Oct 2014.
- CETESB. Poluição do Ar: Gerenciamento e Controle de Fontes. São Paulo: Cetesb, 2017b. (APOSTILA – Poluição do Ar: Gerenciamento e Controle de Fontes).
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). Eficiência energética na indústria: o que foi feito no Brasil, oportunidades de redução de custos e experiência internacional. Brasília: CNI, 2009. Disponível em

[https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer\\_public/cc/5b/cc5b40dd-1047-4293-b8c0-e718829393e2/20121126132514523849i.pdf](https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/cc/5b/cc5b40dd-1047-4293-b8c0-e718829393e2/20121126132514523849i.pdf) . Acesso em 21/08/2022.

CÔRTEZ, Douglas Machado. Aplicação de inversores de frequência em motores elétricos de CA. 2010. 128 f. Dissertação (trabalho de conclusão de curso) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

COSTA, G. J. Iluminação Econômica. Porto Alegre: EDIPUCRS. 2004.

DRUMOND, T. A. P. Aplicação de Técnicas de Produção Sustentável no Processo de Pintura Automotiva. 2013. 180 f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço energético nacional 2017: Ano base 2016. Rio de Janeiro, 2017. 296 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Nota técnica DEA 13/15: Demanda de energia 2050. Rio de Janeiro, 2016. 257 p

FENG L., MEARS L. Analysis of HVAC energy in automotive paint shop. ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2015.

FITZGERALD, A. E; JR, Charles Kingsley; UMANS, Stephen D. Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência. 6 ed. Bookman, 2008, 648 p.

FRANÇA, F. de A. “Ventiladores: Conceitos Gerais, Classificação, Curvas Características Típicas e Leis dos Ventiladores”. FEM / UNICAMP, 1999.

FRANCHI, Claiton Moro. Acionamentos elétricos. 4 ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2008. 250 p.

GNECCO, Celso; MARIANO, Roberto; FERNANDES, Fernando. Tratamento de Superfície e Pintura. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2003.

GODOI, J.M.A. Eficiência energética industrial: um modelo de governança de energia para a indústria sob requisitos de sustentabilidade. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GOEKING, W., Revista O Setor Elétrico, Lâmpadas e Leds – São Paulo: Atitude Editorial. Novembro de 2009, edição 46

GOUVEIA, J. P. C. L. B. Certificados brancos: Análise e contributos para a sua aplicação em Portugal. 2008. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.

HANSON, B., WEIGAND, C., ORLOFF, S. Performance of electric irrigation pumping plants using variable frequency drives. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, May/June, p. 179-82, 1996.

HENN, Érico Antônio Lopes. Máquinas de Fluido. 2. ed. Santa Maria, RS: Editora da UFSM, 2006. 476 p.

HURST, J. “Raising the standard for electric motor efficiency”. *InTech*, April 2007, pp 30-34.

IEA (2022), Energy Efficiency Indicators Data Explorer, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-efficiency-indicators-data-explorer>. Acesso em 14 out. 2022

IEA (2021), India Energy Outlook 2021, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/india-energy-outlook-2021>. Acesso em 14 out. 2022

IEA (2018), Eficiência Energética 2018, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2018> . Acesso em 14 out. 2022

INSTACARRO. A história da pintura automotiva. Disponível em

<https://www.instacarro.com/blog/mercado-automotivo/a-historia-da-pintura-automotiva/#:~:text=Quando%20Karl%20Benz%20patenteou%20o,com%20outros%20olhos%3A%20a%20pintura> .Acessado em setembro 2022.

IVANOVICH, Michael. Association Solutions – VAC Fan Efficiency Codes and Standards: The Pressure is On. *HPAC Engineering*, 6 janeiro 2014, 4p.

JORGENSEN, R. Fan Engineering. 9 ed. Buffalo, New York: Howden Buffalo, Inc.: 1999.

KENNEDY, BARRY W. Power Quality Primer. United States of America: Ed. McGrawHill, 2000.

KRIEL, C.; JOUBERT, R.; MARAIS, J. The influence of variable speed drives on electric motor operating temperatures. In: *INDUSTRIAL AND COMMERCIAL USE OF ENERGY CONFERENCE (ICUE)*, 10., 2013.

KHAN, Faisal I; GHOSHAL, Alope Kr.. Removal of Volatile Organic Compounds from polluted air. *Journal Of Loss Prevention In The Process Industries*, [s.l.], v. 13, n. 6, p.527-545, nov. 2000.

KOSOW, I. L. Máquinas Elétricas e Transformadores. 4.ed. Tradução de Felipe Daiello e Percy Soares. Porto Alegre: Globo, 1982. 2 v

LEDOBRASIL, tecnologia LED. Disponível em <http://ledobrasil.com.br/>. Acesso em: 15 de novembro de 2022

LEITE, A. A. F., BAJAY, S. V. e GORLA F. D. Oportunidades de Eficiência Energética na Indústria. Brasília: CNI/ Eletrobras, 2010a.

MACINTYRE, ARCHIBALD JOSEPH, Ventilação Industrial e controle de poluição. Ed. LTC, Rio de Janeiro, 1990, 2a. ed.

MAHESWARAN, D.et al. Energy Efficiency in Electrical Systems. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS, DRIVES AND ENERGY SYSTEMS, Bengaluru, 2012.

MAMEDE FILHO, JOÃO, Instalações elétricas industriais/João Mamede Filho, -8. ed – [Reimpr]. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MANNELLI, Giovanni (Ed.). Cabines de pintura e fluxo de ar: de quais filtros estou precisando? 2016. Disponível em: <<http://brafiltros.com.br/blog/2016/11/23/cabines-de-pintura-e-fluxo-de-ar-de-quais-filtros-estou-precisando/>>. Acesso em: 02 setembro. 2012.

MARTINHO, EDSON. Distúrbios da Energia Elétrica. 2ª Edição, 2012.

MATTOS, E.E. de., FALCO, R. de. Bombas Industriais. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.474p.

MCKERVEY, G. W. and PERRY, B.. “Fan Applications in the Cement Industry”. Cement Industry Technical Conference, 1993. Record of Conference Papers., 35th IEEE. 23-27 May 1993 pp.467 – 476.

MESQUITA, A.L.S., GUIMARAES, F.A., NEFUSSI, N.. Engenharia de ventilação industrial. CETESB, São Paulo, 1988.

MESQUITA, G. F. Estudo comparativo de consumo energético de uma motobomba centrífuga com o controle de vazão na forma tradicional e com a utilização do inversor de frequência.

2015. 56 f. Dissertação (trabalho de conclusão de curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. Induction Motor Drives. Power electronics: converters, applications and design. 3. ed. Danvers: John Wiley & Sons, 2003. p. 399-434.

MORAES, R. M.; MIRANDA, G. C. Controle de rotação de motor utilizando inversores de frequência. 2014. 32 f. Dissertação (trabalho de conclusão de curso) – Universidade do Vale do Paraíba, Faculdade de Ciências Sociais Aplicadas e Comunicação, São José dos Campos, São Paulo, 2014.

MOREIRA, A. B., SCHIMIDLIN JR., PONTES, R. T. S., MONTEIRO, C. A., NETO, T. N. C. “Operation Analysis of a Industrial Cooling Systems with Variable Speed Aiming the Efficiency Energy”. In: VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais. VII Induscon 2006. Recife - PE: IEEE Industry Applications Society (IAS), 2006. v. 1.

NIOSH, Hughes et al. (Org.). Industrial Ventilation: A manual of recommended practice. 23. ed. Estados Unidos: American Conference Of Governmental Industrial Hygienists, 1998. 514 p.

OENNING, R. Análise da viabilidade econômica de um projeto de implantação de variadores de velocidade em bombas centrífugas industriais. 2011. 69p. Monografia (Especialização em Engenharia Econômica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

PAIXÃO, Jaqueline Pinho. Controle de velocidade de motores elétricos. 2009. 61 f. Monografia (especialização) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

PEREIRA, M. J. “Energia: eficiência e alternativas”. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009.

POMILIO J.A. “Eletrônica de potência”, apostila, UNICAMP, Campinas, 2006

PROCEL - Programa Nacional De Conservação Da Energia Elétrica. Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações. Itajubá, MG: UNIFEI, 2006.

PROCEL - Programa Nacional De Conservação Da Energia Elétrica. Eficiência Energética: Teoria & Prática 1.ed. Itajubá, MG: UNIFEI, 2007.

SANTOS, T. H. dos; GOEDTEL, A.; SILVA, S. A. O. da; SUETAKE, M. Scalar Control of an Induction Motor Using a Neural Sensorless Technique. Electric Power Systems Research, 2014.

SCHULZE M., NEHLER H., OTTOSSON M., THOLLANDER P. Energy management in industry – a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework, *Journal of Cleaner Production*, 112 (5), 3692-3708, 2016.

SCHNEBERGER, Gerald L. *Understanding Paint and Painting Process*. 4 ed. Illinois. Hitchcock Publishing Co., 1989.

SCHUBERT, E. F. *Light-Emitting Diodes*, second edition, Cambridge, 2006

SILVA, P. C. G. Análise de perdas do motor de indução submetido ao ensaio de dupla frequência. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SOUZA, D. F. Uma avaliação do desempenho de motores elétricos de indução trifásicos comercializados no Brasil entre 1945 e 2016 e o impacto da legislação brasileira. Dissertação (Pós-graduação em Energia), Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

STOFFEL, B. *Assesing the energy efficiency of pumps and pump units*. [S.l.]: Elsevier/Europump, 2015.

TECH-AIR, São Paulo. Cabine de pintura. 2018. Disponível em: <http://www.tech-air.com.br/cabines-de-pintura> . Acesso em: 25 ago 2022.

THIES. E. *Revista Interdisciplinar de Ciência Aplicada*. Eficiência energética em sistema eletromotriz de ventilação: uma análise comparativa entre motor de indução trifásico x motor de ímã permanente, 2016 2v

VIANA, C. N. A., *Manual do Programa de Eficientização Industrial - Módulo: Ventiladores e Exaustores*. ELETROBRÁS / PROCEL, Rio de Janeiro, 2002.

WAIDE, P; BRUNNER, C. U. *Energy-efficiency policy opportunities for electric motor driven systems*. Paris: International Energy Agency (IEA), 2011.

WEG Equipamentos S/A, “Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM”, Guia técnico, Jaraguá do Sul, 2016.

WEG Equipamentos S/A, “Motores elétricos”, Guia de especificação, Jaraguá do Sul, 2017.

## APÊNDICES

APÊNDICES A – Referente aos orçamentos utilizados para conclusão deste trabalho, sendo separados da seguinte forma:

A1 – Orçamento do inversor de frequência.



**dimensional**  
A Sonepar Company

DIMENSIONAL BRASIL SOLUCOES LTDA  
AV ARMANDO RAGONHA, 190  
CEP 13481316 - LIMEIRA - SP  
CNPJ 06913480001563  
Insc. Est. 417582321112  
Tel.  
www.dimensional.com.br

**PILHAS E BATERIAS**  
ALCALINAS INDUSTRIAIS



**TRADE FORCE**  
A Sonepar Company

Empresa: MARCOPOLO SA  
CNPJ: 88611835000803  
Contato: RAFAEL ZANARDI  
Endereço: AV RIO BRANCO, 4889  
Cidade / UF: CAXIAS DO SUL - RS  
Fone / Fax: 54 2101-4056  
E-mail: rafael.zanardi@marcopolo.com.br

**EcoDIM**  
Somos uma empresa SUSTENTÁVEL

**Orçamento No. 2153820**

**19/06/2023**

ITEM	CÓDIGO	DESCRIÇÃO	C. FISCAL	ICMS	QTDE	UNID	PREÇO UNITÁRIO	PREÇO TOTAL	ICMS ST	FATURAMENTO EM	
1	32892	INVERSOR 3F 380-480V 178A 125CV G120 6SL32101PE318UL0 SIEMENS DRIVES  <b>DESCRIÇÃO TÉCNICA:</b> INVERSOR FREQUENCIA   NUMERO FASES: TRIFASICO   TAMANHO: FSF   TENSÃO ALIMENTAÇÃO: 380-480V   FREQUENCIA: 47/63HZ   CORRENTE NOMINAL SAIDA LOW OVERLOAD / NORMAL DUTY (LO): 175A   POTENCIA LOW OVERLOAD / NORMAL DUTY (LO): 90KW (125CV)   CLASSE PROTECAO : IP20   ALTURA: 708MM   LARGURA: 305MM   PROFUNDIDADE: 357MM   FILTRO ELETROMAGNETICO: SEM FILTRO RFI   MODELO: G120   MARCA: SIEMENS   REF: 6SL32101PE318UL0	85044050	4	1	PC	59.111,04	59.111,04	0,00	até 1 dia	
2	159914	UNIDADE CONTROLE 2A 24VCC G120 CU240E-2 DP 6SL32440BB121PA1 SIEMENS DRIVES  <b>DESCRIÇÃO TÉCNICA:</b> UNIDADE CONTROLE (INVERSOR FREQUENCIA)   CORRENTE AJUSTAVEL: 2A   TENSÃO CONTROLE: 24VCC   INTERFACE / PROTOCOLO: PROFIBUS   MODELO: SINAMICS G120 CU240E-2 DP   MARCA: SIEMENS   REF: 6SL32440BB121PA1	85049040	4	1	PC	3.831,25	3.831,25	0,00	até 1 dia	
<b>TOTAL SEM ICMS ST:</b>								<b>62.942,29</b>			
<b>TOTAL ICMS ST:</b>									<b>0,00</b>		
<b>TOTAL COM ICMS ST:</b>								<b>62.942,29</b>			

A2 – Orçamento do sensor de pressão.



**616KD-02 | DWYER | Sensor de pressão diferencial (4-20mA) para ar com range de 0 a 3" w.c.**

SKU: 616KD-02

**R\$ 806,28**

Em Estoque

[Descrição](#)
[Ficha Técnica](#)

Sensor de pressão diferencial para ar com sinal de saída em 4-20mA (corrente) com range de pressão positiva de 0 a 3" w.c. - coluna d'água. A série 616KD possui tecnologia de calibração digital por botão de pressão One-Touch® projetados que traz maior facilidade nas etapas de instalação, manutenção e calibração.

## A3 – Orçamento do motor IR3 Premium.



MAGELB COML. ELETR. LTDA  
 AV. RUBEN BENTO ALVES, 7758 SALA A  
 CEP: 95012-404/CINQUENTENARIO  
 FONE: 54-3226.1455 / CAXIAS DO SUL - RS  
 CNPJ: 07.024.978/0001-32 / IE: 0290429684

Plenus Gestão

## ORÇAMENTO DE VENDA

## GERAL

Número:	13064	Data Emissão:	21/03/2023 08:58	Data Validade:	31/03/2023
Cond. Pagto:	28 DIAS	Docto Pessoa:			
Prev. Entrega:					
Observação:	MOTOR LINHA W22 IR3 PREMIUM				

## CLIENTE

Nome:	MARCOPOLO S/A	Telefone:	54-2101.4000
Endereço:	AV RIO BRANCO	Número:	4889
Bairro:	ANA RECH	CEP:	95060650
		Cidade:	CAXIAS DO SUL
		UF:	RS
Email Cliente:	nfe@marcopolo.com.br	Repres:	
Comprador:		Email:	
		Telefone:	

## PRODUTOS/SERVIÇOS

Código	Descrição	NCM	Qtde	UM	Valor Unit	VI ST	Valor Total
998	MOTOR 10 CV 1800 RPM, 380/660 VOLTS IP55 W22 IR3 PREMIUM	85030090	1	UN	R\$ 9.763,26	R\$ 0,00	R\$ 9.763,26

## A4 – Orçamento do motor WMagnet.



MAGELB COML. ELETR. LTDA  
 AV. RUBEN BENTO ALVES, 7758 SALA A  
 CEP: 95012-404/CINQUENTENARIO  
 FONE: 54-3226.1455 / CAXIAS DO SUL - RS  
 CNPJ: 07.024.978/0001-32 / IE: 0290429684

Plenus Gestão

## ORÇAMENTO DE VENDA

## GERAL

Número:	13063	Data Emissão:	21/03/2023 08:53	Data Validade:	31/03/2023
Cond. Pagto:	28 DIAS	Docto Pessoa:			
Prev. Entrega:					
Observação:	MOTOR ELETRICO TRIFASICO CA ROTOR DE IMAS PERMANENTES 10 CV 06 132S 380 C/ 3 TERM 60HZ				

## CLIENTE

Nome:	MARCOPOLO S/A	Telefone:	54-2101.4000
Endereço:	AV RIO BRANCO	Número:	4889
Bairro:	ANA RECH	CEP:	95060650
		Cidade:	CAXIAS DO SUL
		UF:	RS
Email Cliente:	nfe@marcopolo.com.br	Repres:	
Comprador:		Email:	
		Telefone:	

## PRODUTOS/SERVIÇOS

Código	Descrição	NCM	Qtde	UM	Valor Unit	VI ST	Valor Total
999	MOTOR E DRIVE WMAGNET 10 CV 1800 RPM 4 POLOS 380 VOLTS	85015210	1	UN	R\$ 23.499,86	R\$ 0,00	R\$ 23.499,86

MOTOR ELETRICO TRIFASICO CA ROTOR DE IMAS PERMANENTES 10 CV 06 132S 380 C/ 3 TERM 60HZ B3D IP55 W22 MAGNET  
 DRIVE SYSTEM ALTO RENDIMENTO  
 ULTRA PRE - NCM: 8501.52.90 - ENTREGA 45 DIAS



## A5 – Orçamento de correção do fator de potência.

CELETRO CAXIAS

Digitacao de Orcamentos

ORPRA12

## CELETRO CAXIAS MATERIAIS ELETRICOS LTDA.

Orçamento: 094065

CAXIAS DO SUL, 12 de Junho de 2023

Fornecedor		Cliente	
Razao.....: CELETRO CAXIAS MATERIAIS ELETRICOS LTDA.		Nome.....: RAFAEL ZANARDI	099999
Endereco...: RUA OS 18 DO FORTE, 529		Endereco....: RUA OS 18 DO FORTE, 529 NOSSA SENHORA DE LOURDE	
Cidade.....: CAXIAS DO SUL 95.020-472 RS		Cidade.....: CAXIAS DO SUL 95.020-472 RS	
C.N.P.J.....: 89.821.094/0001-73		C.N.P.J.....: 00.000.000/0000-00	
CGC/TE.....: 0290078296		CGC/TE.....: ISENTO	
Telefone...: (54) 3228-1633		Telefone....: ( ) .	Contato...:
Fax.....: (54) 3228-3004		Fax.....:	Atividade.:

Representante		Condicoes	
Nome.....: VALDOMIRO	001	Data Emissao: 12/06/2023	
Endereco...: RUA OS 18 DO FORTE, 529		Prev.Entrega: 12/06/2023	
Cidade.....: CAXIAS DO SUL 95.020-472 RS		Operacao....: 001 5.102 Venda no Estado	
C.N.P.J.....: 000.000.000-00		Cond.Pgto...: 090 A VISTA	
CGC/TE.....: ISENTO		Divisao.....: 00 Divisao Geral	
Telefone...:	Fax...:	Frete.....: FOB	

Descontos..:	Acrescimos.:

Seq Produto	Descricao do Produto	NCM/SH	UM	Quantidade	Pr.Liq.Unit	Preco Total	%ICMS	%IPI
001 21.75.017	CAPACITOR 5,4 KVAR 380V-BLRC050A060B40	85321000	PC	1	473,86	473,86	17,00	
002 21.75.019	CAPACITOR 13,5 KVAR 380V-BLRC125A150B40	85321000	PC	1	689,62	689,62	17,00	
003 21.75.020	CAPACITOR 16,2 KVAR 380V-BLRC150A180B40	85321000	PC	1	750,52	750,52	17,00	
004 21.01.003	CONTATOR LC1DFKM7 - ATÉ 12,5 KVAR 380V	85364900	PC	1	545,78	545,78	17,00	
005 21.01.004	CONTATOR LC1DGKM7 - ATÉ 16,7 KVAR 380V	85364900	PC	1	686,72	686,72	17,00	
006 21.37.141	DISJ TRIF. 3P C - 16 A - EZ9F33316	85362000	PC	1	57,42	57,42	17,00	
007 21.37.142	DISJ TRIF. 3P C - 20 A - EZ9F33320	85362000	PC	1	57,42	57,42	17,00	
008 21.37.144	DISJ TRIF. 3P C - 32 A - EZ9F33332	85362000	PC	1	57,42	57,42	17,00	
009 02.08.113	CABO FLEX. 750 V - 6 MM -	85444900	M	1,00	4,30	4,30	17,00	

O b s e r v a c o e s

- ZANARDI

## ANEXOS

Referente aos dados técnicos das luminárias no relatório do software DIALUX, separados da seguinte forma:

### ANEXO 1 – Luminária fluorescente

**Folha de dados do produto**

Stahl - 6012/1124-4951-1100-11




N° do artigo	226394
P	160.0 W
$\Phi_{\text{Lâmpada}}$	10800 lm
$\Phi_{\text{Luminária}}$	7383 lm
$\eta$	68.36 %
Rendimento luminoso	46.1 lm/W
CCT	5000 K
CRI	69



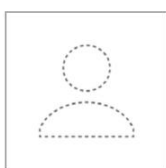
**CDL polar**

Avaliação de ofuscamento seg. UGR

### ANEXO 2 – Luminária LED

#### Folha de dados do produto

Ainda não é um membro DIALux - PI-48 1



N° do artigo	PI-48 1
P	52.9 W
$\Phi_{\text{Lâmpada}}$	5374 lm
$\Phi_{\text{Luminária}}$	5374 lm
$\eta$	100.00 %
Rendimento luminoso	101.6 lm/W
CCT	6000 K
CRI	69

