



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**JOCEMAR JOSÉ COSTA DE OLIVEIRA NETO**

**REDUÇÃO DE CONSUMO DE GÁS NATURAL DE UMA ESTUFA DE SECAGEM  
UTILIZANDO O *PROBLEM SOLVING*: estudo de caso em uma indústria  
montadora de automóveis**

**RECIFE**

**2023**

JOCEMAR JOSÉ COSTA DE OLIVEIRA NETO

**REDUÇÃO DE CONSUMO DE GÁS NATURAL DE UMA ESTUFA DE SECAGEM  
UTILIZANDO O *PROBLEM SOLVING*: estudo de caso em uma indústria  
montadora de automóveis.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador(a): Marcele Elisa Fontana

**RECIFE  
2023**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Oliveira Neto, Jocemar José Costa de.

Redução no consumo de gás natural de uma estufa de secagem utilizando o  
Problem Solving: estudo de caso em uma indústria montadora de automóveis. /  
Jocemar José Costa de Oliveira Neto. - Recife, 2023.

45 p. : il., tab.

Orientador(a): Marcele Elisa Fontana

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de  
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica -  
Bacharelado, 2023.

1. Eficiência energética. 2. Sustentabilidade. 3. Problem Solving. I.  
Fontana, Marcele Elisa. (Orientação). II. Título.

670 CDD (22.ed.)



Universidade Federal de Pernambuco  
Departamento de Engenharia Mecânica Centro de  
Tecnologia e Geociências- CTG/EEP



**ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC2**

Ao 11.º dia do mês de setembro do ano de dois mil e vinte e três, às 16:00 horas, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado **Redução de consumo de gás natural de uma estufa de secagem utilizando o problem solving: estudo de caso em uma indústria Montadora de automóveis**, elaborado pelo aluno **JOCEMAR JOSE COSTA DE OLIVEIRA NETO**, matrícula 20160005246, composta pelos avaliadores Profa. **Marcele Elisa Fontana** (orientadora), Profa. **Janaina Moreira de Meneses** (avaliadora) e Prof. **Rodrigo Sampaio Lopes** (avaliador). Após a exposição oral do trabalho, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se e deliberaram pela sua Aprovação, atribuindo-lhe a média 9,50, julgando-o apto( ) / inapto( ) à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada pelos membros da banca.

Orientadora: Profa. Marcela Elisa Fontana Nota: 9,50

Assinatura \_\_\_\_\_

Avaliadora Interna: Profa. Janaina Moreira de Meneses Nota: 9,50

Assinatura \_\_\_\_\_

Avaliador Externo: Prof. Rodrigo Sampaio Lopes Nota: 9,50

Assinatura \_\_\_\_\_

Recife, 11 de setembro de 2023.

Prof. Marcus Costa de Araújo  
Coordenador de Trabalho de Conclusão de curso - TCC  
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, quero agradecer ao Senhor Jesus, autor e consumidor da minha fé, razão da minha existência, que me concedeu a graça de estar finalizando o curso, mesmo diante de tantos obstáculos.

Aos meus pais e irmãos, que nunca deixaram de me apoiar e me auxiliaram em todas as áreas necessárias da vida.

À minha esposa, que me incentivou nos momentos mais difíceis e compreendeu minhas ausências enquanto me dedicava à realização da graduação.

À minha orientadora, que durante todo o período do trabalho me acompanhou e me deu o suporte necessário para elaboração desse projeto.

Aos meus professores, pelos ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional.

## RESUMO

O avanço da tecnologia e da atividade humana resultou em um aumento desenfreado no consumo de recursos naturais e nas emissões de poluentes, causando efeitos catastróficos na atmosfera, nos ecossistemas e na sociedade. As emissões provenientes da queima de combustíveis representam cerca de 76% de todas as emissões de gases de efeito estufa no Brasil nos setores de energia e processos industriais. No processo de pintura de automóveis, por exemplo, estima-se em 48% a 60% do consumo de energia necessária para a montagem de um automóvel e é o principal causador da liberação de compostos orgânicos voláteis (VOCs), presentes nos solventes da tinta, material particulado, e de gases poluentes como SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> e CO, decorrentes da combustão nos fornos, estufas de secagem e caldeiras. Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho foi estudar ações mais assertivas e eficientes para reduzir o consumo de Gás Natural e, conseqüentemente, reduzir o desperdício de energia e os impactos ambientais associados à etapa de pintura. Para isso, a metodologia *Problem Solving* foi utilizada, tendo como resultado uma redução de 40% no uso de gás natural do forno da cataforese, diminuindo o consumo em aproximadamente 21,9 mil N.m<sup>3</sup> por semana.

**Palavras-chave:** Eficiência Energética; Sustentabilidade; *Problem Solving*.

## ABSTRACT

The advancement of technology and human activity has resulted in an unbridled increase in the consumption of natural resources and pollutant emissions, causing catastrophic effects on the atmosphere, ecosystems and society. Emissions from burning fuels account for around 76% of all greenhouse gas emissions in Brazil in the energy and industrial process sectors. In the process of painting cars, for example, it is estimated that 48% to 60% of the energy consumption required to assemble a car is estimated to be the main cause of the release of volatile organic compounds (VOCs), present in paint solvents, particulate matter, and polluting gases such as SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> and CO, resulting from combustion in ovens, drying ovens and boilers. Given this context, the objective of this work is to study more assertive and efficient actions to reduce the consumption of Natural Gas and, consequently, reduce energy waste and the environmental impacts associated with the painting stage. For this, the *Problem Solving* methodology was used, resulting in a 40% reduction in the use of natural gas in the cataphoresis oven, reducing consumption by around 21,9 thousand N.m<sup>3</sup> per week.

**Keywords:** Energy Efficiency; Sustainability; Process Optimization; *Problem Solving*.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>14</b>
<b>1.3 Justificativas</b> .....	<b>14</b>
<b>1.4 Estrutura do trabalho</b> .....	<b>15</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1 Processo de pintura em uma indústria automotiva</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2 <i>Problem Solving</i></b> .....	<b>21</b>
2.2.1 <i>Passo 1 - Definição clara do problema</i> .....	22
2.2.2 <i>Passo 2 – Estudo detalhado do problema</i> .....	24
2.2.3 <i>Passo 3 – Definição do objetivo a ser alcançado</i> .....	24
2.2.4 <i>Passo 4 – Análise de causa raiz</i> .....	25
2.2.5 <i>Passo 5 – Definição das ações e contramedidas</i> .....	27
2.2.6 <i>Passo 6 – Verificação dos resultados</i> .....	28
2.2.7 <i>Passo 7 – Padronização das ações</i> .....	28
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>29</b>
<b>3.1 Tipo de pesquisa</b> .....	<b>29</b>
<b>3.2 Etapas da pesquisa</b> .....	<b>29</b>
<b>3.3 Locus da pesquisa</b> .....	<b>30</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>32</b>
<b>4.1. Definição do problema</b> .....	<b>32</b>
<b>4.2 Estudo detalhado do problema</b> .....	<b>33</b>
<b>4.3 Definição do objetivo</b> .....	<b>35</b>
<b>4.4 Análise de causa raiz</b> .....	<b>35</b>
<b>4.5 Definição das ações e contramedidas</b> .....	<b>37</b>
<b>4.6 Verificação dos resultados</b> .....	<b>37</b>
<b>4.7. Padronização e expansão das ações</b> .....	<b>40</b>
<b>4.8. Discussão dos resultados</b> .....	<b>40</b>
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>42</b>
<b>6.1 Contribuições do trabalho</b> .....	<b>42</b>
6.1.1 <i>Contribuições Científicas</i> .....	43
6.1.2 <i>Contribuições Sociais</i> .....	43
6.1.3 <i>Contribuições Gerenciais</i> .....	44
<b>6.2 Limitações e futuros trabalho</b> .....	<b>44</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia e da atividade humana, ao longo dos anos, trouxe um aumento desenfreado no consumo de recursos naturais e nas emissões de poluentes, causando efeitos catastróficos à atmosfera, ecossistemas e sociedade. Com isso, a escassez de energia e a poluição ambiental são dois grandes problemas enfrentados atualmente no mundo todo (PATEL; RATHOD, 2020).

Em entrevista à imprensa em 2020, o Dr. Fatih Birol, Diretor Executivo da Agência Internacional de Energia (IEA), afirmou que somente mudanças estruturais mais rápidas na maneira como se produz e consome energia podem quebrar a tendência atual de emissões de poluentes. Diante disso, de acordo com o relatório World Energy Outlook do IEA (2020b), vários países do mundo implementaram metas e políticas com o objetivo de zerar o lançamento de dióxido de carbono na atmosfera até 2050. Neste sentido, a indústria automobilística desempenha um papel crucial no combate à escassez de energia e na redução das emissões de poluentes.

Dentre as fases da produção de automóveis, o processo de pintura é reconhecido como responsável pelos impactos ambientais mais significativos se comparado às demais etapas da produção (GIAMPIERI et al., 2019). Este setor é o principal causador da liberação de compostos orgânicos voláteis (VOCs), presentes nos solventes da tinta, material particulado e de gases poluentes como SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> e CO, decorrentes da combustão nos fornos, estufas de secagem e caldeiras (CETESB, 2008). Além disso, a pintura é a etapa de produção que mais consome energia em toda cadeia produtiva do veículo, devido a sua utilização na eletrodeposição da tinta Ecoat (cataforese) para aquecimento das estufas de secagem e na cabine de pintura. De acordo com Pendar (2022), este consumo chega a 36% de toda a energia necessária para a fabricação de um veículo.

Mais especificamente, os fornos de pintura, onde as superfícies pintadas com tinta úmida são convertidas em um filme seco, consomem mais de 20% da energia total utilizada na oficina de pintura e quando o forno não está curando os veículos, durante a partida e baixa produtividade, mais de 25% da energia é desperdiçada (ROMAGNOLI, 2016; RAO & GOPINATH, 2013).

Diante deste cenário alarmante, o presente trabalho propôs-se a investigar estratégias mais assertivas e eficientes para a redução do consumo de gás natural,

visando, conseqüentemente, mitigar o desperdício de energia e atenuar os impactos ambientais associados à etapa de pintura na indústria automobilística. Utilizando a metodologia *Problem Solving*, este estudo alcançou resultados promissores, conseguindo uma redução notável de 40% no consumo de gás natural do forno de cataforese, o que equivale a uma economia de aproximadamente 21,9 mil N.m<sup>3</sup> por semana.

Este trabalho representa um passo significativo na direção de soluções sustentáveis e eficazes para enfrentar os desafios ambientais e energéticos que assolam a indústria, demonstrando que é possível conciliar o avanço tecnológico com a preservação do meio ambiente. O sucesso desse projeto reforça a importância da busca contínua por práticas mais conscientes e inovadoras, contribuindo assim para a construção de um futuro mais sustentável e resiliente.

## **1.2 Objetivos**

O presente trabalho teve como principal objetivo utilizar a metodologia do *Problem Solving* de forma a identificar a redução no consumo de Gás Natural de uma estufa de secagem.

Para alcançar o objetivo geral proposto foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar o processo de pintura dos veículos;
- Definir claramente o problema relacionado com o alto consumo de energia no setor da pintura automotiva;
- Aplicar a metodologia *Problem Solving* para resolução do problema;
- Identificar e implementar melhorias processuais para redução no consumo de Gás Natural.

## **1.3 Justificativas**

A opção de um trabalho com esse tema se deu, principalmente, pela crescente demanda de processos produtivos com consumo energéticos sustentáveis. Em setembro de 2015, 193 Estados Membros da Organização das Nações Unidas (ONU) adotaram a Agenda 2030 para o Desenvolvimento

Sustentável como a estrutura global esperada para orientar os esforços nacionais para alcançar os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Novovic, 2022). Especificamente, a ODS de nº 12 trata de assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis. Ela afirma que as indústrias ao redor do mundo devem, entre outros pontos, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso, adotar práticas sustentáveis e a integrar informações de sustentabilidade em seu ciclo de relatórios. Como consequência, tem-se a proteção e a preservação da biodiversidade e seus recursos, melhoria na qualidade de vida da sociedade e surgimento de processos mais eficientes, reduzindo o desperdício de insumos e energia.

No âmbito profissional, o trabalho é justificado pela implementação dos conceitos de Engenharia da Qualidade, vistos durante o curso, que aborda as técnicas e ferramentas para a melhoria da qualidade e produtividade nas organizações. Assim, por meio deste trabalho foi possível compreender e aplicar as melhores práticas e planos de melhoria da qualidade nos processos produtivos da empresa.

Do ponto de vista empresarial, este projeto se justifica por vislumbrar o tripé da sustentabilidade (econômico, ambiental e social), visto que o gás natural é uma fonte de energia não renovável. Portanto, a empresa pode reduzir seus gastos operacionais, diminuir os impactos ambientais, contribuir para a mitigação das mudanças climáticas e a preservação dos recursos naturais, melhorando a imagem da empresa perante a sociedade e os clientes.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está estruturado em 5 capítulos, além desse tópico de introdução. Os capítulos seguintes apresentam a fundamentação teórica do trabalho, estudo de caso, resultados, discussão dos resultados obtidos e conclusões.

O capítulo 1 expressa a motivação que levou o desenvolvimento deste trabalho, os objetivos que se pretende alcançar, a justificativa do projeto e a sua estrutura.

O capítulo 2 apresenta uma fundamentação teórica sobre o processo de pintura em uma indústria automotiva, os processos sustentáveis, a metodologia

*Problem Solving*, explicando o que é e como aplicar e como utilizar ferramentas da qualidade para auxiliar sua implementação.

O capítulo 3 exhibe o estudo de caso, o cenário atual da empresa e da sua problemática, bem como a metodologia de aplicação da ferramenta para obtenção dos resultados planejados.

O capítulo 4 apresenta os resultados e discussão, demonstrando a efetividade na aplicação de cada passo da metodologia.

O Capítulo 5 é exposto a conclusão e considerações finais sobre trabalho, resultados obtidos e relevância para área de atuação.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo, foi abordado o processo de pintura em uma indústria automotiva, com foco nos estágios envolvidos e nos desafios enfrentados.

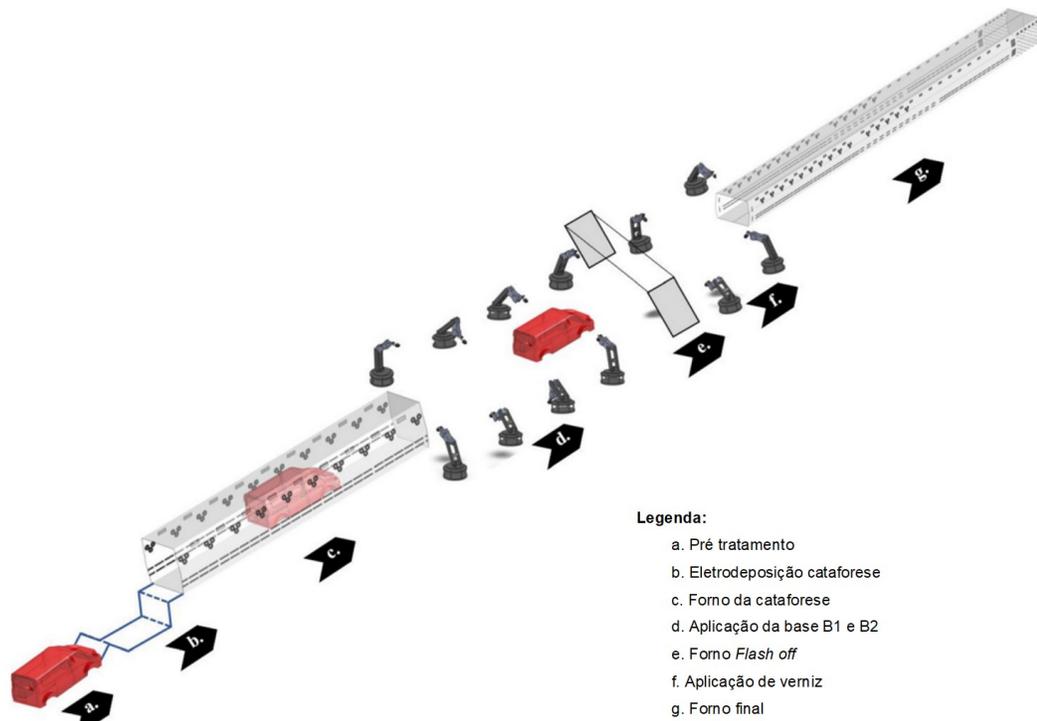
São destacados diversos aspectos desse processo, incluindo sua importância não apenas para a estética do veículo, mas também para a proteção contra oxidação, corrosão, raios UV e outros danos externos. É explicado que na pintura é consumido a maior parcela de energia na fabricação do veículo como um todo.

Após a exploração do processo de pintura, o capítulo passa para o conceito de resolução de problemas na manufatura enxuta. É discutido como a melhoria contínua deve ser implementada em todas as fases da produção e como o ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act) é fundamental nesse contexto.

### **2.1 Processo de pintura em uma indústria automotiva**

As fábricas de automóveis são, geralmente, divididas em 4 grandes áreas: Prensas, Funilaria, Pintura e Montagem final. No setor da Pintura, a carroceria é limpa, revestida de tinta e curada. Além da função estética do carro como profundidade de cor e brilho, a pintura tem que garantir proteção da carroceria contra: oxidação e corrosão, raios U.V, impactos externos (batida de pedra, chuva ácida, abrasão durante a lavagem, por exemplo) e infiltrações de água. Para isso aplicam-se filmes de tinta, com especificações de espessura adequada. A tinta proporciona estética (qualidade óptica e atratividade) e propriedades físicas (resistência à corrosão, proteção mecânica e proteção contra as condições

climáticas) para os veículos (GIAMPIERI et. al, 2019). A Figura 1 ilustra os principais estágios da maioria das grandes montadoras pelo mundo.



**Figura 1:** Ilustração esquemática da planta de uma oficina de pintura automotiva convencional.  
Fonte: Adaptado de Pendar et al., (2022).

Com o intuito de limpar e preparar o substrato metálico do veículo para receber a 1ª camada de tinta protetiva, faz-se necessário sua passagem no **pré-tratamento (a)**. A carroceria, após entrar na oficina de pintura, passa por uma limpeza e enxágue, sendo primeiramente imerso em líquido desengordurante e condicionador, em seguida mergulhado em sais de fosfato e solução diluída de ácido fosfórico para formação da camada de fosfatos cristalinos insolúveis (DOERRE et al., 2018).

Primeiramente, a carroceria atravessa os estágios de limpeza e desengraxe, por imersão e aspensão em um meio alcalino, para retirada do óleo, graxa, resíduos de lixamento e particulados diversos em excesso. Após a limpeza, uma camada de fosfato (geralmente de Zinco) é aplicado através de um ataque ácido na superfície da carroceria, formando os cristais de fosfato e conferindo uma melhora na estabilidade de adesão da próxima tinta e na resistência à corrosão. O processo de pré-tratamento é finalizado com o enxágue do excesso de fosfato residual por meio

de água desmineralizada, para minimizar choque de pH e reduzir concentração de contaminantes antes da carroceria entrar no processo de eletrodeposição.

Após a preparação da superfície metálica, a carroceria imerge no tanque da cataforese, onde sofre o processo de **eletrodeposição da cataforese (b)**, também chamada de Eletroforese, E-coat ou Eletrocoating. O E-Coat é um sistema de pintura orgânico que usa o conceito de eletrólise para depositar tinta sobre uma peça ou produto montado. Com a carroceria imersa em um meio condutivo e submetida a um potencial elétrico, é forçada a migração de partículas de tinta eletricamente carregadas para a carroceria para formar um filme insolúvel.

O processo oferece um bom poder de penetração da tinta em regiões inacessíveis, garantindo uma película uniforme por toda a superfície pintada e atribuindo uma excelente proteção anticorrosiva e resistência a deformação mecânica. Atualmente, nas indústrias, utiliza-se a configuração catódica para o corpo por proporcionar excepcional resistência (STREITBERGER; DOSSEL, 2008).

Antes das camadas bases B1 e B2, há a aplicação de uma massa vedante, chamado de selantes. Esse material, geralmente à base de celulose, é empregado na carroceria de forma manual ou robotizado. Ele preenche os espaços vazios e furos a fim de inibir a infiltração de água no interior das chapas e do veículo. Existe também a etapa de limpeza e revisão da superfície pintada para que seja aplicada as camadas bases da pintura.

A **aplicação das camadas B1 e B2 (d)** é feita a partir da pintura eletrostática automatizada. A carroceria e as partículas que saem dos bicos dos robôs são carregadas eletricamente de forma oposta, facilitando a aderência do filme. Três formas de revestimento de base diferentes que são usadas podem ser nomeadas como, meio sólido à base de solvente, alto teor de sólidos à base de solvente e à base de água (PFAFF, 2008).

A camada B1 tem função de enchimento de pequenos desníveis da superfície, garantir estabilidade de adesão das camadas posteriores, proteção contra diversos tipos de agressões físicas e proteção contra raios UV. Já a camada B2 confere a cor definitiva da carroceria, é a camada onde se tem a profundidade de cor.

Após as camadas base, é necessária a **aplicação da camada de verniz (f.)**, que garante o brilho adequado e proteção da camada anterior, promovendo durabilidade ao revestimento. A camada de verniz protege o corpo da corrosão,

desbotamento pela luz ultravioleta e impactos ambientais e fornece uma camada lisa e sem manchas com filme de apelo estético (AKAFUAH, 2013).

Cada uma das etapas de revestimento mencionadas acima envolvem o processo de cura ou secagem através de fornos (**forno da cataforese (c.)**, **forno flash off (e.)** e **forno final (g.)**). Nos fornos de pintura, as superfícies pintadas com tinta úmida são convertidas em um filme seco, que consome energia significativa para aquecimento e circulação do ar (PENDAR et al, 2022)

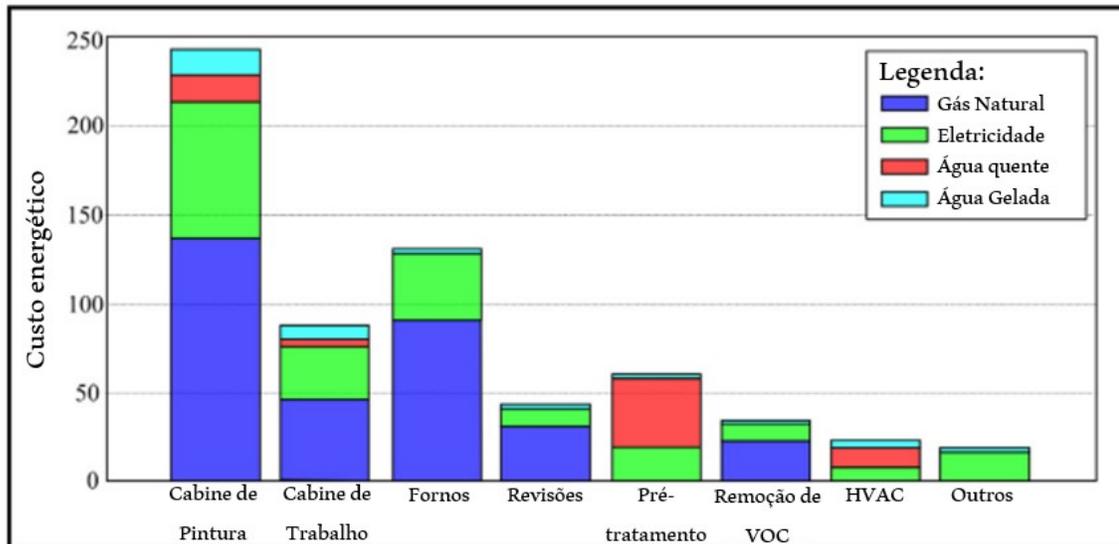
Os fornos além de garantir a janela de cura adequada para a tinta depositada, eles devem ter mecanismos que atenuem a liberação dos compostos orgânicos voláteis (VOCs), presentes, majoritariamente, nos solventes usadas na tinta. Uma estratégia que é largamente utilizada para diminuir esse índice à níveis aceitáveis é a incineração térmica dos VOCs a uma determinada temperatura. A incineração térmica destrói as emissões de VOCs por oxidação térmica gerando dióxido de carbono, água e outros produtos de combustão (JENNINGS, 1984). Fournie et al (2022) afirmaram que a incineração térmica é tratamento mais comum dentro da indústria para decomposição dos VOCs, embora apresente riscos devido à formação e/ou liberação de substâncias perigosas nas emissões do processo.

Segundo Romagnoli (2016), na oficina de pintura, durante os processos de deposição e cura do filme de tinta, o trabalho dos robôs nas cabines de pintura, fornos, cabines de retrabalho, pré-tratamento e sistema de remoção de VOCs, é consumido a maior parcela de energia na fabricação do veículo como um todo.

Giampieri (2019) descreveu as principais fontes de energia utilizadas na oficina de pintura (Figura 2) e as aplicações relacionadas, como:

- **Eletricidade:** É utilizada para alimentar os motores dos ventiladores e produzir fontes de energia secundárias no processo de pintura (iluminação, bombas, transportadores etc.). A alta vazão de ar exigida pelas cabines de pintura, plataformas de trabalho e fornos é responsável pelo maior consumo de energia elétrica na oficina de pintura.
- **Gás Natural:** É usado como combustível para a combustão nos fornos e para aquecer o ar antes de ser fornecido à cabine de pintura e fornos. O gás natural também é usado para produção de água quente, que é crucial para o pré-tratamento durante o processo de pintura. Além disso, é usado para remover o VOC produzido durante o processo de pintura com um processo de oxidação térmica.

- **Ar comprimido:** É altamente utilizado para atomizar as partículas de tinta em um atomizador e borrifá-las na carroceria do veículo. Operações adicionais realizadas com ar comprimido na oficina de pintura são limpeza, reparo, pulverização, remoção de tinta pulverizada em excesso etc.



**Figura 2** - Custo relacionado à energia para instalações de oficina de pintura.  
Fonte: Adaptado de Giampieri (2019).

Na literatura, podem ser identificados dois estudos que abordam a otimização do consumo de energia no setor de pintura:

Um dos estudos destaca uma abordagem inovadora conhecida como pintura úmida sobre úmida sobre úmida (3-Wet), introduzida pela Ford e Mazda (AKAFUAH et al., 2016). Essa abordagem envolve a aplicação de três camadas de tinta de forma sequencial, seguida por um único processo de cura. Essa técnica reduz significativamente a emissão de CO<sub>2</sub> e VOC (Compostos Orgânicos Voláteis) na atmosfera, contribuindo para práticas mais sustentáveis.

Outra pesquisa conduzida por Despotovic & Babic (2018) concentrou-se na gestão eficiente de energia em fornos de cura. Eles exploraram a otimização dos parâmetros operacionais que afetam o processo de cura. Uma das abordagens para melhorar a eficiência energética consistiu em reduzir o fluxo de ar fornecido durante os períodos de inatividade. Além disso, a adaptação da produção conforme a demanda também foi considerada como uma forma de minimizar o desperdício de

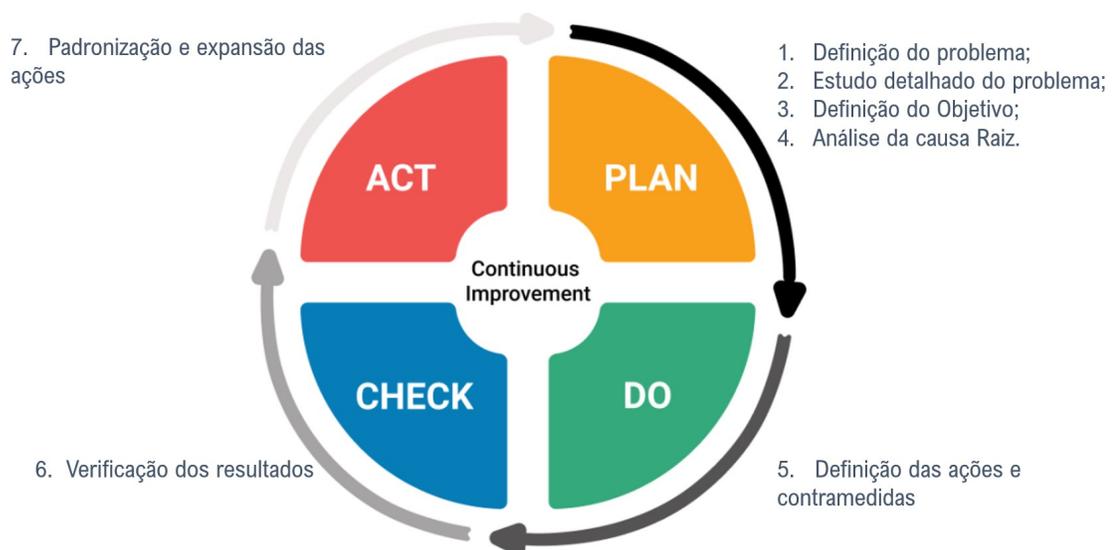
energia elétrica e gás natural. Essas estratégias demonstraram uma redução significativa no consumo de recursos energéticos.

## 2.2 Problem Solving

Na manufatura enxuta, proposta pelo sistema Toyota de produção, a melhoria contínua deve estar em todas as suas fases, visando a eliminação de desperdícios em todos os sistemas e processos de uma organização. (Bhuiyan, 2005). De acordo, com Peças et al. (2021), um projeto de melhoria contínua deve conter algumas abordagens com o ciclo PDCA em seu núcleo, são eles: gerenciamento da documentação da melhoria contínua, identificação do problema, mapeamento e sequência do problema, diagnóstico e análise de causa raiz, contramedidas, implementação, acompanhamento e padronização.

O *Problem Solving* é um processo sistematizado do ciclo PDCA, criando um passo a passo ordenado, com aplicação de diferentes conhecimentos e ferramentas básicas da qualidade em cada fase, a fim de estabelecer uma regra para atingir um objetivo específico (Pintér, 2012). O método é utilizado na metodologia WCM para resolução de problemas desde os mais complexos aos mais simples, promovendo a melhoria contínua dos processos ao longo do tempo (Haenen, 2015).

O processo é dividido em 7 passos dentro das 4 etapas do ciclo PDCA, como mostra a Figura 3.



**Figura 3:** Ciclo PDCA

Fonte: Kanbanize (2002).

Entende-se, como ilustra a Figura 3, que a maior parte do esforço e tempo deve ser dedicada a fase do planejamento, para que se tenha uma maior eficiência na aplicação da metodologia.

### *2.2.1 Passo 1 - Definição clara do problema*

Um problema pode ser definido como a lacuna entre uma situação esperada/ideal da situação atual e é imprescindível, para qualquer empresa que vise o melhoramento contínuo com soluções práticas diárias, definir claramente o mesmo. Sabe-se que as indústrias enfrentam várias adversidades e desafios ao longo dos anos e é preciso saber identificar, priorizar e atacar os problemas de forma efetiva. Para isso, deve-se reunir o máximo de dados a respeito do assunto para diagnosticar a situação e garantir que o foco esteja no problema, não apenas em seus efeitos (MELO, 2009).

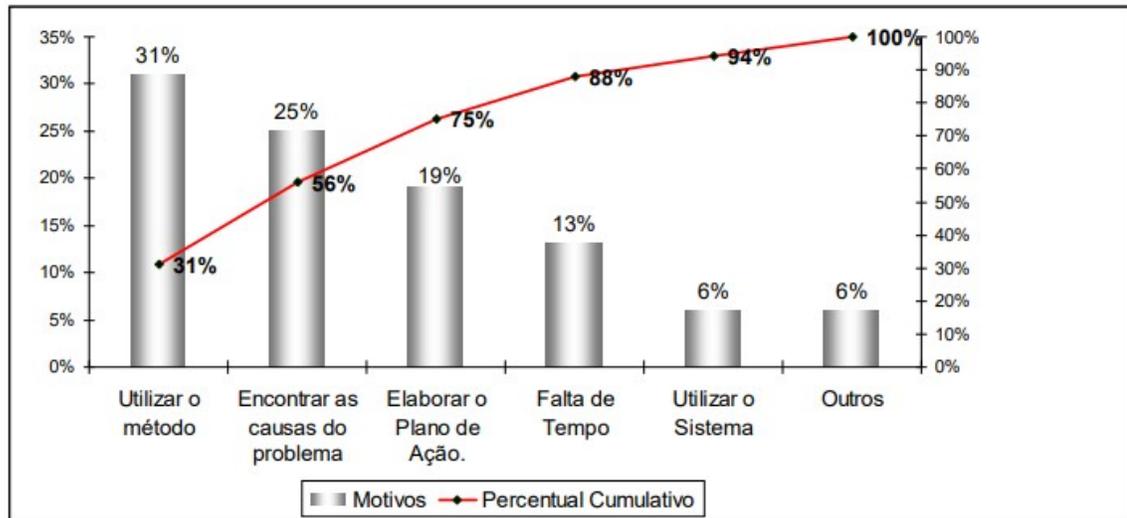
Nesse passo, 3 ferramentas são utilizadas: A estratificação dos dados, o gráfico de Pareto e o 5W1H.

A **estratificação** consiste em agrupar, de diversas maneiras, dados relativos ao problema. É uma técnica estatística utilizada para dividir um conjunto de dados em categorias, com base em características específicas. Por exemplo, imagina-se que uma pessoa queira estratificar a quantidade de tempo gasto durante o dia, ela poderia agrupar os dados em horários de descanso, trabalho, estudo e entretenimento. Ao dividir os dados em estratos, é possível identificar padrões ou diferenças significativas entre grupos, podendo ajudar na definição do principal problema (MELO, 2001).

Já o **gráfico de Pareto** é uma ferramenta gráfica que permite visualizar a distribuição de dados de acordo com sua criticidade ou importância, focando nos problemas que têm maior impacto em um determinado contexto. Campos (2004) afirmou que a análise de Pareto divide um problema grande em problemas menores e mais fáceis de serem resolvidos, e permite priorizar projetos e estabelecer metas concretas e atingíveis.

Utilizando as duas ferramentas em conjunto é possível agrupar os dados em ordem decrescente de criticidade, juntamente com uma linha que descreve o percentual de impacto cumulativo, ajudando na priorização dos principais problemas.

As categorias são colocadas no eixo horizontal e as quantidades ou valores associados a cada categoria são mostrados no eixo vertical, como ilustra a Figura 4.



**Figura 4.** Gráfico de Pareto: Causas da Dificuldade em utilizar o Método. Estratificação por Motivos. Fonte: Melo (2009).

Após o entendimento das perdas mais críticas e de sua priorização, é utilizada a ferramenta do **5W1H** que serve para efetuar, de maneira lógica, a descrição do fenômeno, mediante recolhimento de todos os dados e indícios necessários para compreendê-lo.

Segundo Seleme & Stadler (2010), a utilização desta ferramenta permite que o processo de execução das ações seja dividido em etapas, estruturadas através de perguntas com o intuito de gerar respostas que esclareçam o fenômeno a ser resolvido ou que organizem as ideias na resolução de problemas.

Através de 6 perguntas é possível ter uma compreensão, de forma rápida e detalhada, dos aspectos fundamentais relacionados ao problema (MEIRA, 2003):

- **WHAT** → O que? Em qual objeto/produto foi identificado o problema?
- **WHY** → Por quê?
- **WHERE** → Onde? Onde foi visto o problema? Em qual parte específica, você viu o problema?
- **WHO** → Quem? O problema é correlacionado ao fator homem (nível de experiência/treinamento/habilidade)?
- **WHEN** → Quando? Quando foi verificado o problema?

- **HOW** → Como? Como foi modificado o estado do equipamento/produto em relação as suas condições ideais de operação? Como se manifestou o problema?

### *2.2.2 Passo 2 – Estudo detalhado do problema*

Depois de definir claramente o problema, é de extrema importância conhecer e entender profundamente o problema, para uma compreensão adequada da situação, identificação de todas as partes envolvidas, análise de impactos e consequências de diferentes soluções potenciais, evitar soluções superficiais e efetividade nas ações a serem tomadas. Para estudar detalhadamente o problema, deve-se ter um bom entendimento de como o sistema funciona, como a máquina ou equipamento deve trabalhar em condições normais, por exemplo. Para auxiliar a compreensão do funcionamento do sistema, 3 pontos-chaves são levantados:

1. Fazer desenhos ou esquemas da máquina/sistema;
2. Definir uma lista de componentes envolvidos na máquina/sistema que devem ser investigados;
3. Estudar os manuais, parâmetros e limites de funcionamento da máquina/sistema que está sendo analisado.

Seguindo as indicações dos desenhos e da relação dos componentes, poderá ser observado se a máquina e os equipamentos estão funcionando corretamente ou não, e assim verificar se uma das condições pode estar gerando o problema.

### *2.3.3 Passo 3 – Definição do objetivo a ser alcançado*

Ter um objetivo em um projeto é fundamental, pois permite um direcionamento claro e bem definido das atividades a serem realizadas e das metas que precisam ser atingidas, auxilia na manutenção do engajamento e foco da equipe, serve para acompanhar o avanço das tratativas e decisões e ajuda a avaliar alternativas e determinar qual é a melhor abordagem a ser seguida (Drucker, 2007).

Segundo Paiva (2016) estes objetivos devem ser SMART que é um anagrama das palavras (em inglês) que definem os cinco conceitos que o formam:

- **Specific (Específicos):** O objetivo deve ser claro, bem definido e específico para melhorar o entendimento de todos os envolvidos;
- **Measurable (Mensuráveis):** O objetivo deve ser quantificável e mensurável, de modo que seja possível determinar claramente se foi alcançado ou não.
- **Attainable (Atingíveis):** O objetivo deve ser alcançável e viável, levando em consideração os recursos disponíveis, as habilidades da equipe e as restrições do projeto.
- **Relevant (Relevantes):** O objetivo deve ter um impacto significativo e alinhado com a visão e os objetivos estratégicos da empresa ou da organização como um todo.
- **Time-bound (Temporais):** O objetivo deve ter um prazo definido para ser alcançado. Isso ajuda a estabelecer um senso de urgência, bem como a criar um cronograma e um plano de ação para acompanhar o progresso.

#### 2.2.4 Passo 4 – Análise de causa raiz

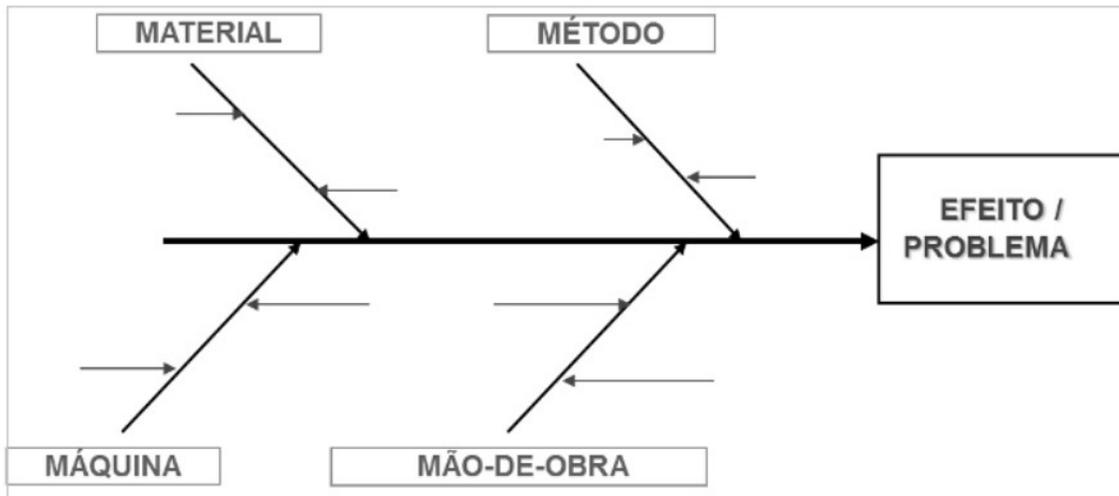
Após o estabelecimento dos objetivos a serem alcançados, faz-se necessário a análise profunda da causa raiz do problema. Para tal, duas ferramentas são utilizadas nesse passo: O diagrama de Ishikawa e os cinco porquês. Primeiramente utiliza-se o diagrama de Ishikawa para identificar a causa macro do problema e, a partir dessa primeira diagnose, é aplicada o método dos cinco porquês para ter um maior aprofundamento.

O **Diagrama de Ishikawa**, ou espinha de peixe, se trata de uma ferramenta visual que auxilia na identificação da causa raiz de um problema. Ele é composto por um eixo horizontal, que representa o efeito ou problema a ser analisado, e várias linhas que se estendem a partir desse eixo, que representam as principais categorias de causas que podem contribuir para o problema (Rodrigues, 2006).

As categorias de causas que são utilizadas na metodologia *Problem Solving* são referidas como “4Ms” (Figura 5):

- **Mão de obra:** Refere-se a pessoas envolvidas no fenômeno, incluindo suas habilidades, treinamento e motivação.
- **Máquina:** Engloba todas as máquinas, equipamentos, ferramentas e tecnologias que impactam no processo.

- Método: Compreende os procedimentos, métodos e ciclos de trabalho usados no processo
- Material: Envolve todos os materiais e insumos utilizados no processo.



**Figura 5** – Exemplo de diagrama de ishikawa 4M  
 Fonte: Adaptado de Cahyana (2018).

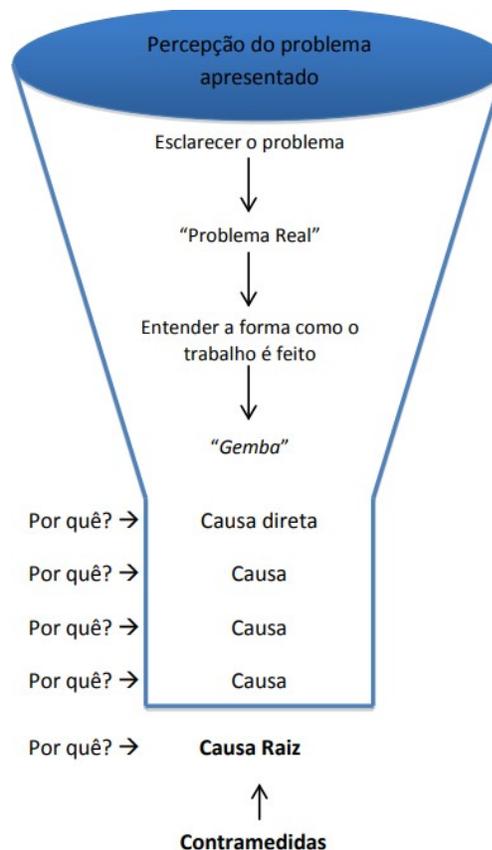
O diagrama de Ishikawa deve ser utilizado em situações que envolvam a necessidade de: identificar as causas possíveis de um problema; obter melhor visualização da relação entre causa e efeito; classificar as causas de um efeito ou resultado, organizando-as em sub-causas; identificar as causas que provocam um problema; identificar a relação entre os efeitos e suas prioridades; analisar defeitos ou falhas, visando sua identificação e melhoria (ANTÓNIO; TEIXEIRA, ROSA, 2016).

Desenvolvida por Sakichi Toyoda, fundador do Sistema Toyota de Produção na década de 1970, a ferramenta **Cinco Porquês** é um método simples baseado na premissa de entender e identificar a causa raiz de qualquer problema e facilitar sua resolução. Em outras palavras, é uma ferramenta da qualidade que visa procurar as causas de origem de um fenômeno anômalo através de uma série consecutiva de perguntas (por quê) as quais devemos atribuir uma resposta (Corrêa e Corrêa, 2012). Weiss (2011) descreveu de forma simplificada os 5 passos que devem ser dados para aplicar o método:

1. Inicie a análise com a afirmação da situação que se deseja entender, ou seja, deve-se iniciar com o problema;
2. Pergunte por que a afirmação anterior é verdadeira.

3. Para a razão descrita que explica o porquê a afirmação anterior é verdadeira, pergunte o porquê novamente;
4. Continue perguntando o porquê até que não se possa mais perguntar mais por quês;
5. Ao cessar as respostas dos por quês significa que a causa raiz foi identificada.

O ideal, para uma implementação eficaz, é responder os cinco porquês, para chegar até a causa verdadeira do problema (Figura 6).



**Figura 6** - Análises para descobrir a real causa raiz do problema  
**Fonte:** Schok (2008).

### 2.2.5 Passo 5 – Definição das ações e contramedidas

Nessa fase, uma equipe capacitada deve ser formada e um brainstorm com as principais ideias devem ser levadas em consideração, analisando o impacto, o custo e a dificuldade de implementação das contramedidas. Outro fator que pode ser

determinante para o sucesso da ação é que ela deve incidir nas causas raízes dos problemas e não sobre os efeitos (sintomas).

Depois de analisar as ações relevantes e suas causas, um plano de ação deve ser elaborado, no qual, segundo Campos (2004), deve-se definir o que será feito para resolver o problema, quem, quando e onde fará e descrever detalhes da ação.

#### *2.2.6 Passo 6 – Verificação dos resultados*

Nesse passo é observado se tudo quanto foi proposto e feito nos últimos tópicos realmente foi eficaz. Aqui a ferramenta de Pareto novamente é utilizada para auxiliar na verificação da evolução do tema crítico, comparando os resultados alcançados com as metas estabelecidas.

Depois de concluída a implementação das medidas, é necessário confirmar o impacto e proceder a um exame quantitativo e qualitativo da implementação em relação aos objetivos, bem como a uma retrospectiva da forma como as atividades progrediram (Ferreira, 2021).

#### *2.2.7 Passo 7 – Padronização das ações*

Nesse tópico deve ser feito padronizações dos ciclos e ações feitas para que os resultados permaneçam e até possam ser expandidas para outras áreas. Depois de todos os problemas que foram enfrentados, esforços devem ser feitos para compartilhar os resultados obtidos entre os obstáculos organizacionais e expandir ainda mais seu efeito (Ferreira, 2021).

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo, será explorado o tipo de pesquisa adotado para atingir os objetivos propostos no trabalho. Para abordar o objetivo de reduzir o consumo de gás natural e minimizar os impactos ambientais associados às emissões de poluentes em uma montadora automobilística em Pernambuco, o presente estudo adota uma abordagem de estudo de caso.

#### 3.1 Tipo de pesquisa

Em relação ao método científico, Gil (2002) afirma que: “O método científico é conjunto de procedimentos intelectuais e técnicos adotados para se atingir o conhecimento”. Visando atingir o objetivo proposto, o presente trabalho apresenta um estudo de caso, na qual demonstra reduzir o consumo de gás natural e minimizar os impactos ambientais associados às emissões de poluentes, aplicado dentro de uma montadora automobilística localizada no estado de Pernambuco.

O estudo de caso é apropriado para investigar fenômenos *in loco*, e acontecimentos reais que tornam as características de um estudo evidentes. Sendo assim é a investigação dentro de um contexto da vida real em que os limites entre fenômeno e contexto são bem claros (Morgado, 2012).

O trabalho foi de caráter exploratório e natureza descritiva. A pesquisa também possui uma abordagem qualitativa, pois pode proporcionar uma visão e compreensão melhor do problema em que a coleta de dados é analisada de forma interpretativa possibilitando uma aproximação da fonte de coleta de dados (Teis, 2006).

#### 3.2 Etapas da pesquisa

As etapas da pesquisa realizada neste trabalho, são as seguintes:

1. **Caracterização do Processo de Pintura dos Veículos:** Foi feita a análise detalhada do processo de pintura dos veículos na indústria automotiva. Foram identificadas as diferentes etapas, fluxos de trabalho, equipamentos e materiais envolvidos nesse processo. Essa caracterização permitiu

compreender as complexidades e os pontos críticos relacionados ao consumo de energia.

2. **Definição do Problema Relacionado ao alto consumo de energia:** Com base na caracterização do processo, o problema de alto consumo de energia na estufa de secagem foi claramente definido. Foram identificados os fatores que contribuem para o desperdício de energia nessa etapa do processo de pintura.
3. **Aplicação da Metodologia *Problem Solving*:** A metodologia *Problem Solving* foi aplicada para abordar o problema identificado. Essa abordagem sistemática envolveu a identificação, análise e resolução do problema por meio de passos estruturados. Foram utilizadas ferramentas de solução de problemas para investigar as causas-raiz do alto consumo de gás natural na estufa de secagem.
4. **Identificação e Implementação de Melhorias Processuais:** Com base na análise realizada durante a etapa anterior, foram identificadas oportunidades de melhorias processuais para redução do desperdício de energia na estufa de secagem. Foram propostas ações concretas e estratégias para otimizar o consumo de gás natural, considerando fatores como regulagem de equipamentos, tempos de operação e utilização de tecnologias mais eficientes.

### 3.3 Locus da pesquisa

O estudo de caso foi realizado no setor de Pintura, em uma indústria automotiva considerada a mais moderna e eficiente linha de produção do mundo, prezando sempre pela sustentabilidade.

Como visto anteriormente, a pintura se configura como o setor que mais utiliza energia para seus processos e, como consequência, libera muitos agentes nocivos ao ecossistema. As estufas de secagem têm uma contribuição significativa e negativa nesse quadro, já que para gerar calor suficiente para cura da tinta na carroceria em uma janela de tempo adequado, os fornos utilizam gás natural como fonte de combustível, desperdiçando grande parte dessa energia e emitindo gases poluentes como SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> e CO.

Diante desse fato, foi utilizada a metodologia *Problem Solving*, a fim de encontrar e definir a melhor tomada de decisão e ação diante do problema do alto consumo de Gás Natural.

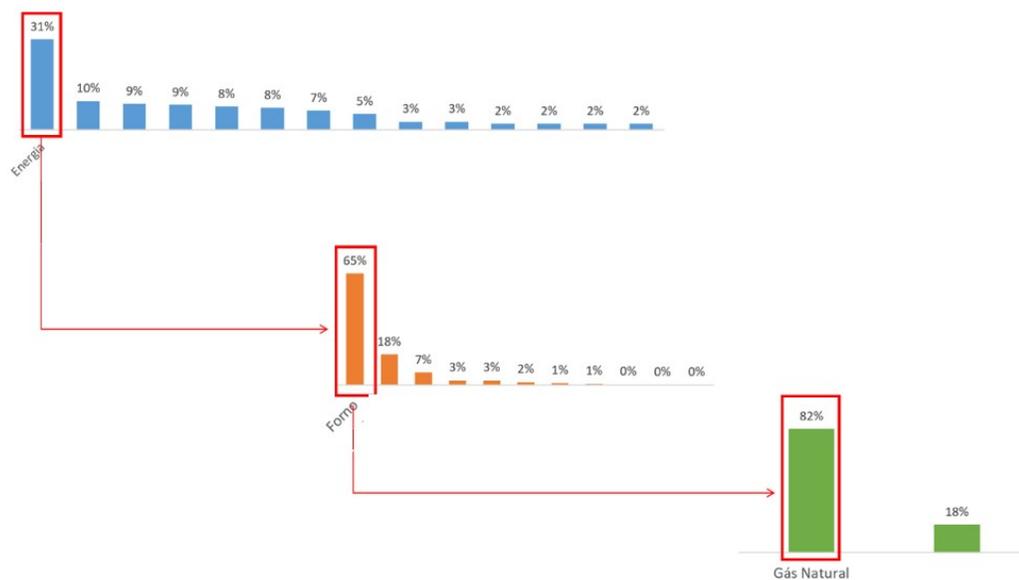
A pesquisa se desenvolveu durante o 1º semestre do ano de 2022 e os resultados foram sintetizados no capítulo 4.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresentará uma análise detalhada do problema identificado, as ações implementadas para resolvê-lo, os resultados obtidos e os benefícios alcançados, demonstrando a eficácia das soluções adotadas no contexto da indústria automotiva.

### 4.1. Definição do problema

A partir dos dados compilados de perdas dentro da oficina de pintura e organizando-os em um gráfico de Pareto, percebeu-se que a sua maior parcela é com relação à energia. Estratificando e analisando esse percentual de energia, chegou-se à conclusão de que a maior contribuição de perdas energéticas no setor se dá pelo consumo excessivo de gás natural nos fornos, como mostra a Figura 7.



**Figura 7** - Estratificação dos dados das perdas no setor da pintura  
 FONTE: Autoria própria

A ferramenta 5W1H foi aplicada, junto ao time de projeto, para compreender claramente o problema, através do recolhimento de todos os dados e indícios necessários para entendê-lo. O Quadro 1 mostra como foi aplicada a ferramenta e exibe um resumo do fenômeno.

Quadro 1 – Aplicação do 5W1H no problema de alto consumo de energia

Método	Descrição
<b>WHAT</b> (O que?)	Alto consumo de energia na pintura
<b>WHY?</b> (Por quê?)	Devido desperdício de energia
<b>WHERE?</b> (Onde?)	No forno da cataforese
<b>WHO?</b> (Quem?)	Independente de operador de máquina
<b>WHEN?</b> (Quando?)	Quando há baixa produtividade (vazios em linha)
<b>HOW?</b> (Como?)	Consumindo gás natural de forma excessiva
<b>RESUMO DO FENÔMENO</b>	Alto consumo de energia na pintura, devido ao seu desperdício no forno da cataforese quando há baixa produtividade (vazios em linha), consumindo gás natural de forma excessiva.

Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.2 Estudo detalhado do problema

A Figura 8 ilustra, de forma resumida, o princípio de funcionamento da estufa no qual: V1 é o grupo de ventiladores para entrada de ar fresco, G1 é o grupo de ventiladores para recirculação do ar, E1 é o exaustor e o ITO1 é o incinerador.



Figura 8 - Esquema do princípio de funcionamento da estufa de secagem  
Fonte: Autoria própria (2023).

A carroceria atravessa o túnel de secagem da estufa (forno), onde há a transmissão de calor por convecção para carroceria mediante circulação forçada de ar quente proveniente da combustão de gás natural em um queimador (incinerador). Ar renovado é succionado, por diferença de pressão, do ambiente para realizar a troca térmica com o ar queimado do incinerador em um trocador de calor. Após isso, o Grupo V1 ventila esse ar renovado aquecido para dentro da estufa de secagem.

O grupo G1 recircula o ar parcialmente saturado de dentro do forno e força sua passagem no trocador de calor, para que seja reaquecido pelo ar queimado do incinerador.

E1 realiza a exaustão do ar saturado e o ITO1 Incinera o ar saturado da estufa queimando-o a cerca de 600°C, a fim de deixá-lo em condições de ser liberado na atmosfera. Esse ar queimado ainda é utilizado para troca térmica nos grupos V e G.

Na prática, a estufa pode ter mais de um grupo V, G, E e ITO. O funcionamento da estufa, também, deve garantir um balanceamento de ar, em que a quantidade de ar fresco que entra (grupo V) tem que ser muito próxima da quantidade de ar que é extraída pelo exaustor. Essa quantidade média é chamada de renovação de ar.

O processo exige uma quantidade mínima de renovação de ar por carroceria dentro do forno. O valor de referência de renovação de ar é 520 kg/carroceria. Sem a renovação adequada, o ar dentro do forno fica demasiadamente saturado de vapores nocivos que comprometem a máquina e a qualidade do produto. Para isso, os exaustores trabalham na vazão de capacidade produtiva máxima da estufa.

Apesar de o sistema garantir a vazão para capacidade máxima de produção, existe grande variação na produtividade da estufa devido a vazios de carrocerias de oficinas anteriores. Nos momentos em que o forno não está completamente cheio existe a oportunidade de reduzir a renovação de ar, conseqüentemente traz uma oportunidade de redução de consumo de Gás Natural e de liberação de poluentes originários de sua combustão, pois o incinerador passa a queimar uma massa menor de ar saturado, já que a área superficial (carrocerias) para troca de calor é reduzida consideravelmente.

### 4.3 Definição do objetivo

Para a definição da meta de melhoria do sistema, time que constituiu o projeto utilizou a ferramenta SMART, como mostra o Quadro 2.

**Quadro 2** – Definição dos objetivos SMART

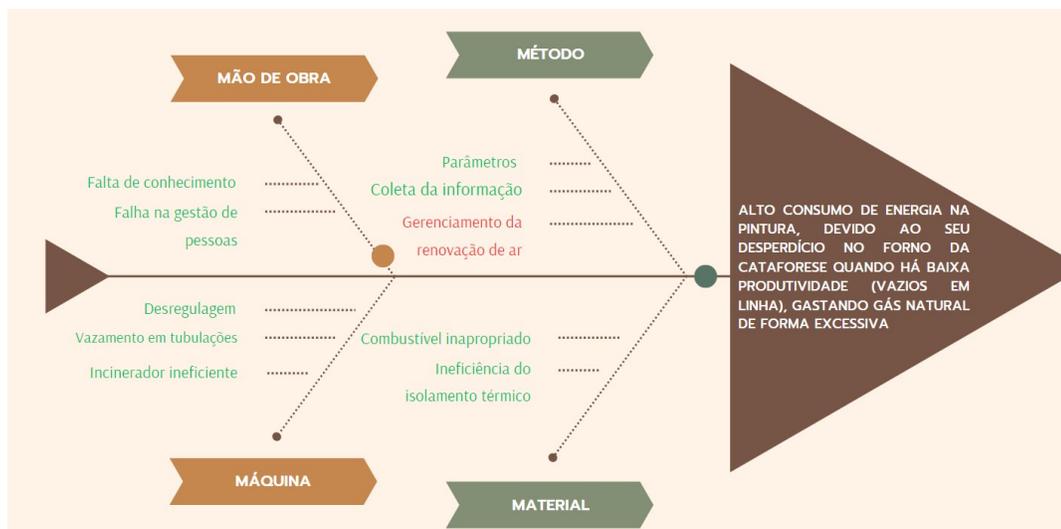
Método		Descrição
<b>S</b>	<b>ESPECÍFICO</b>	Redução do desperdício de energia no forno da cataforese.
<b>M</b>	<b>MENSURÁVEL</b>	Reduzir 30% do consumo de Gás Natural
<b>A</b>	<b>ATINGÍVEL</b>	Em baixa produtividade (em média 40 carros por hora), há uma necessidade 30% menor de renovação de ar para seu bom funcionamento.
<b>R</b>	<b>RELEVANTE</b>	Diminuição de liberação de gases nocivos ao ecossistema além de tornar o sistema mais eficiente, que é uma das metas constantes da empresa.
<b>T</b>	<b>TEMPO PREVISTO</b>	1 mês após a realização do projeto.

Fonte: Autoria própria (2023).

Em síntese, o objetivo SMART foi definido como: Reduzir, no mês subsequente à implementação da melhoria, 30% no consumo de Gás Natural no forno da cataforese durante o período de baixa produtividade, tornando o processo mais eficiente e menos poluente.

### 4.4 Análise de causa raiz

Com o intuito de direcionar a identificação da causa raiz do problema mencionado, foi aplicado junto ao time de projeto, o diagrama de Ishikawa (Figura 9) no fenômeno descrito no 5W1H anteriormente.



**Figura 9** – Aplicação do diagrama de Ishikawa no problema de alto consumo de Gás natural  
 Fonte: Autoria própria (2023).

Com a ajuda da ferramenta dos 5 porquês aplicado à ocorrência **de não gerenciamento da renovação de ar do forno**, pôde-se aprofundar e encontrar a causa raiz do problema relatado (Quadro 3).

**Quadro 3** – Aplicação dos 5 porquês no problema de alto consumo de Gás natural

Método	Descrição
<b>CAUSA INICIAL</b>	Não gerenciamento da renovação de ar no forno
<b>1º POR QUE</b>	Renovação de ar não acompanha a produtividade
<b>2º POR QUE</b>	Ventiladores trabalham com vazão constante
<b>3º POR QUE</b>	A frequência (Hz) dos ventiladores não é variável
<b>4º POR QUE</b>	<i>Setpoints</i> dos ventiladores são fixos
<b>5º POR QUE</b>	Na concepção da máquina, não foi previsto variação dinâmica dos <i>setpoints</i> das frequências dos ventiladores baseada na produtividade de carrocerias

Fonte: Autoria própria (2023).

Conforme evidenciado nos 5 porquês, o principal motivo do alto consumo de gás natural e desperdício de energia é a não modulação dinâmica das frequências dos ventiladores e exaustores associados a quantidade de carros que se têm dentro do forno.

#### 4.5 Definição das ações e contramedidas

Visando aumentar a assertividade das ações e chegar numa solução ideal, foi organizada uma equipe para analisar e avaliar as possíveis contramedidas a serem implementadas. Essa equipe averiguou o impacto da solução na qualidade e na produtividade das carrocerias, qual o custo total, a dificuldade para implantação das soluções propostas, bem como, foi definida as melhores estratégias para atingir o objetivo no prazo estabelecido.

Em vista disso, foi proposto como contramedida desenvolver um sistema, via PLC, que faz a correlação entre a quantidade de carrocerias que estão dentro do forno e os setpoints das frequências dos ventiladores, a fim de garantir a renovação de ar necessária durante a passagem dos carros na estufa de secagem. O Quadro 4 mostra as datas previstas para conclusão e a definição dos responsáveis por cada fase do projeto.

**Quadro 4** – Responsáveis pela implementação das ações

ITEM	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL	DATA PREVISTA
1	Medição de vazão do Ventiladores e Exaustores	Analista de manutenção/analista de processo	mar/22
2	Criação de tabela de Vazão x Frequência dos Ventiladores e Exaustores	Analista de processo	abr/22
3	Definição de tabela base para renovação	Analista de processo	abr/22
4	Criar lógica no PLC	Analista de manutenção/analista de processo	mai/22
5	Avaliação dos resultados	Analista de processo	mai/22

Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.6 Verificação dos resultados

Foram realizadas medições de velocidade do ar nas tubulações de Exaustão e Ventiladores para identificar a vazão a cada frequência imposta na ventilação do forno. Isso gerou uma Tabela de vazão *versus* frequência.

Derivada da tabela de vazões é possível criar uma correlação que estima a massa de ar renovada no forno em relação à sua capacidade produtiva. A partir disso, foi gerada uma tabela de referência (tabela 1) para o PLC com 4 faixas de trabalho para renovação de ar, baseada na produtividade, onde é garantida a renovação mínima para até 25%, até 50%, até 75% e 100% da capacidade por hora.

Colocados contadores de carrocerias (sensores) que estimam periodicamente a quantidade de carros presentes dentro no túnel de secagem. Dessa forma o PLC toma a decisão de ajustar as frequências dos ventiladores de forma mais otimizada, de acordo com a correlação exata de quantidade de carros *versus* renovação mínima de ar, garantindo calor adequado para cura completa da tinta e a qualidade do processo.

**Tabela 1** – Relação entre a massa de ar renovada no forno e a capacidade produtiva do forno.

Frequência (Hz)	Vazão ventilador	Vazão Exaustor	Capacidade produtiva
10	3942,6	7885,2	25%
21	7719,9	15439,7	50%
33	11840,5	23681,1	75%
44	15617,8	31235,6	100%

Fonte: Autoria própria (2023).

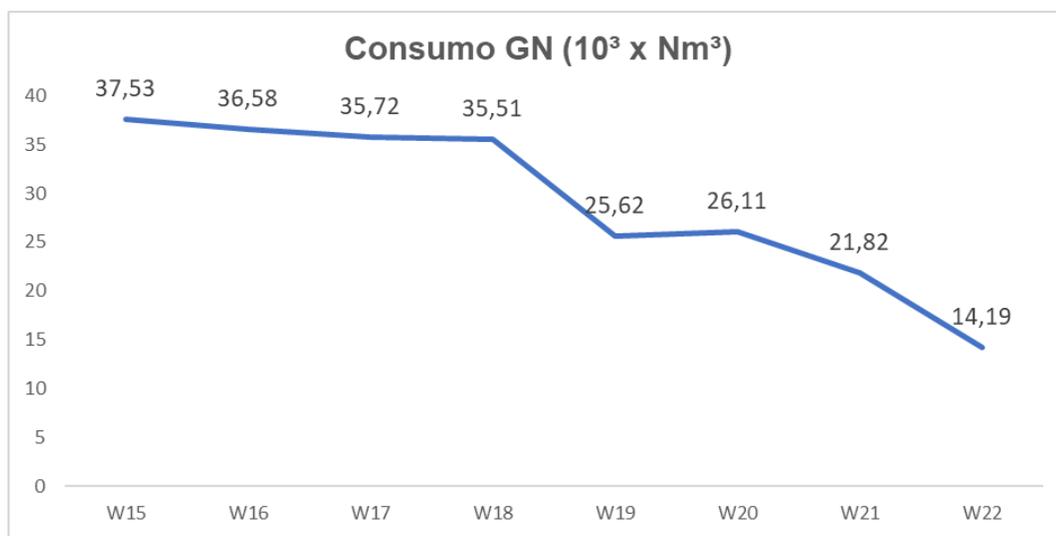
Após a execução dos testes da renovação de ar dinâmica, foi possível entender claramente que houve, como esperado, uma redução do consumo de gás natural, que passou a ser proporcional à quantidade de carrocerias que passam no forno.

A Figura 10 mostra o consumo estabilizado entre 0h e 6h, mesmo a produção (linha preta) tendo alterações em cada hora. A partir do momento do início do teste (a partir das 7h), o consumo de gás natural passa a ter certa proporcionalidade com a produção. É possível notar que as frequências dos exaustores (linhas roxas) passam a variar. A redução de consumo de gás é resultado da redução das frequências dos exaustores e consequente redução da massa de ar que precisa ser incinerada.



**Figura 10** – Evolução do consumo de Gás Natural no tempo  
 Fonte: Autoria própria (2023).

Como referência antes da alteração, o consumo do forno da cataforese era de 36,3 Mil Nm<sup>3</sup>/semana (Semanas w15 a w18). No mês de maio (Semanas w19 a w22), a média de consumo por semana produtiva foi de 21,9 Mil Nm<sup>3</sup>. Uma redução de aproximadamente 40% no consumo de Gás Natural, como mostra a Figura 11.



**Figura 11** – Evolução semanal do consumo de Gás Natural no forno da cataforese.  
 Fonte: Autoria própria (2023).

Obviamente que isso configura, também, uma redução em gases poluentes emitidos pela combustão do Gás Natural, já que menos massa de GN é queimada.

#### 4.7. Padronização e expansão das ações

Após excelentes resultados encontrados no forno da cataforese, foi proposto a mesma análise de gestão de vazios nos outros 2 fornos que existem no setor de pintura. Estima-se com isso uma redução de 20% nas perdas energéticas do setor após a aplicação.

Para replicar nas outras áreas foi preciso padronizar as documentações e melhores práticas, como, por exemplo, a lógica de programação empregada para o PLC e os resultados obtidos, inserindo – as no plano de controle do setor.

#### 4.8. Discussão dos resultados

O trabalho proporcionou uma série de benefícios para a equipe de trabalho envolvida e para a empresa como um todo. Dentre elas pode-se destacar:

- **Consciência Ambiental:** Ao estudar e abordar os impactos negativos da atividade industrial no meio ambiente, a equipe pôde desenvolver uma maior consciência ambiental e compreensão dos desafios enfrentados em relação à sustentabilidade.
- **Desenvolvimento de Habilidades:** A pesquisa e implementação de ações para reduzir o consumo de Gás Natural e as emissões de poluentes exigiram que a equipe desenvolvesse habilidades específicas em termos de análise de dados, planejamento, inovação e resolução de problemas.
- **Colaboração e Trabalho em Equipe:** A implementação do *Problem Solving* envolveu uma abordagem colaborativa, logo, os membros da equipe precisaram trabalhar juntos para identificar problemas e encontrar soluções, fortalecendo a coesão do grupo de trabalho.
- **Sentimento de Realização:** Ao alcançar uma redução de 40% no uso de gás natural na etapa de pintura, a equipe sentiu um grande senso de realização e satisfação, sabendo que suas ações tiveram um impacto positivo no meio ambiente.
- **Reconhecimento e Visibilidade:** O sucesso do trabalho resultou em reconhecimento dentro da empresa, destacando a equipe como líder em práticas sustentáveis e eficientes.

- **Benefícios Econômicos:** A redução no consumo de gás natural levou a economias significativas em termos de custos operacionais, tendo um impacto positivo nas finanças da empresa.

## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um problema real de gestão de desperdício energético no setor de pintura de uma montadora de automóveis, situada em Pernambuco. A maior parcela de energia consumida da montadora se dá quando a carroceria atravessa a oficina. Na pintura, o maior percentual de energia desperdiçada, sobretudo em momentos de baixa produtividade, são os fornos de secagem.

Os conceitos da metodologia de *Problem Solving*, baseados no ciclo PDCA, foram implementados para ajudar na identificação e entendimento do problema, traçar um objetivo, na análise e diagnóstico da causa raiz do problema, na tomada de ação eficaz, na averiguação dos resultados e na sua padronização, a fim de reduzir o consumo de gás natural nos fornos de cura de tinta após aplicação de sua primeira camada protetiva.

Um gerenciamento eficaz da renovação de ar não foi concebido na construção do forno. Diante disso, uma modulação dinâmica das frequências dos ventiladores e exaustores, associados a quantidade de carros que se têm dentro do forno, foi sugerida como ação para o fenômeno.

Após aplicação da ferramenta, obteve-se uma redução de 40% no uso de gás natural do forno da cataforese, diminuindo o consumo em cerca de 21,9 mil N.m<sup>3</sup> por semana.

Pôde-se visualizar que os conceitos da metodologia *Problem Solving* se configuram excelentes ferramentas no auxílio a resolução de problemas e deram resultados expressivos a organização, a sociedade e a biodiversidade.

Esses resultados contribuíram para o objetivo de desenvolvimento sustentável (ODS) de número 12, assegurando padrões de produção e de consumo mais sustentáveis, uma vez que diminuiu de forma considerável a combustão de gás natural e a liberação de gases poluentes na atmosfera.

### 6.1 Contribuições do trabalho

O trabalho apresenta uma abordagem valiosa para enfrentar os desafios ambientais e econômicos relacionados ao consumo de recursos naturais e às emissões de poluentes na indústria automotiva. Suas contribuições científicas,

sociais e gerenciais podem inspirar outras empresas a adotarem práticas mais sustentáveis, ajudando a construir um futuro mais equilibrado em termos ambientais e socioeconômicos.

#### 6.1.1 Contribuições Científicas

- **Desenvolvimento de metodologia:** O trabalho utilizou a metodologia de *Problem Solving*, o que pode ser considerado uma contribuição científica em si. Essa abordagem pode ser aplicada em outros contextos industriais e tecnológicos, incentivando a adoção de estratégias mais sustentáveis e eficientes em diferentes setores.
- **Redução de Gases de Efeito Estufa (GEE):** Ao reduzir o consumo de Gás Natural e as emissões associadas à etapa de pintura de automóveis, o estudo oferece uma contribuição importante para mitigar as mudanças climáticas. A diminuição das emissões de GEE, como CO<sub>2</sub> e outros poluentes, é essencial para combater o aquecimento global e seus impactos negativos no meio ambiente e na sociedade.

#### 6.1.2 Contribuições Sociais

- **Saúde e Qualidade do Ar:** A redução das emissões de compostos orgânicos voláteis (VOCs), SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e CO provenientes da queima de combustíveis nos processos de pintura contribui para melhorar a qualidade do ar. Isso resulta em benefícios diretos para a saúde da população, reduzindo casos de doenças respiratórias e outros problemas relacionados à poluição do ar.
- **Conscientização e Responsabilidade Social:** Ao demonstrar como ações específicas podem contribuir para a sustentabilidade ambiental, o trabalho pode inspirar outras empresas e indústrias a adotarem práticas mais responsáveis em relação ao consumo de recursos naturais e às emissões de poluentes. Essa conscientização coletiva pode criar uma cultura de responsabilidade social corporativa, onde as

empresas se preocupam tanto com seus lucros quanto com seu impacto no meio ambiente e na sociedade.

### 6.1.3 Contribuições Gerenciais

- **Eficiência Energética:** A redução de 40% no uso de gás natural no forno da cataforese, com economia de cerca de 21,9 mil N.m<sup>3</sup> por semana, representa uma melhoria significativa na eficiência energética do processo de pintura. Essa economia de recursos levou a uma redução nos custos de produção, melhorando a competitividade da empresa no mercado.
- **Sustentabilidade Empresarial:** A implementação de medidas sustentáveis no processo de pintura contribuiu para que a empresa pudesse evoluir no conceito de sustentabilidade no setor automotivo. Isso pode ser um diferencial competitivo, atraindo clientes preocupados com a questão ambiental dos produtos que consomem.
- **Cumprimento de Regulações e Normas Ambientais:** O trabalho auxiliou, dentre outros fatores, a empresa estar em conformidade com regulamentações ambientais mais rigorosas, mitigando riscos legais e potenciais multas relacionadas à poluição e ao consumo excessivo de recursos naturais.

## 6.2 Limitações e futuros trabalho

O presente trabalho obteve êxito na redução de Gás natural na oficina de pintura, no entanto, existem limitações a serem consideradas e oportunidades para expandir e aprimorar as ações sustentáveis no setor.

O projeto se concentrou especificamente em medidas para reduzir o consumo de Gás Natural na etapa de pintura de automóveis, mas outras fontes de emissões de gases de efeito estufa e poluentes podem existir em outras etapas do processo de produção. Seria interessante expandir a análise para considerar o ciclo de vida completo do veículo, desde a extração de matérias-primas até o descarte, a fim de identificar e abordar potenciais pontos de melhoria em toda a cadeia de produção.

Outras tecnologias sustentáveis poderiam ter sido consideradas para substituir ou complementar o uso de combustíveis fósseis (Gás Natural) em diferentes etapas do processo de pintura. Por exemplo, a utilização de energias renováveis, como a energia solar ou eólica, poderia contribuir para reduzir ainda mais o viés ambiental da produção de automóveis.

Um estudo mais detalhado dos custos e benefícios das medidas implementadas pode ser aplicado em futuros trabalhos para demonstrar aos gestores e tomadores de decisão o valor real da sustentabilidade. Isso pode ajudar a garantir o apoio contínuo às iniciativas sustentáveis e incentivar a implementação de outras ações eficientes no futuro.

## REFERÊNCIAS

AKAFUAH, N. K.; POOZESH, S.; SALAIMEH, A.; PATRICK, G.; LAWLER, K.; SAITO, K. **Evolution of the automotive body coating process - a review** *Coatings*, V. 6, N. 2, P. 24, 2016.

ANTÓNIO, N. S.; TEIXEIRA, A.; ROSA, A. **Gestão da qualidade de deming ao modelo de excelência da EFQM**. 2. Ed. Rev. E aum. Lisboa: edições Sílabo, 2016.

BHUIYAN, N.; BAGHEL, A. **An overview of continuous improvement: from the past to the present**. *Management decision*, V. 43, P. 761–771, 2005.

CAMPOS, V. F. **TQC – Controle da qualidade total**. Belo Horizonte: INDG, 2004.

CAHYANA, R. **A preliminary investigation of information system using ishikawa diagram and sectoral statistics**. In: IOP conference series: materials science and engineering. IOP publishing, 2018. P. 012050.

CETESB. **Guia técnico ambiental tintas e vernizes: série p+l**. São Paulo: cetesb, 2008. Disponível em: <[https://cetesb.sp.gov.br/areascontaminadas/wp-content/uploads/sites/5/2019/11/guia\\_tintas\\_e\\_vernizes.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/areascontaminadas/wp-content/uploads/sites/5/2019/11/guia_tintas_e_vernizes.pdf)>. Acesso em: 24 jul. 2023.

CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração de produção e operações: manufatura e serviços, uma abordagem estratégica**. 3 ed. São Paulo: atlas, 2012.

DESPOTOVIC, M.; BABIC, M. **Analysis of different scenarios of car paint oven redesign to achieve desired indoor air temperature**. *Energy efficiency*, v. 11, n. 4, p. 877–891, 2018.

DOERRE, M.; HIBBITTS, L.; PATRICK, G.; AKAFUAH, N. K. **Advances in automotive conversion coatings during pretreatment of the body structure: a review**. *Coatings*, v. 8, n. 11, p. 405, 2018.

DORAN, G. T. **Way to write management's goals and objectives**. *Management review*, v. 70, n. 1, p. 35–36, 1981.

DRUCKER, P. F. **The practice of management (REV. ED.)**. 2007.

FERREIRA, F. **Utilização do ciclo PDCA para melhoria de qualidade e aumento de produtividade em uma multinacional do polo industrial de Manaus**. 2021

PEÇAS P.; ENCARNÇÃO, J.; GAMBÔA, M.; SAMPAYO, M.; JORGE, D. **Pdca 4.0: uma nova abordagem conceitual para a melhoria contínua no paradigma da indústria 4.0.** Applied science, v. 11, n. 16, p. 7671, 2021.

FENG, L. **Manufacturing system energy modeling and optimization.** Phd thesis. Clemson university, 2019.

FOURNIE, T.; RASHWAN, T. L.; SWITZER, C.; GRANT, G. P.; GERHARD, J. I. **Exploring pcdd/fs and potentially toxic elements in sewage sludge during smouldering treatment.** Journal of environmental management, v. 317, p. 2022.

GIAMPIERI, A.; LING-CHIN, J.; TAYLOR, W.; SMALLBONE, A.; ROSKILLY, A. P. **Moving towards low-carbon manufacturing in the uk automotive industry.** Energy procedia, v. 158, p. 3381–3386, 2019.

GIL, ANTONIO CARLOS ET AL. **Como elaborar projetos de pesquisa.** São paulo: atlas, 2002.

HAENEN, J.; SCHRIJNEMAKERS, H.; STUFKENS, J. **Sociocultural theory and the practise of teaching historical concepts.** In: kozulin, a.; gindis, b.; ageyev, v. S. And miller, s. M. (eds.). Vygotsky's educational theory in cultural context. New york: cambridge university press, 2003.

IEA. **World energy outlook.** 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>>. Acesso em: 17 jul. 2023.

JENNINGS, M. S.; PALAZZOLO, M. A. **Catalytic incinerator for control of volatile organic compounds emissions.** New Jersey: noyes publications, 1984.

MEIRA, R. C. **As ferramentas para a melhoria da qualidade.** Porto Alegre: SEBRAE, 2003.

MORGADO, J. C. **O estudo de caso na investigação em educação.** 2012.

MELO, C. P.; CARAMORI, E. J. **PDCA método de melhorias para empresas de manufatura - versão 2.0.** Belo Horizonte: fundação de desenvolvimento gerencial, 2001.

MELO, M C. **Gestão da qualidade total–ciclo pdca: estudo de caso em uma indústria frigorífica no município de Pimenta Bueno.** 2009.

NOVOVIC, G. **A agenda 2030 pode trazer “localização”?** Limitações políticas da agenda 2030 no sistema de governança global mais amplo. Development policy review, v. 40, p. E12587, 2022.

PAIVA, E. C. **A utilização do método smart para redefinir os objetivos estratégico da liderança:** um estudo de caso aplicado em um fornecedor de peças plásticas da indústria automobilística. Taubaté, 2016.

PATEL, J. R.; RATHOD, M. K. **Recent developments in the passive and hybrid thermal management techniques of lithium-ion batteries.** Journal of power sources, v. 480, p. 228820, 2020.

PENDAR, M.; LOTFIZADEH, H.; AHMADI, R.; PARASTARAN, E. **Review of coating and curing processes:** evaluation in automotive industry. Physics of fluids, v. 35, n. 1, 2022.

PFAFF, G. **Special effect pigments:** technical basics and applications. Vincentz network gmbh & co. Kg, 2008.

PINTÉR, K. **On teaching mathematical problem-solving and problem posing.** Phd thesis, university of szeged, szeged, 2012.

RAO, P. P.; GOPINATH, A. **Energy savings in automotive paint ovens:** a new concept of shroud on the carriers. Journal of manufacturing science and engineering, v. 135, n. 4, p. 045001-45009, 2013.

RODRIGUES, M. V. **Ações para qualidade, gestão integrada para qualidade.** Rio de Janeiro: editora Qualitymark, 2006.

ROMAGNOLI, M. G. **Simulation of energy savings in automotive coatings processes.** Master's thesis (university of windsor, 2016).

ROELANT, G. J.; KEMPAINEN, A. J.; SHONNARD, D. R. **Assessment of the automobile assembly paint process for energy, environmental, and economic improvement.** Journal of industrial ecology, v. 8, n. 2, p. 173–191, 2004.

SELEME, R.; STADLER, H. **Controle da qualidade: as ferramentas essenciais.** 2. Ed. Curitiba: ibpex, 2010.

SHOOK, J. **Gerenciando para o aprendizado:** usando o processo de gestão A3 para resolver problemas, promover alinhamento, orientar e liderar. São Paulo: lean institute brasil, 2008.

STREITBERGER, H. J.; DOSSEL, K. F. **Automotive paints and coatings.** John wiley & sons, 2008. Taikisha, g. Elene oven. Disponível em: <[https://geicotaikisha.com/solu\\_tions/pretrattamento-e-catoforesi/](https://geicotaikisha.com/solu_tions/pretrattamento-e-catoforesi/)>. Acesso em: 15 jul. 2023.

TEIS, M. A.; TEIS, D. T. **A abordagem qualitativa: a leitura no campo de pesquisa.** Biblioteca on-line de ciências da comunicação, V. 1, P. 1-8, 2006.

WEISS, A. E. **Key business solutions:** essential problem-solving tools and techniques that every manager needs to know. Grã-bretanha: pearson education limited, 2011.

ZHANG, X., GAO, X., LI, B. ET AL. **Development and validation of automobile acoustic test front-end system based on pxi platform.** Int j adv manuf technol 118, 1267–1278 (2021).