**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS**
**UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA**
**CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

LAYNE LEITE DE QUEIROZ SIQUEIRA

# REDUÇÃO DO CONSUMO DE VAPOR DE ALTA PRESSÃO NA TURBINA DE COMPRESSOR EM UMA PLANTA DE MVC

Maceió
2024

LAYNE LEITE DE QUEIROZ SIQUEIRA

# REDUÇÃO DO CONSUMO DE VAPOR DE ALTA PRESSÃO NA TURBINA DE COMPRESSOR EM UMA PLANTA DE MVC

Plano de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Profª. Dra. Albanise Enide da Silva

Maceió
2024

**Catalogação na fonte**
**Universidade Federal de Alagoas**
**Biblioteca Central**
**Divisão de Tratamento Técnico**
Bibliotecária: Sâmela Rouse de Brito Silva – CRB-4 – 6023

S618r Siqueira, Layne Leite de Queiroz.
Redução do consumo de vapor de alta pressão na turbina de compressor em uma planta de MVC / Layne Leite de Queiroz Siqueira. – 2024.
47f. : il. color.

Orientadora: Albanise Enide da Silva
Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 46-47.

1. Redução de consumo de energia. 2. Vapor de alta pressão. 3. Eficiência energética. I. Título.

CDU: 621.41

À minha família, em especial aos meus pais, pelo amor, incentivo e compreensão ao longo dessa jornada. Este trabalho é a concretização de um sonho que sempre foi compartilhado com vocês.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me dar força, sabedoria e saúde para enfrentar os desafios ao longo desta caminhada acadêmica e por estar presente em todos os momentos de superação e aprendizado.

À minha família, que sempre foi meu porto seguro, pelo amor e apoio incondicional. Aos meus pais, Elizângela e Lafaete, por serem minha base, por cada palavra de incentivo, por me proporcionarem condições de estudar e por acreditarem nos meus sonhos mesmo nos momentos mais difíceis. Aos meus irmãos, Lays e Guilherme, por compartilharem comigo essa jornada e por me lembrarem, sempre, do valor da união e do amor familiar.

Ao meu companheiro de vida, André Morais, por estar ao meu lado em todos os momentos, me apoiando, motivando e compartilhando comigo cada vitória e desafio. Sua presença foi fundamental para que eu pudesse alcançar este objetivo.

Aos meus amigos, Vanessa Lins e Cícero Porfírio Júnior, pela amizade, por compartilharem risos, desafios e motivações ao longo desse percurso, pelos momentos de descontração e apoio que tornaram a caminhada mais tranquila e alegre. Sua amizade e incentivo foram essenciais em diversas etapas dessa conquista, trazendo leveza e força quando mais precisei.

À minha orientadora de TCC, Albanise Enide, pela dedicação, paciência e orientações preciosas que foram cruciais para a realização deste trabalho. Sua experiência e generosidade contribuíram imensamente para o meu aprendizado.

Por fim, estendo minha gratidão a todo o corpo docente do curso de Engenharia Química do Centro de Tecnologias da Universidade Federal de Alagoas. Cada professor, com seu conhecimento e comprometimento, contribuiu para a minha formação acadêmica e profissional, moldando-me para os desafios futuros.

A todos vocês, minha eterna gratidão.

# RESUMO

O monocloreto de vinila (MVC) é um composto químico com a fórmula $C_2H_3Cl$. Trata-se de um gás incolor e inflamável à temperatura ambiente, sendo um dos principais precursores para a produção de policloreto de vinila (PVC), amplamente utilizado em tubulações, revestimentos e produtos plásticos. As utilidades industriais desempenham um papel crucial no funcionamento eficiente de uma planta de MVC. Recursos como eletricidade, água e vapor são indispensáveis para viabilizar os diversos processos produtivos. O V-42, é um vapor de alta pressão (42 kg/cm²) amplamente utilizado em plantas de MVC, desempenhando um papel crucial em processos que demandam altas temperaturas e maior eficiência térmica. Esse tipo de vapor é essencial para aquecimento, geração de energia e controle preciso de temperatura em aplicações industriais, como destilação e esterilização. A otimização do uso de vapor nas indústrias é crucial para melhorar a eficiência e reduzir desperdícios. O uso excessivo de vapor provoca impactos ambientais, como emissões de gases de efeito estufa e alto consumo de água, além de aumentar os custos operacionais devido ao maior consumo de energia e manutenção. Assim, a gestão eficiente do vapor é crucial para reduzir esses impactos e garantir a sustentabilidade e viabilidade econômica das operações industriais. Este trabalho foi desenvolvido em uma planta de MVC, com nome fictício "PetroFlex", que utiliza o V-42 em seu compressor de líquido refrigerante R134a. Esse compressor é do tipo centrífugo, com duas seções e três estágios em cada seção, e está conectado a uma turbina onde o vapor é injetado para gerar rotação, movimentando a turbina e acionando o compressor. Em 2023, observou-se um aumento significativo no consumo de V-42, que variou entre 9,0 t/h e 9,6 t/h no mês de julho, ocasionando elevados custos para a planta. O objetivo deste trabalho foi otimizar o consumo de V-42 nas máquinas, reduzindo custos, através da padronização dos procedimentos operacionais e implementando melhorias, contribuindo também para a descarbonização e sustentabilidade. Para isso, foi utilizada a metodologia DMAIC, uma abordagem para resolução de problemas focada na melhoria contínua e no aprimoramento dos processos. Essa metodologia é composta por cinco etapas: Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar, e visa identificar e tratar a causa raiz dos problemas, que neste caso é o alto consumo de V-42 no sistema da planta de MVC da PetroFlex. Na etapa de definição, foram identificados os problemas ou oportunidades de melhoria; na medição, avaliou-se o desempenho do processo e as causas do problema; na análise, as causas principais foram determinadas com base nos dados; na melhoria, soluções foram desenvolvidas e implementadas para corrigir as causas identificadas; e na etapa de controle, os resultados foram monitorados para garantir que as melhorias fossem sustentáveis ao longo do tempo. Com este trabalho reduziu-se significativamente o consumo de V-42 na turbina do compressor, estabilizando-o na faixa de 8,0 t/h a 8,5 t/h. Em apenas dois meses, houve uma economia de aproximadamente 9,47% em setembro e 9,68% em outubro, gerando R$ 295.148,78 em ganhos financeiros. Espera-se superar a economia projetada de R$ 823.583,09 ao longe de um ano de monitoramento da fase de Controle do DMAIC, com impacto positivo na sustentabilidade e redução nas emissões de $CO_2$.



Palavras-Chave: Monocloreto de vinila, Vapor V-42, Melhoria contínua, DMAIC

## ABSTRACT

Vinyl chloride monomer (VCM) is a chemical compound with the formula $C_2H_3Cl$, a colorless and flammable gas at room temperature, serving as one of the primary precursors for the production of polyvinyl chloride (PVC), widely used in pipes, coatings, and plastic products. Industrial utilities play a crucial role in the efficient operation of a VCM plant, as resources such as electricity, water, and steam are indispensable for enabling various production processes. V-42, a high-pressure steam (42 kg/cm²), is extensively utilized in VCM plants, playing a vital role in processes requiring high temperatures and enhanced thermal efficiency, being essential for heating, power generation, and precise temperature control in industrial applications like distillation and sterilization. Optimizing steam usage in industries is critical to improving efficiency and reducing waste, as excessive steam use results in environmental impacts such as greenhouse gas emissions and high water consumption while increasing operational costs due to higher energy usage and maintenance demands, making efficient steam management indispensable for minimizing these impacts and ensuring the sustainability and economic viability of operations. This study was conducted at a VCM plant, referred to as "PetroFlex" for confidentiality, which employs V-42 in its R134a refrigerant liquid compressor—a centrifugal compressor with two sections and three stages in each section, connected to a turbine where steam is injected to generate rotation, driving the turbine and operating the compressor. In 2023, a significant increase in V-42 consumption was observed, ranging from 9.0 t/h to 9.6 t/h in July, leading to high operational costs for the plant. The objective of this study was to optimize V-42 consumption in the machinery, reducing costs through the standardization of operational procedures and implementing improvements, while also contributing to decarbonization and sustainability. To achieve this, the DMAIC methodology, a problem-solving approach focused on continuous improvement and process enhancement, was employed. This methodology comprises five phases—Define, Measure, Analyze, Improve, and Control—aiming to identify and address the root cause of the problem, which in this case was the excessive V-42 consumption in PetroFlex's VCM plant system. In the Define phase, problems or improvement opportunities were identified; in the Measure phase, process performance and problem causes were assessed; in the Analyze phase, the main causes were determined based on data; in the Improve phase, solutions were developed and implemented to address the identified causes; and in the Control phase, results were monitored to ensure the sustainability of the improvements over time. This project significantly reduced V-42 consumption in the compressor turbine, stabilizing it within the range of 8.0 t/h to 8.5 t/h. In just two months, savings of approximately 9.47% in September and 9.68% in October were achieved, resulting in financial gains of R$ 295,148.78, with expectations to exceed the projected savings of R$ 823,583.09 over one year of DMAIC Control phase monitoring, positively impacting sustainability and reducing $CO_2$ emissions.



Keywords: Vinyl chloride monomer, V-42 steam, Continuous improvement, DMAIC

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção de MVC ..... 15
Figura 2 - Fluxograma da Etapa de Purificação do MVC. ..... 17
Figura 3 - Compressor de deslocamento positivo do tipo rotativo (Parafuso). ..... 19
Figura 4 - Compressor dinâmico tipo Centrífugo. ..... 19
Figura 5 - Compressor de líquido refrigerante R134a. ..... 20
Figura 6 - Interior de uma das seções do compressor. ..... 21
Figura 7 - Diagrama de Ishikawa, ilustrado para um problema fictício de um produto com defeito. ..... 24
Figura 8 - Exemplo de brainstorming. ..... 25
Figura 9 - Exemplo de Matriz Causa e Efeito. ..... 26
Figura 10 - Matriz de Esforço e Impacto. ..... 27
Figura 11 - Representação de esquema do compressor com turbina na planta. ..... 29
Figura 12 - Comparativo de consumo de V-42 entre os meses de setembro e outubro de 2023. ..... 33
Figura 13 - Diagrama de Ishikawa para análise de causas. ..... 34
Figura 14 - Matriz de Causa e efeito. ..... 37
Figura 15 - Matriz de Esforço X Impacto ..... 39
Figura 16 - Planilha 5W2H ..... 41
Figura 17 - Comparativo de consumo de V-42 entre os meses de setembro e outubro de 2024. ..... 42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de média e desvio padrão da vazão de consumo de V-42 nos meses de setembro e outubro de 2023.....36
Tabela 2 - Comparativo de valores de média e desvio padrão da vazão de consumo de V-42, antes e após a aplicação do DMAIC.....43

# SUMÁRIO


**1 INTRODUÇÃO ..... 12**

**2 OBJETIVOS ..... 14**

**2.1 Geral ..... 14**

**2.2 Específicos ..... 14**

**3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... 15**

**3.1 Monocloreto de Vinila (MVC) e Policloreto de Vinila (PVC) ..... 15**

**3.2 Utilização de Vapor em Processos Industriais ..... 17**

**3.3 Compressores ..... 18**

**3.4 DMAIC ..... 22**

3.4.1 Principais Ferramentas Utilizadas no DMAIC ..... 23

3.4.1.1 Diagrama de Ishikawa ..... 23

3.4.1.2 Brainstorming ou Tempestade de Ideias ..... 24

3.4.1.3 Matriz de Causa e Efeito ..... 25

3.4.1.4 Matriz de Esforço X Impacto ..... 26

3.4.1.5 Planilha 5W2H ..... 27

**4 METODOLOGIA ..... 28**

**4.1 Problemática ..... 28**

**4.2 Aplicação da metodologia DMAIC ..... 29**

4.2.1 Definição ..... 30

4.2.2 Medição ..... 30

4.2.3 Análise ..... 30

4.2.4 Melhoria ..... 31

4.2.5 Controle ..... 31

**5 RESULTADOS ..... 32**

**5.1 Etapa de Definição ..... 32**

**5.2 Etapa de Medição ..... 33**

5.2.1 Levantamento de Causas Potenciais ..... 34

**5.3 Etapa de Análise ..... 36**

**5.4 Etapa de Melhoria ..... 39**

**5.5 Etapa de Controle ..... 42**

**6 CONCLUSÃO ..... 44**

**REFERÊNCIAS ..... 45**

# 1 INTRODUÇÃO

A indústria do monocloreto de vinila (MVC) desempenha um papel essencial na cadeia produtiva do policloreto de vinila (PVC), um material amplamente utilizado em uma variedade de aplicações, desde tubulações e revestimentos até produtos plásticos de consumo diário. O PVC é valorizado por suas propriedades duráveis, resistência a químicos e versatilidade, o que o torna um componente crítico em inúmeras aplicações industriais e comerciais. Dada a importância do PVC na indústria moderna, a eficiência operacional das plantas de produção de MVC é crucial para garantir não apenas a qualidade do produto final, mas também a sustentabilidade econômica e ambiental dos processos

Dentro dessas plantas, a gestão eficiente das utilidades, especialmente o vapor, é de extrema importância. O vapor é amplamente utilizado para diversas finalidades, incluindo aquecimento, geração de energia elétrica e controle preciso de temperatura em processos como destilação e esterilização. O vapor de alta pressão, como o V-42, que opera a 42 kg/cm², é particularmente valioso em ambientes industriais que requerem temperaturas elevadas e alta eficiência térmica. Sua aplicação é crítica para o funcionamento de equipamentos como turbinas e compressores, que são essenciais para a continuidade e eficácia dos processos produtivos.

No entanto, o uso excessivo de vapor pode gerar problemas significativos, pois o seu consumo não só pode aumentar as emissões de gases de efeito estufa, como também pode resultar em um alto consumo de água e custos operacionais elevados devido ao maior consumo de energia e despesas com manutenção. Esses problemas não apenas afetam a sustentabilidade ambiental, mas também impactam a viabilidade econômica das operações, tornando a gestão eficiente do vapor uma prioridade para as indústrias.

Na planta de MVC fictícia “PetroFlex”, foram identificados problemas relacionados ao consumo excessivo de V-42, com picos atingindo 9,6 t/h em 2023. O compressor de líquido refrigerante R134a, que opera em conjunto com uma turbina a vapor, é responsável por funções críticas como a condensação do HCl proveniente do craqueamento, a redução da temperatura do solvente antes da destilação e a diminuição da emissão de organoclorados. O elevado consumo de vapor e as possíveis desregulações nas variáveis operacionais, como pressão e temperatura, têm levado a um uso ineficiente do vapor, aumentando os custos e os impactos ambientais associados.

Este trabalho buscou analisar e abordar o consumo excessivo de vapor na planta de MVC, com foco na otimização do uso de V-42. Com o objetivo de melhorar a eficiência operacional e reduzir os custos através de uma gestão mais eficaz do vapor, contribuindo também para a sustentabilidade ambiental da planta. A investigação foi conduzida com o propósito de identificar as causas subjacentes do alto consumo de vapor e propor soluções que possam minimizar os impactos econômicos e ambientais, promovendo uma operação mais sustentável e economicamente viável.

# 2 OBJETIVOS

## 2.1 Geral

Reduzir o consumo do vapor de alta pressão na turbina do compressor estabelecendo uma faixa de consumo de vapor estável entre 8,0 t/h e 8,5 t/h e padronizar a execução dos procedimentos operacionais.

## 2.2 Específicos

- Delimitar e descrever a questão a ser solucionada, referente ao elevado consumo de V-42;
- Avaliar qualitativa e quantitativamente as possíveis causas associadas ao elevado consumo do vapor de 42 $kg/cm^2$;
- Investigar e classificar as causas principais do problema que impactam significativamente o processo;
- Sugerir ações de melhoria que sejam pertinentes e factíveis para a realidade da planta;
- Acompanhar e avaliar os resultados gerados pela implementação das melhorias estabelecidas com a aplicação da metodologia DMAIC.

# 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

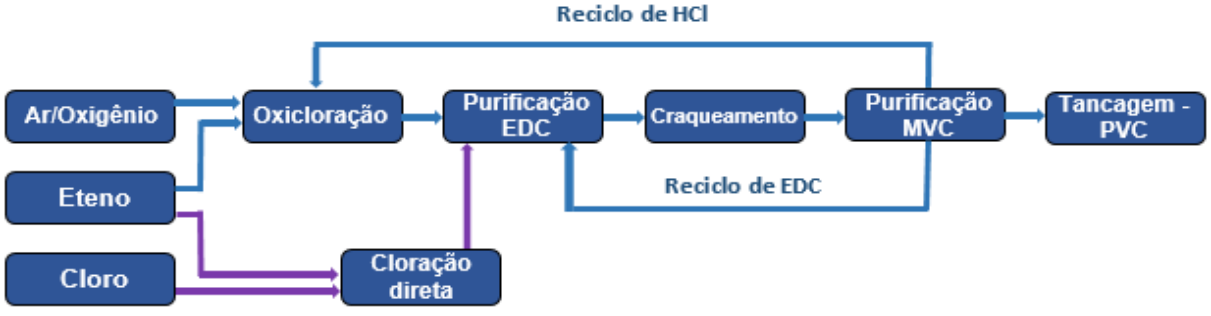
## 3.1 Monocloreto de Vinila (MVC) e Policloreto de Vinila (PVC)

O Monocloreto de Vinila (MVC), também conhecido como cloreto de vinila, é um composto orgânico de grande importância na indústria química. Ele é o principal monômero utilizado na produção do Policloreto de Vinila (PVC), um dos polímeros mais versáteis e amplamente utilizados no mundo. A produção do PVC a partir do MVC ocorre através de processos de polimerização, onde o MVC é transformado em longas cadeias poliméricas, resultando em um material com propriedades físicas e químicas altamente desejáveis para uma ampla gama de aplicações industriais (NUNES; RODOLFO; ORMANJI., 2006).

Este composto é economicamente viável e disponível em grandes quantidades, o que favorece sua utilização em processos industriais massivos. A importância do MVC está diretamente ligada à versatilidade e ampla aplicabilidade do PVC, que se destaca por suas características de durabilidade, resistência e adaptabilidade.

A produção deste monômero inicia-se com a síntese do EDC (1,2-dicloroetano), que pode ocorrer de duas formas: pela cloração direta (sinalizado por setas roxas), em que o cloro é adicionado diretamente ao eteno, ou pela oxicloração (sinalizado por setas azuis), em que o reator é alimentado com uma combinação de eteno, HCl e ar, conforme ilustrado na Figura 1. Em seguida, o EDC formado é purificado para atender às especificações necessárias para alimentar as fornalhas na etapa de craqueamento, onde o MVC é produzido, juntamente com subprodutos como o HCl. Esse HCl é reciclado na etapa de purificação do MVC, sendo direcionado para a oxicloração e utilizado na formação de EDC. Condensar o HCl proveniente da etapa de craqueamento no processo de produção de MVC é uma das principais funções do sistema de refrigeração da planta. Além disso, o sistema reduz a temperatura do solvente antes de seu envio para a torre de destilação, o que melhora a eficiência da absorção, e minimiza a emissão de compostos organoclorados na atmosfera.

**Figura 1 - Produção de MVC**




Fonte: Autora, 2024.

A etapa de purificação é uma das fases mais importantes no processo produtivo, desempenhando um papel essencial na separação e recuperação de compostos críticos como HCl, EDC e MVC, além de assegurar a qualidade dos fluxos para etapas subsequentes. Essa área é composta por três torres de destilação, conforme Figura 2, projetadas para recuperar o HCl produzido na fornalha de craqueamento e enviá-lo ao reator de oxicloração, recuperar o EDC não craqueado e purificar o MVC.

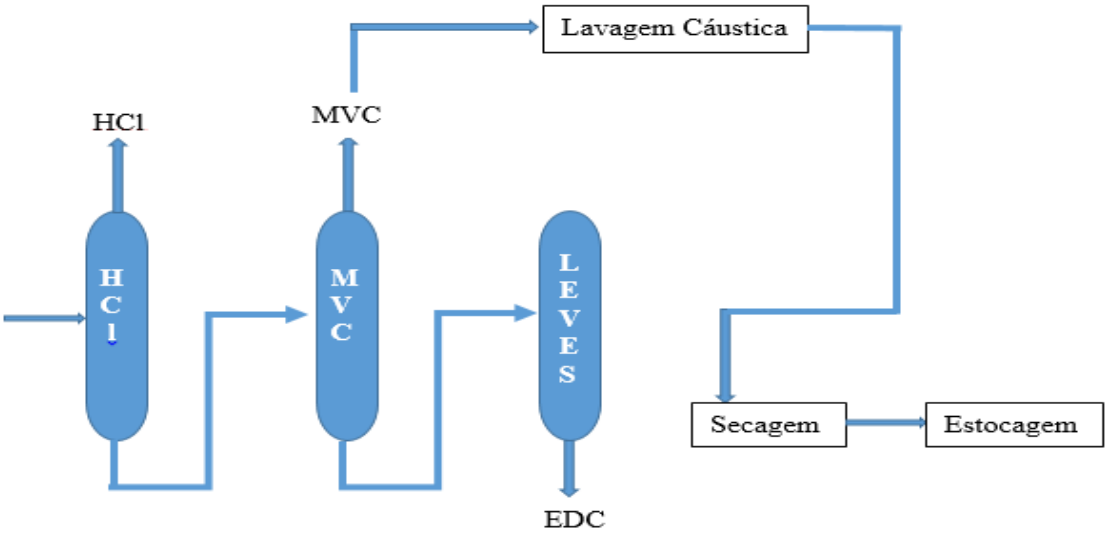
A torre de HCl, especificamente, é um elemento-chave dessa área. Ela utiliza bandejas tipo válvula para realizar a separação das correntes de alimentação, resultando em EDC e MVC no fundo da torre e HCl puro no topo. O processo de purificação envolve etapas críticas como a condensação dos vapores no condensador de topo, onde ocorre uma condensação parcial por meio do uso de R134a como refrigerante. Essa etapa de condensação é fundamental, pois garante o controle da temperatura e da pressão no topo da torre, mantendo as condições ideais de operação.

O controle da pressão e da temperatura no vaso de refluxo e na seção superior da torre é indispensável para garantir a pureza do HCl no topo, um requisito imprescindível para a eficiente operação de oxicloração. Por outro lado, é essencial minimizar a presença de HCl no fundo da torre, pois concentrações elevadas podem causar problemas como alta pressão na torre de MVC.

A temperatura no topo da torre funciona como um indicador crítico da pureza do HCl. Um aumento na temperatura pode sugerir a presença indesejável de MVC no produto de HCl, o que pode comprometer o reator de oxicloração. Situações como falha na unidade de refrigeração, perda de refluxo ou calor excessivo fornecido à torre são causas comuns dessa condição e precisam ser rigorosamente controladas.

Portanto, o processo de purificação, incluindo etapas como a condensação, é de extrema importância para garantir a eficiência, segurança e qualidade em toda a operação da planta, além de evitar impactos negativos nas etapas subsequentes.

**Figura 2 - Fluxograma da Etapa de Purificação do MVC.**




Fonte: Autora, 2024.

O PVC, por sua vez, é um dos polímeros mais produzidos e consumidos globalmente, com aplicações em setores como a construção civil, automotivo, embalagens, medicina e eletrônica. Na construção civil, o PVC é amplamente utilizado para fabricar tubulações, revestimentos de paredes, janelas e portas, devido à sua resistência à água, à corrosão e à radiação ultravioleta. No setor automotivo, o PVC é usado em componentes internos, como painéis e revestimentos, que requerem materiais duráveis e flexíveis (MAGALHÃES, 2024).

Uma das principais vantagens do PVC é a possibilidade de modificação por aditivos, como plastificantes e estabilizadores, permitindo a customização de suas propriedades físicas para atender a diferentes necessidades industriais. Esta adaptabilidade torna o PVC um material indispensável para a produção de uma vasta gama de produtos que requerem alta performance e durabilidade. Além disso, o PVC tem um ciclo de vida longo e é reciclável, o que o torna uma escolha sustentável para muitas aplicações industriais (INSTITUTO BRASILEIRO DO PVC, 2023).

## 3.2 Utilização de Vapor em Processos Industriais

O vapor de água, desde o início de sua aplicação, foi amplamente associado às locomotivas e à Revolução Industrial. No entanto, com o surgimento dos motores elétricos e outras tecnologias, seu uso foi se tornando mais específico e direcionado dentro dos setores industriais e atualmente continua a ser uma parte essencial de vários setores da indústria moderna. O vapor saturado é amplamente utilizado em indústrias químicas, alimentícias, têxteis e farmacêuticas, enquanto o vapor superaquecido é predominantemente empregado para a geração de energia em turbinas de alta pressão (COGGIOLA, 2016).

Entre as várias aplicações industriais, o vapor serve como uma importante fonte de aquecimento em processos como trocadores de calor, evaporadores, secadores, reatores químicos, e até mesmo na esterilização de ferramentas (TOGAWA, 2017). A eficiência e a segurança na utilização do vapor estão intimamente ligadas à sua natureza física e à facilidade de controle da energia que ele transporta. A relação direta entre a pressão e a temperatura do vapor saturado permite um controle eficaz da energia através da modulação da pressão, além de sua capacidade de armazenar grandes quantidades de energia em um volume relativamente pequeno, facilitando o transporte (TOGAWA, 2017).

Na produção industrial, o vapor é gerado em caldeiras, onde a água é aquecida até atingir sua temperatura de saturação a uma pressão estabelecida, levando à mudança de estado físico para o gasoso. A energia térmica total contida no vapor pode ser dividida em calor latente e calor sensível. O calor latente é a energia necessária para mudar o estado físico da água sem alterar sua temperatura, enquanto o calor sensível é a energia que aumenta a temperatura da água sem mudar seu estado físico (DIAS, 2012).

No contexto específico de uma planta industrial que utiliza uma turbina de compressor, como na produção de MVC, a utilização de vapor de alta pressão, como o vapor a 42 kg/cm², é fundamental. O vapor superaquecido é essencial para a movimentação de máquinas como bombas e turbinas, onde se busca aproveitar a energia mecânica com máxima eficiência (SPIRAX, 2021). A alta pressão permite que o vapor transfira mais energia por unidade de massa, resultando em uma maior eficiência da turbina de compressor, que converte essa energia térmica em energia mecânica para o processo produtivo.

A baixa eficiência energética em sistemas de vapor pode ser causada por vazamentos, isolamento inadequado, ou má manutenção dos equipamentos, resultando em perdas de energia e custos elevados. Corrigir esses problemas é essencial para reduzir despesas, otimizar o uso de recursos, minimizar emissões de gases de efeito estufa e melhorar a sustentabilidade e competitividade das operações industriais. A busca por maior eficiência energética garante processos mais econômicos e ambientalmente responsáveis.

## 3.3 Compressores

Os compressores são dispositivos que realizam trabalho sobre substâncias em escoamento, alterando seu estado ao aumentar a pressão e/ou a elevação do fluido. O termo "compressor" é utilizado especificamente quando a substância manipulada é um gás (MORAN et al., 2018). Eles desempenham um papel fundamental em diversas indústrias, sendo

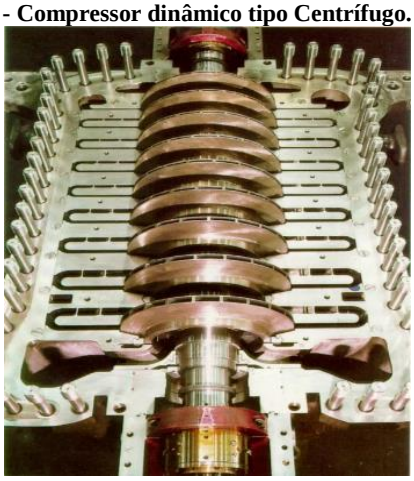
empregados em aplicações como a transferência de gases entre tanques, acionamento de ferramentas pneumáticas e sistemas de refrigeração (WAQAR, 2021).

Existem dois principais tipos de compressores: de deslocamento positivo e dinâmicos. Compressores de deslocamento positivo aprisionam o gás em uma câmara e reduzem seu volume, aumentando a pressão, como ilustrado no compressor de parafuso na Figura 3. Já os compressores dinâmicos aumentam a pressão ao adicionar energia cinética ao gás em movimento contínuo, que é convertida em pressão ao passar por difusores. Entre os compressores dinâmicos, destacam-se os compressores centrífugos (Figura 4), que utilizam um rotor para acelerar o gás, convertendo essa energia em pressão elevada. Esses compressores são amplamente utilizados em grandes sistemas de refrigeração e em turbinas a gás (MOHAMMAD, 2023).

**Figura 3 - Compressor de deslocamento positivo do tipo rotativo (Parafuso).**

Fonte: Noria Corporation, 2023.

**Figura 4 - Compressor dinâmico tipo Centrífugo.**



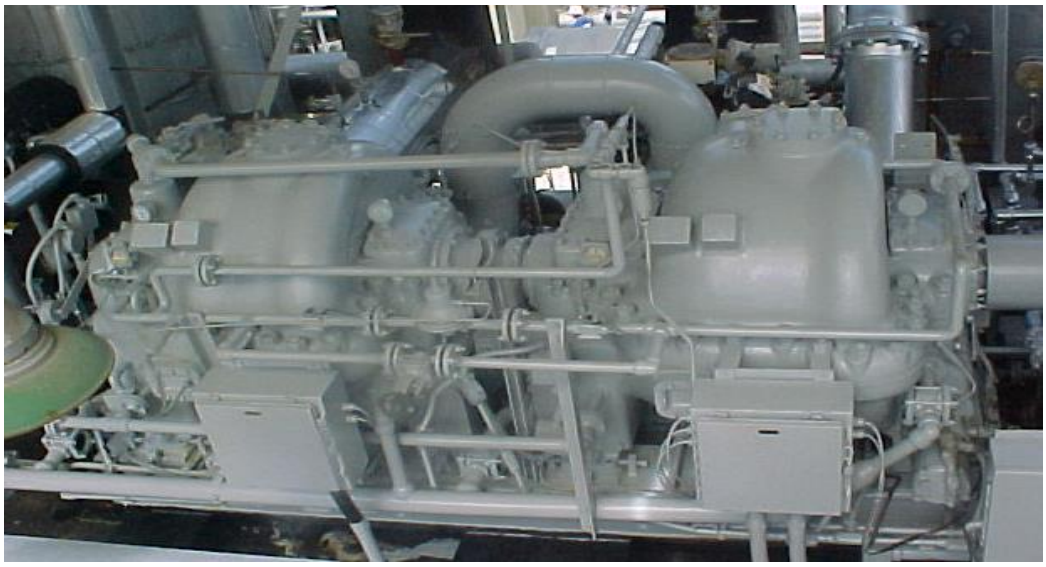
Fonte: Slideshare, 2023.

Na PetroFlex, é utilizado um compressor centrífugo de dois estágios em um sistema de resfriamento, acionado por uma turbina a vapor que opera com vapor de alta pressão, ilustrado na Figura 5. Esse tipo de compressor é ideal para aplicações que exigem alta eficiência e capacidade de compressão em grandes volumes (PENDURADO et al., 2023). Seu funcionamento é garantido pela turbina a vapor, que fornece a energia necessária para o

compressor operar. O gás refrigerante entra no primeiro estágio, onde é comprimido a uma pressão intermediária, e depois é direcionado ao segundo estágio, onde é submetido a uma compressão ainda maior, Figura 6. Esses compressores são amplamente utilizados em sistemas de refrigeração industrial, nos quais grandes volumes de gás precisam ser comprimidos de maneira eficiente (PENDURADO et al., 2023).

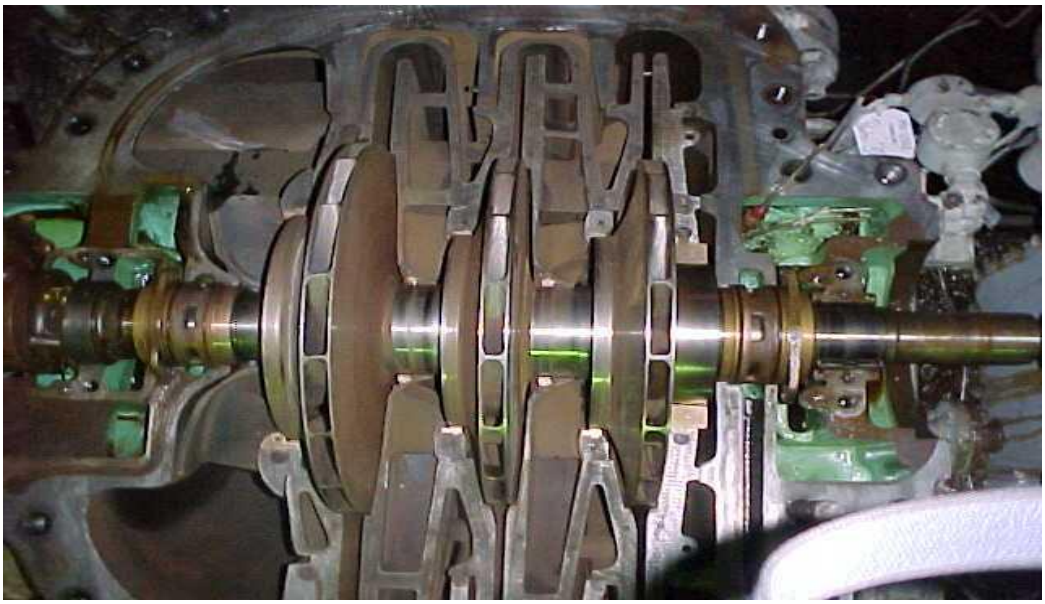
No contexto do sistema de refrigeração com o refrigerante R134a, o vapor desempenha um papel essencial no acionamento do compressor. No entanto, o consumo de vapor frequentemente excede os níveis ideais devido à desregulação de variáveis operacionais como pressão e temperatura do vapor, vácuo, rotação da turbina, vazão de vapor e carga do compressor (YANG et al., 2024). Essas desregulações são, em grande parte, atribuídas à inadequação dos procedimentos operacionais, que, quando não seguidos rigorosamente pelos operadores, levam ao uso excessivo de vapor, por isso é importante que haja a padronização desses procedimentos operacionais.

**Figura 5 - Compressor de líquido refrigerante R134a.**



Fonte: Autora, 2024.

**Figura 6 - Interior de uma das seções do compressor.**



Fonte: Autora, 2024.

Além disso, a necessidade de evitar condições de surge — que ocorre quando há uma perda repentina de fluxo de ar ou gás, resultando em oscilações instáveis na pressão e no fluxo de saída — leva à realização de ajustes excessivos nas variáveis. Esse fenômeno normalmente ocorre quando o compressor opera fora de sua faixa de operação ideal, causando fluxo reverso do gás e colapso da pressão. O surge pode danificar o compressor, gerar vibrações excessivas e reduzir a eficiência do sistema. Geralmente, é controlado por sistemas de alívio ou controle, que visam manter o compressor dentro de sua faixa de operação segura. No entanto, esses ajustes acabam contribuindo para o aumento do consumo de vapor. Embora os ajustes busquem garantir a segurança e a operação estável da turbina, acabam resultando em desperdício de recursos e impactos ambientais negativos (YANG et al., 2024).

A literatura também sugere a importância de identificar as causas subjacentes dessas desregulações e aponta que abordagens integradas, como a otimização dos procedimentos operacionais e a adoção de práticas de manutenção rigorosas, podem contribuir para a redução do consumo de vapor e a melhoria da eficiência energética nas plantas industriais.

A eficiência energética resultante da utilização do vapor de alta pressão impacta diretamente nos custos operacionais da planta, pois permite a redução do consumo de vapor e, consequentemente, de combustível na geração deste. Além disso, a flexibilidade e confiabilidade proporcionadas pelo vapor de alta pressão asseguram a estabilidade da operação industrial, mesmo diante de variações nas condições de operação. Por fim, a utilização do vapor de alta pressão contribui para a sustentabilidade da planta, ao otimizar os recursos energéticos e reduzir o impacto ambiental do processo.

Esta combinação de eficiência energética, segurança operacional e impacto ambiental reduzido torna a utilização do vapor de alta pressão, especialmente na forma superaquecida, uma escolha essencial para processos industriais que exigem grandes quantidades de energia, como no caso da planta de MVC.

## 3.4 DMAIC

A sigla DMAIC, que significa "Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar" em português, é uma ferramenta essencial de gestão da qualidade utilizada na metodologia Lean Six Sigma. Essa abordagem funciona como um roteiro para indústrias e grandes organizações, orientando o desenvolvimento de processos e controlando o fluxo de trabalho. Ao proporcionar uma análise técnica e precisa dos problemas, o DMAIC ajuda as empresas a evitarem decisões precipitadas, permitindo que as ações se concentrem nas causas raízes dos problemas. Além de melhorar processos e a gestão empresarial, o DMAIC busca a melhoria contínua de produtos e serviços, reduzindo custos e desperdícios enquanto aumenta a produtividade. Essa metodologia não só gera retorno financeiro para as empresas, como também eleva sua competitividade no mercado, destacando-se especialmente por seu foco na fase de planejamento, que minimiza erros e otimiza o tempo de implementação (LEÃO, 2022).

A etapa “Definir” é um resumo do projeto, nela identifica-se com clareza qual é, ou quais são, os problemas ou oportunidades de melhorias a serem abordados. É realizada a apuração dos dados necessários para descrever a questão a ser solucionada e elaborado um escopo do projeto. Uma ação fundamental nessa etapa é a definição de quem fará parte da equipe e colaborara para a realização das demais etapas, além de serem escolhidos os indicadores de performance a serem considerados e controlados ao final do projeto.

Na fase de "Medir", é feita uma avaliação abrangente do desempenho do processo, permitindo a identificação das potenciais causas do problema. Essa análise é conduzida tanto de forma qualitativa, considerando aspectos subjetivos e contextuais, quanto de forma quantitativa, utilizando dados e métricas que oferecem uma visão precisa e objetiva da situação.

Na etapa de "Analisar", a equipe foca na identificação e validação das causas raízes dos problemas, conhecidas como X's vitais, que afetam o processo e geram variabilidade nos resultados (variável Y). Com base nos dados coletados na fase de medição, é possível obter uma visão clara do estado atual do processo. Essa análise envolve investigar as causas dos problemas, comprová-las por meio de gráficos e análises estatísticas, e explorar estratégias para abordá-las.

Na etapa de "Melhorar", a equipe implementa soluções para os problemas identificados nas fases anteriores do DMAIC, desenvolvendo e testando um plano de ação voltado para as causas raízes. Essa fase envolve priorizar ações, avaliar seus prós e contras, e adaptar a execução às necessidades específicas de cada processo, enquanto se monitora os resultados das melhorias implantadas. Considerada a fase mais demorada, o processo pode levar entre 30 e 60 dias, dependendo das mudanças (LEÃO, 2022).

Por último, na etapa de "Controlar", o objetivo é monitorar e gerenciar os resultados das melhorias implementadas, assegurando que essas mudanças sejam sustentáveis ao longo do tempo. Isso envolve a criação de um "plano de controle", que inclui treinamentos e revisões de procedimentos, além de estabelecer critérios de controle como check-lists e análises estatísticas.

### 3.4.1 Principais Ferramentas Utilizadas no DMAIC

As ferramentas estatísticas e de qualidade são essenciais para o desenvolvimento do DMAIC, pois permitem uma análise precisa, identificação de causas raízes e monitoramento dos resultados, garantindo a eficácia das melhorias. Neste trabalho, serão apresentadas apenas as ferramentas mais relevantes para a análise e solução do problema, devido à sua contribuição direta para os resultados obtidos.

#### 3.4.1.1 Diagrama de Ishikawa

Conhecido também como Diagrama de Ishikawa ou Diagrama Espinha de Peixe, esse método foi criado pelo professor Kaoru Ishikawa em meados da década de 1990. Trata-se de um gráfico com a finalidade de organizar o raciocínio em discussões sobre problemas prioritários, especialmente em processos industriais, tornando-se indispensável na fase de Medição do DMAIC.

O diagrama é aplicado para analisar causas e efeitos de um problema específico. As categorias adotadas para investigar as causas são conhecidas como os 6M: Matéria-prima, Máquina, Medida, Meio Ambiente, Mão de Obra e Método. Essa análise detalhada permite identificar, de maneira estruturada, as causas do problema e os impactos sobre os processos e sua qualidade (BALLESTERO, 2010).

Essa ferramenta é geralmente usada em conjunto com o brainstorming, pois o levantamento de ideias auxilia no processo de investigação das causas do diagrama, que é comumente realizado por uma equipe multidisciplinar. A Figura 7 apresenta um exemplo de Diagrama de Ishikawa, ilustrando o caso de um produto com defeito, com as causas organizadas conforme os 6M.

**Figura 7 - Diagrama de Ishikawa, ilustrado para um problema fictício de um produto com defeito.**

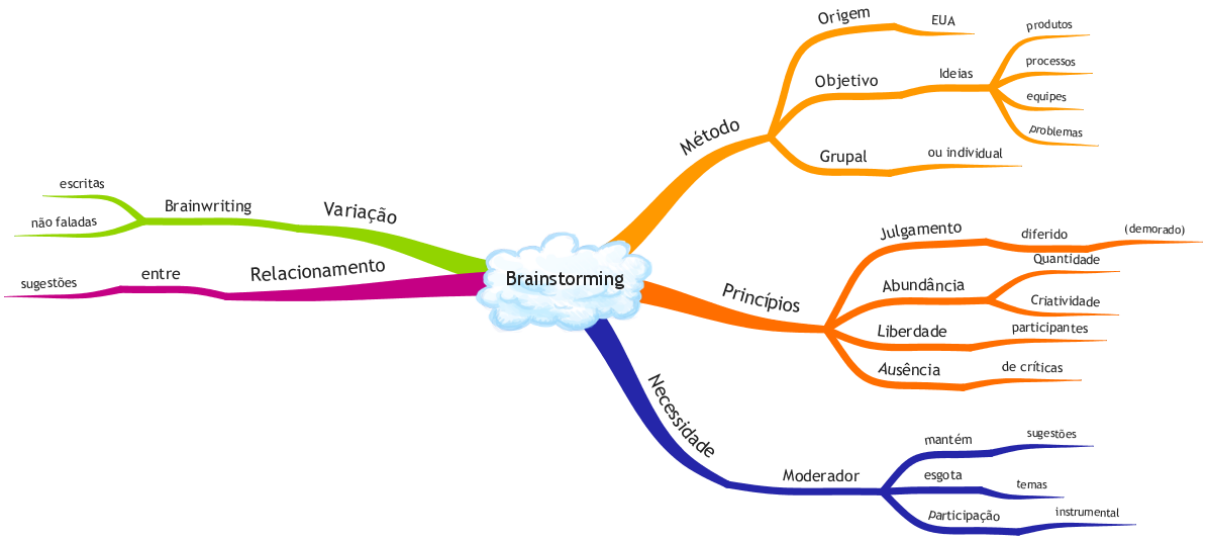
Fonte: Labdge-UFF, 2022.

### 3.4.1.2 Brainstorming ou Tempestade de Ideias

O brainstorming é uma técnica utilizada para propor soluções para um problema específico. Trata-se de uma reunião, também conhecida como tempestade de ideias, onde os participantes têm liberdade para compartilhar suas sugestões e discutir as contribuições uns dos outros (PATEL, 2024). Uma das principais premissas dessa ferramenta é promover a sinergia entre os membros da equipe, o que requer foco no objetivo desejado e a minimização de qualquer influência negativa que problemas organizacionais possam ter sobre a atividade.

Arioli (1998) descreve o brainstorming como um método de levantamento de hipóteses que permite a expressão livre do grupo, sem restrições ou critérios rigorosos. As ideias são apresentadas em um ambiente informal, incentivando a criatividade para gerar o maior número de sugestões possível. Mesmo que algumas ideias não façam sentido imediato, elas devem ser consideradas, pois podem estimular o surgimento de contribuições relevantes para a próxima fase do DMAIC. A Figura 8 ilustra o processo de brainstorming.

**Figura 8 - Exemplo de brainstorming.**




Fonte: Macedo, 2012.

### 3.4.1.3 Matriz de Causa e Efeito

A Matriz de Causa e Efeito é uma ferramenta que auxilia na definição, identificação e priorização das causas, permitindo identificar suas raízes e impactos em um problema. Essa matriz oferece uma visão analítica do processo em que a oportunidade de melhoria (ou problema) se encontra. Assim, após selecionar as variáveis mais influentes para o problema em questão, geralmente após o brainstorming e a criação do Diagrama de Ishikawa, as causas encontradas são inseridas na Matriz de Causa e Efeito. Embora esse seja o uso mais comum, a matriz pode ser aplicada em várias outras situações.

Após identificar as causas do problema na etapa de Medição do DMAIC, a Matriz de Causa e Efeito é aplicada na fase seguinte, que é a de Análise. As causas são consideradas entradas do processo (X’s), enquanto o problema ou problemas são as saídas (Y’s). Um peso é atribuído a cada saída (Índice de Importância), variando de 1 a 10. Cada nível de correlação recebe uma pontuação: 0 (sem correlação), de 1 a 3 (baixa correlação), de 4 a 7 (média correlação), e de 8 a 10 (forte correlação entre X e Y). Em seguida, o valor de cada correlação é multiplicado pelo peso da saída para avaliar se o esforço necessário para eliminar a causa é baixo ou alto.

A Figura 9 ilustra um exemplo de aplicação da Matriz de Causa e Efeito em um Call Center. Os problemas identificados incluíam qualidade no atendimento, tempo de espera e tempo de atendimento (Y’s). Foram consideradas causas potenciais, como falta de padronização de processos, ausência de treinamentos e lentidão do sistema/ERP (X’s). As correlações entre cada causa e problema foram classificadas em notas de 0 a 10. Na coluna de totalização, é

possível observar a soma das multiplicações entre causa e efeito, indicando o esforço necessário para tratar cada causa.

**Figura 9 - Exemplo de Matriz Causa e Efeito.**

**MATRIZ DE CAUSA E EFEITO**

| P: | Atendimento via Call Center | Setor | Call Center | Data | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Análise Causa x Efeito | | Efeito – Nivel de Importância ( Notas de 1-10 ) | | | | | | | | ANÁLISE DE CAUSA x EFEITO | |
| | | 10 | 5 | 6 | | | | | | | |
| | Causa | Qualidade no atendimento | Tempo de espera | Tempo de atendimento | | | | | | Total | Esforço de Eliminação da Causa |
| 1 | Falta de padronização de processo | 9 | 0 | 3 | | | | | | 108 | Baixo |
| 2 | Falta de Treinamento | 9 | 3 | 3 | | | | | | 123 | Alto |
| 3 | Sistema/ERP lento | 3 | 3 | 9 | | | | | | 99 | Baixo |
| 4 | Sistema/ERP confuso para encontrar informações solicitadas pelo cliente | 3 | 1 | 9 | | | | | | 89 | Alto |
| 5 | | | | | | | | | | | |

Fonte: Autora, 2024.

### 3.4.1.4 Matriz de Esforço X Impacto

A Matriz de Esforço e Impacto é uma ferramenta de priorização que organiza as tarefas em quatro grupos, classificando-as pelo impacto gerado e pelo esforço necessário. Na etapa de Análise do DMAIC, após priorizar as causas com a Matriz de Causa e Efeito, a Matriz de Esforço e Impacto ajuda a gerenciar o tempo de forma eficiente, permitindo o planejamento das ações para eliminar as causas do problema na próxima fase do DMAIC, a de Melhoria.

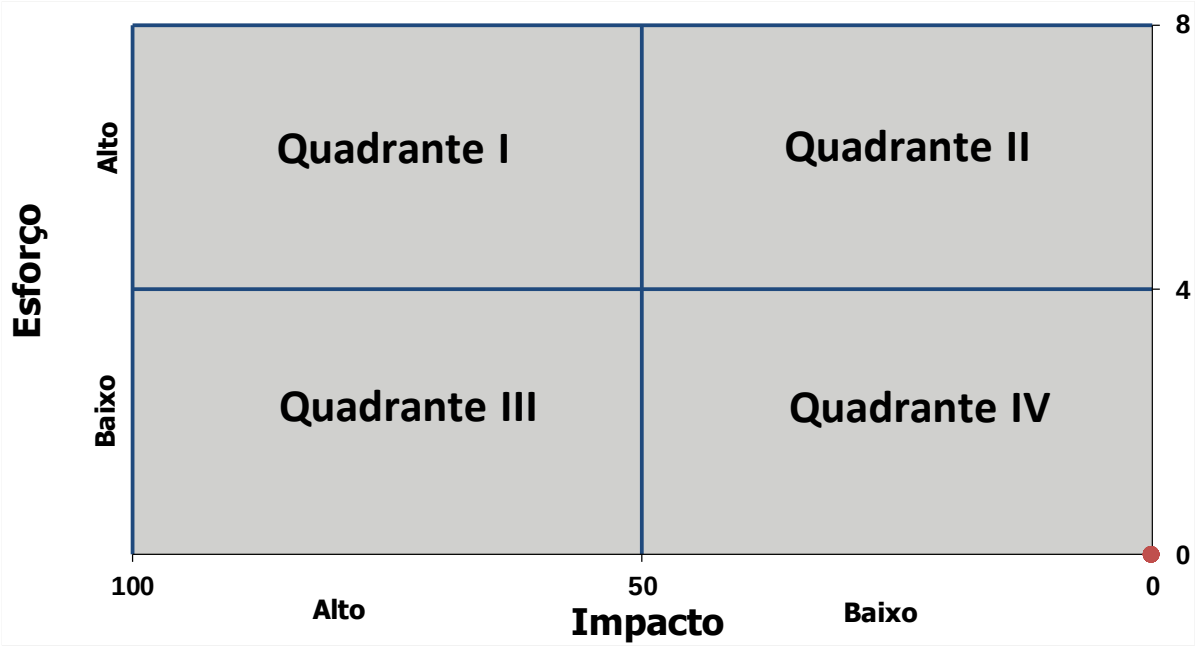
A matriz é dividida em dois eixos, vertical e horizontal (Y e X, respectivamente). O eixo vertical, referente ao esforço, considera o tempo, energia, dinheiro ou recursos humanos que serão empregados na tarefa. Já o eixo horizontal, que representa o impacto, analisa os resultados e benefícios que a ação trará para a empresa, como aumento de lucro ou melhoria na satisfação do cliente.

Os quadrantes da Matriz de Esforço e Impacto, ilustrados na Figura 10, são classificados da seguinte forma:

- Quadrante I: Ações importantes, mas de execução difícil. Exigem disciplina, melhorias contínuas e paciência, devendo ser planejadas com cuidado para facilitar o processo.
- Quadrante II: Ações que, embora demandem esforço, geram pouco impacto, o que pode desmotivar e prejudicar a empresa financeiramente. Se imprescindíveis, essas tarefas devem ser realizadas de maneira criativa para manter a motivação.

- Quadrante III: Tarefas de alta produtividade, que geram grandes resultados com pouco esforço. Estas devem ser priorizadas e executadas prontamente, pois trazem recompensas rápidas e incentivam a equipe.
- Quadrante IV: Tarefas de baixo esforço e baixo impacto. Embora sejam atrativas por sua facilidade, geralmente oferecem resultados mínimos. É recomendável reservar pouco tempo para essas tarefas e executá-las em momentos de menor produtividade da equipe.

**Figura 10 - Matriz de Esforço e Impacto.**




Fonte: Autora, 2024.

3.4.1.5 Planilha 5W2H

A ferramenta 5W2H é uma planilha que organiza atividades, prazos e responsabilidades, usada na etapa de Melhoria do DMAIC para garantir maior clareza e eficiência entre os membros do projeto. Seu objetivo é definir o que será feito, por que será feito, onde, quem será o responsável, quando ocorrerá, como será realizado e qual será o custo (DE PAULA, 2015).

De maneira prática, essa ferramenta se baseia em responder a sete perguntas, que formam a sigla em inglês. As perguntas são:

- What? (O quê?)
- Who? (Quem?)
- Where? (Onde?)
- When? (Quando?)
- Why? (Por quê?)

- How? (Como?)
- How much? (Quanto?)

O Quadro 1 fornece um guia para a aplicação da técnica 5W2H, facilitando sua compreensão.

**Quadro 1 - Utilização da ferramenta 5W2H**

| Passos | Conteúdo das respostas | Exemplos de perguntas |
|---|---|---|
| **What** | Ações necessárias ao tema analisado | - O que deve ser ou está sendo feito?<br>- Quais os insumos do problema?<br>- O que se pretende extrair?<br>- Quais os métodos utilizados? |
| **Why** | Justificativas das ações | - Por que ocorre este problema?<br>- Por que executa desta forma?<br>- Para que atuar neste problema? |
| **Where** | Locais influenciados pelas ações | - Onde ocorre o problema?<br>- Onde é preciso atuar para resolvê-lo? |
| **Who** | Responsabilidades pelas ações | - Quem são os agentes envolvidos?<br>- Quem conhece melhor o processo?<br>- Quais pessoas deverão executar o plano de ação? |
| **When** | Definição de prazos | - Quando começar e terminar?<br>- Quando deverão ser executas cada etapa? |
| **How** | Métodos a serem utilizados | - Como será executado o plano?<br>- Como registrar as informações necessárias?<br>- Como definir as etapas do processo? |
| **How much** | Definição de orçamento | - Quanto será o custo envolvido?<br>- Quanto custa corrigir o problema? |

Fonte: Campos, 2004.

# 4 METODOLOGIA

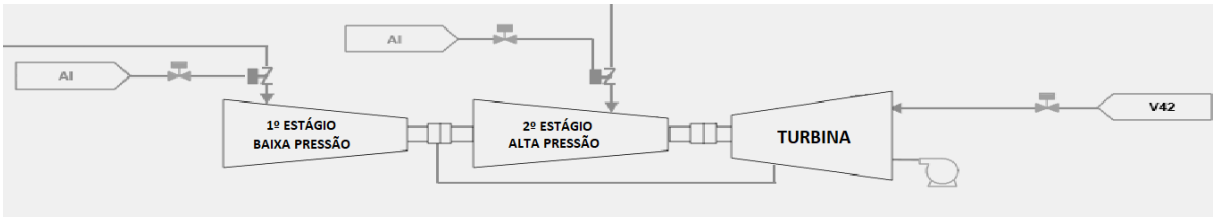
## 4.1 Problemática

A utilização de vapor de alta pressão na turbina do compressor da planta de MVC da PetroFlex apresenta um grande desafio relacionado à eficiência energética e aos custos

operacionais. O vapor é essencial para o funcionamento do compressor de líquido refrigerante R134a, utilizado no sistema de refrigeração da planta, no entanto, o consumo de vapor tem excedido os níveis necessários. Em 2023, observou-se um aumento significativo no consumo de V-42, que variou entre 9,0 t/h e 9,6 t/h no mês de julho, ocasionando elevados custos para a planta. Esses níveis elevados de consumo resultam em aumento dos custos e ineficiência energética, o que reforça a necessidade de uma gestão mais eficiente e controlada dessas variáveis para garantir o equilíbrio entre produção e sustentabilidade.

O compressor utilizado na planta de MVC da PetroFlex é do tipo centrífugo, com duas seções e três estágios em cada uma delas, e está conectado a uma turbina onde o vapor de alta pressão V-42 é injetado para gerar a rotação necessária ao acionamento do compressor, conforme ilustrado na Figura 11. Este equipamento é crucial para o sistema de refrigeração da planta e tem como funções principais condensar o HCl proveniente da etapa de craqueamento no processo de produção de MVC, reduzir a temperatura do solvente antes que ele seja enviado para a torre de destilação, melhorando a eficiência da absorção, e minimizar a emissão de organoclorados na atmosfera. O compressor opera dentro de limites específicos, com temperatura máxima de 121°C, mínima de 46°C, velocidade nominal de 5880 rpm e pressão máxima de 13 kg/cm². A desregulagem dessas variáveis operacionais tem contribuído para o consumo excessivo de vapor, o que agrava os custos operacionais e os desafios de eficiência energética enfrentados pela planta.

**Figura 11 - Representação de esquema do compressor com turbina na planta.**




Fonte: Autora, 2024.

## 4.2 Aplicação da metodologia DMAIC

A estratégia escolhida para reduzir o consumo de vapor de alta pressão na ativação da turbina do compressor na planta de MVC é a aplicação da metodologia DMAIC, focada na melhoria contínua e otimização de processos. O DMAIC consiste em cinco fases: Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar. Essa abordagem tem como objetivo tratar diretamente as causas principais do problema, que, neste caso, é o elevado consumo de vapor necessário para operar a turbina do compressor na planta de MVC da PetroFlex.

### 4.2.1 Definição

Na etapa de Definição, o problema que foi abordado para reduzir o consumo de vapor de alta pressão na ativação da turbina do compressor na PetroFlex foi apresentado por meio de ferramentas de qualidade, como Gráficos de Tendência e de Dispersão. Essas ferramentas permitiram observar o comportamento do consumo e identificar a existência de valores elevados.

Nesta etapa foram consideradas as seguintes perguntas (Leão, 2022):

- Qual é o problema a ser resolvido?
- Esse problema possui relevância financeira para a empresa e é viável?
- Qual será a meta a ser alcançada e qual o ganho financeiro esperado?
- Quais são os membros da equipe que irão trabalhar e contribuir para o projeto?
- Qual é o cronograma do projeto?

Para evidenciar e quantificar o problema identificado na indústria PetroFlex, utilizou-se o software Aspen Process Explorer®, desenvolvido pela Aspen Technology. Esse software permite a visualização, de maneira gráfica ou por meio de tabelas, dos dados de processo e parâmetros de qualidade em tempo real. No estudo, foi analisada a tendência de consumo do vapor de 42 $kg/cm^2$ ao longo do ano de 2023 sendo em seguida esses dados extraídos para uma tabela de Excel onde foram calculadas as médias de vazão de consumo de V-42 mês a mês.

### 4.2.2 Medição

Na etapa de medição, foram empregados dois tipos de análise: qualitativa e quantitativa. Na análise qualitativa, as causas foram identificadas utilizando-se a ferramenta Diagrama de Causa e Efeito (também conhecido como Diagrama de Ishikawa) para ilustrar as possíveis causas, com o apoio de uma sessão de brainstorming conduzida por uma equipe multidisciplinar composta por engenheiro de produção, técnico operacional, chefe de área (ROI) e operadores da indústria PetroFlex, as causas foram organizadas em seis categorias: Matéria-prima, Meio Ambiente, Método, Medição, Mão de Obra e Máquina. Já na análise quantitativa, foram coletados dados numéricos para confirmar a existência do problema. Neste trabalho, foram utilizados os dados de média e desvio padrão da vazão de consumo do V-42 como indicadores para a análise de comportamentos e estatísticas.

### 4.2.3 Análise

Na etapa de Análise, após identificar as possíveis causas do problema com o Diagrama de Ishikawa, foi conduzido um brainstorming para avaliar se essas causas realmente

contribuíam para o problema identificado. Com base nessa avaliação, elaborou-se a Matriz de Causa e Efeito, na qual foram atribuídas notas a cada uma das 21 causas potenciais levantadas, refletindo seu grau de importância em relação ao problema. As causas foram classificadas segundo seu impacto (alto ou baixo) e o esforço necessário para eliminá-las ou tratá-las (as chamadas "X’s do processo") na matriz de Esforço X Impacto o que restringiu o foco a 15 causas potenciais.

Como o problema analisado envolve um único valor de saída (Y) — o consumo de V-42 —, o Índice de Importância atribuído a essa saída foi fixado em 10. Para cada causa potencial identificada (X’s), foram atribuídos valores que refletem o grau de influência sobre o consumo elevado de vapor de alta pressão. Esses valores, foram então multiplicados pelo Índice de Importância do Y, obtendo o valor “Total”. Além disso, foi definido o esforço necessário para eliminar cada variável de entrada, definindo valores de 1 a 8, classificando-as em esforço alto ou baixo.

Duas ferramentas de qualidade, amplamente empregadas em gestão de processos e melhoria contínua, foram aplicadas nesta fase de Análise:

- Matriz de Causa e Efeito: permitiu a priorização das variáveis de entrada do processo com relação aos impactos que elas geram em cada uma das saídas. Para este estudo, as ações foram priorizadas conforme a problemática específica da PetroFlex.

- Matriz Esforço X Impacto: utilizada para complementar a Matriz de Causa e Efeito, ajudando a restringir e priorizar as causas que realmente seriam abordadas neste trabalho, permitindo uma análise mais focada e eficiente.

### 4.2.4 Melhoria

Na etapa de melhoria, foi desenvolvido um plano de ação para abordar os problemas identificados na fase anterior, utilizando a Matriz Esforço X Impacto para priorizar as causas. Esse plano teve como foco a implementação de soluções eficazes, além da avaliação dos resultados e impactos das melhorias realizadas. Foi empregada a ferramenta 5W2H, estruturando as atividades, definindo claramente as responsabilidades, prazos e custos envolvidos no processo.

### 4.2.5 Controle

Na etapa de controle, o objetivo foi garantir a sustentabilidade das melhorias implementadas na fase anterior, assegurando que os resultados positivos fossem mantidos ao longo do tempo. Para isso, foi realizado um plano de controle abrangente que incluiu métodos

de monitoramento e responsabilidades, visando à manutenção dos ganhos obtidos. As métricas selecionadas, como o consumo de vapor, receberam acompanhamento regularmente para identificar quaisquer variações no processo e possibilitar a tomada de decisões corretivas de forma ágil.

A ferramenta gráfica utilizada nesta fase também consistiu em gráficos de dispersão, assim como aqueles empregados na etapa de definição do problema. Isso se deve ao fato de que essa abordagem permitiu realizar uma comparação para verificar se a aplicação do DMAIC trouxe resultados. Os novos dados de medição de vazão de consumo de V-42 foram igualmente coletados pelo software Aspen Process Explorer®.

Além disso, a equipe foi capacitada para seguir os procedimentos estabelecidos, reforçando a importância do monitoramento contínuo. Assim, esta etapa não apenas assegurou a continuidade das melhorias, mas também promoveu uma cultura de aprimoramento contínuo, onde novas oportunidades de otimização são constantemente identificadas e exploradas, contribuindo para a eficiência operacional na PetroFlex.

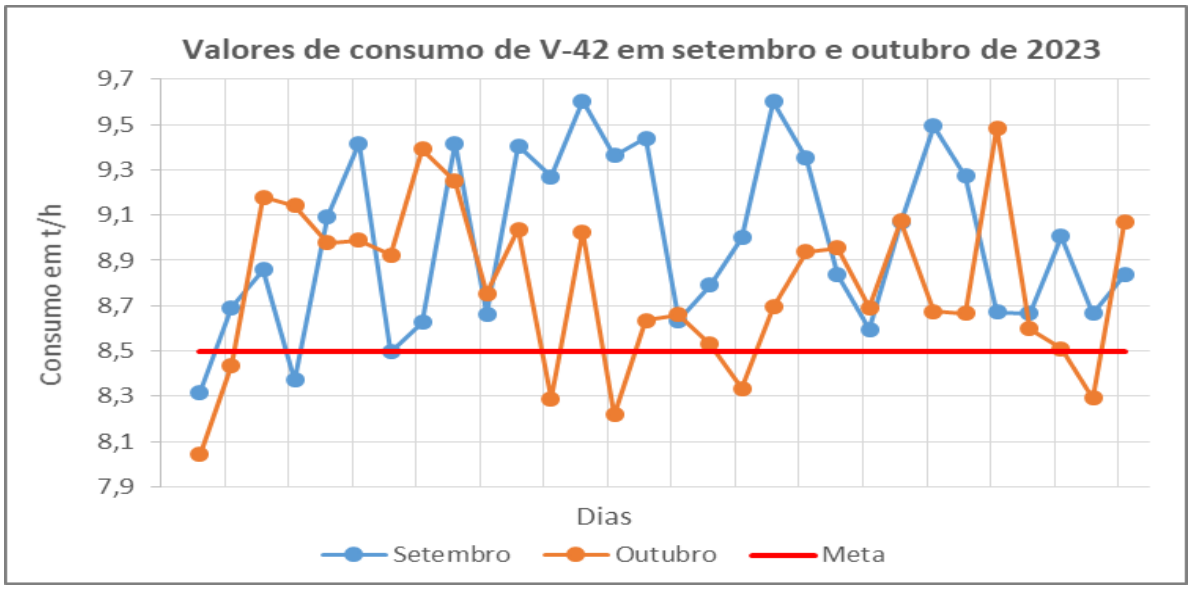
# 5 RESULTADOS

A partir da implementação da metodologia DMAIC na indústria PetroFlex para o problema de consumo elevado de vapor de alta pressão na turbina do compressor na planta de MVC, os resultados obtidos com a execução das etapas estão listados a seguir.

## 5.1 Etapa de Definição

A Figura 12 demonstra graficamente um comparativo entre dados de vazão de consumo de vapor de alta pressão entre os meses de setembro e outubro de 2023 em comparação com a meta que permitiria um consumo máximo de 8,5 t/h, explicitando a problemática e assim identificando o recorrente consumo elevado do vapor.

**Figura 12 - Comparativo de consumo de V-42 entre os meses de setembro e outubro de 2023.**



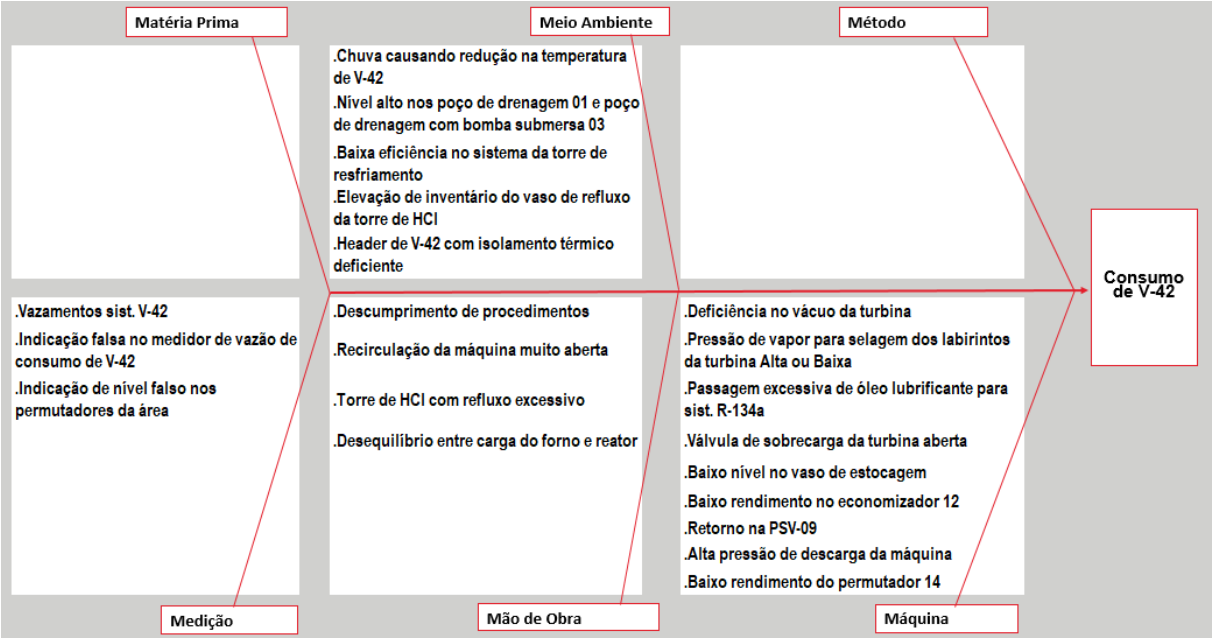

Fonte: Autora, 2024.

Observa-se que, em setembro, os valores de consumo foram consistentemente mais altos, variando entre 8,9 t/h e 9,6 t/h, com algumas oscilações acima da meta. Já em outubro, os valores estiveram mais abaixo em comparação com setembro, apresentando valores que se aproximaram mais da meta, mas ainda assim em sua maioria, maiores que 8,5 t/h, variando entre 7,9 t/h e 8,9 t/h.

## 5.2 Etapa de Medição

Após a caracterização da variabilidade do problema, suas causas foram mapeadas por meio do Diagrama de Causa e Efeito (Diagrama de Ishikawa). Essa abordagem de análise foi qualitativa e, com o auxílio do diagrama, foram identificadas 21 possíveis causas que contribuíam para o problema. O Diagrama de Ishikawa e as causas identificadas estão representados na Figura 13.

**Figura 13 - Diagrama de Ishikawa para análise de causas.**




Fonte: Autora, 2024.

### 5.2.1 Levantamento de Causas Potenciais

As causas identificadas foram organizadas de acordo com a metodologia 6M. No entanto, não foram levantadas causas específicas para as categorias de Matéria-prima e Método. Essa organização permite uma análise estruturada e focada nos fatores que influenciam a eficiência operacional. A seguir, são detalhadas as causas classificadas em cada uma das categorias relevantes.

- Meio Ambiente:

Fatores relacionados ao ambiente externo e à infraestrutura da planta que influenciam diretamente o consumo de V-42:

- Chuva causando redução na temperatura de V-42: A exposição das linhas de vapor ao ambiente externo durante chuvas pode resfriar o vapor, reduzindo sua eficiência térmica.

- Nível alto no poço de drenagem 01 e poço de drenagem com bomba submersa 03: Níveis elevados podem causar desbalanceamento e sobrecarga no sistema, aumentando a demanda por vapor.

- Baixa eficiência no sistema da torre de resfriamento: Ineficiências na torre comprometem o controle térmico, exigindo maior consumo de vapor para compensar o resfriamento inadequado.

- Elevação de inventário do vaso de refluxo da torre de HCl: Inventários altos podem gerar instabilidades operacionais, resultando em maior demanda por vapor.

- Header de V-42 com isolamento térmico deficiente: Isolamento inadequado causa perda de calor ao longo das tubulações, aumentando o consumo de vapor para compensar.

- Medição:

Problemas relacionados à instrumentação e ao monitoramento do sistema:

- Vazamentos no sistema de V-42: Fugas ao longo do sistema acumulam perdas significativas de vapor, exigindo maior produção para atender à demanda.

- Indicação falsa no medidor de vazão de consumo de V-42: Leituras incorretas podem levar a ajustes desnecessários ou ineficazes no sistema.

- Indicação de nível falso nos permutadores da área: Leituras imprecisas comprometem a troca térmica, resultando em maior consumo de vapor para manter os parâmetros operacionais.

- Mão de Obra:

Fatores relacionados ao comportamento e às práticas operacionais dos trabalhadores:

- Descumprimento de procedimentos: Operações fora dos padrões estabelecidos geram desbalanceamentos e ineficiências no sistema.

- Recirculação da máquina muito aberta: Configurações inadequadas de recirculação podem causar desperdício de vapor.

- Torre de HCl com refluxo excessivo: Excesso de refluxo aumenta o consumo de vapor para manter a separação adequada dos componentes.

- Desequilíbrio entre carga do forno e reator: Desbalanceamentos na carga resultam em ajustes frequentes, que elevam a demanda por vapor.

- Máquina

Fatores relacionados ao desempenho e à manutenção dos equipamentos:

- Deficiência no vácuo da turbina: Vácuo inadequado reduz a eficiência da turbina, aumentando a necessidade de vapor.

- Baixo rendimento do permutador 14: Problemas no desempenho térmico exigem maior consumo de vapor para compensar.

- Retorno na PSV-09: Vazamentos ou retorno na válvula de segurança resultam em desperdício de vapor.

- Válvula de sobrecarga da turbina aberta: Uma válvula aberta desnecessariamente aumenta o consumo de vapor.

- Baixo nível no vaso de estocagem: Níveis baixos afetam a estabilidade do processo, demandando ajustes e maior consumo de vapor.

- Baixo rendimento no economizador 12: Ineficiências no equipamento comprometem a recuperação de energia, resultando em maior demanda de vapor.

- Passagem excessiva de óleo lubrificante para o sistema R-134a: Contaminações prejudicam a eficiência do sistema de refrigeração, aumentando a demanda de vapor.

- Alta pressão de descarga da máquina: Pressões elevadas na descarga exigem maior esforço e consumo de vapor.

- Pressão de vapor para selagem dos labirintos da turbina Alta ou Baixa: Pressões inadequadas comprometem o desempenho da turbina, gerando maior consumo de vapor.

Além da análise qualitativa, a problemática foi também abordada de forma quantitativa, por meio do cálculo da média e do desvio padrão dos dados de vazão de consumo de vapor no compressor para os meses de setembro e outubro de 2023. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 - Valores de média e desvio padrão da vazão de consumo de V-42 nos meses de setembro e outubro de 2023.**

| 2023 | MÉDIA | DESVIO PADRÃO |
|---|---|---|
| **SETEMBRO** | 8,984298134 | 0,38459913 |
| **OUTUBRO** | 8,782210541 | 0,358703206 |

Fonte: Autora, 2024.

É possível observar que o valor médio da vazão de consumo de V-42 se encontra acima da faixa de 8,0 t/h a 8,5 t/h que é uma faixa de consumo aceitável e que garante o bom funcionamento do equipamento. Quanto ao desvio padrão dos dados pode-se observar que são valores baixos, o que mostra que esse consumo elevado foi mantido alto durante os meses inteiros.

## 5.3 Etapa de Análise

A Figura 14 ilustra a Matriz de Causa e Efeito, onde foram listadas as 21 causas potencias para o elevado consumo do vapor.

**Figura 14 - Matriz de Causa e efeito.**

| X's do Processo | | Consumo de V-42 | TOTAL | Esforço de Eliminação da Variável de Entrada | Alto 5 - 8 Baixo 1- 4 |
|---|---|---|---|---|---|
| X01 | Chuva causando redução na temperatura de V-42 | 6 | **60** | Alto | 5 |
| X02 | Nível alto no poço de drenagem 01 e poço de drenagem com bomba submersa 03; | 9 | **90** | Alto | 5 |
| X03 | Baixa eficiência no sistema da torre de resfriamento | 5 | **50** | Baixo | 3 |
| X04 | Elevação de inventário do vaso de refluxo da torre de HCl | 3 | **30** | Baixo | 2 |
| X05 | Vazamentos sist. V-42 | 5 | **50** | Baixo | 4 |
| X06 | Indicação falsa no medidor de vazão de consumo de V-42 | 8 | **80** | Baixo | 3 |
| X07 | Indicação de nível falso nos permutadores da área | 6 | **60** | Baixo | 3 |
| X08 | Descumprimento de procedimentos | 8 | **80** | Baixo | 2 |
| X09 | Recirculação da máquina muito aberta | 9 | **90** | Baixo | 2 |
| X10 | Torre de HCl com refluxo excessivo | 7 | **70** | Baixo | 2 |
| X11 | Desequilíbrio entre carga do forno e reator | 6 | **60** | Baixo | 2 |
| X12 | Deficiência no vácuo da turbina | 8 | **80** | Baixo | 4 |
| X13 | Baixo rendimento do permutador 14 | 9 | **90** | Alto | 5 |
| X14 | Retorno na PSV-09 | 8 | **80** | Baixo | 4 |
| X15 | Válvula de sobrecarga da turbina aberta | 6 | **60** | Baixo | 2 |
| X16 | Baixo nível no vaso de estocagem | 7 | **70** | Baixo | 3 |
| X17 | Baixo rendimento no economizador 12 | 7 | **70** | Baixo | 4 |
| X18 | Passagem excessiva de óleo lubrificante para sist. R-134a | 6 | **60** | Alto | 5 |
| X19 | Alta pressão de descarga da máquina | 9 | **90** | Alto | 6 |
| X20 | Header de V-42 com isolamento térmico deficiente | 8 | **80** | Alto | 8 |
| X21 | Pressão de vapor para selagem dos labirintos da turbina Alta ou Baixa | 8 | **80** | Baixo | 1 |

Fonte: Autora, 2024.

Entre as 21 possíveis causas levantadas, destaca-se que as causas relacionadas a parâmetros operacionais e manutenção de equipamentos têm maior impacto, refletindo na necessidade de ajustes imediatos para redução de desperdícios e melhora na eficiência.

As variáveis "Recirculação da máquina muito aberta" (X09) e "Alta pressão de descarga da máquina" (X20) receberam a maior pontuação total (90), evidenciando que possuem forte impacto no consumo de V-42. Isso mostra que intervenções nesses pontos são cruciais. No caso

da recirculação, ações como o ajuste correto das válvulas podem levar a reduções imediatas no consumo de vapor. Já a alta pressão de descarga pode indicar problemas no desempenho da máquina, exigindo ajustes técnicos mais detalhados para melhorar sua eficiência.

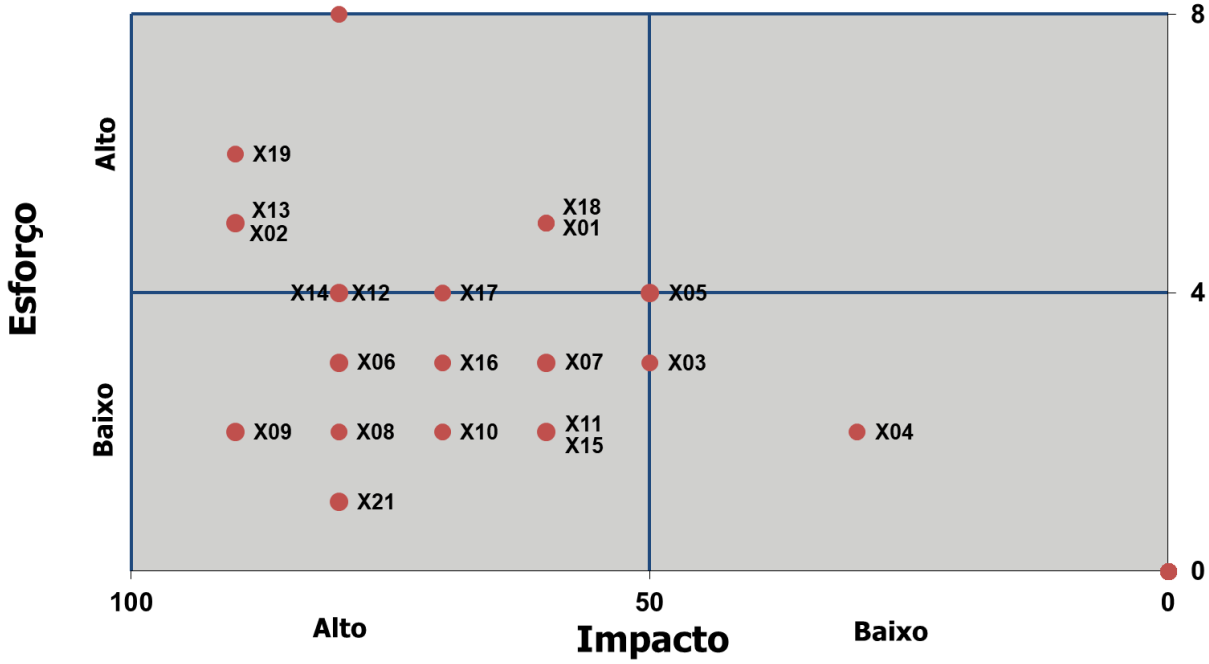
Por outro lado, causas como "Vazamentos no sistema de V-42" (X05) e "Baixa eficiência no sistema da torre de resfriamento" (X03), embora com pontuações totais mais baixas (50), também apresentam relevância. Isso se deve ao fato de que esses problemas são relativamente fáceis de abordar, como no caso de reparos em vazamentos ou manutenção preventiva no sistema de resfriamento. Resolver essas questões pode gerar impactos rápidos e positivos, mesmo que o esforço aplicado seja menor.

Outro ponto relevante é a influência de fatores externos, como "Chuva causando redução na temperatura de V-42" (X01), que recebeu pontuação de 60. Embora não seja possível controlar as condições climáticas, os resultados reforçam a necessidade de monitorar seus efeitos e ajustar o sistema de acordo para evitar perdas. Da mesma forma, fatores como "Descumprimento de procedimentos" (X08), que apresentou alta pontuação (80), mostram que a padronização operacional e a capacitação da equipe são elementos centrais para a sustentabilidade dos resultados.

A matriz evidencia que, ao focar em causas de alto impacto e esforço gerenciável, como "Torre de HCl com refluxo excessivo" (X10) e "Deficiência no vácuo da turbina" (X12), a planta pode alcançar reduções significativas no consumo de V-42, contribuindo diretamente para a eficiência operacional e sustentabilidade econômica.

A Figura 15 ilustra a Matriz de Esforço X Impacto deste trabalho, com as respectivas causas potenciais distribuídas nos seus quadrantes.

**Figura 15 - Matriz de Esforço X Impacto**




Fonte: Autora, 2024.

A aplicação da matriz de Esforço X Impacto permitiu restringir as 21 causas potenciais a 15, considerando apenas as entradas com alto impacto e baixo esforço, para garantir uma abordagem prática e eficiente. Entre essas causas priorizadas, destacaram-se duas com a maior influência sobre os resultados:

- Vazamentos no Sistema de V-42: Essa causa foi fundamental para a avaliação e correção da integridade dos equipamentos no sistema de distribuição de V-42. A inspeção detalhada ao longo do percurso do vapor identificou pontos de pequenos vazamentos que comprometiam a eficiência do sistema, levando a um consumo elevado devido à perda de vapor.

- Descumprimento de Procedimentos Operacionais: Foi observado que a operação do sistema por alguns grupos de operadores de painel resultava em um consumo de vapor superior ao necessário. A busca por uma zona de conforto durante a operação levou ao descumprimento de procedimentos recomendados e de faixas operacionais otimizadas, o que impactou diretamente o consumo do recurso.

Essas duas causas foram identificadas como prioritárias para correção, uma vez que afetavam significativamente o consumo de V-42 e exigiam atenção imediata para otimizar a eficiência e reduzir desperdícios no sistema. Contudo, as outras 13 causas potenciais também foram igualmente tratadas.

## 5.4 Etapa de Melhoria

Após a análise e priorização das causas potenciais do problema, realizadas na etapa de Análise, foi possível elaborar um plano de ação na etapa de Melhoria, utilizando a metodologia “5W2H”. A Figura 16 apresenta a planilha “5W2H” desenvolvida para este trabalho.

Na planilha, foram estabelecidas ações para cada causa priorizada na Matriz Esforço e Impacto, incluindo os responsáveis pela execução, os prazos para sua conclusão, as justificativas das ações, seu detalhamento, o local de execução e os custos envolvidos. As ações propostas na planilha "5W2H", nesta etapa de melhoria do DMAIC, foram implementadas com sucesso na indústria PetroFlex. Algumas dessas ações não acarretaram custos para a empresa, evidenciando a relevância da implementação deste projeto.

**Figura 16 - Planilha 5W2H**

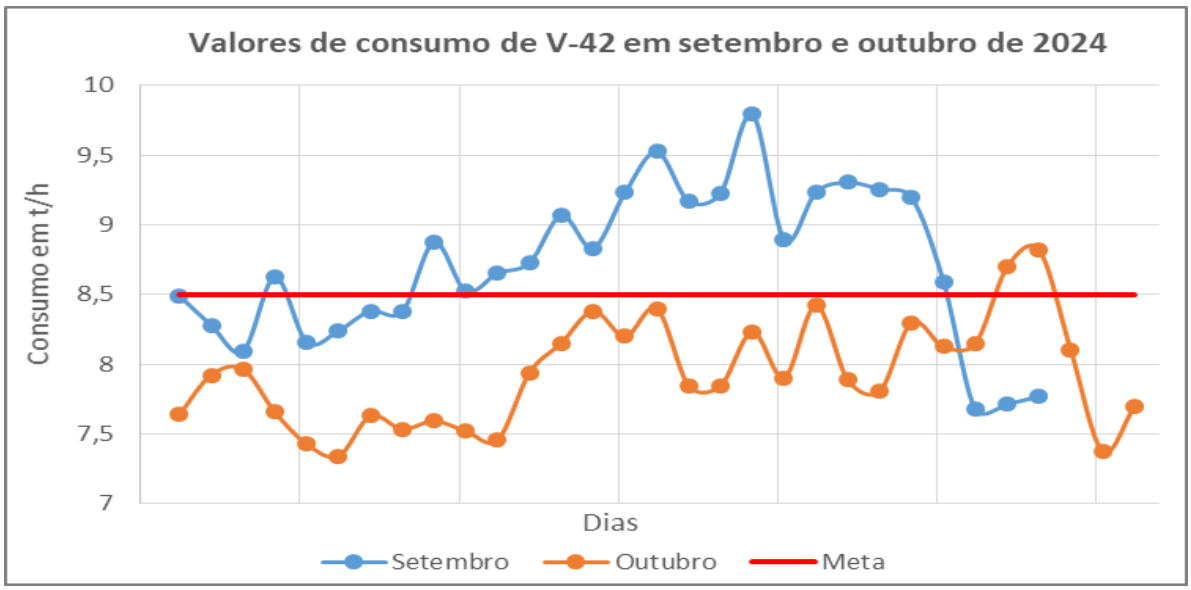
| CAUSA (X´s vitais) | O QUE FAZER (ação ou contramedida) | QUEM (responsável) | QUANDO (prazo/conclusão) | PORQUE (Justificativa da ação) | COMO (Detalhamento da ação) | ONDE (local) | QUANTO (Custo da ação) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Baixa eficiência no sistema da TR-9501 (x03) | Levantar informação e buscar correção necessária | Operação | 01/10/24 | Eliminar possíveis pontos de ineficiência e geradores de consumo | Verificação equipamento/sistema | Painel e Campo | R$ - |
| Vazamentos Sist. V-42 (x05) | Levantar informação e buscar correção necessária | Operação e Técnico Operacional | 01/10/24 | Eliminar possíveis pontos de ineficiência e geradores de consumo | Verificação equipamento/sistema e solicitação de mão de obra | Painel e Campo | R$ 1.000,00 |
| Indicação falsa no FQ-1545 (x06) | Levantar informação e buscar correção necessária | Operação | 01/10/24 | Eliminar possíveis pontos de ineficiência e geradores de consumo | Verificação equipamento/sistema | Painel e Campo | R$ - |
| Indicação de nível falso nos permutadores da área (x07) | Levantar informação e buscar correção necessária | Operação | 01/10/24 | Eliminar possíveis pontos de ineficiência e geradores de consumo | Verificação equipamento/sistema | Painel e Campo | R$ - |
| Descumprimento de procedimentos (x08) | Treinar os operadores | ROI, Operador e Layne | 15/10/24 | Reciclagem de conhecimento e padronização de rocedimentos operacionais. | Elaboração de apresentação e treinamento dos operadores | Painel e Campo | R$ - |
| Recirculação da máquina muito aberta (x09) | Levantar informação e buscar correção necessária | Operação | 01/10/24 | Eliminar possíveis pontos de ineficiência e geradores de consumo | Verificação equipamento/sistema | Painel e Campo | R$ - |
| T-1501 com refluxo excessivo (x10) | Levantar informação e buscar correção necessária | Operação | 01/10/24 | Eliminar possíveis pontos de ineficiência e geradores de consumo | Verificação equipamento/sistema | Painel e Campo | R$ - |
| Desequilíbrio entre carga do forno e reator (x11) | Levantar informação e buscar correção necessária | Operação | 01/10/24 | Eliminar possíveis pontos de ineficiência e geradores de consumo | Verificação equipamento/sistema | Painel e Campo | R$ - |
| Deficiência no vácuo da turbina (x12) | Levantar informação e buscar correção necessária | Operação | 01/10/24 | Eliminar possíveis pontos de ineficiência e geradores de consumo | Verificação equipamento/sistema | Painel e Campo | R$ - |
| Retorno na PSV-09 (x14) | Levantar informação e buscar correção necessária | Operação | 01/10/24 | Eliminar possíveis pontos de ineficiência e geradores de consumo | Verificação equipamento/sistema | Painel e Campo | R$ - |
| Válvula de sobrecarga da turbina aberta (x15) | Levantar informação e buscar correção necessária | Operação | 01/10/24 | Eliminar possíveis pontos de ineficiência e geradores de consumo | Verificação equipamento/sistema | Painel e Campo | R$ - |
| Baixo nível no vaso de estocagem (x16) | Levantar informação e buscar correção necessária | Operação | 01/10/24 | Eliminar possíveis pontos de ineficiência e geradores de consumo | Verificação equipamento/sistema | Painel e Campo | R$ - |
| Baixo rendimento no P-1512 (x17) | Levantar informação e buscar correção necessária | Operação | 01/10/24 | Eliminar possíveis pontos de ineficiência e geradores de consumo | Verificação equipamento/sistema | Painel e Campo | R$ - |
| Header de V-42 com isolamento térmico deficiente (x20) | Levantar informação e buscar correção necessária | Operação e Técnico Operacional | 01/10/24 | Eliminar possíveis pontos de ineficiência e geradores de consumo | Verificação equipamento/sistema e solicitação de mão de obra | Painel e Campo | R$ 1.200,00 |
| Pressão de vapor para selagem dos labirintos da turbina Alta ou Baixa (x21) | Levantar informação e buscar correção necessária | Operação | 01/10/24 | Eliminar possíveis pontos de ineficiência e geradores de consumo | Verificação equipamento/sistema | Painel e Campo | R$ - |

Fonte: Autora, 2024.

## 5.5 Etapa de Controle

Após a aplicação das ações propostas, foi monitorada a redução no consumo de vapor de alta pressão na turbina do compressor da planta de MVC durante os meses de setembro e outubro de 2024. A Figura 17 apresenta a nova dispersão dos dados após a implementação da metodologia, durante os meses de setembro e outubro de 2024.

**Figura 17 - Comparativo de consumo de V-42 entre os meses de setembro e outubro de 2024.**




Fonte: Autora, 2024.

Com o controle das ações propostas no ciclo DMAIC, foi possível observar uma melhoria no consumo de V-42. Em comparação com os meses de setembro e outubro de 2023, quando os valores de vazão de consumo de vapor estavam, em sua maioria, acima da faixa máxima estabelecida na meta do projeto, em setembro de 2024 já se nota uma redução significativa, embora parte dos valores ainda tenha permanecido acima de 8,5 t/h. Vale ressaltar que, neste mês, nem todas as ações planejadas haviam sido implementadas. A ação de treinamento dos operadores, com o objetivo de evitar descumprimentos e padronizar os procedimentos operacionais, foi concluída apenas no final de setembro, e os resultados começaram a ser refletidos nos dados de outubro. Nesse mês, os valores ficaram consistentemente abaixo da faixa de 8,5 t/h e, em diversos momentos, até mesmo abaixo de 8,0 t/h. O ponto em que o consumo ultrapassou as 8,5 t/h ocorreu devido a um evento pontual, que causou a elevação de pressão em uma das torres de destilação da planta, e nesse caso é esperado que haja um aumento temporário no consumo de vapor.

Os valores de média e desvio padrão dos valores de vazão de consumo de V-42 foram medidos novamente, e estes estão dispostos na Tabela 2.

**Tabela 2 - Comparativo de valores de média e desvio padrão da vazão de consumo de V-42, antes e após a aplicação do DMAIC.**

| | MÉDIA | | DESVIO PADRÃO | |
|---|---|---|---|---|
| | **2023** | **2024** | **2023** | **2024** |
| **SETEMBRO** | 8,984298134 | 8,131296825 | 0,38459913 | 0,55485217 |
| **OUTUBRO** | 8,782210541 | 7,935847959 | 0,358703206 | 0,383755918 |

Fonte: Autora, 2024.

Antes da aplicação do DMAIC, os valores médios de vazão do consumo de V-42 eram significativamente mais elevados, com uma redução de aproximadamente 9,47% entre setembro (de 8,98 t/h para 8,13 t/h) e 9,68% em outubro (de 8,78 t/h para 7,93 t/h). Esses resultados representam uma diminuição expressiva em apenas dois meses de monitoramento das ações implementadas. Estima-se que essa tendência de redução continue nos próximos meses, dado que a fase de Controle do DMAIC será mantida por pelo menos um ano de acompanhamento e consolidação dos ganhos obtidos.

A implementação das ações corretivas e preventivas propostas pelo trabalho teve um impacto altamente positivo para a PetroFlex. O trabalho, caracterizado por baixo custo e esforço reduzido para a execução das ações, teve reconhecimento na empresa. Além de promover a redução no consumo de vapor e nas emissões de $CO_2$, contribuindo diretamente para a sustentabilidade, o projeto também visa um ganho financeiro estimado em aproximadamente R$ 823.583,09 ao final de um ano de acompanhamento.

Os resultados financeiros já demonstram um retorno significativo. Nos meses de setembro e outubro de 2024, foi obtido um ganho de R$ 295.148,78, o que indica que o valor financeiro estimado inicialmente poderá ser superado ao final do projeto.

# 6 CONCLUSÃO

A aplicação da metodologia DMAIC permitiu identificar e definir um problema significativo em uma indústria produtora de MVC, ficticiamente denominada PetroFlex. A partir disso, foram coletados dados, realizadas análises detalhadas e implementadas ações de melhoria e controle de processos, utilizando diversas ferramentas estatísticas para alcançar os resultados desejados pela empresa. O uso dessa metodologia, juntamente com as ferramentas de melhoria contínua, trouxe resultados altamente satisfatórios, considerando que o projeto envolveu um baixo custo e demandou pouco tempo e esforço para execução, garantindo, assim, um impacto positivo e eficaz para a organização.

Com a aplicação do método, foi possível reduzir o consumo de vapor de alta pressão na turbina do compressor da planta de MVC, permitindo que a equipe de engenharia e operadores realizassem uma operação mais eficiente da máquina, mesmo com a diminuição da quantidade de vapor utilizada. Além disso, o projeto implementado contribuiu para a criação de uma cultura de melhoria contínua entre todos os envolvidos na operação do sistema, resultando em um desempenho aprimorado, com maior conhecimento técnico e padronização nas atividades.

A redução da vazão de consumo de V-42 foi observada tanto de forma qualitativa, por meio da análise visual dos gráficos de dispersão, quanto de forma quantitativa, através da análise dos valores de média e desvio padrão das populações. Vale destacar que, por se tratar de um projeto de melhoria contínua implementado em uma indústria de monômeros, os resultados obtidos com a aplicação da metodologia DMAIC devem ser considerados como um ponto de partida. Espera-se que esses resultados sejam sustentados ao longo do tempo, mantendo a tendência positiva observada durante os dois meses de monitoramento e controle (setembro e outubro de 2024).

# REFERÊNCIAS


ARIOLI, E.E. **Análise e Solução de Problemas – O Método da Qualidade Total com Dinâmica de Grupo.** Rio de Janeiro, Qualitymark, 1998.

BALLESTERO, A; Esmeralda, M. **Gestão de qualidade, produção e operações**. 2, ed. São Paulo: Atlas, 2010.

CAMPOS, V. **Gerenciamento da rotina do trabalho do dia a dia.** Belo Horizonte: INDG Tecnologia e Serviços Ltda., 2004.

COGGIOLA, O. **Da revolução industrial ao movimento operário. As origens do mundo contemporâneo**. v. 9, n. 09, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/287205625_Revolucion_Industrial_e_Movimento_Operario_As_origens_do_mundo_contemporaneo. Acesso em: 12 de ago. 2024.

DE PAULA, G. **O que é 5W2H: reduza incertezas, ganhe produtividade e aprenda como fazer um plano de ação.** Treasy, 2015.

DIAS, S. P. M. **Otimização da Rede de Vapor**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal. Disponível em: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395145007859/Tese%20Final.pdf. Acesso em: 13 de ago. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DO PVC. **PVC e sustentabilidade**. Instituto Brasileiro do PVC. 2023. Disponível em: <https://www.pvc.org.br/sustentabilidade>. Acesso em: 26 ago. 2024.

LABDGE-UFF. **Diagrama de Ishikawa**. 2022. Disponível em: https://labdge.uff.br/diagrama-de-ishikawa/. Acesso em: 12 nov. 2024.

LEÃO, T. **DMAIC: Significado, Exemplo e Como Funciona o Método**. Blog Industrial Nomus, 2022. Disponível em: https://www.nomus.com.br/blog-industrial/dmaic/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw5ea1BhC6ARIsAEOG5pxEmkq4tJrQWTVT7Rd8NXTAlqqeDAwm4Jp5atjtZbsBQtS0Sw0p5kYaAsFDEALw_wcB. Acesso em: 12 de ago. 2024.

MACEDO, Diego. **Mapa Mental: Brainstorming**. 2012. Disponível em: https://www.diegomacedo.com.br/mapa-mental-brainstorming/. Acesso em: 12 nov. 2024.

MAGALHÃES, R. **Plástico PVC: tipos, propriedades, processos e utilizações**. Compraco, 2024. Disponível em: <https://www.compraco.com.br/artigos/plastico-pvc-tipos-propriedades-processos-e-utilizacoes>. Acesso em: 26 ago. 2024.

MOHAMMAD, S. M. **5 Tipos de Compressores de Ar: Princípio de funcionamento, Aplicação (PDF)**. 2023. Disponível em: https://www.theengineerspost.com/types-of-air-compressors/. Acesso em: 22 ago. 2024.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BAILEY, M. B. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

NORIA CORPORATION. **O que você precisa saber sobre a lubrificação de compressores.** 2023. Disponível em: https://www.noria.com.br/o-que-voce-precisa-saber-sobre-a-lubrificacao-de-compressores/. Acesso em: 11 nov. 2024

NUNES, L. R.; RODOLFO, A. Jr.; ORMANJI, W. **Tecnologia do PVC**. São Paulo: ProEditores / Braskem, 2006.

PATEL, N. **Brainstorming: O Que É, Como Fazer (Passo a Passo).** NP Digital, 2024.

PENDURADO, K.; HSIAO, W.; LI, Y.; KUAN, Y. **150USRT Class R-513A Refrigerant Two-Stage Centrifugal Compressor Design Point and Separation Point Flow Field Simulation Analysis**. 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/2227-9717/11/1/253. Acesso em: 22 ago. 2024.

Slideshare Company. **Apostila Compressor Centrífugo**. (2017). Disponível em: https://pt.slideshare.net/slideshow/apostila-compressor-centrifugo/76602471. Acesso em: 11 nov. 2024.

SPIRAX, S. **Bem vindo ao mundo do vapor - Apostila de estudo do vapor**. 2021. Disponível em: http://www.scribd.com/doc/25316074/apostila-sarco. Acesso em: 12 de ago. 2024.

TOGAWA, V. **Uso do Vapor na Indústria**. 2017. Disponível em: https://togawaengenharia.com.br/blog/uso-do-vapor-na-industria/. Acesso em: 12 ago. 2024.

WAQAR, E. **Air Compressor Types and Applications**. 2021. Disponível em: https://mechanicalboost.com/air-compressor-types-and-applications/. Acesso em: 22 ago. 2024.

YANG, C.; NI, W.; PANG, C.; He, Z. **Numerical Simulation of a Two-Stage Centrifugal Air Compressor Cooling Structure for Hydrogen Fuel Cells**. 2024. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-99-8581-4_32. Acesso em: 22 ago. 2024.