



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

THIAGO FRANCISCO FERREIRA

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DMAIC PARA MELHORIA NA EFICIÊNCIA
DA RECUPERAÇÃO DO ÓLEO DE LAMINAÇÃO EM UMA INDÚSTRIA DE
ALUMÍNIO**

Recife, PE

2025

THIAGO FRANCISCO FERREIRA

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DMAIC PARA MELHORIA NA EFICIÊNCIA
DA RECUPERAÇÃO DO ÓLEO DE LAMINAÇÃO EM UMA INDÚSTRIA DE
ALUMÍNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação de Engenharia Química
da Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Leandro Danielski

Recife, PE

2025

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

Ferreira, Thiago Francisco.

Aplicação da metodologia DMAIC para a melhoria na eficiência da
recuperação de óleo de laminação em uma indústria de alumínio / Thiago Francisco
Ferreira. - Recife, 2025.

47 p. : il., tab.

Orientador(a): Leandro Danielski

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química -
Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Alumínio. 2. DMAIC. 3. Ferramentas da qualidade. 4. Melhoria. I.
Danielski, Leandro . (Orientação). II. Título.

660 CDD (22.ed.)

THIAGO FRANCISCO FERREIRA

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DMAIC PARA MELHORIA NA
EFICIÊNCIA DA RECUPERAÇÃO DO ÓLEO DE LAMINAÇÃO EM UMA
INDÚSTRIA DE ALUMÍNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Química da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em: 06/08/2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **LEANDRO DANIELSKI**
Data: 07/08/2025 09:35:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr.-Ing. Leandro Danieliski (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 **FELIPE PEDRO DA COSTA GOMES**
Data: 11/08/2025 10:27:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Felipe Pedro da Costa Gomes (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 **JORGE VINÍCIUS FERNANDES LIMA CAVALCANTI**
Data: 12/08/2025 13:05:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jorge Vinícius Fernandes Lima Cavalcanti (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer às pessoas que me ajudaram e estiveram comigo até o fim da graduação. Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais, Sandra e Genival, por todo apoio e carinho que me forneceram durante toda a minha vida e por me encorajarem a sempre seguir em frente, por me mostrarem o que é resiliência.

Gostaria de agradecer aos meus colegas de estágio na CBA, que juntos me mostraram o quão fascinante pode ser trabalhar em uma indústria, abrindo minha mente para diversos caminhos que jamais imaginei.

Agradeço à equipe de melhoria contínua, em especial à minha gestora Amanda Nogueira, por todas as orientações. Agradeço também à Rafaela Mendes por me ensinar sobre produção e melhoria contínua, e por sempre me incentivar a entender sobre os processos da fábrica.

Por fim, gostaria de agradecer ao meu orientador, o professor Leandro Danielski, que além de me orientar nesse trabalho, também me orientou no meu projeto de iniciação científica.

RESUMO

A indústria do alumínio é uma das mais importantes do mundo, possuindo aplicação desde a construção civil, automobilística e até mesmo a indústria naval. Para se obter os produtos oriundos do alumínio, é necessário um grande gasto energético e de insumos, devido à natureza do seu processo de fabricação. Devido a esse alto custo energético, diversas empresas do segmento buscam aumentar a qualidade dos seus produtos afim de reduzir a porcentagem de retrabalhos e diminuir também a taxa de desperdício de matéria prima. Para reduzir esses problemas, empresas do mundo todo adotam a filosofia *Lean Six Sigma*, que muitas vezes é acompanhada da metodologia DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar) que tem como objetivo aumentar a qualidade do processo e reduzir a sua variabilidade. Este trabalho utiliza a metodologia DMAIC para aumentar a eficiência em uma planta de recuperação de óleo de laminação, que é um dos principais insumos utilizado no processo de obtenção de chapas e filmes a base de alumínio. Foi estipulada uma meta mínima de recuperação de 12,96 litros por tonelada de óleo recuperado (L/ton), com um valor desejável de 22,96 L/ton. Com o uso da metodologia houve um aumento de 32,6% no volume de óleo recuperado, além de um aumento na capacidade do processo.

Palavras-chave: Alumínio; DMAIC; Ferramentas da qualidade. Melhoria.

ABSTRACT

The aluminum industry is one of the most important in the world, with activities ranging from construction to automobile and even shipbuilding industries. To obtain products made from aluminum, a great deal of energy and input are required due to the nature of the manufacturing process. Due to this high energy cost, many companies in the sector are looking to increase the quality of their products to reduce the percentage of rework and to reduce the rate of raw material waste. To reduce these problems, companies around the world have adopted the Lean Six Sigma philosophy, which is often accompanied by the DMAIC methodology, which aims to increase the quality of the process and reduce its variability. This work uses the DMAIC methodology to increase efficiency in a rolling mill oil recovery plant, which is one of the main inputs used in the process of obtaining aluminum-based sheets and films. A minimum target of 12.96 L/ton of recovered oil was set, with a desirable value of 22.96 L/ton. Using the methodology resulted in a 32.6% increase in the volume of oil recovered, as well as an increase in process capacity.

Keywords: Aluminum; DMAIC; Improvement, Quality tools.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Principais objetivos da metodologia TPM.	14
Figura 2 –	Lavra de bauxita.	16
Figura 3 –	Fluxograma representativo do processo Bayer.	17
Figura 4 –	Representação da célula eletrolítica.	17
Figura 5 –	Lingotamento do metal derretido.	18
Figura 6 –	Lotes de lingotes de alumínio.	18
Figura 7 –	Lingotamento contínuo do aço.	19
Figura 8 –	Representação de um laminador Caster.	20
Figura 9 –	Esquema representativo de um laminador desbastador.	20
Figura 10 –	Estrutura hierárquica da capacitação Lean Six Sigma.	21
Figura 11 –	Representação da capacidade de um processo.	23
Figura 12 –	Exemplo de um gráfico de Pareto.	23
Figura 13 –	Representação de um gráfico de controle.	24
Figura 14 –	Tipos de relações em gráficos de dispersão.	25
Figura 15 –	Representação de um diagrama de Ishikawa.	25
Figura 16 –	Média mensal da recuperação do óleo de laminação.	30
Figura 17 –	Fluxograma do processo.	31
Figura 18 –	Diagrama SIPOC do processo de recuperação de óleo.	32
Figura 19 –	Histograma dos dados históricos.	33
Figura 20 –	Análise da capacidade do processo.	34
Figura 21 –	Diagrama de causa e efeito do problema.	35
Figura 22 –	Diagrama ELV do sistema acetonitrila e nitrometano a 75°C.	37

Figura 23 –	Resultado após o plano de ação.	39
Figura 24 –	Análise da capacidade dos resultados.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Resumo da estatística descritiva dos dados de 2024.	33
Tabela 2 –	Matriz de priorização baixa eficiência de recuperação de óleo de laminação.	35
Tabela 3 –	Condutividade térmica de alguns materiais.	36
Tabela 4 –	Causas dos principais problemas.	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TPM	Manutenção Produtiva Total
DMAIC	<i>Define, Measure, Analyze, Improve, Control</i>
LSS	<i>Lean Six Sigma</i>
PDCA	<i>Plan, Do, Check, Act</i>
CBA	Companhia Brasileira de Alumínio
SIPOC	<i>Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers</i>
LIE	Limite Inferior de Especificação
LSE	Limite Superior de Especificação

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Mi
σ	Sigma
n	Número de dados
k	Condutividade térmica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	A INDÚSTRIA DO ALUMÍNIO	15
2.2	A FABRICAÇÃO DO ALUMÍNIO	16
2.2.1	Etapa Upstream e Midstream	16
2.2.2	Etapa Downstream	19
2.3	LEAN SIX SIGMA E A METODOLOGIA DMAIC	21
2.4	ESTATÍSTICA E AS FERRAMENTAS DA QUALIDADE	22
3	METODOLOGIA	27
3.1	CONSTRUINDO O INDICADOR E ENTENDENDO O PROBLEMA	27
3.2	ETAPAS DA METODOLOGIA DMAIC	27
3.2.1	Definir	28
3.2.2	Medir	28
3.2.3	Analisar	28
3.2.4	Melhorar	29
3.2.5	Controlar	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1	HISTÓRICO DE RECUPERAÇÃO	30
4.2	IMPLEMENTAÇÃO DO DMAIC	31
4.2.1	Definir	31
4.2.2	Medir	32
4.2.3	Analisar	34
4.2.4	Melhorar	38
4.2.5	Controlar	38
5	CONCLUSÃO	41
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é um dos metais mais abundantes do planeta, onde ele é muito utilizado pela população. A principal forma de obtenção do alumínio é através do processo Bayer, que é a principal forma de obtenção de alumínio em escala industrial, pelo qual ele utiliza a alumina (Al_2O_3) como principal matéria prima (Raahauge; Willians, 2022). O processo de fabricação de alumínio pode gerar um conjunto de impactos socioambientais que pode ser devido desde o grande consumo de recursos minerais, até o risco de acidentes trabalhistas presentes, como os riscos presentes na etapa de mineração (Henriques; Porto, 2013).

Nesse contexto, para a diminuição de consumo e desperdício de insumos e para a melhoria da qualidade dos produtos, foram criadas uma série de metodologias que focaram em maximizar a produção evitando desperdícios. Algumas dessas metodologias são o 5S e o TPM (Manutenção Produtiva Total). O 5S é uma metodologia japonesa que busca a qualidade total, usando conceitos como: utilização, organização, limpeza, padronização e disciplina. A metodologia 5S oferece várias vantagens, onde algumas das principais são a redução de acidentes no trabalho, aumento na produção e melhoria na qualidade dos produtos (Qualyteam, 2021).

A metodologia 5S tornou-se uma das mais utilizadas mundialmente. Isso se deve ao fato de poder ser aplicada em qualquer ambiente, seja em uma linha de produção industrial, em um escritório ou em um laboratório de pesquisa. O uso desse conceito mostra que sua implementação motiva os colaboradores, além de melhorar a produtividade da empresa. (Totvs, 2024).

Desenvolvida no Japão, a metodologia TPM (Manutenção Produtiva Total) tem como foco principal a melhoria das máquinas de fabricação, melhorar a manutenção e qualidade final dos produtos. Com a implementação da metodologia, é possível observar uma maior eficácia na equipe responsável pela máquina, maior capacitação e autonomia dos funcionários e a implementação de um fluxo de melhoria contínua, que é bastante valorizado no ambiente industrial. A metodologia é formada por diversos pilares para garantir seu funcionamento, onde alguns desses principais pilares são: manutenção autônoma, manutenção planejada, melhoria focada e treinamento/desenvolvimento (Fractal, 2025).

A implementação do TPM busca evitar problemas do sistema produtivo, na qual a operação tenta manter a máquina nas condições em que ela foi fabricada. O principal objetivo da ferramenta é atingir a “Quebra-zero”, sendo utilizado um conjunto de ações que aumentam

a produtividade das máquinas e a autonomia dos operadores, onde a responsabilidade do reparo da máquina não depende apenas da equipe de manutenção (Alves, 2020). A Figura 1 mostra os principais objetivos da metodologia.

Figura 1. Principais objetivos da metodologia TPM.



Fonte: Alves, 2020.

Juntamente com essas metodologias, para garantir a gestão de qualidade dos produtos, também é usado o *Lean Six Sigma* (LSS), que reúne um conjunto de ferramentas estruturadas no ciclo DMAIC (Definir, medir, analisar, melhorar e controlar), onde esse conjunto de ferramentas reduzem os defeitos e melhoram a qualidade dos produtos. A metodologia DMAIC é muito similar ao ciclo PDCA (Planejar, fazer, checar e agir); no entanto, ela tem uma etapa maior focada no planejamento das ações, além de fazer um uso de recursos estatísticos mais aprofundados para garantir a melhoria do processo (Jones; Dowdall, 2023).

Um dos insumos mais importantes na indústria do alumínio é o óleo de laminação, que é de extrema importância para o funcionamento dos laminadores. É um recurso muito utilizado, onde a má utilização pode gerar um grande desperdício de matéria prima, tornando o processo menos eficiente e sustentável. No caso do alumínio, o óleo utilizado para a laminação deve ter algumas características importantes como por exemplo: boa qualidade para prevenir a formação de manchas, baixo odor e viscosidade constante (Cadium, 2020).

Diante do que foi apresentado, o objetivo geral do trabalho é utilizar a metodologia DMAIC para aumentar a eficiência da recuperação de óleo de laminação dentro de uma planta própria da fábrica, os objetivos específicos são:

- Coletar dados históricos do índice de recuperação de óleo.
- Utilizar ferramentas estatísticas para avaliar os dados.
- Fazer um Brainstorming de ideias e elaborar um plano de ação de propostas de melhoria.
- Avaliar se houve melhorias no processo através da média e da análise de capacidade do processo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A INDÚSTRIA DO ALUMÍNIO

Nos últimos anos, o mercado do alumínio apresentou um crescimento na produção do alumínio primário. Somente em 2022, o investimento no setor cresceu em 58% quando comparado ao ano interior, gerando um aumento na geração de empregos (ABAL, 2023).

Um dos principais desafios na fabricação do alumínio é o alto consumo de energia elétrica, visto que para transformar a alumina em alumínio é necessário utilizar a eletrólise ígnea, que consome elevadas taxas de energia elétrica. Um outro problema que surge na fabricação do alumínio é a alta taxa de produção de gases do efeito estufa, na qual 3% dos gases do efeito estufa do planeta são produzidos devido à fabricação de alumínio (IEA, 2023).

O alumínio produzido pode ser utilizado para a fabricação de diversos produtos utilizados no cotidiano, onde alguns desses produtos transformados podem ser classificados como chapas, folhas, extrudados e telhas. As chapas de alumínio podem ser aplicadas no setor automotivo, enquanto as folhas de alumínio (que possuem espessuras menores) podem ser aplicadas tanto na produção de trocadores de calor, como até mesmo embalagens para medicamentos e produtos alimentícios (CBA, 2025).

2.2 A FABRICAÇÃO DO ALUMÍNIO

O processo de fabricação de alumínio pode ser dividido em três segmentos diferentes: *upstream*, *midstream* e *downstream*. O primeiro segmento compreende a etapa de mineração da bauxita, que ao passar por um processo de refino é transformada em um pó branco chamado alumina. No fim da etapa, a alumina é transformada em alumínio líquido via processo eletroquímico. Na etapa *midstream*, o alumínio líquido é usado para produzir lingotes, tarugos ou placas, que posteriormente são usados como matéria prima para outros produtos. Por fim, na etapa de *downstream*, o alumínio é transformado em produtos acabados ou semiacabados que serão utilizados na indústria de automóveis, elétrica, naval ou até mesmo a farmacêutica. Alguns destes produtos incluem fios elétricos, lataria de veículos e embalagens de alimentos ou de medicamentos (ALBRAS, 2025).

2.2.1 Etapa Upstream e Midstream

A etapa inicial da fabricação do alumínio é a mineração da bauxita, que é o minério que contém em sua composição um conjunto de óxidos de alumínio hidratado. Uma particularidade da mineração da bauxita é que diferente de outros minérios, ela é extraída a partir de grandes tiras de terra, que logo em sequência são recuperadas. Esse método de mineração é chamado de *strip mining*, que é um processo diferente da mineração do ferro (maior parte da mineração do Brasil) que realiza cavas em montanhas (Revista Alumínio, 2019). A Figura 2 mostra a imagem de uma lavra de alumínio, onde é possível observar que o solo minerado apresenta uma cor avermelhada, cor pertencente ao minério de onde é extraído o alumínio.

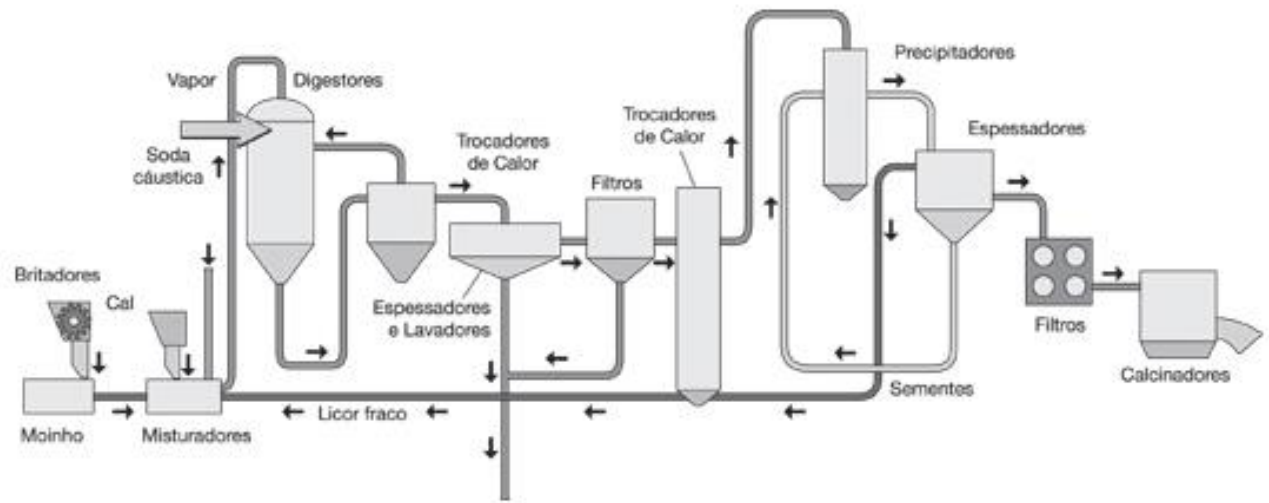
Figura 2. Lavra de bauxita.



Fonte: Revista alumínio, 2019.

Após a fase de mineração, vem a fase de beneficiamento, onde o minério que contém o óxido de alumínio passa por um processo de britagem para reduzir o seu tamanho, além de ser lavado, para que seja possível diminuir teor de sílica, para logo em seguida ser secado. Em seguida, a bauxita é submetida a uma série de operações, que a transformam em alumina pura. Esse conjunto de operações é conhecido como processo Bayer. Em resumo, a bauxita é moída e dissolvida em soda cáustica, onde o óxido de alumínio (alumina) é separado dos demais elementos através da dissolução. Em seguida a solução é filtrada, para separar as demais impurezas e depois é concentrada para formar um aglomerado de cristais hidratados. Para remover a água dos cristais, são utilizados calcinadores em altas temperaturas, onde o produto é a alumina pura, que em seguida é encaminhada para sofrer uma eletrólise. A Figura 3 mostra um fluxograma do processo Bayer (ABAL, 2023).

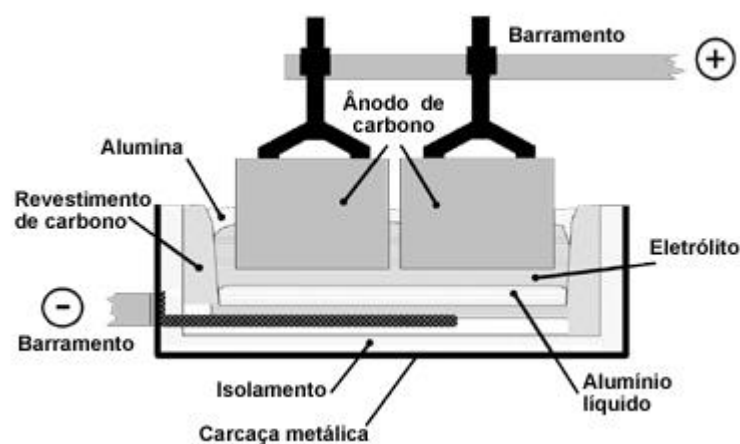
Figura 3. Fluxograma representativo do processo Bayer.



Fonte: ABAL, 2023.

Por fim, a alumina pura é encaminhada para cubas eletrolíticas para sofrer uma redução eletrolítica, onde a alumina é finalmente transformada em alumínio líquido. Esse processo de transformar a alumina em alumínio líquido é conhecido como processo Hall-Héroult. As etapas dessa transformação consistem em dissolver a alumina em um banho de criolita (Na_3AlF_6), onde nessa combinação há a decomposição do oxigênio. Em seguida o oxigênio reage com o ânodo de carbono presente na cuba eletrolítica, formando gás carbônico. Por fim o alumínio líquido puro é precipitado no fundo da cuba (ABAL, 2023). A Figura 4 mostra a representação da célula eletrolítica.

Figura 4. Representação da célula eletrolítica.



Fonte: ABAL, 2023.

A etapa *Midstream* é dedicada a transformar o alumínio líquido em alumínio no estado sólido. Assim como o aço, o alumínio líquido também passa por um processo de conformação que busca transformar o metal fundido em outros produtos intermediários que são utilizados

para fabricação de estruturas metálicas ou embalagens. O metal solidificado pode assumir o formato de placas, lingotes ou tarugos. Uma das principais formas de conformação é o lingotamento, que consiste em transformar o metal líquido em formas de blocos maciços de metal. Os lingotes são principalmente utilizados no setor de laminação e forjaria, passando por processos como por exemplo, a “refusão” do metal (Pasqua, 2024). A Figura 5 ilustra o processo de lingotamento.

Figura 5. Lingotamento do metal derretido.



Fonte: Pasqua, 2024

Na indústria, são utilizados diferentes tipos de lingotamento, onde os dois principais são o lingotamento tradicional, e o lingotamento contínuo. No método tradicional, o metal líquido é despejado em um molde feito de material refratário (lingoteiras). Em seguida o metal é resfriado naturalmente para ocorrer a solidificação, formando os lingotes sólidos (Pasqua, 2024). A Figura 6 mostra um conjunto de lingotes de alumínio.

Figura 6. Lotes de lingotes de alumínio.



Fonte: Pasqua, 2023.

No lingotamento contínuo, que é muito utilizado na fabricação do aço, o metal fundido é direcionado para uma máquina conhecida como *tundish*. Em seguida o metal líquido é distribuído de maneira uniforme para garantir que o volume de vazamento do metal seja constante. O material fundido é conduzido para um molde de material refratário, onde ele é resfriado de forma gradativa. Esse resfriamento gradativo do material implica diretamente na qualidade final do produto. Por fim o material solidificado é encaminhado a máquinas automáticas de corte que por fim molda o material em placas ou tarugos (Saccheli, 2025).

Segundo Sacchelli (2025), o lingotamento contínuo possui diversas vantagens em relação ao tradicional, como por exemplo: melhor eficiência energética, melhor qualidade do metal devido a formação de estruturas mais homogêneas e produção mais sustentável. Após o processo de lingotamento contínuo, os materiais podem ser direcionados aos processos de conformação mecânica para obter os produtos laminados como folhas e chapas de metal. A Figura 7 mostra o lingotamento contínuo do aço.

Figura 7. Lingotamento contínuo do aço.

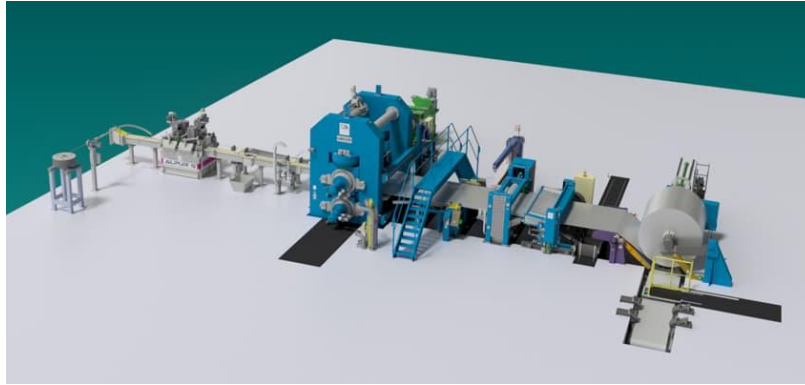


Fonte: Sachelli, 2025.

2.2.2 Etapa Downstream

Para se produzir os produtos oriundos do alumínio (transformados), é utilizado o alumínio primário, juntamente com o alumínio reciclado. Os dois tipos de alumínio são introduzidos em fornos juntamente com outros materiais para a formação da liga metálica. Esses outros materiais diferentes do alumínio são normalmente chamados de elementos de liga e são responsáveis por dar algumas propriedades mecânicas da liga final. A partir disso o alumínio líquido é solidificado e laminado em altas temperaturas, utilizando um tipo de máquina conhecida como *Caster*, um esquema da máquina está representado na Figura 8 (Brasil Alumínio, 2016).

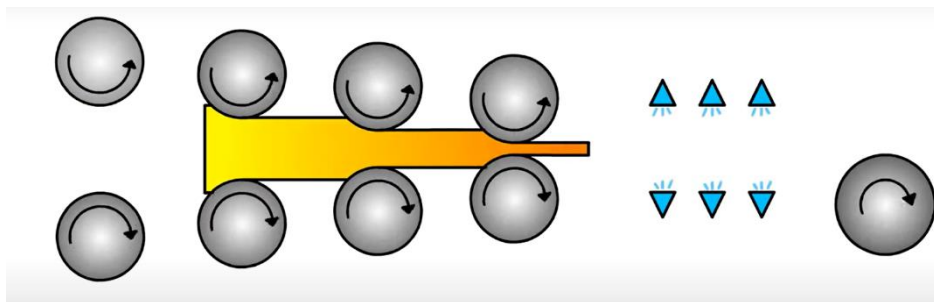
Figura 8. Representação de um laminador Caster.



Fonte: Novaelis, 2024.

Após a conformação do metal na máquina *Caster*, para se obter as chapas ou folhas de alumínio, o material deve passar pelo processo de laminação. Os laminadores geralmente são classificados de duas formas: Desbastador e acabador. O laminador desbastador é responsável por fazer o primeiro passe do material pela máquina, é nesse laminador que se tem a maior redução de espessura do material (CIMM, 2025). A Figura 9 mostra um esquema de como funciona um laminador desbastador a quente. Após o desbaste, o material é conduzido para um laminador acabador, que é responsável por laminar a chapa ou folha de alumínio para as espessuras finais. Além disso, este laminador também pode dar um acabamento na superfície da bobina de alumínio, como, por exemplo, perfilar (Infomet, 2025).

Figura 9. Esquema representativo de um laminador desbastador.



Fonte: CIMM, 2025.

Um dos insumos mais utilizados na laminação do alumínio é o óleo de laminação. O óleo é um composto muito importante, visto que ele é responsável pela lubrificação, refrigeração e proteção do material. O óleo de laminação pode ser classificado em três tipos: mineral, sintético e vegetal. A principal função do óleo é a lubrificação do material, visto que isto diminui o atrito entre o metal e os cilindros, evitando tanto o superaquecimento do material quanto o desgaste do cilindro, gerando um produto de maior qualidade e contribuindo para o aumento do tempo de vida da máquina (Solven, 2025).

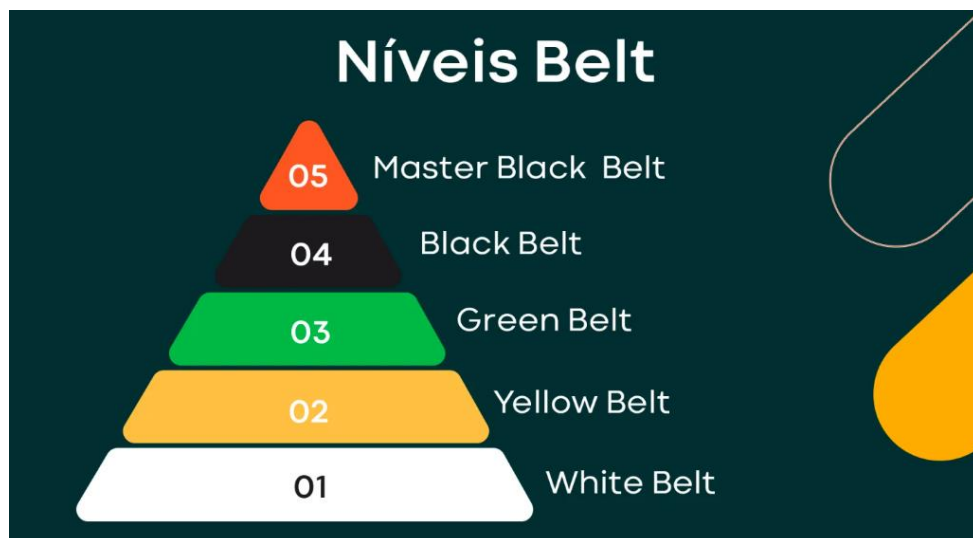
Na laminação a quente (acima do ponto de recristalização do metal), o óleo atua muito bem como refrigerante, visto que ele tem forte atuação na dissipação do calor e na proteção dos cilindros contra o superaquecimento. Quando se fala do alumínio, o óleo deve possuir uma série de propriedades como por exemplo: elevado ponto de fulgor, baixa pressão de vapor, ser um ótimo solvente, baixo odor e elevado nível de pureza, visto que muitas vezes o alumínio vai estar em contato direto com produtos do ramo alimentício (Cadium, 2020).

2.3 LEAN SIX SIGMA E A METODOLOGIA DMAIC

Com o aumento da industrialização, as perdas de clientes devido à falta de qualidade dos produtos ou à alta taxa de desperdícios se tornou um problema para as pequenas e grandes empresas. O termo Lean Six Sigma (LSS) vem da combinação das práticas do Lean Manufacturing, que é um sistema de produção enxuta, oriunda do Sistema Toyota de Produção com o Seis Sigma, que é uma série de práticas que visam minimizar os defeitos, utilizada inicialmente pela Motorola (Werkema, 2011).

Um projeto LSS busca então garantir a qualidade do produto e minimizar as perdas geradas por desperdícios na produção. Como em outros setores, também há uma hierarquia para os indivíduos capacitados a participarem de um projeto LSS. Essa hierarquia está representada na Figura 10.

Figura 10. Estrutura hierárquica da capacitação Lean Six Sigma.



Fonte: Menezes, 2024.

A diferença entre os níveis se dá devido ao treinamento, experiência e complexidade dos projetos. Um White Belt por exemplo, não pode liderar projetos LSS devido ao seu baixo

nível de conhecimento da ferramenta. Já um profissional Black Belt assume a liderança de projetos complexos, onde é necessário um profundo conhecimento sobre o processo e uma facilidade e experiência de ferramentas estatísticas que auxiliam na interpretação dos resultados (Menezes, 2024).

Um projeto de melhoria Lean Six Sigma muitas vezes é estruturado no modelo DMAIC que consiste em utilizar um conjunto de dados para identificar problemas, propor soluções, melhorar e otimizar resultados e controlar possíveis variações. Um projeto que utiliza a metodologia DMAIC deve seguir obrigatoriamente todas as fases de execução, onde cada fase pode utilizar ferramentas específicas (Jones; Dowdall, 2023).

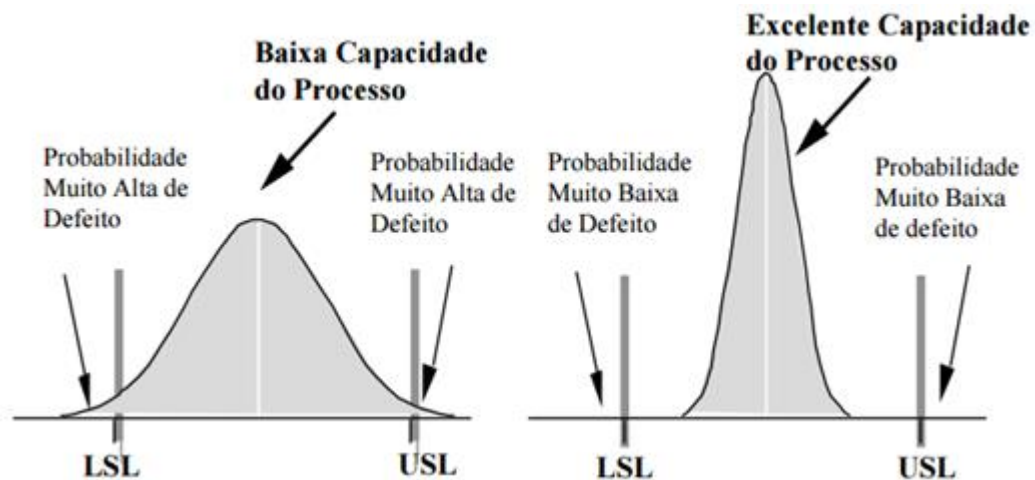
Segundo Mast e Lokkerbol (2012), a metodologia DMAIC pode ser amplamente utilizada no contexto de resolução de problemas, onde cada um dos seus estágios utilizam algumas ferramentas essenciais para o funcionamento da metodologia. A fase de medição, por exemplo, utiliza o SIPOC (Fornecedores, Entradas, Processo, Saída e Clientes), que é um diagrama resumido que tem a função de mapear os processos. As ferramentas da qualidade (Análise de Pareto, diagrama de causa e efeito, carta de controle, diagrama de dispersão etc.) também são ferramentas essenciais para garantir o funcionamento do ciclo.

2.4 ESTATÍSTICA E AS FERRAMENTAS DA QUALIDADE

A estatística é uma ferramenta poderosa na indústria, visto que é uma poderosa ferramenta para a garantia de qualidade do produto. Com a popularização do Lean Six Sigma, as indústrias têm utilizado cada vez mais a abordagem estatística para a análise dos seus resultados. Entre os diversos cálculos que podem ser utilizados, informações como a média, o desvio padrão e a variância de um determinado processo são informações cruciais para as análises (Santos; Antonelli, 2011).

Com o auxílio da estatística, diversas análises podem trazer informações importantes sobre o processo, como por exemplo, realizar um teste de hipóteses para averiguar se uma determinada hipótese sobre um grupo amostral é verdadeira ou não. Outra ferramenta muito importante utilizada é a análise de capacidade (ou capacidade), que verifica se um processo é capaz de produzir dentro das especificações definidas (Montgomery; Runger, 2021). A Figura 11 mostra a comparação dos dados entre um processo com alta capacidade (capaz) e um processo com baixa capacidade (incapaz).

Figura 11. Representação da capacidade de um processo.

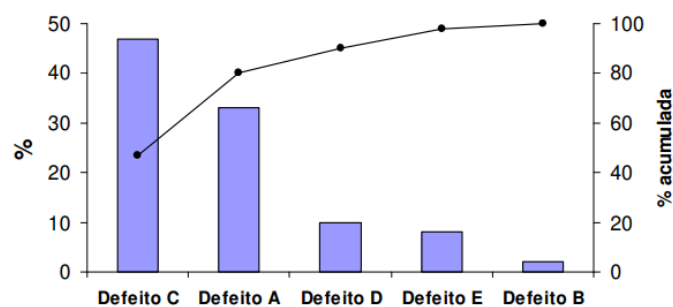


Fonte: Coutinho 2020.

Segundo Marques (2012), as ferramentas da qualidade são um conjunto de técnicas, geralmente gráficas que tem como objetivo identificar e solucionar um problema em relação a qualidade de um determinado produto ou processo. As ferramentas da qualidade são: folha de estratificação, diagrama de Pareto, histograma, diagrama de causa e efeito, folha de verificação, cartas de controle e gráfico de dispersão. O uso desse conjunto de ferramentas é muito importante para a solução ou melhoria de um determinado processo, porque através delas além de observar o problema, também é possível observar as causas dele e o nível de recorrência dessas possíveis causas.

O diagrama de Pareto é um gráfico de barras que tem a finalidade de mostrar a frequência de um determinado acontecimento, seja ele um defeito ou alguma reclamação. Através do diagrama de Pareto é possível identificar qual problema deve ser solucionado preferencialmente, visto que problemas com maior incidência tem uma maior priorização na busca de soluções (Marques, 2012). A Figura 12 mostra o exemplo de um gráfico de Pareto.

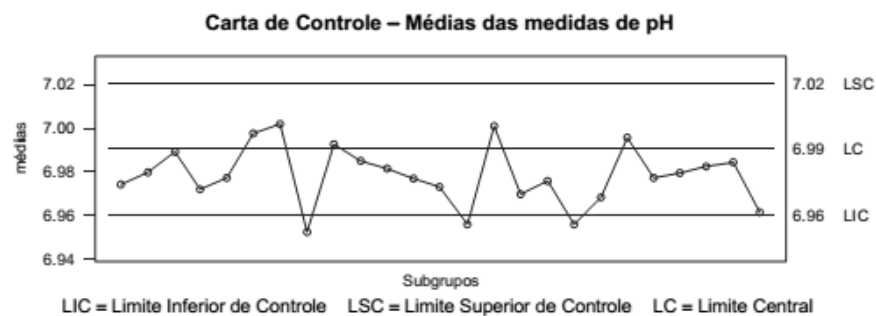
Figura 12. Exemplo de um gráfico de Pareto.



Fonte: Marques, 2012.

A carta de controle (ou gráfico de controle) é um gráfico de controle estatístico de um processo que consiste em uma série temporal que mostram informações sobre um determinado processo, seja a média, o desvio padrão ou a amplitude, por exemplo. Foi inicialmente desenvolvido por Walter A. Shewhart. Nesse gráfico é possível comparar as informações com limites de controle calculados ou pré-estabelecidos, sendo possível assim visualizar se o processo está sob controle ou se está ocorrendo um possível desvio devido à alguma causa especial (Amante, 2021). A Figura 13 mostra um exemplo de uma carta de controle.

Figura 13. Representação de um gráfico de controle.

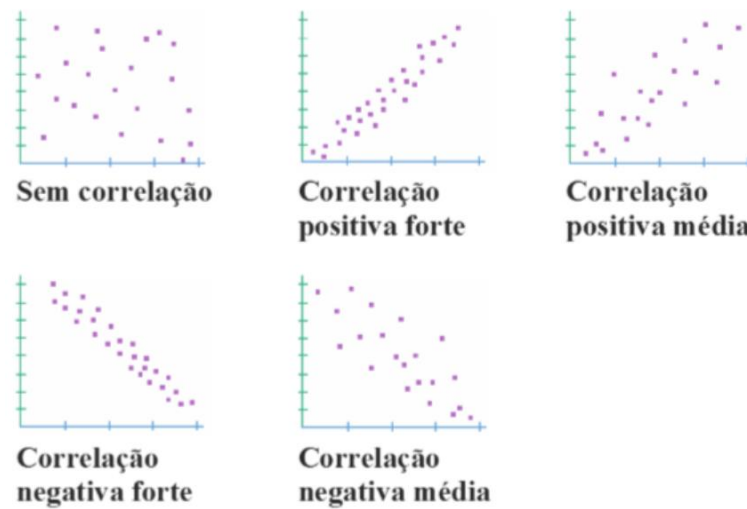


Fonte: Silva, 2020.

A folha de estratificação é um documento que organiza e separa um conjunto de dados de acordo com a semelhança e o comportamento desse conjunto. A estratificação dos dados é muito importante no auxílio da visualização de tendências e otimização de processos. Já a folha de verificação tem a finalidade de coletar dados e organizar os dados. A coleta de dados é uma etapa muito importante para a metodologia DMAIC, e essa coleta deve ser bem estruturada para evitar falhas no processo de análise de dados (Amante, 2021).

O gráfico de dispersão é um gráfico que pode relacionar duas ou mais variáveis. Basicamente o gráfico consiste em um plano de coordenadas cartesianas onde estão representados um conjunto de dados, onde o objetivo dele é verificar possíveis relações entre essas variáveis. Nesse tipo de gráfico é possível verificar se a correlação entre duas variáveis é forte ou nula. É uma ferramenta muito útil para relacionar variáveis no processo (Frons, 2020). A Figura 14 apresenta alguns exemplos de gráficos de dispersão.

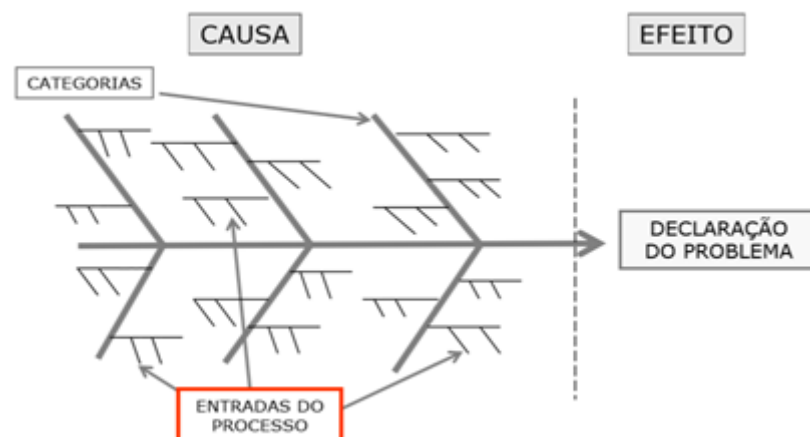
Figura 14. Tipos de relações em gráficos de dispersão.



Fonte: Frons, 2020.

O histograma consiste em um gráfico de barras retangulares que tem como objetivo representar a frequência de um determinado valor dentro de um conjunto de variáveis. É uma ferramenta muito útil para conferir a simetria, amplitude e centralização de um conjunto de dados. Já o diagrama de Ishikawa consiste em uma representação gráfica que tem como objetivo encontrar a causa de um determinado problema. A ferramenta une um conjunto de ideias subdivididas em tópicos para encontrar as possíveis causas e avaliar qual causa é a mais provável de ter relação com o problema (Coutinho, 2019). A figura 15 mostra um esquema de um diagrama de Ishikawa.

Figura 15. Representação de um diagrama de Ishikawa.



Fonte: Coutinho, 2019.

Embora existam discussões sobre ser ou não uma ferramenta da qualidade, o fluxograma é um item muito útil na resolução de um problema. O fluxograma consiste em um diagrama que mostra de forma sequencial e simples o fluxo de um determinado processo, ajudando na visualização e mapeamento do processo em questão. Um fluxograma pode ser tanto simples, com figuras geométricas simples e de fácil compreensão, quanto um mais avançado, mostrando equipamentos e linhas de produção.

3 METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido em uma fábrica de alumínio no estado de Pernambuco, onde foi utilizada a metodologia DMAIC. Essa metodologia foi escolhida por ser amplamente utilizada no ramo industrial. Juntamente com o DMAIC, foram utilizadas ferramentas estatísticas como Excel e Minitab, além de terem sido utilizadas algumas ferramentas da qualidade para facilitar as análises. O presente trabalho utiliza esse conjunto de ferramentas para melhorar a eficiência da recuperação do óleo de laminação.

3.1 CONSTRUINDO O INDICADOR E ENTENDENDO O PROBLEMA

Foi utilizado o *software* Minitab, que é um programa que reúne um conjunto de ferramentas estatísticas. A partir desse aplicativo foi possível observar o valor médio do conjunto de dados, bem como o desvio padrão. Os dados foram coletados pela produção, onde o principal indicador foi calculado utilizando a equação 1:

$$\text{óleo recuperado} = \frac{V}{M} \quad (1)$$

Onde V é o volume de óleo em litros que é captado na saída do destilador e M é a massa de alumínio laminado em toneladas. O indicador (em L/ton) mede a eficiência da recuperação de óleo de laminação dos laminadores, dependendo tanto da quantidade de alumínio que é laminado (fator que não depende do sistema de recuperação) quanto do volume de óleo recuperado (fator que pode depender da eficiência de recuperação do sistema). Então obviamente, quanto maior o volume de óleo recuperado para uma quantia fixa de alumínio que é processado, mais eficiente é a planta de recuperação.

3.2 ETAPAS DA METODOLOGIA DMAIC

O trabalho utiliza a estrutura da metodologia DMAIC montada em 5 passos: definir, medir, analisar, melhorar e controlar. As ferramentas utilizadas em cada etapa foram escolhidas de forma que facilitasse o entendimento dos dados e auxiliasse a análise, para pôr fim, sugerir ações de melhoria e avaliar os possíveis resultados. A seguir é exibido o detalhamento de cada etapa, bem como as ferramentas que são utilizadas em cada uma, de forma que torne cada etapa sistêmica e de fácil entendimento.

3.2.1 Definir

Na etapa definir, foi observado o problema em relação à baixa eficiência da planta de recuperação de óleo. Com isso foram comparadas as médias dos últimos 10 meses que antecederam o início do projeto. O valor nominal do indicador foi calculado utilizando o *software* Excel, já os demais valores estatísticos foram calculados utilizando o Minitab. Logo em seguida foi definida a meta desejada do indicador, que foi no valor de 12,96 L/ton (com base na equação 1).

Por fim, nesta etapa foi feita o diagrama SIPOC para entender de forma superficial como o processo funciona, buscando entender as variáveis de processo e como as entradas e os fornecedores afetam o resultado na recuperação.

3.2.2 Medir

Durante a etapa medir, foram coletados todos os dados históricos aferidos (no período de 10 meses). Em seguida, foi utilizado o Minitab para construir o sumário gráfico, onde é possível ver um resumo de medidas estatísticas como média (μ), desvio padrão (σ) e o número de amostras do conjunto de dados (n). Também foi elaborado o fluxograma do processo para poder identificar os possíveis pontos na linha de produção onde poderiam se concentrar os principais problemas.

Por fim, foi feita a análise de capacidade do processo, em que neste caso, o problema só possui um limite de controle, que foi a meta mínima de 12,96 L/ton, se caracterizando como Limite Inferior de Especificação (LIE), e um valor desejável de 22,96 L/ton, sendo o Limite Superior de Especificação (LSE).

3.2.3 Analisar

Com o início da etapa analisar, foi montada uma equipe multidisciplinar contendo engenheiros, operadores e técnicos em manutenção para realizar uma *Brainstorming*. Logo em seguida foi feito um diagrama de Ishikawa para analisar como as causas se relacionam com o problema no indicador. Em seguida, foi feita uma matriz de priorização para analisar quais das causas levantadas provavelmente tinham maior impacto sobre a causa levantada.

3.2.4 Melhorar

Após o mapeamento das possíveis causas, foi montado o plano de ação para atacar as possíveis causas principais que foram identificadas. Para isso, foi utilizada a técnica dos 5 porquês para entender como o determinado problema afeta o sistema de separação. Após entender as causas, foi utilizada a ferramenta 5W1H para ser possível montar o plano de ação para atuar no sistema. Esta ferramenta permite montar ações lógicas para solucionar o problema, deixando claro os responsáveis de cada ação, além da maneira que essas soluções são implementadas.

3.2.5 Controlar

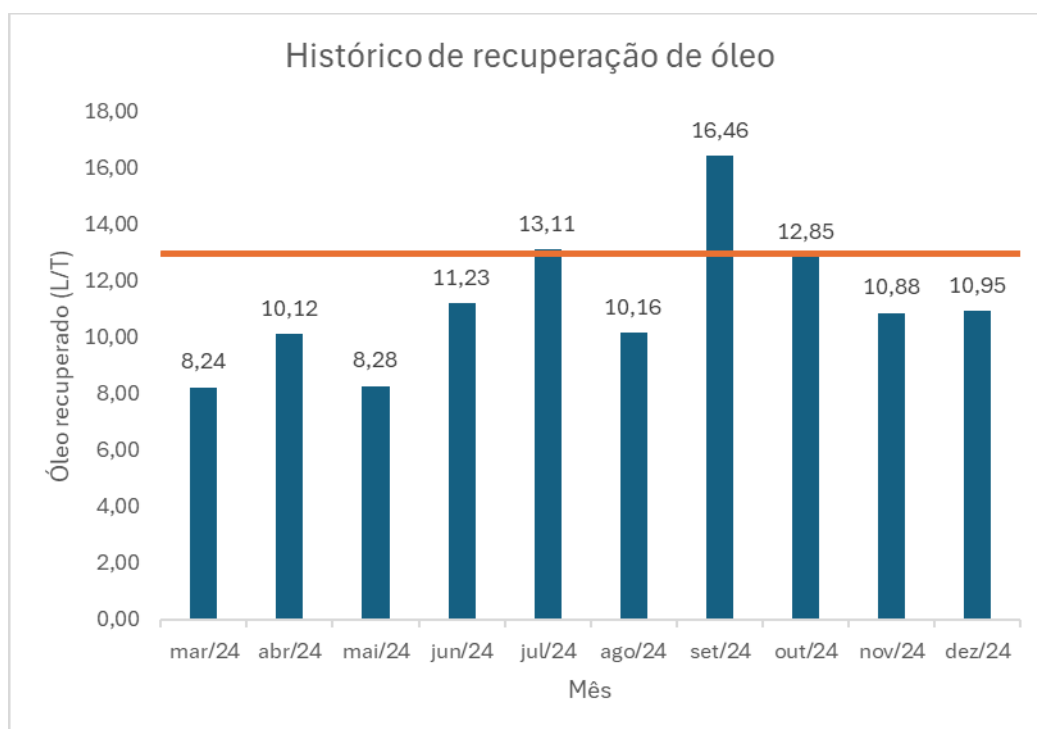
Na última fase do ciclo DMAIC, foram analisados os dados obtidos diariamente após a implementação das ações. Com isso, foram comparados os valores médios e o desvio padrão das amostras após a implementação das ações. Logo em seguida, foi feita a análise de capacidade do processo para observar a melhoria do processo. Por fim, foram levantadas uma série de possíveis ações que auxiliassem na melhoria dos resultados, bem como diminuir o valor do desvio dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 HISTÓRICO DE RECUPERAÇÃO

O estudo de caso foi aplicado em um processo de recuperação de óleo de laminação que foi utilizado em três laminadores em uma fábrica de alumínio. Ao longo da produção do produto (folhas e chapas), o processo de laminação é utilizado para diminuir a espessura do alumínio. Na laminação, um dos principais insumos utilizados é o óleo de laminação, onde o uso dele previne até mesmo incêndios. A meta de óleo recuperado (em L/ton) é de 12,96 L/ton, onde este parâmetro deve ser controlado para garantir a eficiência mínima desejada da planta de recuperação. No entanto, ao longo dos meses foram observados valores abaixo desta meta de recuperação. A Figura 16 mostra o valor médio da recuperação de óleo mensal.

Figura 16. Média mensal da recuperação do óleo de laminação.



Fonte: O autor, 2025.

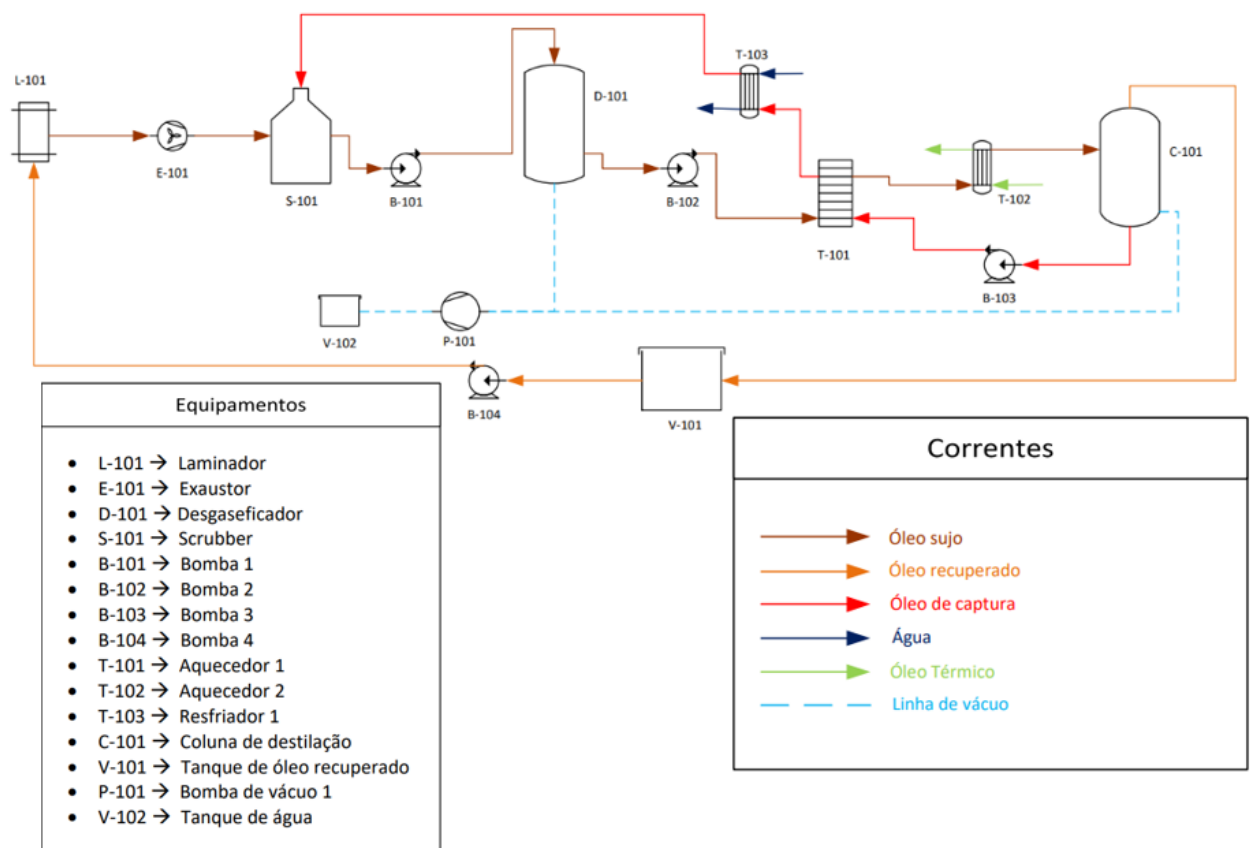
É possível observar que a maioria dos meses observados manteve um valor bem abaixo da meta de recuperação. Apenas o mês de setembro esteve acima do valor desejável de forma significativa, devido ao aumento da produção e a uma manutenção feita no sistema de destilação.

4.2 IMPLEMENTAÇÃO DO DMAIC

4.2.1 Definir

A unidade de recuperação de óleo é formada por diversos equipamentos, onde as principais etapas do processo são a absorção, a remoção de gases (desgaseificação) e a destilação. A Figura 17 mostra um fluxograma resumido do processo de recuperação de óleo.

Figura 17. Fluxograma do processo.

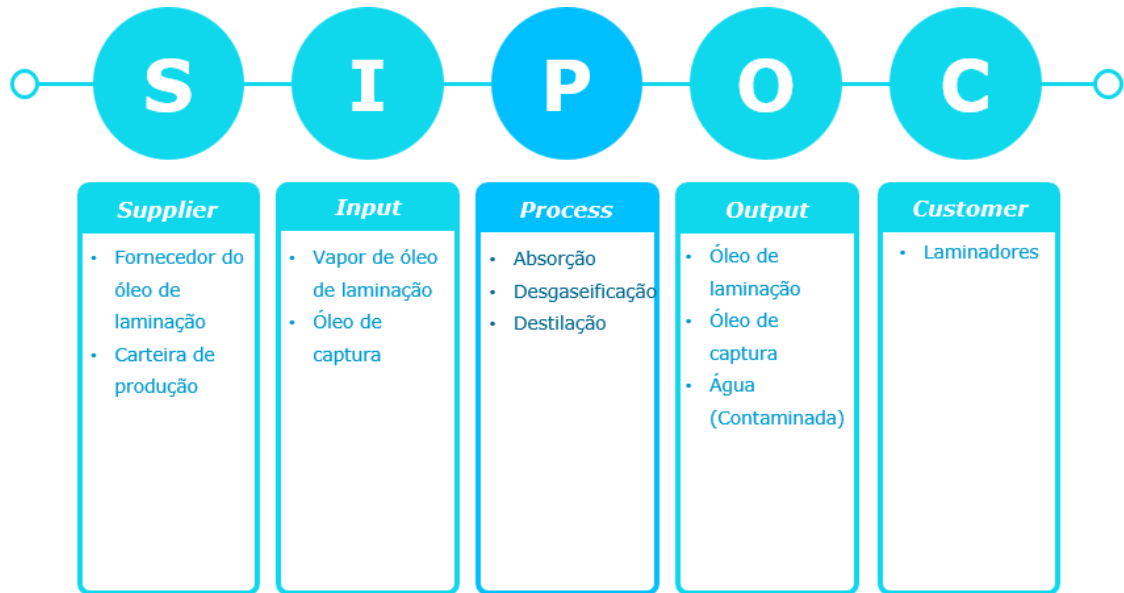


Fonte: O autor, 2025.

Inicialmente o óleo de laminação (na fase de vapor) é encaminhado para uma torre de absorção (Scrubber), onde um óleo de captura absorve o composto orgânico, juntamente com algumas impurezas como água e gás carbônico. Em seguida a mistura é encaminhada para um desgaseificador (D-101) que separa as impurezas do conjunto de óleos. A fase seguinte consiste em aquecer a mistura para encaminhar para uma coluna de destilação a vácuo (C-101), onde O óleo de laminação, que é o elemento mais leve, sai pela corrente de topo, e o óleo de captura é redirecionado para o Scrubber (S-101). Por fim, o óleo recuperado é armazenado em tanques de plástico para depois ser redirecionado para os laminadores.

A Figura 18 mostra o diagrama SIPOC do processo, em que é possível entender as principais entradas e saídas do processo.

Figura 18. Diagrama SIPOC do processo de recuperação de óleo.



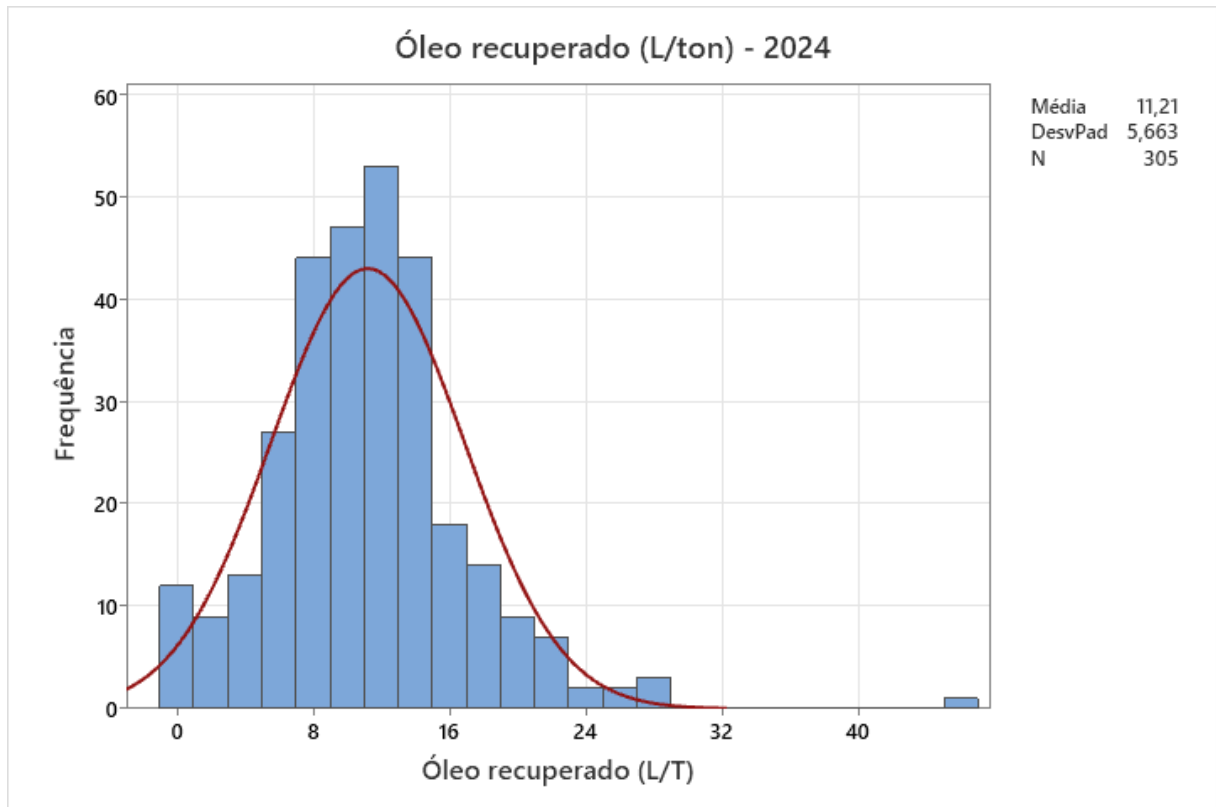
Fonte: O autor, 2025.

A carteira de produção atua comprando o óleo de laminação ao fornecedor a um valor aproximado de 8 reais por litro de óleo. Neste processo as entradas são o óleo de laminação (contaminado) e o óleo de captura. Em seguida o conjunto de operações unitárias do processo de separação dos óleos e da água, que é o principal contaminante do sistema, podendo gerar problemas no processo, inclusive danificando as bombas de vácuo. Por fim, os principais clientes deste processo são os próprios laminadores, que utilizam o insumo para sua operação.

Dessa forma, foi definida uma equipe multidisciplinar (operadores, eletricitas, mecânicos, engenheiros e técnicos) para atuar na medição e solução nas demais etapas da metodologia DMAIC.

4.2.2 Medir

Após a definição do problema e analisado os valores mensais, foram coletados os valores individuais de cada mês, onde foram feitas as análises estatísticas em cima do problema utilizando o *software* Minitab. A Figura 19 mostra um histograma dos dados referentes a 2024.

Figura 19. Histograma dos dados históricos.

Fonte: O autor, 2025.

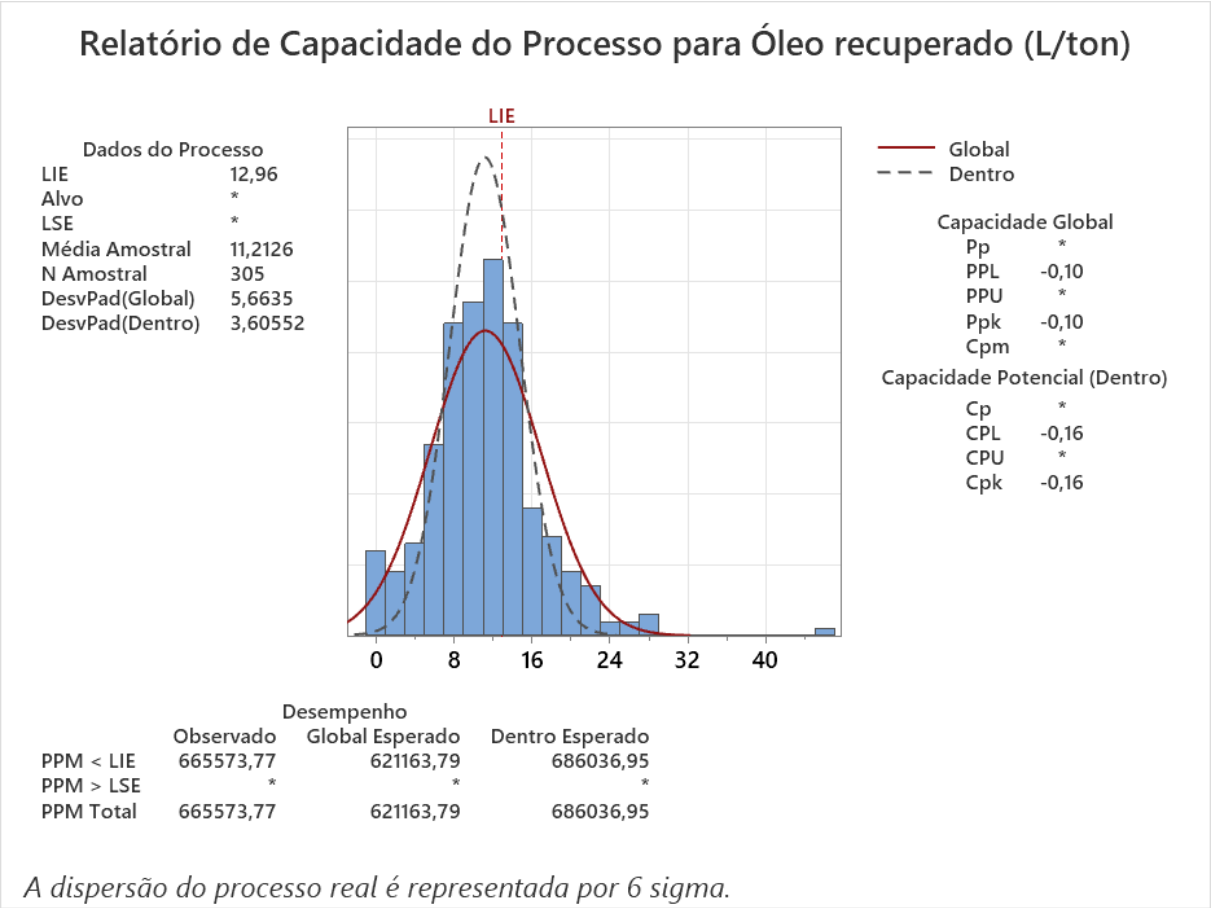
É possível observar que a média geral dos valores se encontra abaixo da meta mínima de 12,96 L/ton, além disso o processo apresentou um alto desvio padrão, mostrando que o processo tem uma alta variação de resultados, o que pode indicar um processo incapaz. Um parâmetro que mede a capacidade do processo é o índice C_{pk} , onde caso esse valor seja abaixo de 1,0, o processo é considerado incapaz. A Tabela 1 mostra um resumo estatístico do conjunto de dados, enquanto a Figura 20 mostra o teste de capacidade do processo.

Tabela 1. Resumo da estatística descritiva dos dados de 2024.

Média	Desvio padrão	1º Quartil	Mediana	3º Quartil
11,21	5,66	8,11	11,00	13,97

Fonte: O autor, 2025.

Figura 20. Análise da capacidade do processo.



Fonte: O autor, 2025.

É possível observar que o baixo valor médio combinado com o alto desvio padrão comprometeu a capacidade do processo, visto que o índice C_{pk} foi de $-0,16$. Além disso, a mediana do processo (valor central do conjunto de dados) foi abaixo da meta desejada, quando o ideal é que ela seja o mais próximo possível da meta e com um baixo desvio padrão. Para aumentar a capacidade do processo, deve-se aumentar o índice C_{pk} através de um conjunto de ações que procurem melhorar o processo.

4.2.3 Analisar

Após verificar a baixa eficiência do sistema, foi convocada uma equipe multidisciplinar, onde foram indagadas as possíveis causas do problema. Para avaliar quais causas foram as mais importantes, foi construída uma matriz de priorização, onde a importância de cada problema era indicada por 9 para muito provável, 3 para média relação e 1 para pouco provável. A pontuação geral de cada problema foi feita realizando a soma de cada valor atribuído pelos

membros da equipe, onde cada membro poderia atribuir duas notas 9, quatro notas 3 e seis notas 1, totalizando 36 pontos por participante. A Tabela 2 mostra o *brainstorming* juntamente com as causas mais prováveis indicadas em amarelo.

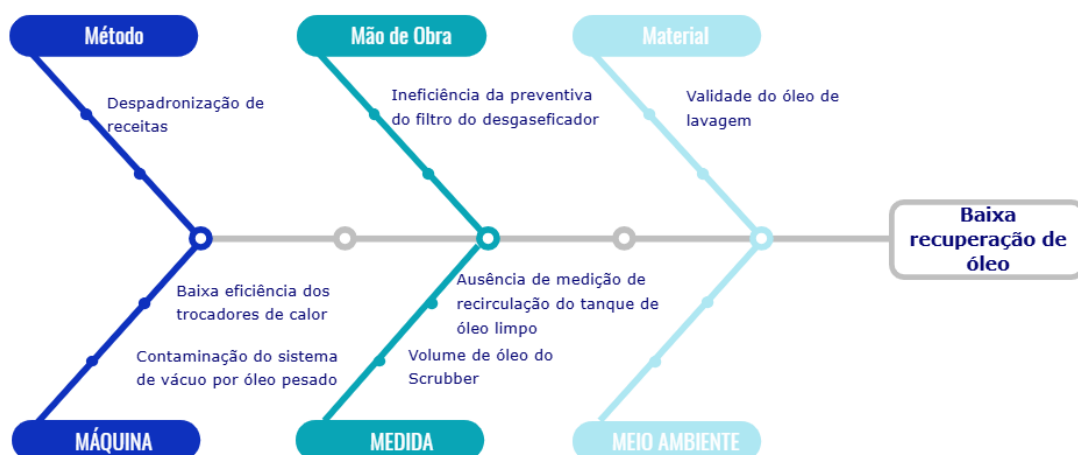
Tabela 2. Matriz de priorização da baixa eficiência de recuperação de óleo de laminação.

Pergunta:	Participantes					
	Produção	Mecânico	Eletricista	Operador	Engenheiro	
Por que há uma baixa eficiência de recuperação do óleo de laminação?						
Baixa eficiência dos trocadores de calor	3	3	9	9	9	33
Contaminação por água (sistema retificador)	9	3	3	3	9	27
Ineficiência do sistema de bombas de vácuo	9	1	9	3	1	23
Contaminação do sistema de vácuo por óleo pesado	3	1	3	9	3	19
Despadronização de receitas	3	1	3	3	3	13
Ineficiência do sistema de bombas de recirculação	3	3	1	1	1	9
Ausência da medição de recirculação do tanque de óleo limpo	1	1	1	1	1	5
Ineficiência da preventiva do filtro do desgaseificador	1	1	1	1	1	5
Ineficiência do sistema termofluido	1	3	1	1	3	9
Ineficiência do sistema de exaustão das coméias	1	1	1	1	1	5
Perda de vapor de óleo pelo exaustor	1	9	3	3	1	17
Validade do óleo de lavagem	1	9	1	1	3	15
Volume de Óleo do Scrubber (Óleo de Captura)	0	0	0	0	0	0
Anel de dispersão do Desgaseificador (pressão para remossão de água)	0	0	0	0	0	0
Total por participante	36	36	36	36	36	180

Fonte: O autor, 2025.

Com base nas ideias levantadas e no fluxograma do processo, foi montado um diagrama de causa e efeito (Ishikawa) para compreender onde algumas dessas causas atuavam no sistema com base em 6M's: Método, mão de obra, material, máquina, medida e meio ambiente, onde apenas 5 desses tópicos foram utilizados. A Figura 21 mostra um diagrama de causa e efeito com algumas das ideias que foram levantadas.

Figura 21. Diagrama de causa e efeito do problema.



Fonte: O autor, 2025.

Ao analisar a Figura 18, que na categoria de máquina, foram incluídos alguns dos principais problemas levantados na matriz de priorização. Um desses problemas foi a baixa eficiência dos trocadores de calor e a contaminação do sistema de vácuo por óleo pesado (óleo utilizado como fluido térmico para resfriamento em um dos trocadores de calor).

Outros problemas como a ineficiência do sistema de vácuo podem se enquadrar nesta categoria. A ineficiência da preventiva do filtro, que foi enquadrada como mão de obra também é um ponto a ser considerado. Outros pontos, como a perda de vapor de óleo no sistema exaustor e a validade do óleo de lavagem, não foram subdivididos no diagrama de causa e efeito. Porém eles possuem impacto sobre o processo, alterando a qualidade do fluxo produtivo.

Levando em consideração as análises levantadas acima, foram identificadas oportunidades de melhoria nos trocadores de calor, no sistema de bomba de vácuo e no sistema retificador (que é responsável pela recuperação e purificação do óleo recuperado na forma líquida).

Foi verificado que a provável causa da baixa eficiência do trocador de calor se deu pela presença de sujeiras e incrustações no sistema de troca térmica. A incrustação pode ocorrer por diversos fatores, como por exemplo o acúmulo de elementos orgânicos, como óleos e gorduras ou também através da precipitação de sais. A condutividade térmica dos metais no geral é maior do as dos demais materiais da natureza, justificando então o uso na construção de trocadores de calor (Incropera, 2008). A Tabela 3 mostra a condutividade térmica k em $W/(m.K)$ de alguns materiais a 300K.

Tabela 3. Condutividade térmica de alguns materiais.

Material	Condutividade térmica (W/m.K)
Alumínio puro	237
Cobre puro	401
Asfalto	0,062
Papel	0,180

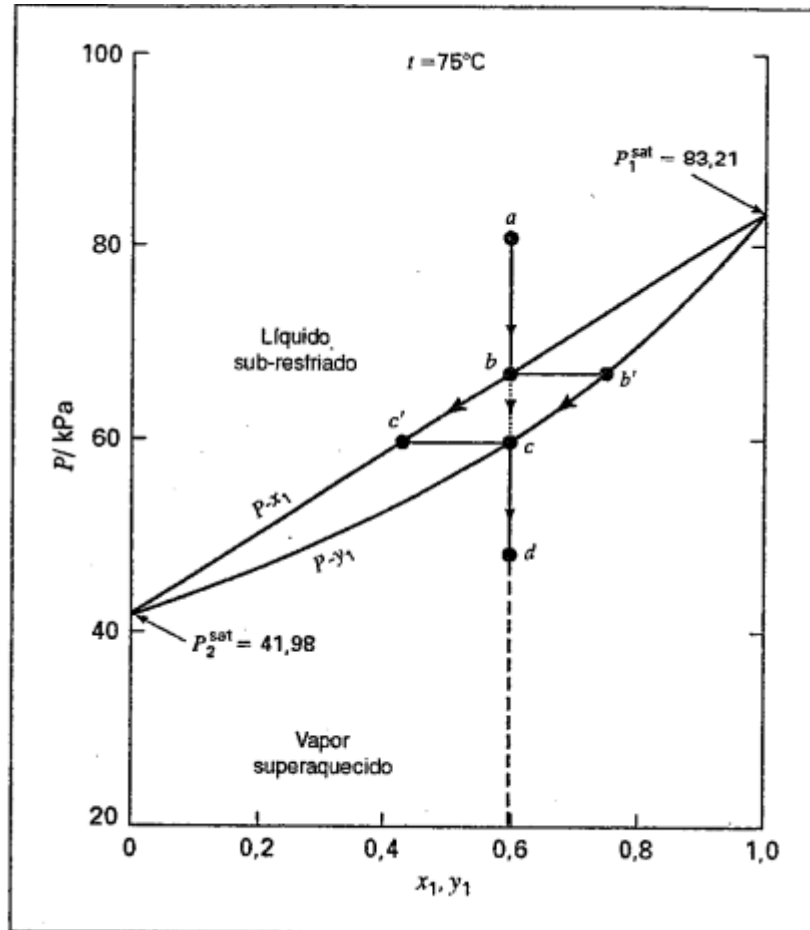
Fonte: Adaptado de Incropera, 2008.

A presença de impurezas e incrustações pode formar uma película de material que se deposita na parede das tubulações dos trocadores de calor, e por essas incrustações possuírem uma condutividade térmica muito baixa (ou seja, uma alta resistência térmica), a eficiência da troca de temperatura é comprometida, resultando em uma temperatura de saída da mistura menor do que a necessária para realizar a destilação de forma eficiente.

O sistema de bombas de vácuo também foi identificado como um ponto de melhoria que poderia ser eficaz na resolução do problema. Neste caso, foi observado que uma das bombas do sistema de vácuo não estava em operação. A pressão é uma propriedade muito importante

na termodinâmica, tendo impacto direto na volatilidade dos compostos. A Figura 22 mostra um exemplo de diagrama de equilíbrio de fases que relaciona a pressão com as frações de líquido e vapor do sistema binário acetonitrila e nitrometano.

Figura 22. Diagrama ELV do sistema acetonitrila e nitrometano a 75 °C.



Fonte: Smith e Van Hess, 2007.

É possível observar que em sistemas que envolvem destilação, quanto menor a pressão, maior é a fração de vapor do elemento (y_n). Esse acontecimento se deve porque há uma pressão menor sobre as moléculas, facilitando que o sistema se torne vapor. Portanto, é possível concluir que ao apresentar um sistema de vácuo eficiente, o processo de destilação dos óleos deverá apresentar resultados melhores.

Com o conhecimento desses possíveis pontos de melhoria, foi iniciada a próxima fase do ciclo (melhorar), com intuito de se aprofundar em cada problema e montar um plano de ação para aperfeiçoar o processo.

4.2.4 Melhorar

Após o mapeamento do processo e a análise das possíveis causas, foi utilizada a técnica dos 5 porquês para tentar chegar na causa raiz de cada problema, onde após isso, foi construído um plano de ação simplificado que seguiu o método 5W1H para ser elaborado. A Tabela 4 mostra o resultado dos 5 porquês dos principais problemas.

Tabela 4. Causas dos principais problemas.

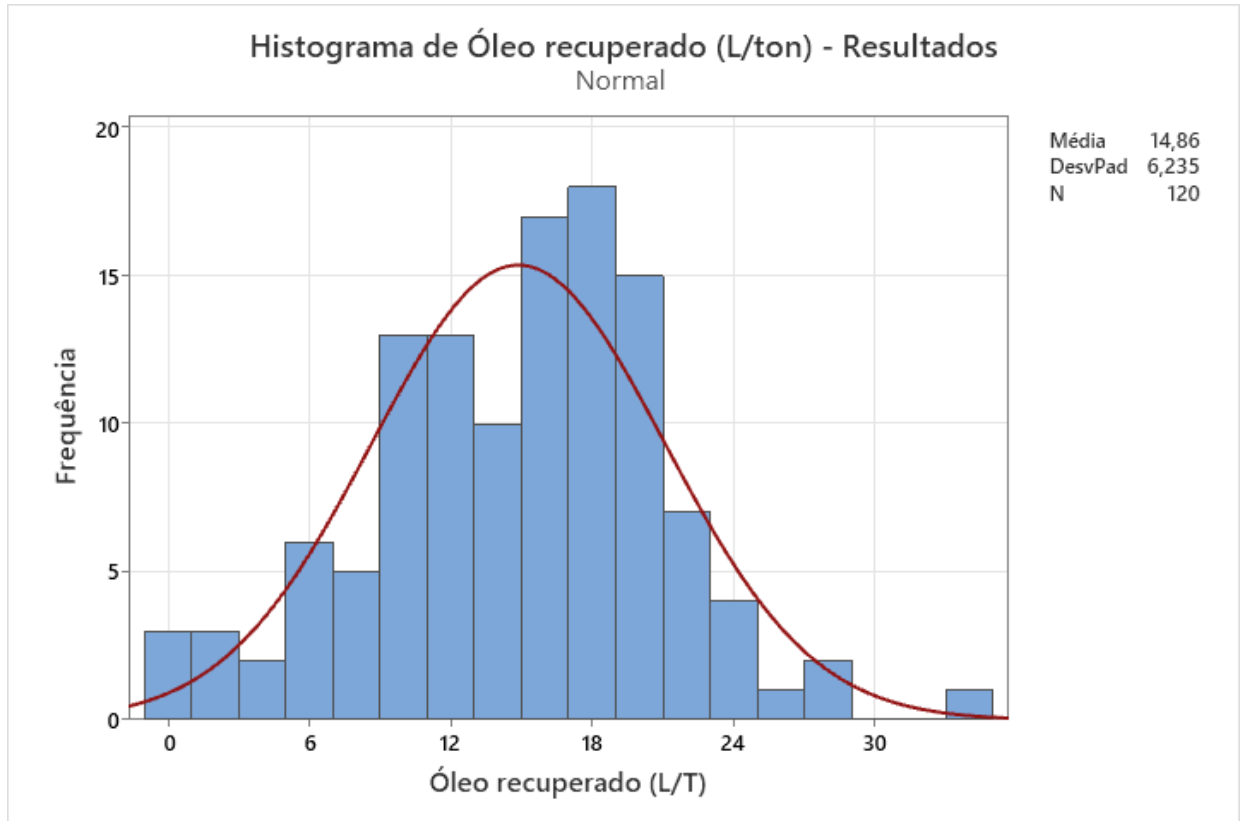
Efeito	1° Por que	2° Por que	3° Por que	4° Por que	5° Por que
Baixa eficiência dos trocadores de calor	Obstrução no sistema de troca térmica	Óleo com presença de impurezas	Baixa eficiência do filtro de pressão	Filtro obstruído por excesso de impurezas	Junção de impurezas do óleo e do sistema de exaustão
Ineficiência do sistema de bomba de vácuo	Restabelecimento do sistema reserva de vácuo	Falta de componentes da unidade reserva	Componente utilizados em outros sistemas de vácuo	Quantidade insuficiente de sobressalentes para as demais linhas	Restabelecer a manutenção para o sistema de vácuo
Contaminação do sistema retificador por água	Água no óleo a retificar	Presença de água no tanque de óleo a retificar	Tanque com excesso de sujeira	Ineficiência do filtro de manga	Manga saturada ou rompida

Fonte: O autor, 2025.

Com base nos problemas identificados, foram executadas pelos membros da equipe uma série de ações para melhorar o sistema. As medidas mais efetivas envolveram a troca dos filtros e estabelecer rotina de inspeção do sistema de troca de calor, onde os resultados foram observados e analisados na fase de controle.

4.2.5 Controlar

Na etapa de controle, foram coletados os resultados após a instauração do plano de ação e avaliado os resultados. Foram coletados os dados até julho, onde o valor médio do óleo recuperado foi analisado, a Figura 23 mostra um histograma contendo os resultados, onde os dados foram avaliados utilizando o *software* Minitab.

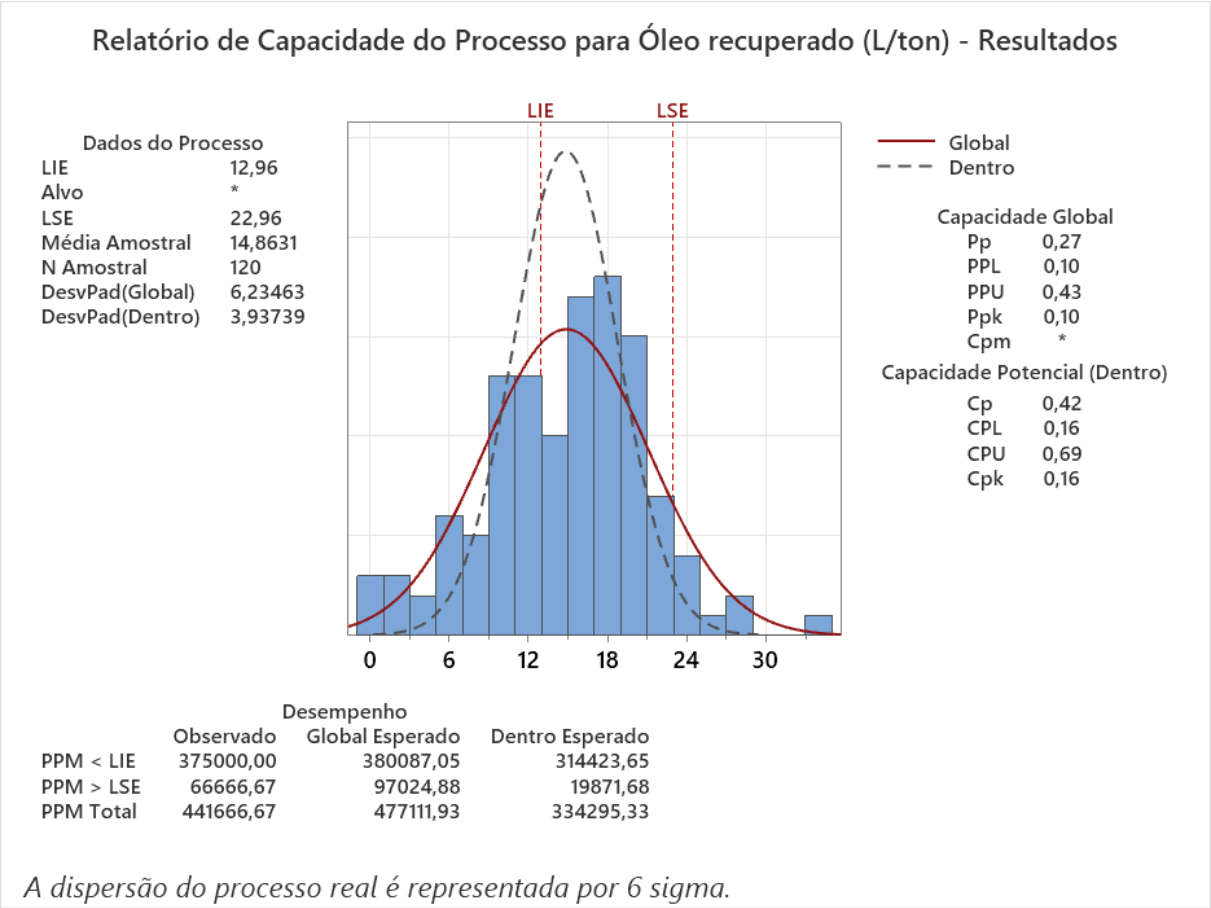
Figura 23. Resultado após o plano de ação.

Fonte: O autor, 2025.

É possível observar que o valor médio de óleo recuperado teve um aumento para 14,86 L/ton, representando um aumento de aproximadamente 32,6% em relação ao valor inicial. No entanto também houve um aumento no desvio padrão, o que indica maior flutuação dos resultados. A mediana do conjunto de dados foi no valor de 15,87 L/ton e o valor do primeiro quartil aumentou para 10,68 L/ton, comprovando que realmente houve um aumento significativo nos valores.

Após realizar um resumo dos dados estatísticos, foi feita a análise de capacidade do processo com o intuito de avaliar seu rendimento. A Figura 24 mostra o resultado da análise de capacidade dos resultados do projeto.

Figura 24. Análise da capacidade dos resultados.



Fonte: O autor, 2025.

Os resultados mostram que o índice C_{pk} aumentou, mostrando que a capacidade global do processo aumentou. No entrando, o aumento do desvio padrão teve um impacto negativo no índice C_p , mostrando que a capacidade potencial do processo pode ser futuramente afetada, devido ao alto aumento do desvio padrão. Mesmo com o aumento na recuperação do óleo de laminação, deve-se tomar mais medidas para diminuir o desvio do processo, para o tornar um processo capaz e para posteriormente aumentar ainda mais a meta mínima de recuperação. Algumas possíveis sugestões para aumentar o rendimento no processo seriam: manter um calendário regular de manutenção preventiva nos trocadores de calor e nos sistemas de bomba de vácuo, compra e utilização de sistema de controle e automação da temperatura de entrada do destilador. Por fim, criar Procedimentos Operacionais Padrão (POP's) para auxiliar na operação e manutenção da planta de separação.

5 CONCLUSÃO

A metodologia DMAIC foi utilizada para aumentar a eficiência na planta de recuperação de óleo de laminação, onde houve um aumento de 32,6% no volume de óleo recuperado, mostrando que a ferramenta é eficaz para realizar projetos de melhoria. O plano de ação foi montado com base em uma equipe multidisciplinar para atacar o problema, podendo ser novamente utilizado para realizar outras melhorias na planta.

Ao longo da aplicação do projeto, foi possível entender melhor como essas ferramentas de melhoria funcionam, além de adicionar conhecimento técnico sobre o processo de laminação, absorção e destilação. O estudo permitiu conhecer também sobre todo o processo de produção de alumínio, auxiliando a compreender que a qualidade dos produtos pode ser afetada desde o processo de refusão do alumínio, até a etapa final de laminação.

O projeto contribuiu para aperfeiçoar os conhecimentos a respeito de melhoria contínua, além de revisar conceitos básicos sobre engenharia química como transmissão de calor e operações unitárias e aperfeiçoando os conhecimentos sobre a indústria do alumínio.

REFERÊNCIAS

ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Investimento do setor de alumínio cresce 58% e chega a R\$ 1,9 bilhão em 2022, aponta anuário da ABAL**. São Paulo, 2023. Disponível em: <<https://abal.org.br/noticia/investimento-do-setor-de-aluminio-cresce-58-e-chega-a-r-19-bilhao-em-2022-aponta-anuario-da-abal/>>. Acesso em: 19 jun. 2025.

ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Cadeia Primária**. 2023. Disponível em: <<https://abal.org.br/aluminio/cadeia-primaria/>>. Acesso em: 26 jun. 2025.

ALBRAS. **Como é feito o alumínio**. 2025. Disponível em: <<https://albrasaluminio.com.br/aluminio-e-produtos/>>. Acesso em: 19 jun. 2025.

ALVES, F. Manutenção Produtiva Total: entenda e aplique os 8 pilares do TPM!. **Kimia**, 2020. Disponível em: <<https://www.kimia.com.br/manutencao-produtiva-total-saiba-mais-sobre-os-pilares-do-tpm/>>. Acesso em: 20 jun. 2025.

AMANTE, L. A. et al. **Gestão da Mudança através do método PDCA: Estudo de caso em uma indústria**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

BRASIL ALUMÍNIO. **Ciclo da laminação**. Disponível em: <https://brasilaluminio.com/lamination_cycle>. 2016. Acesso em: 23 jun. 2025.

CADIUM. **Óleo de laminação de alumínio: escolhendo o melhor lubrificante**. Disponível em: <<https://cadium.com.br/oleo-de-laminacao-de-aluminio-escolhendo-do-melhor-lubrificante/>>. 2020. Acesso em: 17 mai. 2025.

CBA - COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **Nossa história**. Disponível em: <<https://ri.cba.com.br/a-cba/nossa-historia/>>. 2025. Acesso em: 20 jun. 2025.

CBA - COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **Produtos transformados**. Disponível em: <<https://www.cba.com.br/produtos/produtos-transformados/>>. 2025 Acesso em: 20 jun. 2025

CIMM – CENTRO DE INFORMAÇÕES SOBRE MONTAGEM MECÂNICA. **Laminação a quente**. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6477-laminacao-a-quente>. 2025. Acesso em: 25 jun. 2025.

COUTINHO, T. **Conheça as 7 ferramentas da qualidade com exemplos!** 2019. Disponível em: <<https://voitto.com.br/blog/artigo/7-ferramentas-da-qualidade>>. Acesso em: 25 jun. 2025.

COUTINHO, T. **O que é capacidade do processo? Aprenda a analisar!** Disponível em: <<https://voitto.com.br/blog/artigo/capabilidade-do-processo>>. 2020. Acesso em: 24 jun. 2025.

FRACTTAL. **TPM: como maximizar a efetividade dos ativos?** 2025. Disponível em: <https://www.fractal.com/pt-br/tpm>. Acesso em: 19 jun. 2025.

FRONS. **Aprenda a montar um diagrama de dispersão com o Excel**. 2020. Disponível em: <<https://frons.com.br/blog/produtividade/aprenda-a-montar-um-diagrama-de-dispersao-com-o-excel/>>. Acesso em: 24 jun. 2025.

HENRIQUES, A. B.; PORTO, M. F. S. **A insustentável leveza do alumínio: impactos socioambientais da inserção do Brasil no mercado mundial de alumínio primário**. *Ciência & Saúde Coletiva*, Rio de Janeiro, v. 18, n. 11, p. 3223-3234, nov. 2013. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/csc/a/Spf7PNs9r9JbnY9bPfTZrqf>>. Acesso em: 19 jun. 2025.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Aluminium**. 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/energy-system/industry/aluminium>>. Acesso em: 20 jun. 2025

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INFOMET. **Classificação dos laminadores.** Disponível em: <https://www.infomet.com.br/siderurgia-7a-classificacao-laminadores.php>. 2025. Acesso em: 22 jun. 2025.

JONES, M. B.; DOWDALL, J. **Lean Six Sigma para Leigos.** São Paulo: Alta Books, 2023.

MARQUES, J. C. *et al.* **Ferramentas da qualidade.** 2012. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/62396224/11-Ferramentas_da_Qualidade20200317-124853-57pe0l-libre.pdf. Acesso em: 20 ma 2025.

MAST, J.; LOKKERBOL, J. "An analysis of the Six Sigma DMAIC method from the perspective of problem solving". **International Journal of Production Economics**, v. 139, n. 2, p. 604–614, out. 2012.

MENEZES, M. **Lean Six Sigma: conheça as diferenças e níveis dos Belts.** Lean Solutions. 2024. Disponível em: <https://www.leansolutions.com.br/blog/lean-six-sigma-diferencas-aplicacoes-belts/>. Acesso em: 23 jun. 2025.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

NOVELIS PAE. **A new contract was signed in January 2018 between Gränges Americas and Novelis PAE.** Disponível em: <https://novelispae.com/granges-americas-and-novelis-pae/>. 2024. Acesso em: 23 jun. 2025.

PASQUA. **Como funciona o processo de lingotamento?** 2024. Disponível em: <https://www.aluminiopasqua.com.br/blog/2024/08/08/como-funciona-o-processo-de-lingotamento/>. Acesso em: 19 jun. 2025.

PASQUA. **Lingotes de alumínio em São Paulo: conheça mais sobre suas aplicações, benefícios e vantagens.** 2023. Disponível em: <https://www.aluminiopasqua.com.br/blog/lingotes/lingotes-de-aluminio-em-sao-paulo-conheca-mais-sobre-suas-aplicacoes-beneficios-e-vantagens/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

QUALYTEAM. **O que é e como aplicar a metodologia 5S em sua empresa?** 2021. Disponível em: <<https://qualyteam.com/pb/blog/o-que-e-e-como-aplicar-metodologia-5s-em-sua-empresa/>>. Acesso em: 20 maio 2025.

RAAHAUGE, B. E.; WILLIAMS, F. S. (Ed.). **Smelter grade alumina from bauxite: history, best practices, and future challenges.**

REVISTA ALUMÍNIO. **Especial mineração de bauxita: como é feita a extração e qual a importância da atividade para o Brasil.** 2019. Disponível em: <<https://revistaaluminio.com.br/especial-mineracao-de-bauxita-como-e-feita-a-extracao-e-qual-a-importancia-da-atividade-para-o-brasil/>>. Acesso em: 11 jun. 2025.

REVISTA ALUMÍNIO. **Personalidades do setor: visionário, Antônio Ermírio de Moraes fundou a CBA.** 2022. Disponível em: <<https://revistaaluminio.com.br/personalidades-do-setor-visionario-antonio-ermirio-de-moraes-fundou-a-cba/>> Acesso em: 13 mai. 2025

SACHELLI. **Como é o processo de lingotamento contínuo do aço?** 2025. Disponível em: <<https://sacchelli.com.br/como-e-o-processo-de-lingotamento-continuo-do-aco/>>. Acesso em: 22 jun. 2025.

SANTOS, A. B.; ANTONELLI, S. C. Aplicação da abordagem estatística no contexto da gestão da qualidade: um survey com indústrias de alimentos de São Paulo. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 18, n. 3, p. 509–524, 2011.

SILVA, O. A. F.; **Como detectar alterações em um processo? Use a carta de controle.** Sociedade de Investigações Florestais (SIF), 2020. Disponível em: <<https://sif.org.br/2020/04/como-detectar-alteracoes-em-um-processo-use-a-carta-de-controle/>>/. Acesso em: 24 jun. 2025.

SMITH, J.M.; VAN NESS, H.C. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química.** 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

SOLVEN. **O uso de óleos na laminação de metais: um guia completo.** Disponível em:<
<https://solven.com.br/mercado/o-uso-de-oleos-na-laminacao-de-metais-um-guia-completo/>>.
2025. Acesso em: 25 mai. 2025.

TOTVS; **Metodologia 5S: o que é, vantagens e como aplicar na empresa.**, 2024. Disponível em: <<https://www.totvs.com/blog/negocios/metodologia-5s/>>. Acesso em: 25 jun. 2025.

WERKEMA, C. **Lean Seis Sigma: introdução às ferramentas do Lean Manufacturing.** São Paulo: Atlas, 2011.