



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Redução do consumo de sulfato de sódio na caldeira de recuperação através da metodologia Lean: estudo de caso

Autor: Flávia Lux Magalhães

Orientadores: Débora Jung Luvizetto Faccin

Pedro Juarez Melo

Coorientadora: Ana Carolina Corso Minotto

Porto Alegre, fevereiro de 2024

Autor: Flávia Lux Magalhães

Redução do consumo de sulfato de sódio na caldeira de recuperação através da metodologia Lean: estudo de caso

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química

Orientadores: Débora Jung Luvizetto Faccin

Pedro Juarez Melo

Coorientadora: Ana Carolina Corso Minotto

Banca Examinadora:

Prof^ª. Dr^ª. Caroline Borges Agustini, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Nilson Romeu Marcilio, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre

2024

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Joici, pelo amor, colo e apoio incondicional durante toda a minha vida. Por acreditar em mim mais do que eu mesma e nunca deixar eu desistir.

Ao meu namorado Pedro Carvalho, que chegou no final dessa jornada e a tornou mais especial. Pelo incentivo, cuidado e por me motivar todos os dias a ser a minha melhor versão.

Aos amigos de infância e aos que fiz ao longo da graduação, com quem compartilhei desabafos, inseguranças, momentos de alegria e diversão, por tornarem essa caminhada mais leve.

Aos professores Débora e Pedro Melo e à colega Ana Carolina, pela orientação e paciência na realização deste trabalho.

Ao meu pai Flávio, por quem a saudade aumenta mais a cada dia.

RESUMO

O setor de celulose e papel contribui significativamente para a economia brasileira, visto que o Brasil é o maior exportador de celulose no mundo. Para se manter num mercado competitivo, as indústrias devem utilizar sistemas operacionais eficientes, que busquem melhorias em toda a cadeia produtiva, promovam a inovação e respondam rapidamente às exigências do mercado. Uma das metodologias utilizadas para atingir a excelência operacional, o Lean Manufacturing foca na redução dos desperdícios para possibilitar a melhoria contínua dos processos. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi o estudo e análise da implementação de um projeto de redução do consumo específico de sulfato de sódio na caldeira de recuperação de uma indústria de celulose. A metodologia de gestão do projeto foi o Ciclo PDCA, ferramenta de qualidade do Lean Manufacturing. A análise do problema foi feita a partir das ferramentas de Diagrama de Causa e Efeito, Gráfico de Pareto e 5 Porquês. Após a investigação, as causas raízes encontradas para a necessidade de um alto consumo de sulfato de sódio no ano de 2022 foram a elevada perda alcalina nas etapas de lixiviação de cinzas e da deslignificação. Um plano de ação para a solução do problema foi elaborado a partir da utilização da ferramenta 5W1H. Dentre as ações implementadas ao longo do ano de 2023 estão a implementação de um método de gestão e acompanhamento das perdas alcalinas e a revisão dos limites de operação das centrífugas do sistema de lixiviação de cinzas. Como resultado, obteve-se uma redução de 8,55% no consumo específico de sulfato de sódio em comparação com o ano anterior. No entanto, a perda alcalina aumentou em 2,67%. A utilização da metodologia PDCA mostrou-se fundamental para a minimização do problema e para o desenvolvimento da equipe de Recuperação e Utilidades em relação à identificação de problemas e gestão de projetos. A implementação de um projeto abrangendo em seu escopo todo o processo produtivo e que utilize ferramentas da qualidade mais robustas, como a metodologia Lean Six Sigma, pode se mostrar mais eficaz para solução do problema.

Palavras-chave: celulose, melhoria contínua, lean manufacturing, ciclo de recuperação, perda alcalina.

ABSTRACT

The pulp and paper sector makes a significant contribution to the Brazilian economy, as Brazil is the largest exporter of pulp in the world. To remain in a competitive market, industries must use efficient operating systems that seek improvements throughout the production chain, promote innovation and respond quickly to market demands. One of the methodologies used to achieve operational excellence, Lean Manufacturing focuses on reducing waste to enable continuous process improvement. The aim of this work was to study and analyze the implementation of a project to reduce the specific consumption of sodium sulfate in the recovery boiler of a pulp industry. The project management methodology was the PDCA Cycle, a Lean Manufacturing quality tool. The problem was analyzed using the Cause and Effect Diagram, Pareto Chart and 5 Whys tools. After the investigation, the root causes found for the need for high sodium sulfate consumption in 2022 were alkaline loss in the ash leaching and delignification stages. An action plan to solve the problem was drawn up using the 5W1H tool. Among the actions implemented over the course of 2023 are the implementation of a method for managing and monitoring alkaline losses and a review of the operating limits for the ash leaching system's centrifuges. As a result, a reduction of 8.55% was achieved in the specific consumption of sodium sulfate compared to the previous year. However, alkaline loss increased by 2.67%. The use of the PDCA methodology proved fundamental in minimizing the problem and in developing the Recovery and Utilities team in terms of problem identification and project management. The implementation of a project covering the entire production process and using more robust quality tools, such as the Lean Six Sigma methodology, may prove to be more effective in solving the problem.

Keywords: *pulp, continuous improvement, lean manufacturing, recovery cycle, alkaline loss.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação do ciclo de recuperação Kraft.	3
Figura 2: Representação de uma caldeira de recuperação.	5
Figura 3: Sistema convencional de lixiviação de cinzas.	6
Figura 4: Ciclo PDCA.	10
Figura 5: Representação do Diagrama de Pareto.	12
Figura 6: Estrutura do Diagrama de Causa e Efeito.	13
Figura 7: Fluxograma do sistema <i>AshLeach Duo</i>	15
Figura 8: Consumo de sulfato de sódio para reposição no ano de 2022.	17
Figura 9: Mapeamento de perda alcalina do processo.	18
Figura 10: Gráfico de Pareto das perdas alcalinas na linha L2.	18
Figura 11: Comparação entre a dosagem de álcali e sulfidez do processo.	19
Figura 12: Diagramas de Causa e Efeito para o problema de perda alcalina.	20
Figura 13: Análise dos 5 Porquês para o problema de perda alcalina.	21
Figura 14: Consumo específico de sulfato de sódio na caldeira de recuperação nos anos de 2022 e 2023.	23
Figura 15: Perda alcalina nos anos de 2022 e 2023.	24
Figura 16: Reposição de alcalinidade no processo em 2023.	24
Figura 17: Tela de acompanhamento de balanço de álcali da linha L2.	26
Figura 18: Procedimento Operacional Padrão (POP) para o sistema <i>AshLeach Duo</i>	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Método de solução de problemas segundo Campos, 2013.	11
--	----

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica	2
2.1	Processo Kraft	2
2.1.1	Lavagem e deslignificação com oxigênio	3
2.1.2	Caldeira de Recuperação	4
2.2	Variáveis de interesse	7
2.2.1	Carga alcalina	7
2.2.2	Sulfidez	8
2.3	Lean Manufacturing	9
2.3.1	PDCA (Plan – Do – Check – Act)	9
2.3.2	Ferramentas de qualidade	11
3	Estudo de Caso	15
3.1	Descrição da unidade industrial	15
3.2	Aplicação da metodologia – Etapas Plan e Do	16
3.2.1	Plan	16
3.2.2	Do	22
4	Resultados	23
4.1	Aplicação da metodologia – Etapas Check e Act	23
4.1.1	Check	23
4.1.2	Act	25
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	27
	REFERÊNCIAS	28
	APÊNDICE A	31

1 Introdução

A indústria de celulose e papel possui um papel significativo na economia brasileira e mundial. No ano de 2022, a produção de celulose no Brasil atingiu a marca de 25 milhões de toneladas, registrando um crescimento de 10,9% e mantendo o país na posição de segundo maior produtor mundial, atrás somente dos Estados Unidos (aproximadamente 50 milhões de toneladas). No mesmo ano, o Brasil se manteve na posição de maior exportador de celulose no mundo, exportando US\$ 8,4 bilhões. O país também se destaca como pioneiro na plantação de eucalipto para produção de celulose, sendo o setor de plantação de árvores o quarto maior do agronegócio brasileiro (IBÁ, 2023).

O crescimento do setor de celulose e papel no Brasil se deve ao fato de o país possuir clima favorável para plantação de eucalipto, utilizar de biotecnologia e engenharia genética que favorecem a produtividade, bem como pelo desenvolvimento da tecnologia de clonagem de mudas e excelente logística. Por estes e outros fatores, o custo de produção de celulose no Brasil é o mais baixo do mundo, tornando o país um forte competidor no mercado mundial (DEPEC, 2018).

O processo Kraft é a principal rota para produção de celulose e baseia-se no uso de soda cáustica e sulfato de sódio para obtenção da celulose. O processo produtivo pode ser dividido em duas grandes etapas: a linha de fibras, responsável pela extração da celulose da madeira, e o ciclo de recuperação, onde os químicos e a energia utilizados no processo são recuperados para serem reutilizados (PEREIRA, 2019).

Para garantir a produtividade e estabilidade num setor competitivo, as indústrias necessitam de sistemas organizacionais eficientes que busquem melhorias em toda a cadeia produtiva, promovam a inovação e respondam rapidamente às exigências do mercado. Nesse sentido, o sistema Lean Manufacturing vem sendo aplicado pelas indústrias na busca da melhoria contínua dos processos. Sua origem vem do Sistema Toyota de Produção, que criou e implantou um sistema produtivo focado na identificação e eliminação dos desperdícios, reduzindo custos, aumentando a qualidade e a produtividade e acelerando os processos de produção (WOMACK; JONES; ROOS, 2004).

Apesar de o processo Kraft ser um processo circular e possibilitar a recuperação de químicos, ao longo do processo pode ser necessária a reposição de insumos dependendo de fatores operacionais, elevando os gastos da empresa. Produzir celulose a menor custo é decisivo para a competitividade do mercado. Assim, reduzir o consumo de químicos se torna uma prioridade estratégica das indústrias. Dentre os químicos que podem ser repostos no processo Kraft, o sulfato de sódio é um dos principais reagentes e é adicionado no sistema através da alimentação no tanque de mistura da caldeira de recuperação.

Este trabalho tem como objetivo geral estudar e analisar a implementação de um projeto de redução de consumo específico de sulfato de sódio na caldeira de recuperação de uma indústria de celulose através da utilização do Ciclo PDCA, ferramenta de qualidade do Lean Manufacturing. Os objetivos específicos são o estudo do processo Kraft, das etapas do processo produtivo que envolvem a reposição de sulfato de sódio e da aplicação da metodologia PDCA como ferramenta de gestão do projeto.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Processo Kraft

O processo Kraft de produção de celulose tem por objetivo a obtenção das fibras celulósicas através da dissolução da lignina, substância que age como ligante entre as fibras da madeira, sem ocasionar a degradação dos carboidratos (celulose e hemicelulose) e com maior rendimento possível. Para tanto, o processo utiliza para o cozimento dos cavacos de madeira uma solução alcalina, chamada de licor branco, composta por hidróxido de sódio (NaOH), também chamado de soda cáustica, e sulfeto de sódio (Na₂S) (GOMIDE, 1979).

Segundo Carvalho (1999), quando comparado ao processo soda, que utiliza apenas NaOH como reagente no cozimento, o processo Kraft, também conhecido como “processo sulfato”, oferece benefícios como maior rendimento e qualidades superiores das polpas celulósicas, possibilitando uma maior flexibilidade na escolha do tipo de madeira como matéria-prima. O nome *kraft*, que significa “resistente” em sueco e alemão, refere-se à maior resistência físico-mecânica das pastas produzidas no processo em questão. No entanto, o processo apresenta alguns aspectos negativos, como altos custos de investimento e a liberação de compostos de enxofre de odor desagradável, como mercaptanos e gás sulfídrico.

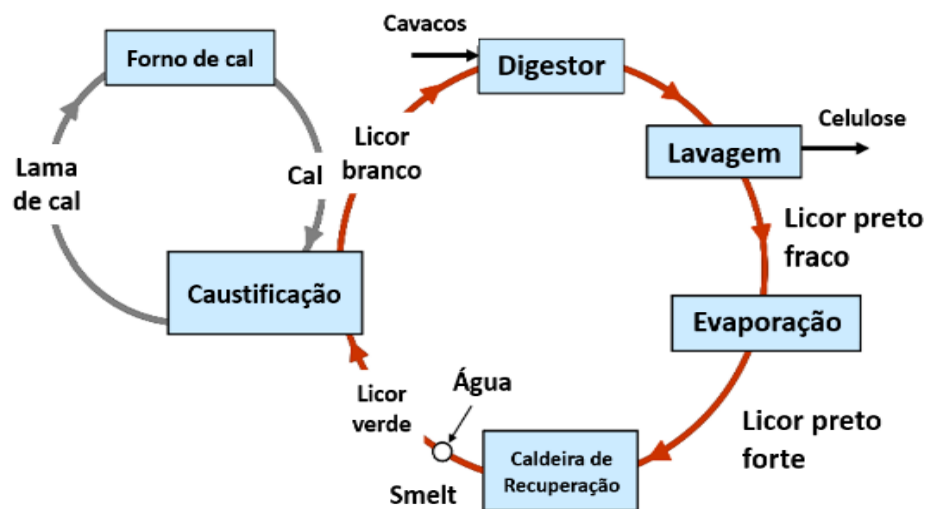
Na polpação Kraft contínua, os cavacos e o licor branco são alimentados a um digestor, onde ocorre a separação da lignina das fibras de celulose. Ao final do cozimento, é gerada a polpa celulósica marrom, que é enviada para a etapa de pré-branqueamento (lavagem, depuração e deslignificação) para que os materiais inorgânicos indesejáveis sejam removidos e ocorra a remoção da lignina residual antes da etapa de branqueamento da polpa (D’ALMEIDA, 1988). A polpa branqueada pode seguir para a etapa de secagem e enfardamento, se o produto final for a celulose, ou para o setor de fabricação de papel.

Uma das principais vantagens da produção Kraft é a existência de um ciclo de recuperação, que permite a economia e sustentabilidade do processo. Além dos produtos químicos inorgânicos serem recuperados para reutilização no cozimento, a matéria orgânica contida no licor preto é utilizada como combustível para geração de vapor e energia elétrica (SIXTA, 2008; TRAN; VAKKILAINEN, 2016). Apesar da maior parte dos químicos utilizados ser recuperada, ainda assim ocorrem perdas de alcalinidade, que são repostas através de um *make-up*, ou seja, da reposição de soda cáustica ou sulfato de sódio.

No ciclo de recuperação, conforme ilustrado na Figura 1, o licor preto fraco, obtido após a lavagem da polpa marrom, é enviado a evaporadores de múltiplo efeito, onde é concentrado geralmente a 65% de teor de sólidos para que possa ser queimado com eficiência na caldeira de recuperação. O licor preto forte (concentrado) é alimentado na parte inferior da caldeira, onde é queimado em um ambiente com baixa presença de oxigênio, possibilitando a recuperação de sódio e enxofre através da formação do *smelt* fundido, constituído principalmente por sulfeto de sódio (Na₂S) e carbonato de sódio (Na₂CO₃). O *smelt* é misturado com água e licor branco fraco num tanque de dissolução para formar o licor verde, que é posteriormente enviado à planta de caustificação de forma a converter o Na₂CO₃ em NaOH através da reação com a cal, CaO. Nessa etapa, o Na₂S permanece inalterado. A lama de cal (CaCO₃ precipitado) é lavada e enviada ao forno de cal para regenerar o CaO para reutilização.

Desta forma, ao final da etapa de caustificação tem-se o licor branco recuperado, que é devolvido ao digestor para reutilização na polpação (TRAN; VAKKILAINEN, 2016).

Figura 1: Representação do ciclo de recuperação Kraft.



Fonte: Traduzido de Vakkilainen, 2016.

As seções a seguir descrevem com maiores detalhes as etapas de maior interesse do presente trabalho: lavagem e deslignificação com oxigênio, caldeira de recuperação e lixiviação de cinzas.

2.1.1 Lavagem e deslignificação com oxigênio

A polpa celulósica marrom gerada ao final do cozimento passa por um processo de limpeza que consiste inicialmente na depuração em peneiras ou cestos rotativos para a eliminação de material não cozido e demais impurezas. A pasta depurada é então enviada para lavagem e em sequência é encaminhada ao processo de deslignificação com oxigênio.

A deslignificação com oxigênio ocorre em reatores de fluxo ascendente e tem por finalidade a remoção da lignina residual antes do branqueamento da polpa. Nessa etapa é utilizada alta pressão de oxigênio em condições alcalinas, empregando soda cáustica (NaOH) ou licor branco oxidado (licor branco com baixa sulfidez). O oxigênio reage com os grupos fenólicos da lignina, que são dissociados em condições alcalinas e de altas temperaturas, causando a fragmentação do polímero e facilitando a sua remoção (ALA-KAILA; REILAMA, 2001 citado por MENDES, 2013).

Apesar do elevado custo de instalação e menor seletividade em relação ao uso de dióxido de cloro, a utilização do oxigênio na deslignificação resulta numa menor necessidade de cloro na etapa de branqueamento. Além disso, a utilização de O₂ proporciona a vantagem de diminuir a carga poluente do efluente, através da recuperação da matéria orgânica dissolvida aproveitada como fonte de energia (BERRY, 2015 citado por VENSON et. al., 2015).

A etapa de lavagem ocorre mais de uma vez no processo produtivo de celulose. Após a deslignificação, a polpa é encaminhada novamente para lavagem de forma a remover os químicos solubilizados nas etapas anteriores. A lavagem após o cozimento aumenta o grau de

deslignificação e reduz a carga alcalina necessária na deslignificação. A lavagem intermediária entre as etapas da deslignificação pode otimizar o consumo de reagentes no branqueamento e aumentar a eficiência do processo (MENDES, 2013).

Uma das principais variáveis acompanhadas na etapa de lavagem é a perda alcalina, que mede a concentração de sódio na polpa. Quanto maior a eficiência da lavagem, menor a perda alcalina na polpa. Valores altos de perda alcalina na polpa lavada indicam que haverá necessidade de excesso de uso de reagentes no branqueamento. Dessa forma, o processo de lavagem como um todo e a análise da perda alcalina têm grande influência no aspecto econômico de uma indústria de celulose, pois estão relacionados à dosagem de álcali na recuperação e, conseqüentemente, no custo variável de produção (MENDES, 2013).

2.1.2 Caldeira de Recuperação

A caldeira de recuperação é o equipamento que proporciona a sustentabilidade e viabilidade ambiental e econômica de uma indústria de celulose. Diferencia-se das caldeiras convencionais por funcionar como um reator químico, ao mesmo tempo em que gera vapor e energia para os processos e para a planta industrial (JORGE, 2018). Os principais objetivos da caldeira de recuperação são elencados a seguir (ALMEIDA, 2006):

- Recuperar a matéria inorgânica do licor, convertendo o sulfato de sódio do licor preto em sulfeto de sódio, agente ativo no processo Kraft;
- Produzir vapor através da combustão dos compostos orgânicos presentes no licor preto, gerando energia para ser utilizada no processo de produção e nas demais necessidades da fábrica;
- Recuperar parte do licor preto gerado no digestor, a fim de minimizar a necessidade de descarte para o meio ambiente e, simultaneamente, atuar como incinerador de compostos indesejáveis para o processo produtivo.

A caldeira de recuperação, conforme ilustrado na Figura 2, é do tipo aquatubular e pode ser dividida em duas seções: a fornalha e a seção de troca de calor convectivo. A fornalha, com as injeções de licor e ar de combustão, funciona como um reator químico, onde ocorre a combustão do licor e a formação de Na_2S e Na_2CO_3 , que compõem o licor verde bruto. A seção de troca térmica, com a alimentação de água, é similar às caldeiras convencionais geradoras de vapor (ALMEIDA, 2006).

O licor preto concentrado que entra na caldeira, vindo da etapa de evaporação, é pré-aquecido e alimentado na fornalha na forma de spray através dos bicos pulverizadores de licor. Na fornalha, as partículas de licor sofrem processos que podem ser divididos em quatro etapas: secagem, pirólise, término da combustão do carbono residual e redução dos sais inorgânicos para a formação do material inorgânico fundido, chamado de *smelt*. O *smelt* escoava para o tanque dissolvedor, onde é misturado com licor branco fraco. Forma-se no tanque, então, o licor verde cru, que é posteriormente enviado à área de caustificação a fim de passar por uma série de processos para se licor branco e ser reutilizado na etapa de polpação. Abaixo são mostradas as principais reações químicas que ocorrem na caldeira de recuperação (ALMEIDA, 2006).

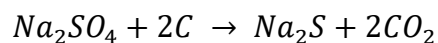
Licor + calor

+ voláteis (CO_2 , CO , H_2 , H_2O , H_2S , SO_2 , CH_3SH , NH_3 , NO e outros)

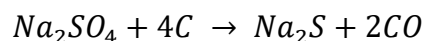
+ orgânicos (basicamente C – fixo)

+ inorgânicos (Na_2CO_3 , Na_2S , Na_2SO_4 e outros)

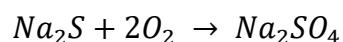
(Reação 1)



(Reação 2)

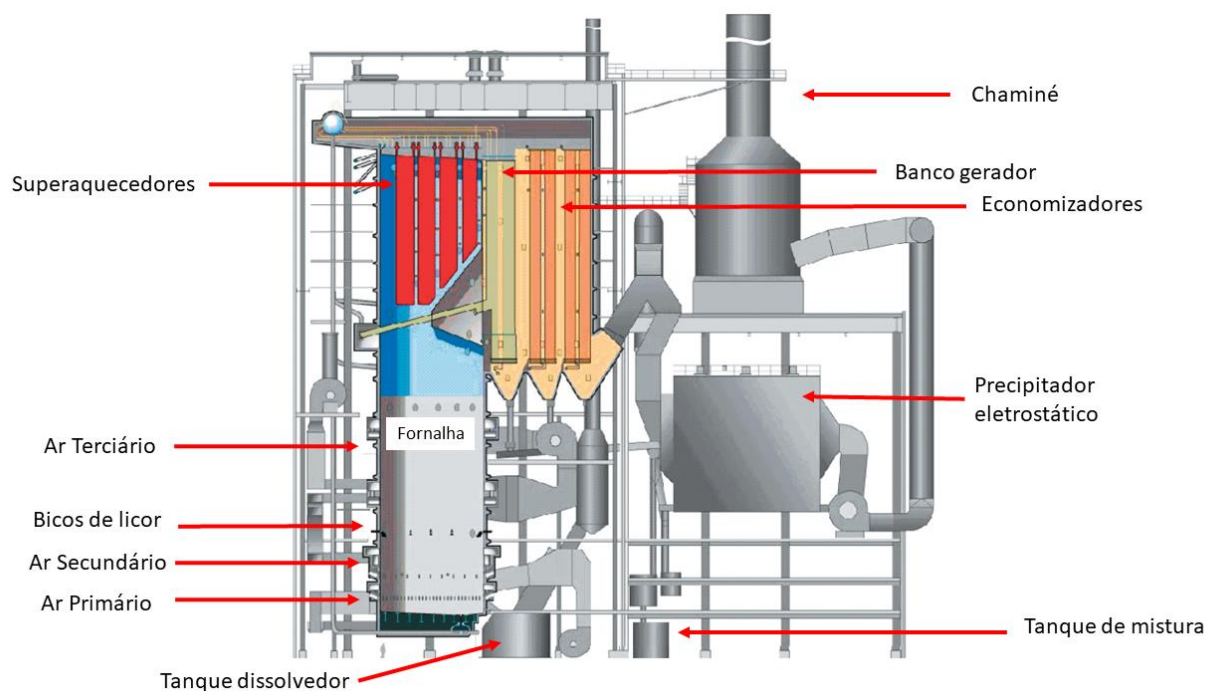


(Reação 3)



(Reação 4)

Figura 2: Representação de uma caldeira de recuperação.



Fonte: Adaptado de Vakkilainen, 2005.

A queima do licor na caldeira exige, ao mesmo tempo, um ambiente oxidante, para a queima do seu do material orgânico, e um ambiente redutor, para a redução dos seus compostos inorgânicos. Dessa forma, o ar de combustão é distribuído em três níveis na fornalha e cada um deles possui uma função referente ao controle da queima do licor.

O ar primário tem a finalidade de manter a estabilidade da queima, controlar a posição e o formato do leito de *smelt* e fornecer oxigênio na camada externa do leito, favorecendo o ambiente redutor na região interna do leito. O ar secundário desempenha o papel de regular a altura e a temperatura do leito, bem como de secar e queimar o licor e os produtos voláteis resultantes da pirólise. Este é o principal nível de ar para controle da combustão do licor, pois o controle adequado da temperatura do leito possibilita um aumento da eficiência de redução e a minimização de emissões atmosféricas. O ar terciário, por fim, tem como finalidade completar a combustão dos produtos voláteis e selar a fornalha, a fim de minimizar o arraste de material particulado. Outros níveis de ar podem ser empregados de forma a reduzir as

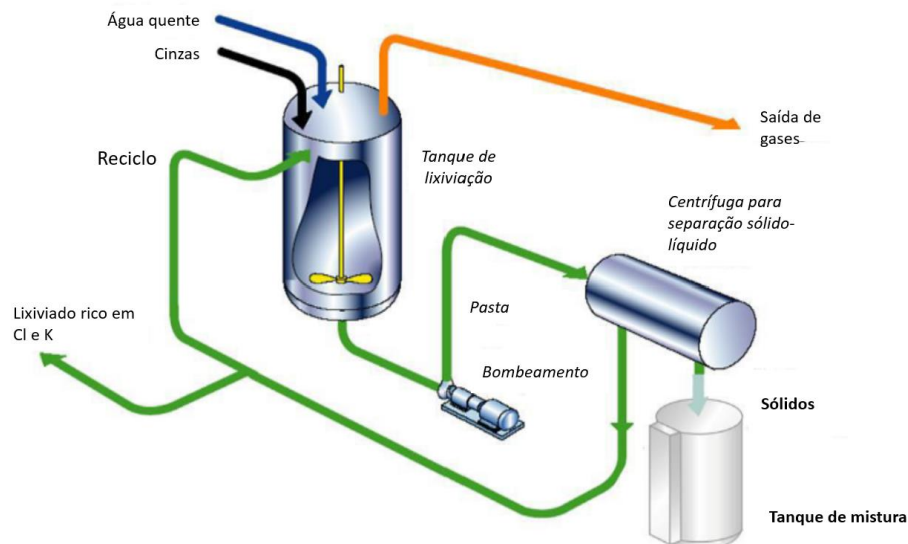
emissões atmosféricas. Pequenos ajustes de pressão e fluxo em cada um dos níveis de ar devem ser realizados para possibilitar maior eficiência de queima (VAKKILAINEN, 2005).

2.1.2.1 Captura e lixiviação de cinzas

Em uma indústria de celulose, a caldeira de recuperação é a principal responsável pelas emissões gasosas de H_2S , SO_2 e NO_x e emissões de material particulado formados por partículas de sais de sódio, principalmente o de sulfato (Na_2SO_4), de gotas de licor e de carbono residual. O material particulado consiste também em compostos de cloreto de sódio e potássio, como KCl , $NaCl$ e K_2SO_4 , oriundos da própria matéria prima do processo Kraft, a madeira, e presentes no licor. Estes compostos favorecem a formação de incrustações e corrosão nos tubos de transferência de calor das caldeiras de recuperação. Com objetivo de reduzir os custos de produção, bem como eliminar tais compostos indesejáveis, são empregados meios para a recuperação do sódio e do enxofre presentes nas cinzas (BORDADO; GOMES, 2002).

O equipamento mais comum instalado nas caldeiras de recuperação para captura do material particulado é o precipitador eletrostático. Este equipamento consiste fundamentalmente de eletrodos colocados em uma câmara por onde passam os gases de combustão. A alta voltagem aplicada nos eletrodos induz a ionização das moléculas dos gases, criando uma descarga elétrica na qual íons negativos migram e carregam as partículas sólidas até as placas de coleta, onde as cinzas são depositadas e posteriormente transferidas para o sistema de lixiviação de cinzas, ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Sistema convencional de lixiviação de cinzas.



Fonte: Traduzido de Tran, 2004.

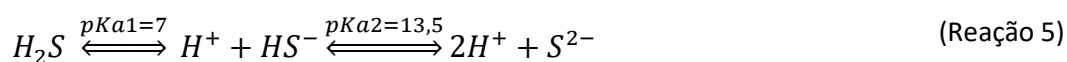
O sistema de lixiviação de cinzas tem como objetivo reduzir a concentração de cloretos e de potássio no ciclo do licor ao mesmo tempo em que Na_2SO_4 é recuperado. Desta forma, é possível evitar a incrustação das cinzas na caldeira de recuperação e evitar paradas para manutenção e limpeza no equipamento. No processo de tratamento, as cinzas são adicionadas a um tanque de lixiviação, onde são misturadas com água e condensado e a maior

parte do cloreto e potássio é dissolvida, enquanto grande parte do sulfato de sódio permanece sólido. Após passar por uma centrífuga, onde ocorre a separação das duas fases, a fração de sólidos contendo Na_2SO_4 é misturada com o licor preto oriundo da evaporação no tanque de mistura, retornando para o ciclo de recuperação química. A fração líquida, ou seja, o lixiviado, é encaminhada para a planta de tratamento de efluentes (LARSSON, 2012).

2.2 Variáveis de interesse

2.2.1 Carga alcalina

O licor de cozimento empregado no processo Kraft é formado principalmente por NaOH e Na_2S , eletrólitos que, em solução aquosa, dissociam-se nos íons Na^+ , HS^- , OH^- e S^{2-} , sendo somente os três últimos agentes ativos durante as reações de polpação. As reações de dissociação dos reagentes são as seguintes (GOMIDE, 1979):



Embora ambas as reações de hidrólise 6 e 7 representem a dissociação do sulfeto de sódio, somente a reação 6 ocorre de forma completa, enquanto a reação 7 apenas seria possível em pH menor que o do cozimento. Assim, parte do sulfeto de sódio presente no licor encontra-se indisponível para agir como agente deslignificante, pois parte dele está complexado. O álcali efetivo ($\text{NaOH} + \frac{1}{2} \text{Na}_2\text{S}$) expressa a real quantidade de álcali disponível para as reações no processo Kraft (ALMEIDA, 2003; GOMIDE, 1979).

Nos processos de polpação alcalina, o álcali é consumido na dissolução dos carboidratos e nas reações com a lignina e com os ácidos orgânicos, sejam os presentes na madeira ou os produzidos por hidrólise na polpação, nas reações com as resinas das madeiras e uma pequena porcentagem é adsorvida pelas fibras (GOMIDE, 1979).

Os valores de carga alcalina empregados na polpação Kraft dependem das características da madeira, do tamanho dos cavacos, do grau de deslignificação necessário ao longo do digestor e de outras condições de cozimento, como tempo e temperatura (STEIN, 2010). Para o eucalipto, geralmente utilizam-se valores de álcali ativo ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$) entre 14 e 21% (CARVALHO, 1999).

Almeida, Gomide e Silva (2000) constataram em seus estudos de dissolução da madeira de eucalipto que a carga alcalina aplicada influencia consideravelmente a taxa de deslignificação e a degradação das hemiceluloses. A aplicação de cargas alcalinas mais elevadas aumenta a velocidade de deslignificação, obtendo-se menor teor de lignina residual na polpa para um mesmo tempo de reação. Entretanto, este efeito é acompanhado de uma diminuição expressiva do rendimento total da polpação devido à degradação da celulose (EK et al. citado por STEIN, 2010).

2.2.2 *Sulfidez*

A relação percentual entre a quantidade de sulfeto de sódio e o álcali ativo é chamada de sulfidez. No processo Kraft, o sulfeto de sódio é obtido através da redução do sulfato de sódio, que é adicionado ao licor preto na caldeira de recuperação para reposição da carga alcalina do processo. Na etapa de deslignificação na polpação Kraft, os íons HS^- e S^{2-} são específicos para a reação de degradação da lignina, sem atuar na degradação dos carboidratos e limitando que eles sejam atacados pelos íons OH^- . O enxofre não é consumido no processo e atua como um catalisador (GOMIDE, 1979; RYDHOLM, 1965 citado por SILVA, 2001).

Em casos que envolvem variação da sulfidez, é essencial observar que a concentração dos íons OH^- , provenientes do hidróxido de sódio e do sulfeto de sódio, deve ser mantida constante para não ocultar o efeito da sulfidez. Desta forma, é fixada a concentração dos íons OH^- , ou seja, a carga de álcali efetivo, e varia-se apenas a concentração de íons HS^- (SILVA, 2001).

Segundo Carvalho (1999), a presença de sulfeto de sódio no licor branco acelera a deslignificação, aumentando a reatividade da lignina ao promover a sua dissolução e a tornando menos condensada ao final do cozimento, permitindo o uso de condições menos drásticas de temperatura, tempo e carga alcalina nesta etapa. Adicionar sulfeto de sódio ao licor de cozimento também traz como benefício um aumento da eficiência do ciclo de recuperação dos reagentes químicos e a geração de energia do processo (GOMIDE et. al, 1980 citado por GOMES, 2019).

O ponto ótimo de sulfidez depende de fatores como espécie da madeira, carga alcalina, temperatura de cozimento e propriedades desejadas para o produto (MIMMS et al., 1993). Estudos evidenciam que, em indústrias que adotam eucalipto como matéria prima, a sulfidez é empregada na faixa de 20 a 30%. Esse parâmetro é influenciado pelos custos da recuperação do licor preto, pelas características da madeira e condições do cozimento. Considerando as propriedades da pasta celulósica, para um determinado grau de deslignificação, o aumento da sulfidez em até 30% permite um menor tempo de cozimento e um consequente aumento da viscosidade da polpa e do rendimento do digestor. Em condições de carga alcalina constante, um índice de sulfato acima de 30% leva a um nível de carga de álcali efetivo insuficiente, diminuindo a velocidade de cozimento (CARVALHO, 1999). A viscosidade da polpa é significativamente reduzida quando é aplicada menos de 20% de carga de sulfeto de sódio (PHANEUF et al., 1998 citado por SILVA, 2001).

Com relação ao ciclo de recuperação química, segundo Tran e Villarroel (2015), a utilização de elevada sulfidez no licor branco é positiva pois reduz a demanda na etapa de caustificação e a quantidade de cloreto presente no ciclo do licor, que pode causar incrustações nas tubulações da caldeira. Por outro lado, um elevado índice de sulfeto aumenta a corrosividade do licor e a emissão de gases odoríferos e poluentes e leva a menor geração de vapor nas caldeiras de recuperação.

Segundo Grace et al. (1989), citado por Silva (2001), a diminuição da sulfidez pode representar uma opção para minimizar as emissões gasosas de compostos reduzidos de enxofre, como sulfeto de hidrogênio e metilmercaptanas, altamente poluentes e malcheirosos. Além disso, uma redução na sulfidez implica na redução da quantidade de álcali

circulando no processo, pois é necessária menor quantidade de álcali ativo para manter uma dada concentração de álcali efetivo, reduzindo assim o custo com reagentes químicos.

2.3 Lean Manufacturing

O sistema Lean é uma abordagem de gestão fundamentada nas práticas e nos resultados do Sistema Toyota de Produção, criado e implantado pelo executivo Taiichi Ohno na década de 1950, cujo principal foco é a identificação e eliminação dos desperdícios, reduzindo custos e acelerando os processos de produção. O sistema recebeu a denominação de *Lean Manufacturing* (Produção Enxuta) por revelar uma forma de produzir cada vez mais com cada vez menos (WERKEMA, 2022a).

Segundo Womack, Jones e Roos (2004), a produção enxuta é guiada por cinco princípios básicos, conhecidos como *Lean Thinking* (Pensamento Enxuto), que tem por finalidade orientar as empresas que queiram adotar a filosofia de gestão para atingir seus objetivos:

1. Especificar o valor: Compreender o que é valor a partir da perspectiva do cliente e o que representa um benefício para ele. Entender qual é a necessidade do cliente e buscar atendê-la (WOMACK; JONES; ROOS, 2004).
2. Identificar o fluxo de valor: Mapear a cadeia produtiva, identificando desperdícios e atividades que não agregam valor ao produto. Em geral, a análise do fluxo de valor identifica três tipos de ações: aquelas que agregam valor, aquelas que não agregam, mas são necessárias para a produção, e aquelas que não agregam valor algum e devem ser eliminadas (KOSKELA, 1993).
3. Criar fluxos contínuos: Eliminar as interrupções e esperas de tempo (gargalos) entre os processos. Redefinir os trabalhos de cada função, de maneira que o trabalho seja focado nas verdadeiras necessidades dos clientes em todas as etapas do processo (SHINGO, 1996; WOMACK; JONES; ROOS, 2004).
4. Produção puxada pelo cliente: Evitar a superprodução, produzindo conforme a demanda e necessidade do cliente (WOMACK; JONES; ROOS, 2004).
5. Buscar a perfeição: A busca incessante pelo aperfeiçoamento e melhoria contínua dos processos deve ser o compromisso de todos os envolvidos no fluxo de valor.

2.3.1 PDCA (*Plan – Do – Check – Act*)

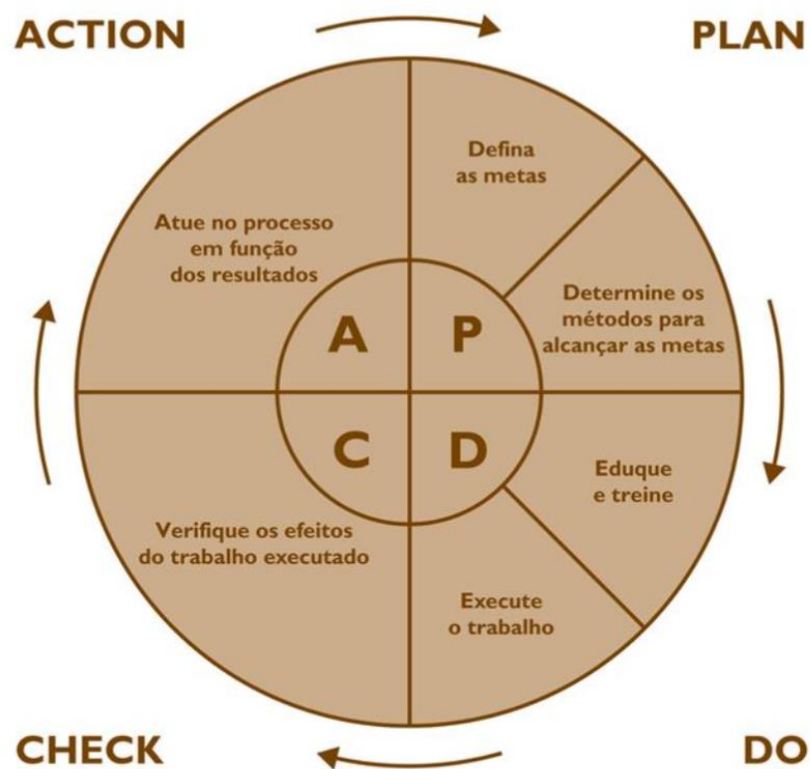
O Ciclo PDCA, criado por Deming (1950) a partir dos conceitos apresentados por Shewhart (1930) e apresentado na Figura 4, é uma ferramenta empregada na resolução de problemas, a fim de obter a melhoria contínua na gestão dos processos organizacionais.

A sigla PDCA, do inglês *Plan, Do, Check and Act*, significa Planejar, Executar, Verificar e Agir e é composto pelas seguintes etapas (WERKEMA, 2021):

1. Plan (Planejar): A partir da identificação do problema e análise das suas causas, estabelecer metas e o método para alcançá-las.

2. Do (Executar): Esta é a fase em que ocorre a execução das tarefas de acordo com o plano de ação e a coleta de dados que serão analisados na próxima etapa.
3. Check (Verificar): Comparar os resultados alcançados com a meta estabelecida, a partir dos dados coletados na fase de execução.
4. Act (Agir): Esta etapa consiste em atuar de forma corretiva a partir dos resultados obtidos. Caso a meta tenha sido alcançada, pode-se adotar como padrão o plano de ação executado. Caso contrário, deve-se agir sobre as causas do não atingimento da meta.

Figura 4: Ciclo PDCA.



Fonte: Campos, 2013.

De acordo com Campos (2013), as quatro etapas do PDCA podem ser decompostas em oito fases, com o objetivo de facilitar o detalhamento das ações que devem ser realizadas em cada uma delas, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Método de solução de problemas segundo Campos, 2013.

PDCA	Fase	Objetivo
	Identificação do problema	Definir claramente o problema e reconhecer sua importância.
P	Análise do fenômeno	Investigar as características específicas do problema com uma visão ampla e sob vários pontos de vista. Desdobrar o problema em problemas menores que podem ser facilmente resolvidos.
	Análise do processo	Descobrir as causas fundamentais de cada problema menor.
	Plano de ação	Conceber um plano para bloquear as causas fundamentais de cada problema menor.
D	Execução	Bloquear as causas fundamentais.
C	Verificação	Verificar se o bloqueio foi efetivo.
	Padronização	Prevenir contra o reaparecimento do problema.
A	Conclusão	Recapitular todo o processo de solução do problema para trabalhos futuros.

Fonte: Campos, 2013.

2.3.2 Ferramentas de qualidade

Segundo Werkema (2021), as chances de alcance da meta estabelecida são maiores quanto maior a quantidade de informações conhecidas. Assim, é maior a necessidade de utilização de ferramentas analíticas apropriadas para a coleta, o processamento e a disposição destas informações. Desta maneira, algumas ferramentas que acompanham a utilização da metodologia PDCA são apresentadas a seguir.

2.3.2.1 Estratificação

A estratificação consiste em dividir o problema em questão em partes menores, tornando mais fácil sua investigação e análise (MARIANI, 2005). De modo a focalizar a ação, as divisões são feitas com base no agrupamento da informação sobre vários fatores de estratificação, como por exemplo tempo, local, equipamentos e condições ambientais (WERKEMA, 2022b).

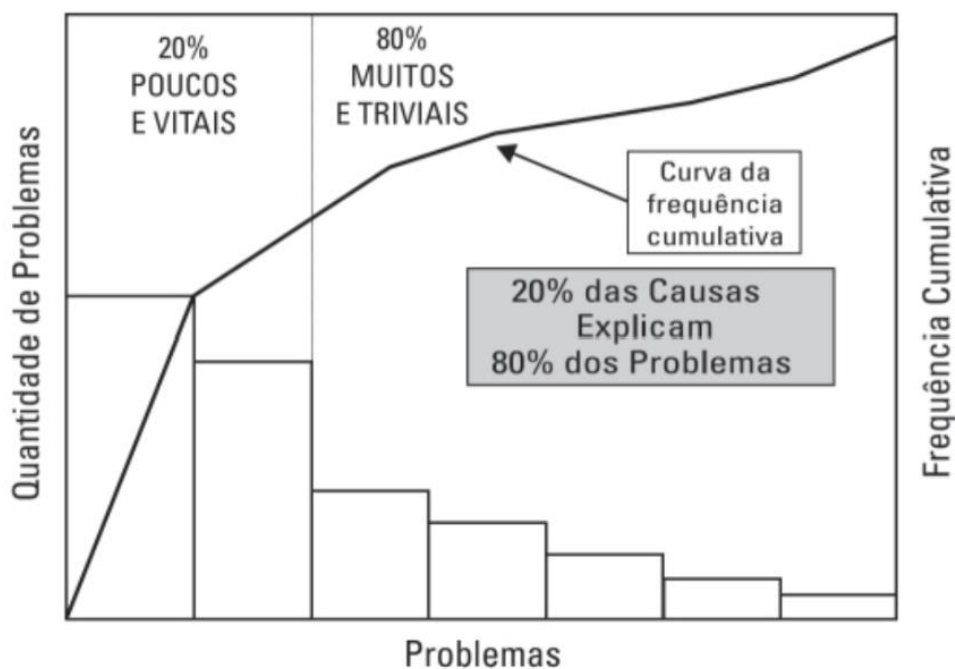
2.3.2.2 Diagrama de Pareto

Baseado no princípio de Vilfredo Pareto (1848-1923), o Diagrama de Pareto é uma representação gráfica que quantifica as causas mais significativas, listando-as em ordem decrescente, com base na estratificação (SILVA, 1995 citado por MARIANI, 2005).

O diagrama baseia-se no Princípio de Pareto que diz que ao identificar-se as poucas causas vitais dos poucos problemas cruciais, é possível eliminar praticamente todas as perdas por meio de uma pequena quantidade de ações. Ou seja, para que os problemas sejam resolvidos da maneira mais eficiente possível, primeiramente deve-se focar naqueles que são pouco vitais, desconsiderando os muitos triviais (WERKEMA, 2022b).

O Diagrama de Pareto é essencial para explicitar os principais problemas de um processo através da relação 20/80, ou seja, 20% das causas justificam 80% dos problemas. Essa regra permite identificar os problemas mais frequentes e concentrar esforços para buscar melhorias nos processos onde os maiores ganhos podem ser obtidos (RODRIGUES, 2020; WERKEMA, 2022b). Uma representação do diagrama de Pareto é apresentada na Figura 5.

Figura 5: Representação do Diagrama de Pareto.



Fonte: Rodrigues, 2020.

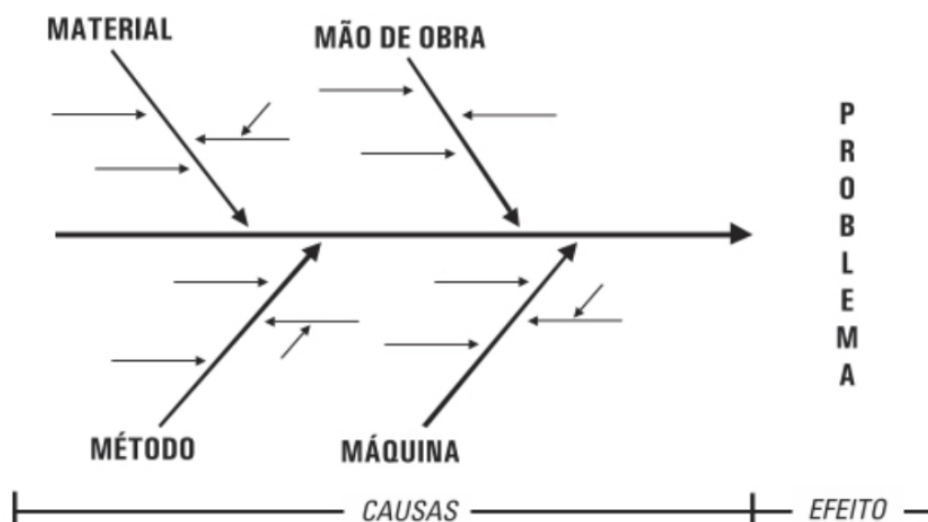
2.3.2.3 Diagrama de Causa e Efeito

O Diagrama de Causa e Efeito, conhecido como Diagrama de Ishikawa ou Diagrama Espinha de Peixe (Figura 6), é um diagrama simples que visa estabelecer a relação entre o resultado de um processo (efeito) e os fatores (causas) do processo. Cada efeito possui várias categorias de causas, que, por sua vez, podem ser desdobradas em outras causas (RODRIGUES, 2020; WERKEMA, 2022b).

Segundo Rodrigues (2020), o Diagrama de Ishikawa deve ser elaborado através de um *brainstorming* (tempestade cerebral), ou seja, deve ser feito a partir do compartilhamento espontâneo de ideias de uma equipe de trabalho. Como base para a especificação das principais causas geralmente são utilizados os diagramas denominados 4M, que relacionam as causas dos problemas com a sua dependência:

- Mão de obra: quando a causa é relacionada ao fator humano, falhas na gestão de pessoas, falta de treinamento, de qualificação e de atenção;
- Máquina: quando a causa é relacionada à problemas operacionais, de manutenção e instrumentação;
- Material: quando a causa é relacionada à qualidade, especificações e disponibilidade dos materiais e insumos.
- Método: quando a causa é relacionada à metodologia de gestão, ao processo de fabricação e falhas nos procedimentos operacionais.

Figura 6: Estrutura do Diagrama de Causa e Efeito.



Fonte: Rodrigues, 2020.

2.3.2.4 5 Porquês

Segundo o Lean Enterprise Institute, o Método dos 5 Porquês é uma técnica que consiste em perguntar repetidamente o porquê de um problema ter ocorrido, de forma a ir além dos sintomas óbvios e descobrir a sua causa raiz. Ohno (1997) defende que perguntando o porquê, no mínimo, cinco vezes é possível identificar a causa raiz do problema e corrigí-lo.

2.3.2.5 5W1H

A ferramenta 5W1H é utilizada como orientação para a obtenção de informações essenciais na elaboração de um plano de ação, baseada nas respostas para as seguintes perguntas:

- *What*: o quê?
- *Why*: por quê?
- *Where*: onde?
- *When*: quando?
- *Who*: quem?
- *How*: como?

Dados os conceitos apresentados acima, na seção a seguir são descritas a unidade industrial em estudo e a aplicação do Ciclo PDCA como metodologia de gestão de um projeto de redução do consumo de sulfato de sódio na caldeira de recuperação desenvolvido ao longo do ano de 2023 na empresa estudada.

O sistema de lixiviação de cinzas da L2 é denominado *AshLeach Duo*, uma vez que funciona em dois estágios de lixiviação pois, devido ao alto volume de cinzas que a caldeira produz, apenas um estágio não é suficiente para o tratamento das cinzas. Além disso, parte das cinzas é encaminhada diretamente ao tanque de mistura e não passa por tratamento. No estágio inicial, as cinzas oriundas dos precipitadores eletrostáticos são direcionadas para o primeiro tanque de lavagem, onde é realizada a primeira etapa de lixiviação. A lama formada é encaminhada para as centrífugas 1:1 e 1:2, onde é feita a separação sólido-líquido. Parte do rejeito das centrífugas recircula para o sistema e parte segue para a etapa de tratamento de efluentes. Os sólidos são encaminhados para outro tanque de lavagem, onde ocorre o segundo estágio de lixiviação. Assim como no primeiro, a lama formada no segundo estágio segue para a centrífuga 2.0, onde ocorre a separação sólido-líquido. A parte sólida é encaminhada para o tanque de mistura para ser misturada com o licor preto, sulfato de sódio e parte das cinzas não tratadas e, posteriormente, seguir para a etapa de evaporação. O rejeito do segundo estágio passa por recirculação e é utilizado nos tanques de lavagem.

3.2 Aplicação da metodologia – Etapas Plan e Do

A metodologia PDCA foi escolhida para o projeto em questão por sua simplicidade e facilidade de aplicação. Uma equipe multidisciplinar com especialistas, operadores, analistas e estagiários das áreas de Recuperação e Utilidades, Linha de Fibras, Manutenção, Meio Ambiente e Melhoria Contínua foi formada para atuar no projeto.

3.2.1 Plan

3.2.1.1 Identificação do problema

No ano de 2022, o consumo específico de sulfato de sódio da caldeira de recuperação da linha L2 da empresa em questão foi maior do que o orçado de 7 kg de Na₂SO₄/ADt¹. Conforme a Figura 8, o consumo foi em média de 8,46 kg de Na₂SO₄/ADt, mantendo uma média de sulfidez de 33,12%. Os meses de setembro e outubro apresentaram valores elevados de consumo de sulfato de sódio devido ao período pré e pós-parada geral, quando são requeridas maiores reposições de sulfato de sódio de forma a estabilizar a produção.

Desta forma, o objetivo do projeto foi, com base no ano de 2022, reduzir o consumo específico de sulfato de sódio para uma média de 7 kg Na₂SO₄/ADt por mês no ano de 2023 de forma a atender ao orçamento estipulado para 2023.

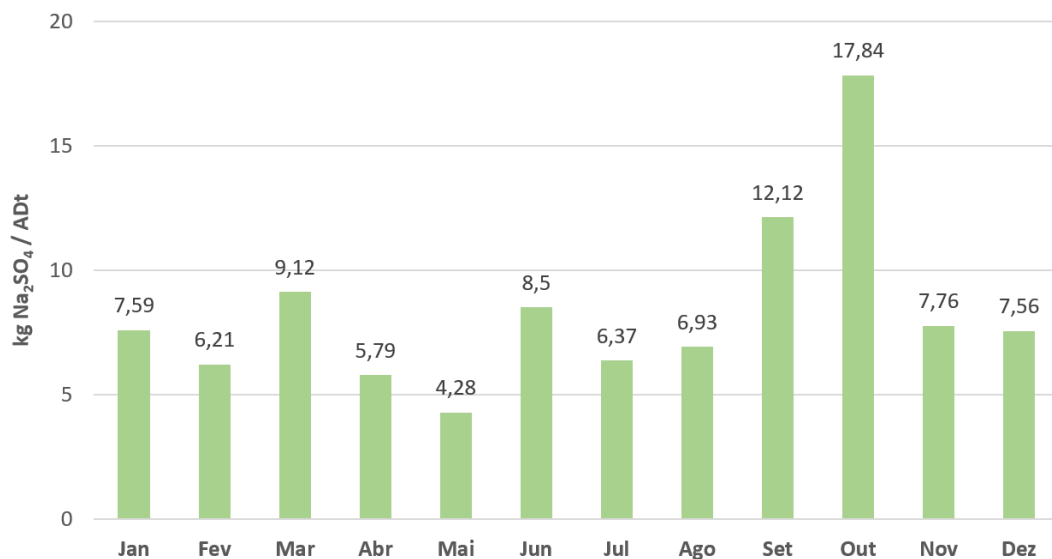
3.2.1.2 Análise do fenômeno

O controle de dosagem de sulfato de sódio segue as seguintes premissas:

- Mínima dosagem de sulfato possível;
- Sulfidez do licor branco entre 32 e 34%;
- Necessidade de reposição de sulfidez e alcalinidade;
- Aumento da dosagem de sulfato de sódio para repor sulfidez quando for dosada soda cáustica no sistema.

¹ ADt, do inglês *Air Dried Ton*, toneladas secas ao ar, é a unidade de medida de produção de celulose.

Figura 8: Consumo de sulfato de sódio para reposição no ano de 2022.



Fonte: A autora.

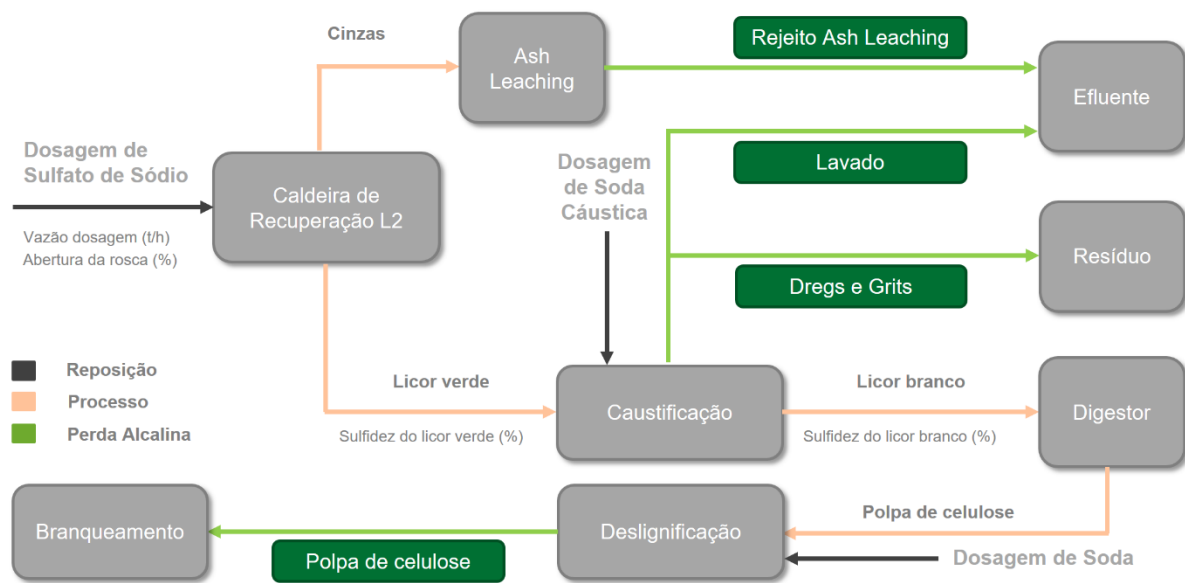
Dito isso, para reduzir a quantidade de sulfato de sódio dosada, pode-se minimizar as perdas alcalinas do processo. Melhorias no controle de dosagem poderiam ser realizadas, mas devido ao projeto de expansão da produção da empresa estudada, essa ação foi descartada pois o projeto já engloba a otimização de dosagem de sulfato, porém apenas para o ano de 2024.

A partir do mapeamento de processo (Figura 9) foi possível identificar que a perda alcalina pode ocorrer tanto nas etapas de lixiviação de cinzas (*ash leaching*) da caldeira, como ao final das etapas de caustificação e de deslignificação.

Identificadas as etapas onde ocorre o problema em questão, foram levantados os dados de perda alcalina em cada uma delas ao longo do ano de 2022, quando foi registrada perda alcalina total de 19,7 kg NaOH/ADt. Conforme apresentado no gráfico de Pareto na Figura 10, verificou-se que 54% da perda alcalina ocorreu no rejeito de *ash leaching*, enquanto 39% foram perdidos na polpa na etapa de deslignificação. Os 8% restantes foram perdidos nos resíduos da etapa de caustificação, sendo 7% no lavado e 1% nos *dregs* (impurezas do licor verde) e *grits* (impurezas após a obtenção do licor branco).

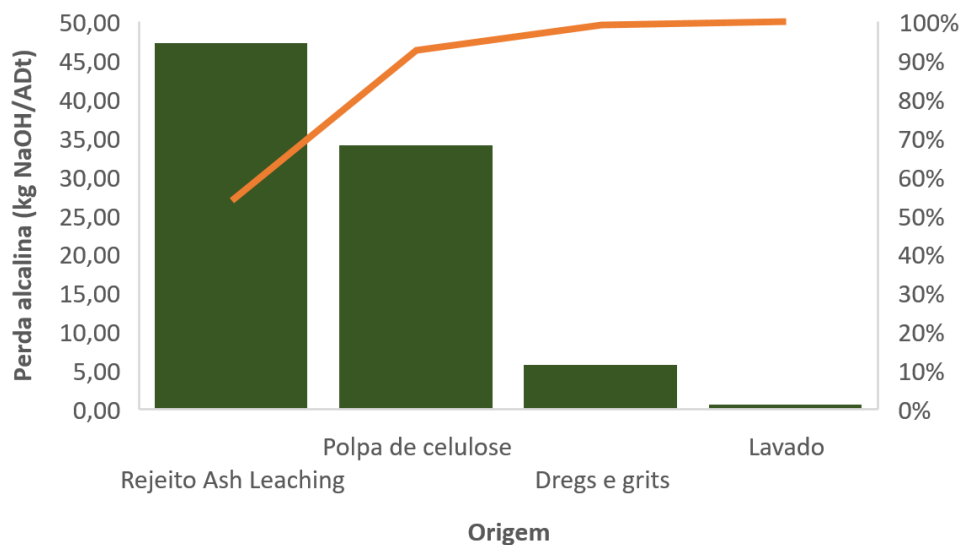
Além da necessidade da reposição de sulfato de sódio devido à perda alcalina, como dito anteriormente, pode ser necessário dosá-lo quando for dosada soda cáustica no sistema. O que ocorre é que a dosagem de soda cáustica causa um aumento de alcalinidade, que, por sua vez, causa uma redução na sulfidez, sendo necessária a dosagem de Na₂SO₄ para repor tal variável.

Figura 9: Mapeamento de perda alcalina do processo.



Fonte: A autora.

Figura 10: Gráfico de Pareto das perdas alcalinas na linha L2.



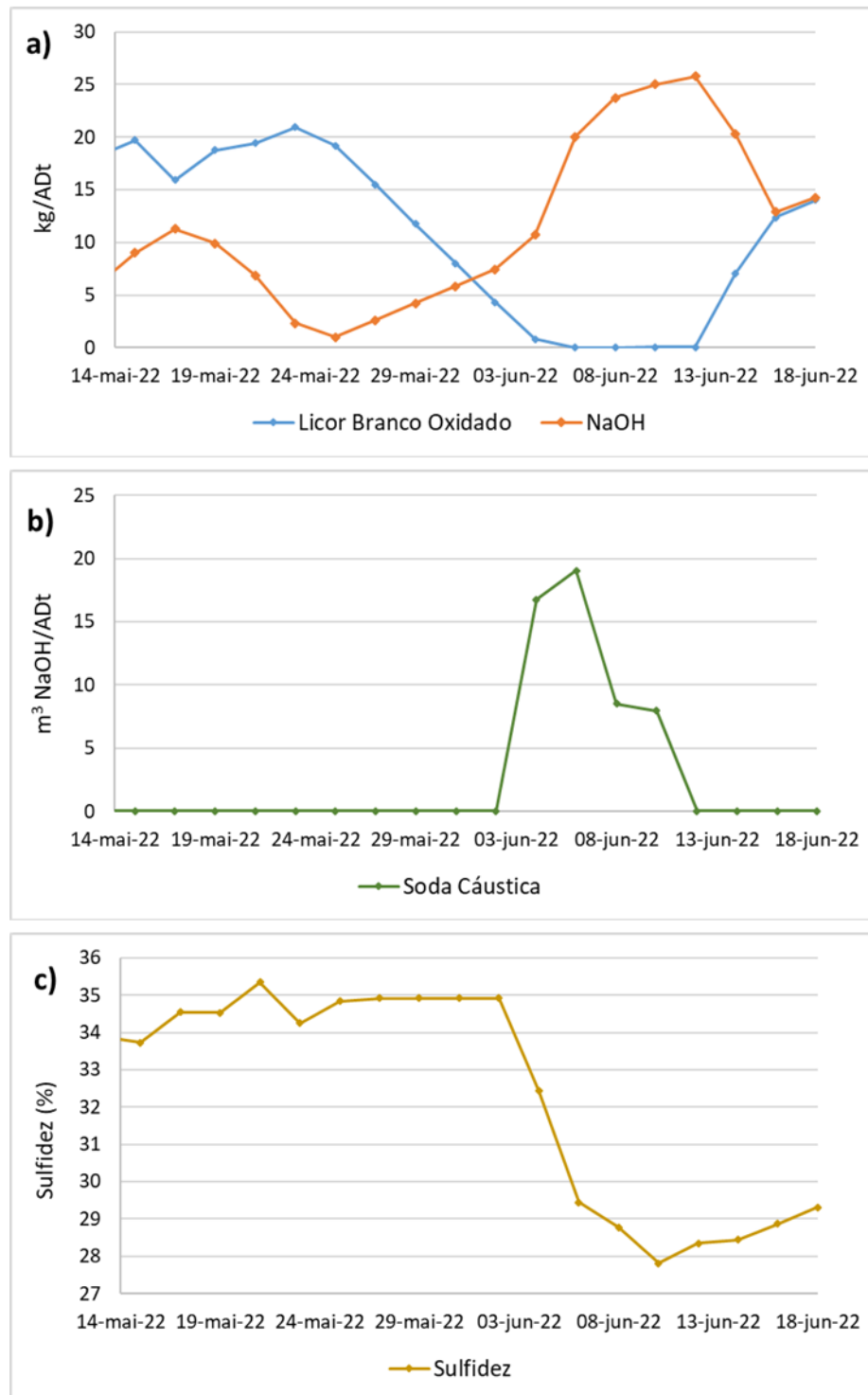
Fonte: A autora.

Conforme observado na Figura 11a, num período em que a dosagem de licor branco oxidado na deslignificação estava baixa, houve a necessidade de reposição de soda cáustica na deslignificação para recuperação da alcalinidade. No mesmo período, ocorreu a dosagem de soda na caustificação (Figura 11b) também com a finalidade de recuperar a alcalinidade. Figura 11c mostra que, como consequência das dosagens de álcali, foi possível notar uma queda na sulfidez no processo.

A dosagem de soda cáustica na deslignificação também é necessária quando há queda no nível de licor branco. Da mesma forma, é necessária a reposição da alcalinidade quando o

inventário de álcali é reduzido e, para tanto, pode-se dosar soda cáustica na deslignificação ou na caustificação ou, ainda, nas duas etapas ao mesmo tempo com o objetivo de retomar o álcali efetivo rapidamente. Outra prática utilizada para manutenção da alcalinidade é a transferência de licor preto da linha L1 para a L2.

Figura 11: Comparação entre a dosagem de álcali e sulfidez do processo.

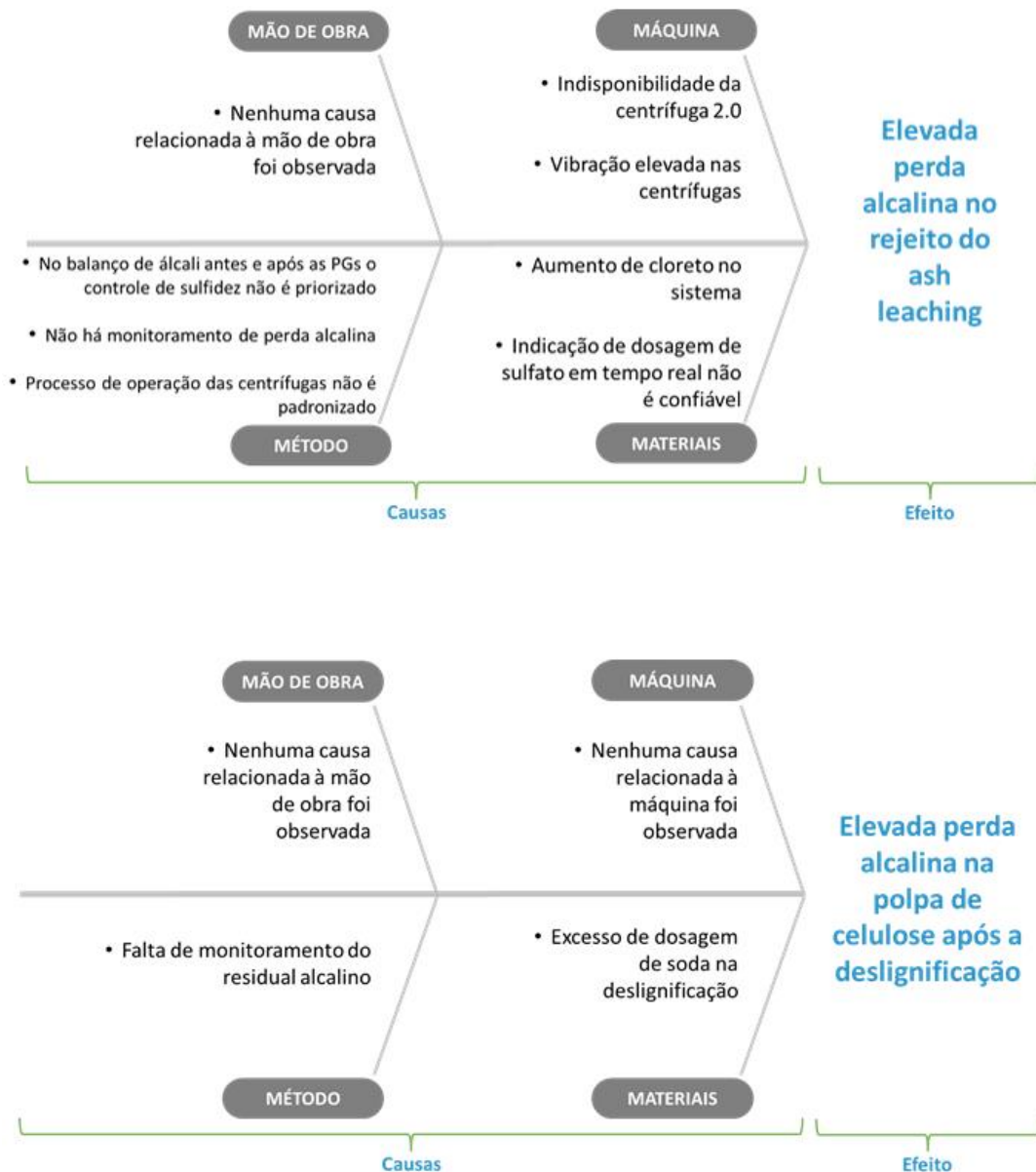


Fonte: A autora.

3.2.1.3 Análise do processo

Considerando o resultado do Diagrama de Pareto, foi definido que o foco do projeto seria nas elevadas perdas alcalinas no *ash leaching* e na lavagem da polpa. Dessa forma, as causas fundamentais desse problema foram levantadas em sessões de brainstorming pela equipe do projeto com a utilização do Diagrama de Causa e Efeito conforme a Figura 12.

Figura 12: Diagramas de Causa e Efeito para o problema de perda alcalina.



Fonte: A autora.

Uma vez levantadas as causas do problema, foram identificadas as causas raízes de cada uma delas através do uso da ferramenta dos 5 Porquês, conforme apresentado na Figura 13. Para cada causa raiz, foi elaborada uma ou mais ações para a solução do problema, conforme detalhado na seção a seguir.

Figura 13: Análise dos 5 Porquês para o problema de perda alcalina.

CAUSA	PORQUE	PORQUE	PORQUE	PORQUE	CAUSA RAZIZ
Elevada perda alcalina no ash leaching	Não há monitoramento de perda alcalina	Falta uma metodologia de controle do descarte do ash leaching considerando a quantidade de cloreto nas cinzas			Falta uma metodologia de controle do descarte do ash leaching considerando a quantidade de cloreto nas cinzas
	No balanço de álcali antes e após as PGs o controle de sulfidez não é priorizado	Não há padrão de controle de álcali e sulfidez antes e após as PGs			Não há padrão de controle de álcali e sulfidez antes e após as PGs
	Processo de operação das centrífugas não é padronizado	O padrão operacional das variáveis da centrífuga 2.0 não está definido			O padrão operacional das variáveis da centrífuga 2.0 não está definido
	Indisponibilidade da centrífuga 2.0	Quebra da centrífuga 2.0	Vibração e torque elevados	Limites de operação não alinhados com os de projeto	Limites de operação não alinhados com os de projeto
	Vibração elevada nas centrífugas	Lavagem ineficiente	Pressão de condensado baixa para lavagem	Não há uma bomba de condensado específica para o sistema de lavagem de centrífugas	Não há uma bomba de condensado específica para o sistema de lavagem de centrífugas
	Aumento de cloreto no sistema	Procedência da madeira			Procedência da madeira
	Indicação de dosagem de sulfato em tempo real não é confiável	Controle de dosagem pela abertura da rosca e pela balança não é preciso			Controle de dosagem pela abertura da rosca e pela balança não é preciso
Elevada perda alcalina na polpa após deslignificação	Falta de monitoramento do residual alcalino	Análises laboratoriais com pouca frequência	Não há gatilhos e limites bem definidos para acompanhamento e gestão da perda alcalina		Não há gatilhos e limites bem definidos para acompanhamento e gestão da perda alcalina
	Excesso de dosagem de soda na deslignificação	Ineficiência da lavagem das prensas	Qualidade do condensado (condutividade mais elevada)	Prensa trabalha acima da capacidade hidráulica	Prensa trabalha acima da capacidade hidráulica

Fonte: A autora.

3.2.1.4 Plano de ação

O plano de ação (Apêndice A) foi elaborado pela equipe multidisciplinar com o uso da ferramenta 5W1H. Foram definidas as ações, os responsáveis e os prazos para conclusão, além de justificativas para a realização das ações e como elas seriam feitas. O plano de ação foi registrado no portal de Gestão de Projetos utilizado pela unidade industrial e monitorado ao longo das reuniões mensais de acompanhamento do projeto.

Com relação ao problema de falta de metodologia de controle do descarte do *ash leaching* e monitoramento da perda alcalina, foi definida a ação de criação de uma planilha de controle de balanço de lixiviação de cinzas para estimativa de vazão de descarte recomendada, a fim de alcançar uma porcentagem mínima de teor de cloreto nas cinzas. Além disso, visto que eram feitas análises periódicas de laboratório da quantidade de sódio existente nos pontos de perda alcalina, mas não existia um reporte dos dados efetivos para a equipe, foi definida a ação de criação de acompanhamento semanal de perda alcalina e divulgação dos resultados das análises laboratoriais de forma a conscientizar a equipe sobre a importância do tema e identificar desvios e possíveis tratativas.

Ainda no que diz respeito ao acompanhamento da perda alcalina, foi estabelecido que limites e gatilhos devem ser definidos e notificados semanalmente para a equipe de produção, por meio das reuniões de acompanhamento de variáveis, a fim de possibilitar ações reativas e imediatas.

Para o problema do controle de sulfidez não ser priorizado nos balanços de álcali antes e após as paradas gerais (PG) da fábrica, foi estipulado que para a PG do mês de outubro devia ser definida uma estratégia em relação ao inventário de álcali, dosagem de sulfato e dosagem de soda cáustica após a PG, de forma a minimizar a reposição de sulfato de sódio após paradas.

No que se refere às três centrífugas do sistema de lixiviação de cinzas, foi estabelecida a ação de criação de procedimento operacional padrão (POP) seguindo os limites especificados pelos manuais dos equipamentos, de forma a evitar que as centrífugas operem em sobrecarga. Além disso, foi estipulado que os limites de vazão de entrada e densidade de sólidos deveriam ser revisados para adequar as condições de trabalho às condições de projeto.

De forma a mapear o aumento de cloreto no sistema, foi definido que a eficiência de remoção de cloretos no *ash leaching* devia ser acompanhada através do monitoramento das análises laboratoriais periódicas de amostras das cinzas tratadas.

Visto que os dados de vazão (t/h) de sulfato de sódio dosado são obtidos de forma bastante simplificada, através da relação entre a abertura da rosca e a medição da balança, para obter dados mais precisos para acompanhamento da dosagem de sal foi estabelecida a ação de criação de uma *tag* de acompanhamento no software de processo PI Vision™ em que pudesse ser registrada a quantidade de saída diária de sulfato de sódio do estoque, dado que todo o sal que sai do almoxarifado é utilizado para reposição no tanque de mistura.

Para o problema da perda alcalina por lavagem da polpa na etapa de deslignificação, foi definido que a equipe deve buscar um produto químico auxiliar de lavagem no mercado que torne a etapa mais eficaz de maneira a evitar o uso excessivo de químicos e maior perda alcalina. Além disso, como parte do projeto de ampliação da fábrica haverá um aumento da capacidade de lavagem a partir da instalação de duas prensas em série após a etapa de deslignificação.

No que diz respeito a não existir uma bomba de condensado dedicada para o sistema de lavagem das centrífugas, também como parte do projeto de ampliação da fábrica, serão instaladas linha e bomba dedicadas especificamente para etapa de lavagem dos separadores de arraste (*demisters*) da evaporação, que utilizam da mesma bomba utilizada para lavagem das centrífugas do *ash leaching*, eliminando, portanto, a interferência na pressão de condensado para lavagem destas.

3.2.2 Do

As ações foram realizadas ao longo do segundo semestre de 2023 e o andamento do projeto foi acompanhado quinzenalmente pela equipe de Melhoria Contínua e nas reuniões mensais de resultados da unidade industrial. As demais etapas do PDCA são apresentadas na próxima seção.

4 Resultados

4.1 Aplicação da metodologia – Etapas Check e Act

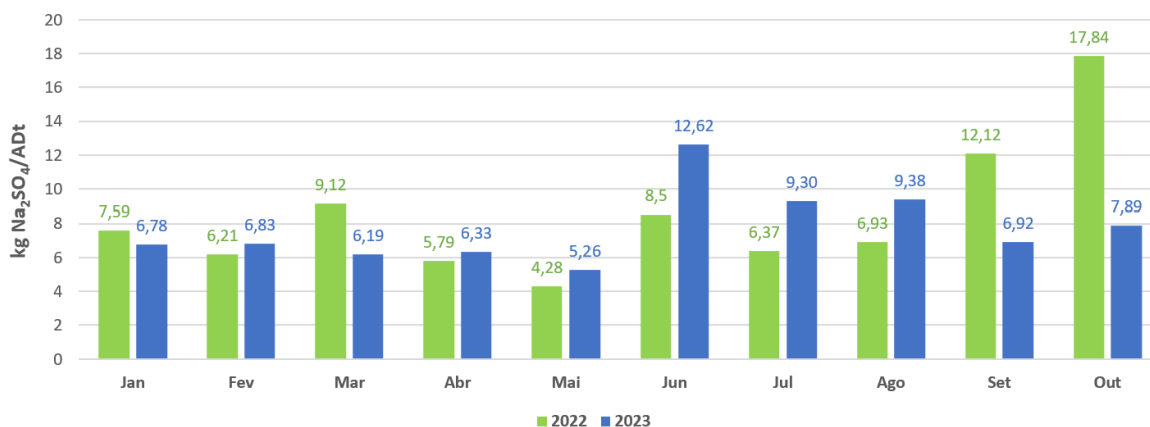
Os dados de consumo de sulfato de sódio na CR2 foram monitorados no período de janeiro a outubro de 2023, pois, nos meses de novembro e dezembro ocorreram a parada, a partida e o início da estabilização da produção da L2 após finalizada a implementação da nova caldeira de recuperação (CR3). De posse dos dados, foi realizada a verificação das ações implementadas durante o projeto, seus impactos na solução do problema e as ações bem-sucedidas foram padronizadas, conforme detalhado nos tópicos a seguir.

4.1.1 Check

A partir do levantamento dos dados, observou-se que a meta de redução de 7 kg $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{ADt}$ não foi atingida. A equipe de Recuperação e Utilidades considera que a meta foi superestimada, pois ela foi definida utilizando como base o consumo específico de sulfato de sódio no período mais estável da produção em 2022, sem considerar a questão do aumento da capacidade produtiva, bem como as paradas gerais para ampliação da fábrica, os períodos de pré e pós-PGs e o período de estabilização da produção.

Contudo, a partir da implementação das ações estabelecidas, em 2023 foi possível reduzir o consumo específico de sulfato de sódio na caldeira de recuperação da linha L2 de 8,47 para 7,46 kg $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{ADt}$, equivalente a uma redução de 8,55% em comparação com o ano de 2022, conforme apresentado na Figura 14.

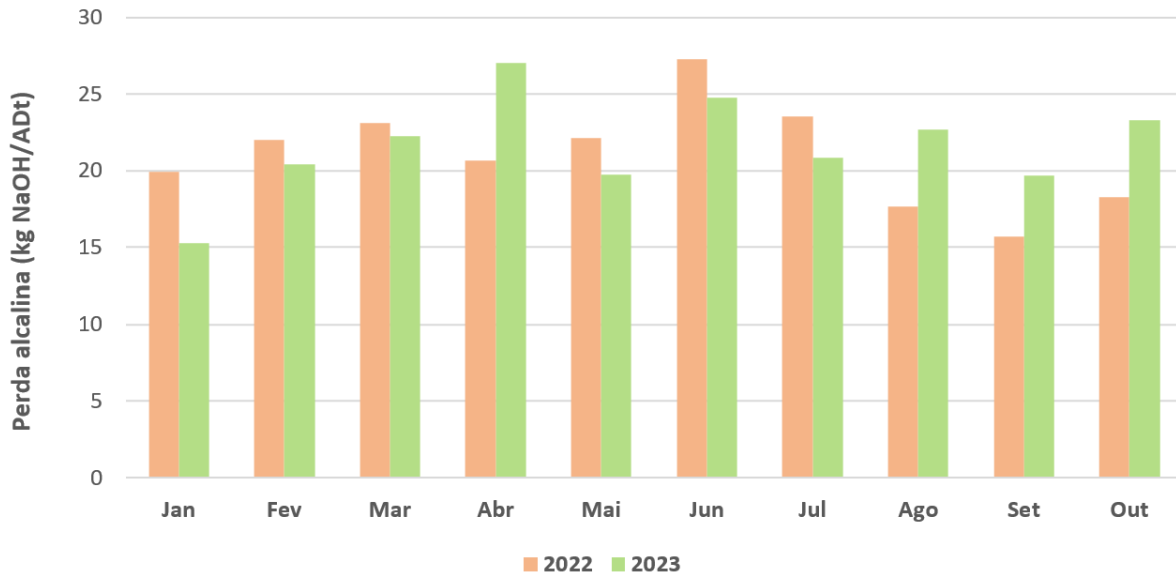
Figura 14: Consumo específico de sulfato de sódio na caldeira de recuperação nos anos de 2022 e 2023.



Fonte: A autora.

Apesar da redução do consumo específico de sulfato de sódio, não houve redução da perda alcalina no ano de 2023 em comparação ao ano anterior, conforme mostrado na Figura 15. Em 2023, a média total da perda alcalina foi de 21,6 kg NaOH/ADt , representando um aumento de 2,67% em relação ao ano de 2022.

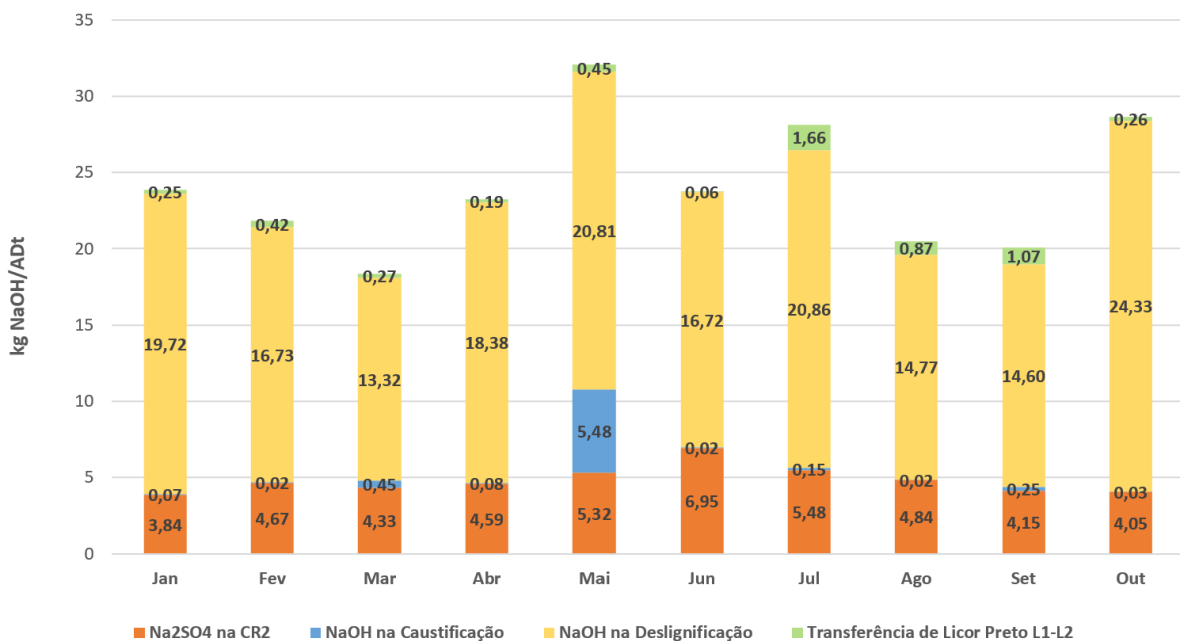
Figura 15: Perda alcalina nos anos de 2022 e 2023.



Fonte: A autora.

A redução do consumo de sulfato de sódio, mesmo quando a perda alcalina aumentou em relação ao ano de 2022, é justificada pela utilização de outras formas de reposição de alcalinidade no processo em 2023, conforme a Figura 16. O mês de abril, por exemplo, teve alta perda alcalina, mas a reposição de álcali se deu principalmente pela utilização de soda cáustica na deslignificação.

Figura 16: Reposição de alcalinidade no processo em 2023.



Fonte: A autora.

Um dos principais fatores que impactaram negativamente no andamento do projeto foi o fato de a centrífuga 2.0 em sua capacidade projetada não atender à necessidade do processo. Segundo o fabricante, o limite de operação do equipamento é de 24.400 kg/h de cinzas recebidas para tratamento. No entanto, a faixa de trabalho aplicada para atender a eficiência desejada para o processo de lixiviação de cinzas era entre 36.000 e 40.000 kg/h. Desta forma, a operação excedia a capacidade, o que ocasionou a exaustão do equipamento e na consequente necessidade de uma manutenção frequente, tornando a centrífuga 2.0 indisponível até junho de 2023 e levando ao aumento da perda alcalina por *ash leaching*. Mesmo quando a centrífuga retornou após o conserto, ao operar com a centrífuga 2.0 com a vazão limitada pelo fornecedor, não foi possível obter os níveis de remoção de cloreto e potássio desejados. Assim, foram revisados os limites apenas para as centrífugas 1.1 e 1.2 e optou-se por não utilizar a centrífuga 2.0 para o tratamento de cinzas, a fim de preservar a operação contínua da caldeira de recuperação.

É importante destacar que, com o projeto de implantação da nova caldeira de recuperação (CR3) foi instalado, também, um novo sistema de lixiviação de cinzas que tem capacidade de tratamento não só do material oriundo da CR3, mas também das cinzas da CR2. Portanto, a questão da centrífuga 2.0 não suportar a vazão necessária para a eficiência do processo de *ash leaching* será tratada após a estabilização da produção em 2024, uma vez finalizado o projeto de ampliação da fábrica.

O teste industrial com o produto auxiliar de lavagem não apresentou resultados significativos e apenas traria benefícios se houvesse melhoria na eficiência da prensa da deslignificação, sendo necessárias mudanças no próprio equipamento.

Dentre as ações que trouxeram impacto positivo para o resultado, destaca-se a inclusão de uma bomba dedicada a lavagem dos *demisters* da evaporação, que permite que a etapa de *ash leaching* possua uma bomba específica para lavagem das centrífugas. A pressão do condensado para lavagem aumentou após a implementação do equipamento, aumentando a eficiência na lavagem da centrífuga e, conseqüentemente, trazendo uma melhora no sistema de lixiviação de cinzas.

4.1.2 Act

4.1.2.1 Padronização

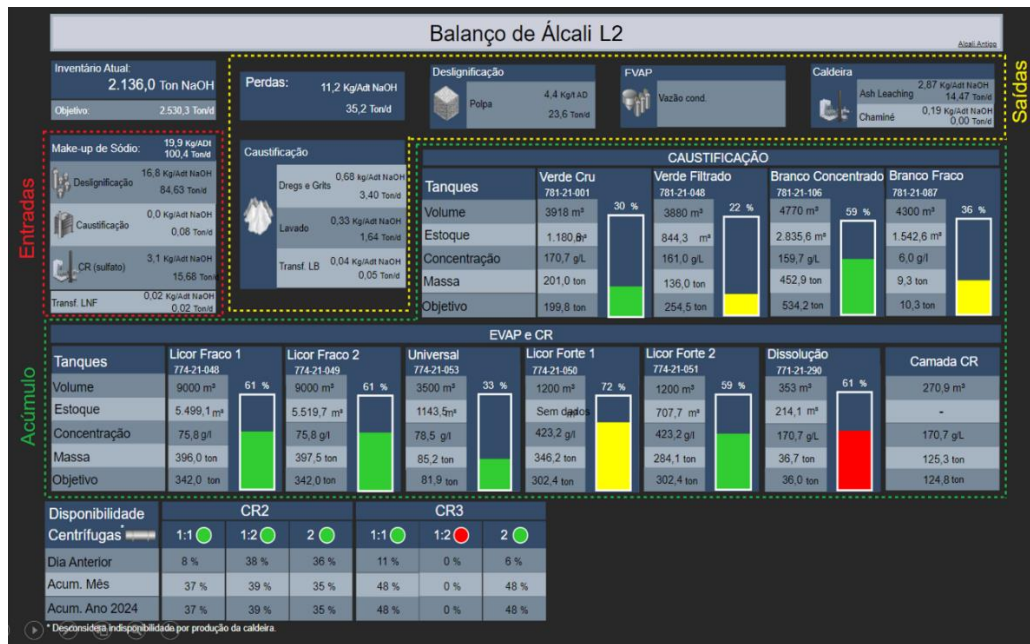
De forma a manter as melhorias realizadas no projeto, a partir do relatório semanal dos dados de perda alcalina, foi elaborada uma tela de acompanhamento de balanço de álcali no software PI Vision™, conforme a Figura 17. Com isso, tem-se a automatização da visualização dos resultados e agilidade na tratativa de desvios do indicador, que passa a ser visto diariamente nas reuniões de controle de variáveis críticas.

Foi elaborado um Procedimento Operacional Padrão (POP) para as centrífugas da linha L2 de forma a padronizar a operação dos equipamentos, considerando os limites de fluxo e densidade de cinzas. O documento está disponível para todos os colaboradores da empresa no *SoftExpert Excellence Suite™*, o Sistema de Gestão Integrado utilizado, e os operadores de painel e área foram treinados na tarefa. Na Figura 18 são mostradas algumas das informações contidas no POP.

4.1.2.1 Conclusão

Em dezembro de 2023, em reuniões de fechamento de projeto e seminário de apresentação de resultados para as gerências da unidade industrial, foi identificado que o projeto de redução do consumo específico de sulfato de sódio deve continuar no ano de 2024, especialmente devido ao aumento de capacidade de produção da planta.

Figura 17: Tela de acompanhamento de balanço de álcali da linha L2.



Fonte: A autora.

Figura 18: Procedimento Operacional Padrão (POP) para o sistema AshLeach Duo.

Descrição		Pontos de atenção														
Responsável/Executante: Operador de Área/ Painel		Qualidade: Prevenção de defeitos, pontos de inspeção, atendimento à especificações.														
Área/Processo relacionado: Caldeira de Recuperação e Evaporação G2		Produtividade: Otimizar tempo máquina, ciclo, prevenir perdas de produção.														
Objetivo: Padronizar a operação do sistema do Ash Leaching G2, realizada em operações normais, a fim de garantir o funcionamento adequado do sistema.		Energia: Prevenção do consumo desnecessário de energia.														
		Segurança: Prevenção de acidentes, ergonomia, riscos associados.														
		Meio ambiente: Prevenção de danos ao meio ambiente e uso racional de recursos.														
ID	Imagem	Descrição (passo a passo)	Pontos de atenção													
1		Verificar se a operação das centrífugas atende aos <u>padrões operacionais</u> do processo: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Estágio</th> <th>Centrífuga</th> <th>Fluxo de Lama kg/h</th> <th>Densidade kg/m3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">1º estágio</td> <td>1.1</td> <td rowspan="2">41.120</td> <td rowspan="2">1430</td> </tr> <tr> <td>1.2</td> </tr> <tr> <td>2º estágio</td> <td>2.0</td> <td>24.400</td> <td>1430</td> </tr> </tbody> </table>	Estágio	Centrífuga	Fluxo de Lama kg/h	Densidade kg/m3	1º estágio	1.1	41.120	1430	1.2	2º estágio	2.0	24.400	1430	
Estágio	Centrífuga	Fluxo de Lama kg/h	Densidade kg/m3													
1º estágio	1.1	41.120	1430													
	1.2															
2º estágio	2.0	24.400	1430													
2		Solicitar ao operador de área para inspecionar regularmente o topo dos tanques de <u>lixiviação</u> para assegurar boas condições de mistura das cinzas/cinzas tratadas.	 													
3		Certificar-se de que os <u>agitadores</u> dos tanques de ash leaching estão operando, a fim de evitar a sedimentação nos tanques.	 													

Fonte: A autora.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O presente trabalho envolveu o estudo sobre o processo Kraft, mais especificamente sobre o ciclo de recuperação e a reposição de sulfato de sódio no processo, além de abordar a metodologia PDCA para gestão de projetos e a utilização de ferramentas da qualidade. Foi possível observar problemas reais e rotineiros de uma indústria de celulose e perceber que a aplicação de uma metodologia de solução de problemas é de alta complexidade.

O estudo de caso do projeto de redução do consumo específico de sulfato de sódio na caldeira de recuperação evidenciou que um projeto de melhoria no ambiente industrial é complexo, pois depende de fatores operacionais que muitas vezes podem ser imprevisíveis, como por exemplo, a questão da indisponibilidade da centrífuga 2.0.

Num cenário atípico para a empresa, com duas paradas gerais no ano de 2023, além da conclusão da implementação da CR3, as ações planejadas para o projeto em questão muitas vezes não foram priorizadas. O que aconteceu foi que o foco das equipes da unidade industrial estava nas atividades relacionadas ao projeto de ampliação da fábrica, impactando na dedicação e na implementação das ações dos projetos menores de melhoria e, conseqüentemente, no seu resultado.

A meta do projeto de reduzir em média 7 kg Na₂SO₄/ADt por mês foi superestimada, pois não foram considerados em sua determinação os impactos da ampliação da capacidade produtiva, o período de estabilização da produção e o maior consumo de sulfato de sódio após os períodos de parada geral em sua devida proporção. O que ocorreu foi uma falha na execução da etapa de planejamento do PDCA, pois a meta foi baseada apenas na necessidade de se atingir o valor orçado para o ano de 2023, desconsiderando a viabilidade operacional de atingimento desse resultado.

Mesmo com as questões citadas até aqui, as ações tomadas para a solução do problema cumpriram seu objetivo de reduzir em 8,55% o consumo específico de sulfato de sódio na caldeira de recuperação em comparação com o ano de 2022 e, conseqüentemente, reduzir os gastos com suprimentos. Além disso, a utilização da metodologia PDCA foi importante para dar início à tratativa do problema. Através do projeto, a equipe de trabalho pôde atingir um nível maior de conhecimento sobre o tema, além de aumentar o engajamento para solução de problemas e contribuir para a melhoria da gestão dos projetos da área de Recuperação e Utilidades.

Uma estratégia a ser adotada pela empresa futuramente pode ser a implementação de um projeto de melhoria focado na redução da perda alcalina, tendo em seu escopo todas as etapas do processo produtivo e a redução do consumo tanto de sulfato de sódio como de soda cáustica. A utilização uma ferramenta de qualidade mais robusta e com maiores recursos estatísticos, como a metodologia Lean Six Sigma, pode possibilitar melhor identificação da causa raiz do problema e maior foco e controle para solucioná-lo.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. S. DE. **Influência da carga alcalina no processo de polpação Lo-Solids® para madeiras de eucalipto**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 30 set. 2003.
- ALMEIDA, G. M. DE. **Deteção de situações anormais em caldeiras de recuperação química**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 12 set. 2006.
- ALMEIDA, J.; GOMIDE, J.; SILVA, D. Dissolução dos constituintes da madeira de eucalipto ao longo dos processos kraft contínuo convencional e aditivado. **Revista Árvore**, v. 24, n. 2, p. 215–222, 2000.
- ANDREUCETTI, M. T. **Caracterização do licor negro de eucalipto na etapa de evaporação e correlação de suas propriedades**. Dissertação—Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2010.
- BORDADO, J. C. M.; GOMES, J. F. P. Atmospheric emissions of Kraft pulp mills. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 41, n. 8, p. 667–671, set. 2002.
- CAMPOS, V. F. **Gerenciamento da rotina do trabalho do dia-a-dia**. 9. ed. Nova Lima: INDG, 2013.
- CARREIRO, M. R. DE M. **Análise exergética e ambiental do processamento do licor negro gerado em fábricas de celulose e papel**. Dissertação—Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2009.
- CARVALHO, M. DA G. **Efeito das variáveis de cozimento nas características químicas de pastas kraft de eucalyptus globulus**. Coimbra: Universidade de Coimbra, 1999.
- D'ALMEIDA, M. **Celulose e papel: Tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2. ed. São Paulo: IPT, Centro Técnico em Celulose e Papel, 1988. v. I
- DEPARTAMENTO DE PESQUISAS E ESTUDOS ECONÔMICOS (DEPEC). **Papel e Celulose**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset_papel_e_celulose.pdf>. Acesso em: 9 jan. 2024.
- GOMES, R. M. **Impacto da sulfidez em processos kraft de polpação**. Tese—Piracicaba: Universidade de São Paulo, 16 dez. 2019.
- GOMIDE, J. L. **Polpa de celulose: química dos processos alcalinos de polpação**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1979.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório Anual 2023**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>>. Acesso em: 9 jan. 2024.

JORGE, I. E. **Estudo sobre a extração de lignina do licor negro, seu impacto no processo de recuperação e geração de energia e seu potencial uso em novas aplicações**. Monografia—Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

KOSKELA, L. **Lean Production in Construction**. 26 maio 1993. Disponível em: <https://www.iaarc.org/publications/proceedings_of_the_10th_isarc/lean_production_in_construction.html>. Acesso em: 8 nov. 2023

LARSSON, M. **Calculation tool for the treatment of electrostatic precipitator ash in Metso's ash leaching process**. Tese—Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2012.

MARIANI, C. A. Método PDCA e ferramentas da qualidade no gerenciamento de processos industriais: um estudo de caso. **Revista de Administração e Inovação**, v. 2, n. 2, p. 110–126, 2005.

MENDES, A. F. **Impacto da lavagem da polpa marrom no branqueamento, na evaporação e no meio ambiente**. Dissertação—Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 15 jul. 2013.

MIMMS, A.; KOCUREK, M. J.; PYATTE, J. A.; et al. **Kraft Pulping: A Compilation of Notes**. Atlanta: Tappi Press, 1993.

OHNO, T. **O Sistema Toyota de Produção: além da produção em larga escala**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 1997.

PEREIRA, R. DA C. **O Setor de papel e celulose brasileiro: uma análise sob a ótica da avaliação social do ciclo de vida**. Dissertação—Dourados: Universidade Federal da Grande Dourados, 2019.

RODRIGUES, M. V. **Ações para a qualidade: gestão estratégica e integrada para a melhoria dos processos na busca da qualidade e produtividade (GEIQ)**. 6. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2020.

SHINGO, S. **O Sistema Toyota de Produção do ponto de vista da Engenharia de Produção**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 1996.

SILVA, F. DA. **Impactos da sulfidez e adição de antraquinona nas emissões de metilmercaptana, nas características e na branqueabilidade de polpas kraft de Eucalyptus**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2001.

SIXTA, H. **Handbook of Pulp**. Weinheim: Wiley, 2008. v. 1–2

STEIN, F. **Modelagem da produção industrial de celulose Kraft com modelos aditivos generalizados e redes neurais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2010.

TRAN, H.; VAKKILAINEN, E. K. The kraft chemical recovery process. 2016.

TRAN, H.; VILLARROEL, R. **Operational challenges in energy and chemical recovery in kraft pulp mills**. 7th International Colloquium on Eucalyptus Pulp. **Anais...**Vitória: Universidade Federal de Viçosa, 2015

VAKKILAINEN, E. K. **Kraft recovery boilers - Principles and practice**. Helsinki: Suomen Soodakattilayhdistys r.y., 2005.

VENSON, I.; ANDRADE, A. S. DE; KLOCK, U.; et al. INFLUÊNCIA DA LAVAGEM INTERMEDIÁRIA NA DESLIGNIFICAÇÃO COM OXIGÊNIO EM POLPA KRAFT. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 4, p. 991–999, 30 dez. 2015.

WERKEMA, C. **Métodos PDCA e DEMAIC e suas ferramentas analíticas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Atlas, 2021.

WERKEMA, C. **Ferramentas Estatísticas Básicas do Lean Seis Sigma Integradas ao PDCA e DMAIC**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Atlas, 2022a.

WERKEMA, C. **Lean Seis Sigma - Introdução às Ferramentas do Lean Manufacturing**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Atlas, 2022b.

WOMACK, J.; JONES, D.; ROOS, D. **A Máquina que Mudou o Mundo**. 3. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2004.

APÊNDICE A

Plano de ação elaborado utilizando a ferramenta 5W1H.

Causa (Ishikawa)	Fator do Problema (Modo de Falha)	What (o que será feito?) PLANO DE AÇÃO	Why (por que será feito?) RESULTADO ESPERADO	Where (onde será feito?)	When (quando será feito?) dd/mm/aaaa	Who (por quem será feito?) RESPONSÁVEL	How (como será feito?)	Data de Conclusão dd/mm/aaaa
Método	Falta de uma metodologia de controle do descarte do ash leaching x Cl nas cinzas e monitoramento da perda alcalina	Criar uma planilha de controle com os cálculos de balanço do ash leaching para estimar a vazão de descarte recomendada a fim de se alcançar o cloreto de 1,9% nas cinzas	Para possibilitar um controle mais preciso em relação a perda alcalina por resíduo do ash leaching e ter melhor planejamento do balanço de álcali	Ash Leaching CR2	08/12/2023	L.R.	Cálculos de balanço	18/12/2023
Método	Falta de uma metodologia de controle do descarte do ash leaching x Cl nas cinzas e monitoramento da perda alcalina	Realizar um acompanhamento semanal das perdas alcalinas e divulgar para as equipes	Para conscientizar a equipe sobre a importância do tema e identificar desvios e possíveis tratativas	Áreas com Perda Alcalina na L2	30/06/2023	L.R. / A.M.	Relatórios de perda alcalina enviados por e-mail semanalmente	30/06/2023
Método	No balanço de álcali antes e após as PGs o controle de sulfidez não é priorizado	Para a PG de outubro, definir uma estratégia de retorno da PG em relação a inventário de álcali, dosagem de sulfato e dosagem de soda	Minimizar a reposição de sulfato após PGs	CR2	31/10/2023	L.R.	Balanço e procedimento	17/10/2023
Método	Não há um padrão operacional para as variáveis das centrífugas	Criar um procedimento seguindo os limites especificados pelo manual do equipamento	Evitar que as centrífugas operem em sobrecarga	Centrífugas 1.1 e 1.2	08/12/2023	J.R. / A.M.	Procedimento	15/12/2023
Máquina	Limites de operação não alinhados com os de projeto	Revisar os limites de sólido de entrada e densidade para adequar as condições de trabalho as condições de projeto	Evitar que a centrífuga opere em sobrecarga	Centrífugas 1.1, 1.2 e 2.0	01/10/2023	L.R.	Cálculos de limite	01/10/2023
Máquina	Não há uma bomba de condensado dedicada para o sistema de lavagem das centrífugas	Será tratado no projeto de ampliação, em que será implementado uma linha e bomba dedicada para lavagem dos Demisters, assim eliminando a interferência na pressão para lavagem das centrífugas	Garantir uma lavagem eficiente, com maior pressão de condensado	Evap 2	30/11/2023	A.C. / D.G.	Inclusão de bomba dedicada - Projeto de ampliação	30/11/2023
Material	Procedência da madeira	Acompanhamento da eficiência de remoção de Cl no ash leaching	Mapear aumento de cloreto no sistema	Ash Leaching CR2	01/07/2023	L.R.	Análises de laboratório e monitoramento dessas análises	01/07/2023
Material	Indicação de dosagem de sulfato em tempo real não é confiável	Solicitação da criação de uma TAG em que possa ser registrado o quanto sai de estoque diariamente de forma mais precisa	Obter dados mais precisos para acompanhamento da dosagem de sulfato	Dosagem de Sulfato	30/07/2023	A.M. / L.R. / L.F.	Criação de tag	30/07/2023
Método	Não há gatilhos e limites bem definidos para acompanhamento e gestão da perda alcalina	Definir gatilhos e limites, sendo notificado semanalmente (reunião quinzenal para follow up)	Obter gatilhos a fim de possibilitar ações reativas	Tela de Balanço de Álcali no PI	12/01/2024	R.L. / L.R.	Criação de limites na tela de acompanhamento da perda alcalina e inclusão das principais perdas como variável do SDCA	31/07/2023
Material	Trabalha acima da capacidade hidráulica	Buscar produto químico no mercado que torne a lavagem mais eficaz apresentando um menor fator de diluição (lavagem melhor com menos volume) para melhorar a qualidade do condensado	Reduzir a perda alcalina por lavagem da polpa na designificação	Designificação o L2	21/07/2023	J.L.	Através de testes utilizando novo produto	21/07/2023
Material	Trabalha acima da capacidade hidráulica	Ampliação da capacidade de lavagem ao serem instaladas duas prensas em série após a designificação	Reduzir a perda alcalina por lavagem da polpa na designificação	Projeto de ampliação	30/11/2023	A.B. / T.C	Inclusão de prensas novas - Projeto de ampliação	30/11/2023