



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO



Breno Faria Grossi Gonçalves

**Monitoramento de massa das cinzas de uma caldeira de
recuperação em uma planta de papel e celulose**

Ouro Preto

2025

Breno Faria Grossi Gonçalves

Monitoramento de massa das cinzas de uma caldeira de recuperação em uma planta de papel e celulose

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador(a): Dr. Agnaldo José da Rocha Reis

Ouro Preto

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G635m Gonçalves, Breno Faria Grossi.

Monitoramento de massa das cinzas de uma caldeira de recuperação em uma planta de papel e celulose. [manuscrito] / Breno Faria Grossi Gonçalves. - 2025.

34 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Controle e Automação .

1. Caldeiras - Caldeira de recuperação. 2. Aparelhos e materiais elétricos - Transdutores. 3. Mecânica - Massa (Física). 4. Caldeiras - Índice de Incrustação (li). I. Reis, Agnaldo José da Rocha. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 681.3

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E
AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Breno Faria Grossi Gonçalves

Monitoramento de Massa das Cinzas de uma Caldeira de Recuperação em uma Planta de Papel e Celulose

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Aprovada em 05 de setembro de 2025

Membros da banca

Doutor - Agnaldo José da Rocha Reis - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutora - Luciana Gomes Castanheira - Examinadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Engenheiro - Marcus Vinicius Santos - Examinador (Andritz Group)

Agnaldo José da Rocha Reis, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou o seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 13/10/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Agnaldo Jose da Rocha Reis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/10/2025, às 21:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0996131** e o código CRC **B9409ABD**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente aos meus pais Márcia e Wallace, que sempre estiveram por perto para me auxiliar nos momentos difíceis da vida.

Ao meu orientador Dr. Agnaldo José da Rocha Reis pelos conhecimentos compartilhados.

À professora Dra. Luciana Gomes Castanheira pela dedicação e ajuda.

E ao Marcus Santos, meu orientador de estágio, que me ajudou no início da minha jornada profissional.

A todos, os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Apresenta-se neste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) a implementação de um sistema de automação para uma planta de papel e celulose, com foco no monitoramento de massa das cinzas nos trocadores de calor de uma caldeira de recuperação (CR). O sistema implementado utiliza células de carga com a finalidade de monitorar a massa das cinzas acumuladas na CR e, desse modo, fornecer informações críticas, como o índice de incrustação de cinzas nos trocadores de calor da CR, aos operadores, engenheiros e técnicos de manutenção. Para o desenvolvimento do sistema de monitoramento foi utilizado o software *Metris all-in-one*, de propriedade da empresa Sindus Andritz. O Metris é um software que oferece diversos aplicativos com diferentes soluções para a indústria 4.0, e, no caso deste trabalho, o Metris foi utilizado como ferramenta responsável pela aquisição e tratamento dos dados gerados pelos sensores de campo, para que, com os dados obtidos, fosse possível produzir uma IHM de alta eficiência. O sistema de monitoramento de cinzas atende a um problema industrial clássico das CRs de plantas celulósicas, sendo peça chave para o adequado funcionamento das fábricas, e, na redução dos custos do processo produtivo.

Palavras-Chave: caldeira de recuperação, células de carga, massa, índice de incrustação.

ABSTRACT

This article presents the implementation of an automation system for a pulp and paper plant, focusing on monitoring the mass of ash in the heat exchangers of a Recovery Boiler (RB). The implemented system uses load cells to monitor the mass of ash accumulated in the RB and, thus, provide critical information, such as the ash fouling index in the RB heat exchangers, to operators, engineers, and maintenance technicians. Metris all-in-one software, owned by Sindus Andritz, was used to develop the monitoring system. Metris offers several applications with different solutions for Industry 4.0. In this work, Metris was used as the tool responsible for acquiring and processing data generated by field sensors, enabling the production of a highly efficient HMI. The ash monitoring system addresses a classic industrial problem in cellulosic plant CRs, being a key component for the proper functioning of the factories and for reducing production process costs.

Keywords: Recovery boiler, load cells, mass, fouling index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de uma indústria de papel e celulose	4
Figura 2 - Composição química da fibra da madeira.....	5
Figura 3 - Representação de um Digestor contínuo e suas zonas de processo.....	6
Figura 4 - Esquema do processo Kraft de produção de celulose de mercado	7
Figura 5 - Licor negro separado da polpa durante a lavagem	8
Figura 6 - Fluxograma da geração de vapor.....	9
Figura 7 - Variação da temperatura do licor em relação ao derretimento de cinzas	12
Figura 8 - Visão da CR com os trocadores de calor	15
Figura 9 - Ponte Wheatstone	16
Figura 10 - Ponte de Wheatstone com representação das tensões E0 e E1	17
Figura 11 - Exemplo de um sensor de extensômetro.....	17
Figura 12 - Arquitetura do sistema de monitoramento.....	19
Figura 13 - Sensores do sistema HEWI na fábrica de Varkaus.....	20
Figura 14 - Exemplo da interface do Vpshere para gerenciamento de máquinas virtuais	21
Figura 15 - Exemplo de um servidor Dell utilizado para hospedar máquinas virtuais	21
Figura 16 - Lógica para a média móvel no metris	24
Figura 17 - IHM com as informações de massa geradas pelos seniores de campo	25
Figura 18 - IHM de alta eficiência com as informações de massa geradas pelos seniores de campo	26
Figura 19 - Cena do vídeo "Long Retractable Sootblower"	27
Figura 20 - Cena do vídeo "Long Retractable Sootblower"	28
Figura 21 – Cena do vídeo "Long Retractable Sootblower"	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variação do estado físico das cinzas com a mudança de temperatura	11
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

HEWI	Heat Exchange Weight Indicator
TCC	Trabalho de conclusão de curso
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
PIMS	Plant Information Management System
CLP	Controlador Lógico Programável
IHM	Interface Homem Máquina
CR	Caldeira de Recuperação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVOS	1
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2	REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1	Processo de produção de papel e celulose	3
2.2	Linha de Fibras	4
2.2.1	Cozimento.....	4
2.2.2	Lavagem e classificação	7
2.2.3	Branqueamento	8
2.3	Caldeira de Recuperação.....	8
2.3.1	Funcionamento de uma Caldeira de Recuperação.....	9
2.3.2	Processo de Geração de vapor pela Caldeira em uma planta real	9
2.4	Incrustação das superfícies de troca de calor.....	10
2.4.1	Composição das cinzas	10
2.4.2	Variação de temperatura e o fenômeno da incrustação	11
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
3.1	Implementação do Sistema de monitoramento de massa.....	14
3.1.1	Sensores de massa	14
3.1.2	A plataforma Metris.....	18
3.1.3	Arquitetura do sistema de monitoramento.....	18
3.1.4	Arquitetura para a plataforma Metris	20
4	RESULTADOS	23
4.1.1	Lógica do Metris para o índice de incrustação	23
4.1.2	Dados gerados com o monitoramento	24
4.1.3	Sistema Sootblower	27
5	CONCLUSÕES.....	30
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1 INTRODUÇÃO

A caldeira de Recuperação (CR) é o equipamento de maior importância em uma planta de papel e celulose, pois ela atua na recuperação química do licor e na geração de vapor para a fábrica. Vapor este que, posteriormente, é enviado ao turbo gerador para produção de energia e para outras áreas do ciclo celulósico e de produção de papel, como a evaporação e a máquina de papel.

Uma CR durante o seu processo de operação realiza a queima de licor negro dentro da fornalha, com o objetivo de fazer a recuperação química do licor e gerar vapor para a fábrica. A energia térmica dos gases de combustão gerados pela queima de licor é utilizada para transferir calor para a água que circula nos tubos das paredes da caldeira, e deste modo, produzir o vapor superaquecido ou vapor principal. É justamente no processo de queima do licor que ocorre a geração de cinzas como subproduto da reação de combustão. As cinzas geradas pela queima são bastante pegajosas e incrustam nas superfícies dos trocadores de calor, gerando perda de eficiência da troca térmica entre os gases de combustão e a água, consequentemente, impedindo a adequada geração de vapor.

O trabalho do engenheiro de controle e automação é garantir o funcionamento ótimo da CR e, portanto, aborda-se neste trabalho de conclusão de curso a implementação de um sistema de automação para monitorar a quantidade de cinzas geradas na caldeira. No sistema de monitoramento executado foram utilizadas células de carga para a medição de massa das cinzas, um CLP, e o software Metris all in one, de propriedade da empresa Sindus Andritz, para o tratamento dos dados gerados.

1.1 OBJETIVOS

Desenvolver e apresentar uma metodologia que permite monitorar a quantidade de cinzas geradas em uma caldeira de Recuperação e produzir uma IHM de alta eficiência, com os dados obtidos pelos sensores.

A solução proposta neste trabalho foi realizada em três grandes etapas, a instalação de sensores de massa em cada um dos trocadores de calor da caldeira, a coleta de dados em um sistema de gerenciamento da planta em tempo real e a conversão dos dados coletados em gráficos 2D, disponibilizados em uma IHM para controle de engenheiros, operadores e equipe de manutenção.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado como se segue, no capítulo 2, apresenta-se a fundamentação científica e a revisão da literatura, com toda a explicação de como funciona o processo de produção de papel e de celulose em uma indústria moderna. A seguir, no capítulo 3, trata-se dos materiais e métodos, em que todas as atividades necessárias para a implementação do sistema de monitoramento foram descritas em detalhes. Já o capítulo 4 apresenta os resultados gerados com a implementação do sistema de monitoramento, e por último, desenvolve-se a conclusão desta monografia com reflexões acerca do trabalho realizado e considerações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

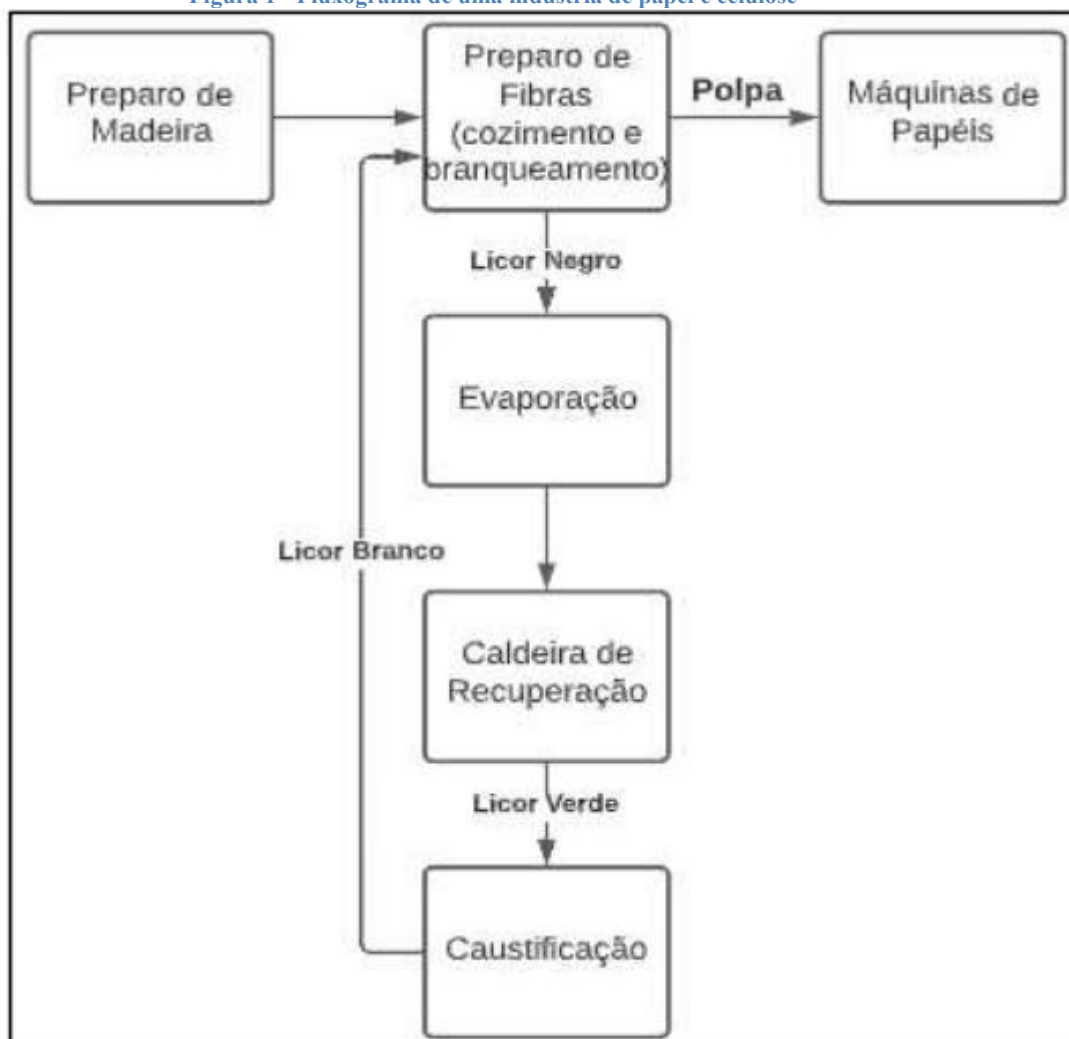
2.1 Processo de produção de papel e celulose

Uma planta de papel pode ser dividida em dois grandes ciclos, o ciclo da fibra ou madeira e o ciclo da recuperação. O ciclo da fibra se caracteriza por seguir o caminho da polpa celulósica no processo fabril e seu início é pelo pátio de madeira, local em que as toras que não são utilizadas de imediato são estocadas e as demais são direcionadas para o descascamento, limpeza e picagem, para que então, possam ser convertidas em cavacos. Os cavacos são transportados por correias até a etapa seguinte, a linha de fibras. É nesta etapa que os cavacos são transformados em uma pasta celulósica pela combinação de agentes químicos e vapor no digestor. A pasta ou polpa celulósica, então, passa pelos processos de lavagem e branqueamento, para a remoção das impurezas da pasta marrom e aprimoramento da pureza da polpa. Finalmente, a polpa pode ser enviada para a secagem, que é a etapa responsável por gerar a folha de papel, após a filtração e a prensagem na mesa formadora. (FILIPIN, 2024)

Em conjunto com o ciclo da fibra, tem-se o ciclo da recuperação, que é o responsável por garantir o balanço energético da planta e permitir a viabilidade econômica do negócio. O ciclo da Recuperação é composto pelas etapas da evaporação, caldeira de recuperação e caustificação. O licor negro fraco produzido pelo digestor durante o cozimento é transferido para a evaporação, com o objetivo de ter o seu teor de sólidos elevado, e desse modo, ser utilizado como combustível na CR. A caldeira realiza o processo de geração de vapor com a queima do licor, e também recupera quimicamente o licor negro para licor verde, por meio da recuperação dos químicos inorgânicos. O licor verde gerado é enviado para a caustificação a fim de transformá-lo em licor branco. E este retorna para o digestor, podendo assim atuar como agente ativo do cozimento. (FILIPIN, 2024).

O ciclo do processo descrito para uma fábrica de papel e celulose é representado pelo fluxograma da Figura 1 e também descrito em detalhes na seção 2.2 Linha de Fibras e 2.3 Ciclo de Recuperação.

Figura 1 - Fluxograma de uma indústria de papel e celulose



Fonte: HENRIQUE, Pablo. Análise da Viabilidade econômica da substituição do antiespumante no filtro lavador da linha de Kraft marrom de uma fábrica de papel. 2022.51f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina. p. 16.

2.2 Linha de Fibras

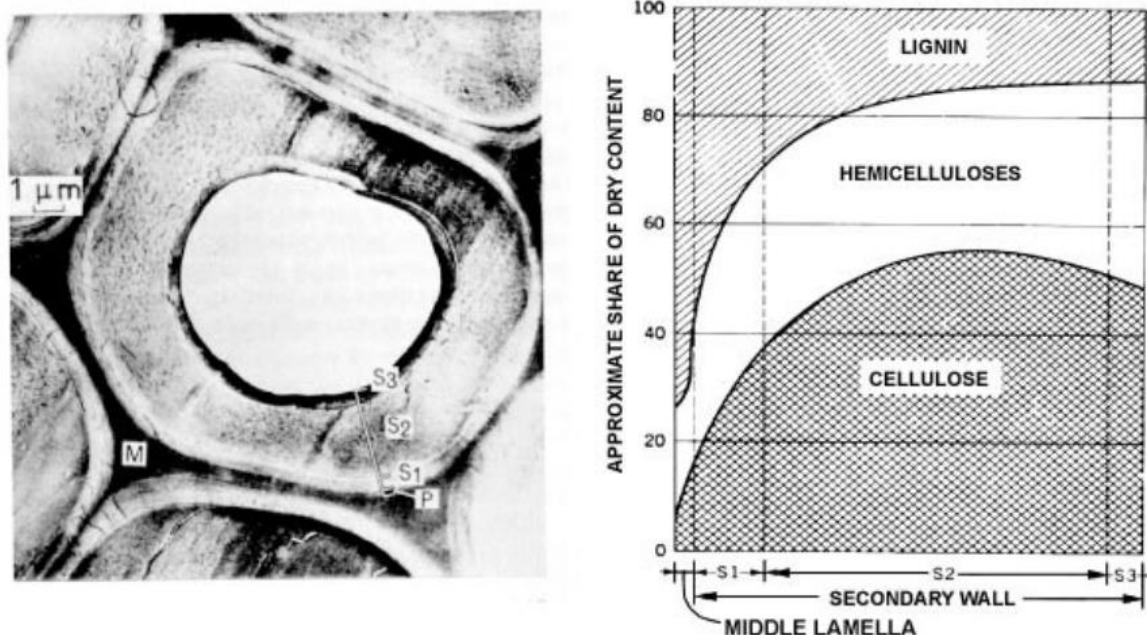
2.2.1 Cozimento

A etapa da linha de fibras se inicia pelo cozimento, cujo principal objetivo é eliminar a lignina que une as fibras da madeira com a utilização de químicos e calor. O hidróxido de sódio, NaOH, popularmente conhecido como soda cáustica, uma base solúvel em água, é responsável pela degradação da lignina, enquanto o Na₂S, sulfeto de sódio, acelera a reação. (CASTRO, 2009).

Por degradação, entende-se a cisão da ligação 1,4 glicosídica da molécula da celulose, ou seja, a cisão da ligação entre dois monômeros de glicose. A degradação produz moléculas com grau de polimerização menor, afetando, portanto, as propriedades que dependem do comprimento da cadeia molecular da celulose, tais como, viscosidade e resistência mecânica. (CASTRO, 2009, p.3)

A fibra da madeira é composta basicamente por lignina, hemicelulose e celulose, conforme Figura 3.

Figura 2 - Composição química da fibra da madeira

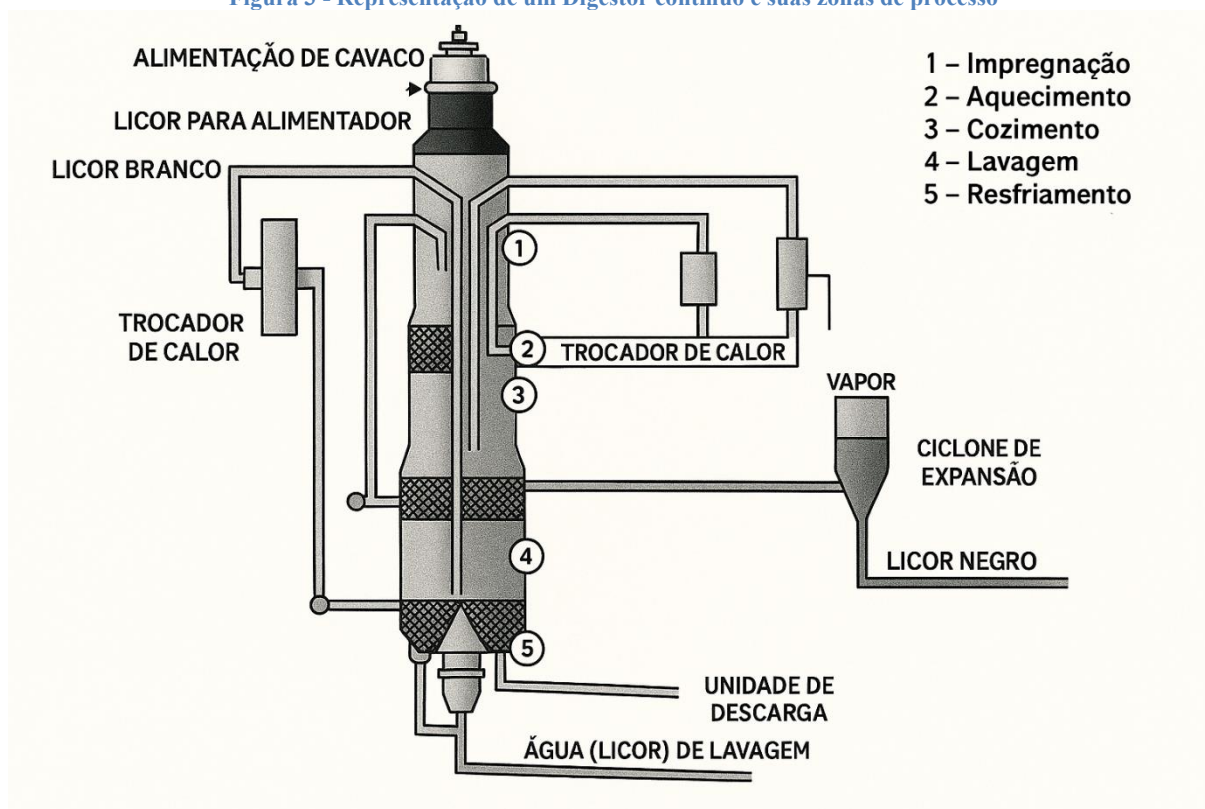


Fonte: KNOWPULP (s.d.).

A lignina é um material bastante resistente que está conectado à hemicelulose e a celulose na fibra da madeira, dificultando a degradação desses materiais, conferindo rigidez à fibra. Indústrias que produzem plástico, adesivos e antioxidantes utilizam a lignina em sua cadeia de processo. A hemicelulose é um polissacarídeo com diferentes unidades de açúcares ligados entre si e é utilizada em indústrias que buscam produzir papel, álcool, ácidos orgânicos e solventes. A celulose, por sua vez, é um polímero de glicose de alta massa e principal constituinte da célula de biomassa. (CASTRO, 2009).

O principal equipamento da etapa de cozimento é o digestor, que pode ser em batelada ou contínuo. O digestor contínuo é mais eficiente e tem sido empregado nas novas fábricas de celulose. O digestor pode ser descrito como um vaso pressurizado em que ocorrem diversas reações, como impregnação, cozimento e lavagem. A impregnação é o momento em que ocorre a transferência de químicos para dentro dos cavacos, no núcleo da madeira, através da penetração e difusão. O cozimento é o momento em que a lignina é dissolvida. E a lavagem é quando o licor negro é removido. (BATISTA, 2018; MACEDO, 2006). Figura 3.

Figura 3 - Representação de um Digestor contínuo e suas zonas de processo



Fonte: GOMIDE (2001) apud PAIVA, Pablo Henrique Eduardo Nazario de. Análise da Viabilidade econômica da substituição do antiespumante no filtro lavador da linha de Kraft marrom de uma fábrica de papel. 2022.51f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina. p. 17.

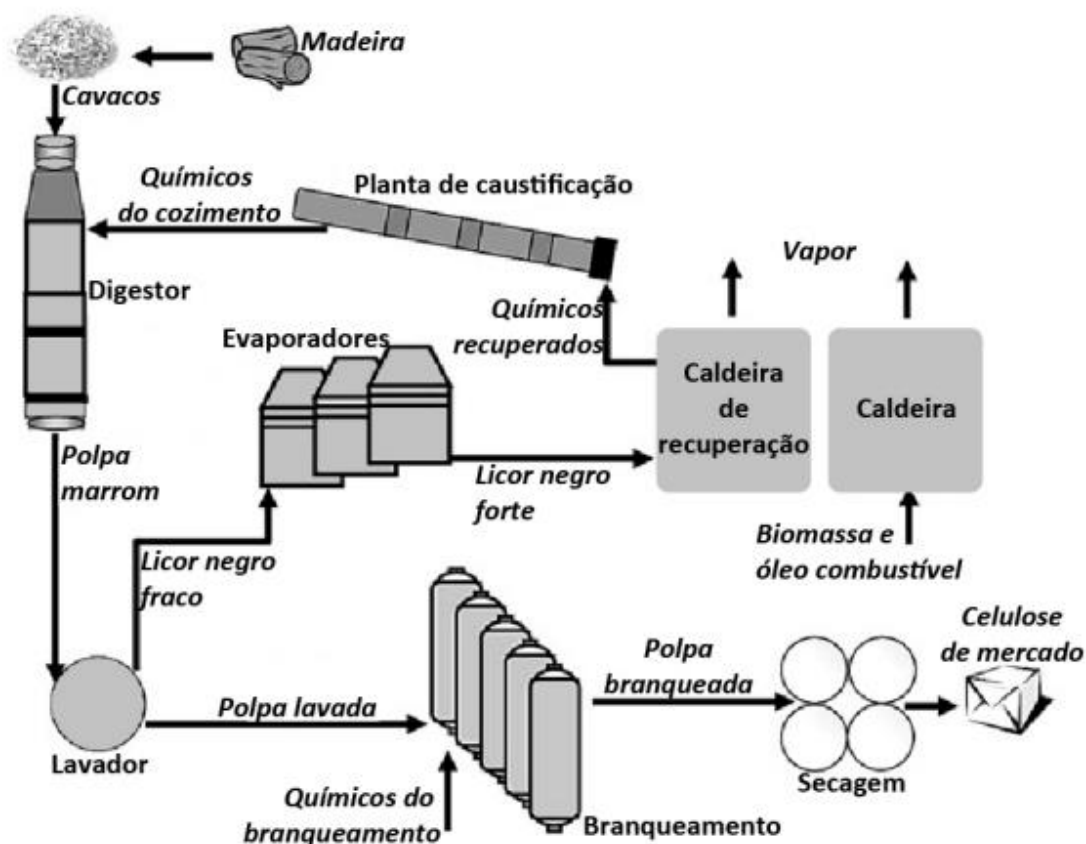
Para analisar a qualidade e a eficiência do cozimento, existe um importante parâmetro medido, o número kappa ou teor de lignina residual. Quanto maior o número kappa no cozimento, maior é o residual de lignina presente na polpa celulósica, isto é, um número kappa mais elevado indica uma baixa quantidade de fibras degradadas, o que implica na utilização de uma maior quantidade de químicos para branquear a polpa, no processo de Branqueamento celulósico. (MACEDO, 2006).

A lignina residual presente nas fibras é o que faz com que a polpa tenha uma tonalidade marrom durante a etapa de cozimento. (FRIGIERI, 2016).

Isso significa que para processos em que a polpa não será branqueada, como nos casos da produção de papelão, o número Kappa apresenta valores mais altos, por volta de 25 a 35. E, no caso da produção de celulose que será branqueada, espera-se que o número Kappa na saída do Digestor oscile por volta de 15 a 20. (CORREIA; D'ANGELO; SILVA JÚNIOR, 2019).

Encerrada a etapa do cozimento, ainda existem mais três processos pelos quais a polpa passa na linha de fibras: a lavagem e o branqueamento, conforme Figura 4.

Figura 4 - Esquema do processo Kraft de produção de celulose de mercado



Fonte: OLIVEIRA (2012).

As próximas seções explicam a lavagem e o branqueamento

2.2.2 Lavagem e classificação

A etapa subsequente ao cozimento é a lavagem. Nesse momento, o objetivo do processo é separar as substâncias que se encontram dissolvidas na polpa, da polpa em si. Ou seja, a polpa suja, que está envolta pelo licor residual, que contém restos de madeira e químicos, é separada em uma polpa seca. A polpa limpa obtida durante a lavagem reduz o uso de químicos para que ela seja branqueada futuramente e o licor negro obtido neste processo será enviado para a evaporação, que posteriormente, retornará como um potente combustível a ser utilizado na caldeira de recuperação com o intuito de gerar de vapor para o turbo gerador e outros equipamentos da planta, (FILIPIN, 2024)

Figura 5 - Licor negro separado da polpa durante a lavagem

Licor negro separado da polpa durante a lavagem



Fonte: KNOWPULP (s.d.).

2.2.3 Branqueamento

O branqueamento busca melhorar a alvura e pureza química da polpa, utilizando-se de um tratamento físico-químico da pasta celulósica após esta passar pela etapa do cozimento. Nesta etapa diversos reagentes químicos são aplicados para que ocorra a descoloração da polpa. O número de Kappa ao final da etapa de branqueamento deve ser ainda menor do que o obtido na descarga do digestor (DANILAS, 1981).

2.3 Caldeira de Recuperação

A caldeira de recuperação em uma planta de celulose cumpre duas funções principais: realizar a recuperação dos químicos utilizados no processo de Cozimento e utilizar o calor gerado no processo de recuperação para a produção de vapor. O calor produzido é recuperado pela transferência de energia dos gases da caldeira com a água que circula nos tubos localizados nas paredes do equipamento. Tanto a recuperação química, como a recuperação de energia são processos que ocorrem separadamente na CR, isso significa, que a recuperação química pode acontecer sem que a recuperação energética ocorra (FILIPIN, 2024).

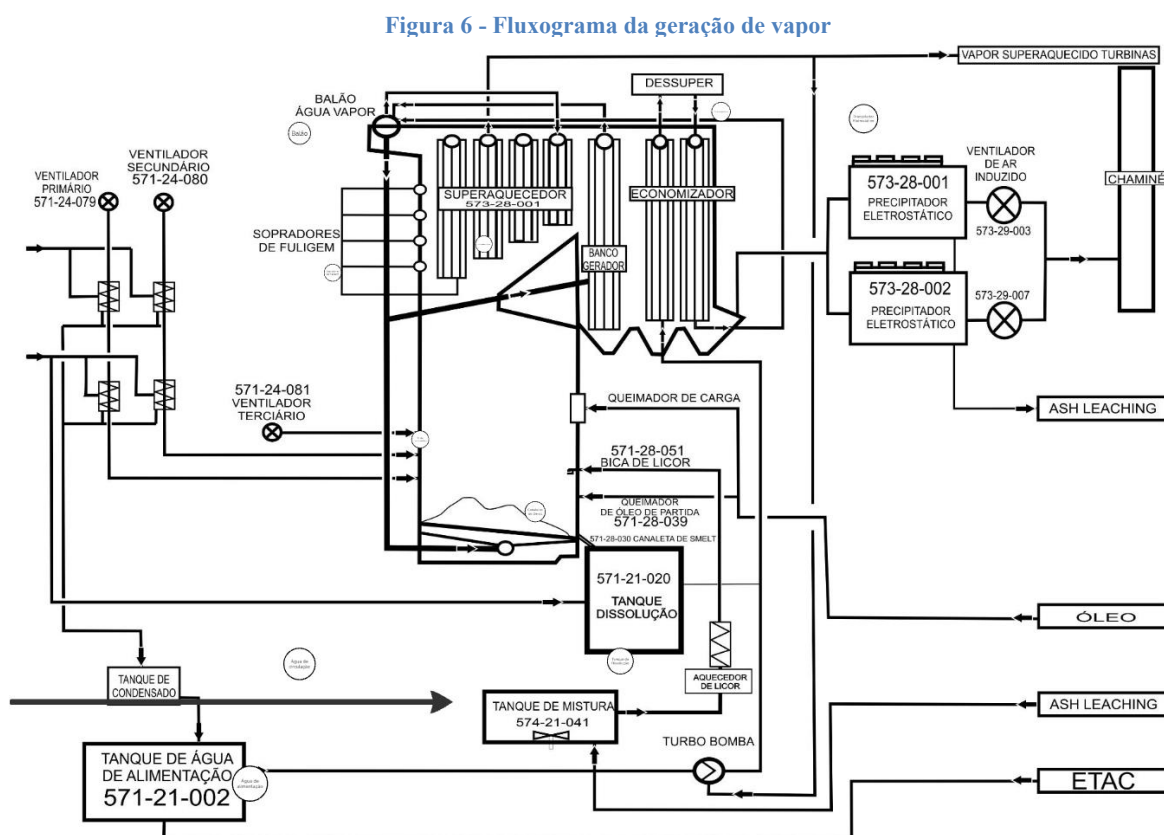
2.3.1 Funcionamento de uma Caldeira de Recuperação

A caldeira de recuperação, diferentemente de uma caldeira de força convencional, que somente queima biomassa, funciona como um reator químico que realiza a queima e a redução do licor negro gerado pelo cozimento. O licor negro é formado basicamente por compostos inorgânicos, portanto, um combustível bastante sujo e impuro (FILIPIN, 2024)

Dentro da fornalha, o licor é despejado através das bicas, formando o *charbed* ou camada, e no fundo desta, é onde ocorre a redução do sulfato de sódio, Na_2SO_4 , para sulfeto de sódio, Na_2S . O processo de redução do sulfato de sódio em sulfeto é de extrema importância para a viabilidade da fábrica, visto que o sulfeto retorna ao digestor para ajudar no processo de cozimento dos cavacos (FILIPIN, 2024)

2.3.2 Processo de Geração de vapor pela Caldeira em uma planta real

Os superaquecedores de uma caldeira fazem parte da etapa de geração de energia, que é o processo que busca gerar o vapor nas condições adequadas de temperatura e pressão, para posterior envio ao turbo gerador para geração de energia elétrica.



Fonte: DIAS (2025)

A Figura 6 ilustra o processo de geração de vapor em uma caldeira. Nela, é possível observar o *Feed Water Tank* (tanque de alimentação), que recebe uma mistura de água desmineralizada e condensado proveniente da própria fábrica. No tanque de alimentação, essa

mistura é aquecida para promover a remoção do oxigênio dissolvido, evitando-se assim, uma possível corrosão dos economizadores ao longo do processo. O objetivo é atingir uma concentração de oxigênio de aproximadamente 10 partes por bilhão (ppb). Para contextualizar, em um rio com ecossistema aquático saudável, a concentração de oxigênio é tipicamente da ordem de 10 partes por milhão (ppm) – ou seja, mil vezes maior que o nível desejado no tanque de alimentação (RAHMAN; LEHTINEN, 2013).

Após passar pelo tanque de alimentação, a água é direcionada aos economizadores por meio das bombas de alimentação, onde inicia-se a absorção de calor. Em seguida, o fluido é transportado até o balão de vapor. O balão de vapor é um tanque multifásico, no qual coexistem água e vapor. Nele, ocorre a separação das fases: a água, mais densa, acumula-se na parte inferior, enquanto o vapor, menos denso, concentra-se na região superior. E, uma vez separado da água, o vapor segue para os superaquecedores da caldeira, onde sua temperatura é elevada de forma controlada, gerando o vapor principal que será utilizado nas turbinas. Esse processo ocorre em etapas: o vapor passa pelo primeiro estágio do superaquecedor, onde é pré-aquecido. Em seguida, é direcionado ao dessuperaquecedor, que regula sua temperatura por meio da injeção de água. Por fim, o vapor é transportado até o terceiro e último superaquecedor, atingindo as condições ideais de pressão e temperatura para se tornar o vapor principal (RAHMAN; LEHTINEN, 2013).

O vapor principal é então conduzido até a turbina, que possui diversas ranhuras ou palhetas. Ao passar por essas estruturas, o vapor transfere sua energia térmica, que é convertida em energia cinética, fazendo com que a turbina gire, e o movimento das pás será transformado em energia elétrica por meio do gerador acoplado à turbina (TURBIVAP, 2025).

2.4 Incrustação das superfícies de troca de calor

2.4.1 Composição das cinzas

A incrustação de partículas nos trocadores de calor que se encontram na parte alta da caldeira ocorre devido a formação de cinzas, após a queima do licor negro. Mikkanen (2000), estudou os elementos que compõem o licor negro, que incluem o Na, K, S, Cl e C. E, e foi observado que, no processo de combustão, pequenas partículas dos elementos volatilizados durante o a queima dentro da fornalha, formaram o fumo, que é composto basicamente pelos elementos Na_2SO_4 , carbonatos, NaCl , K_2SO_4 e KCl . Dos compostos presentes no fumo, o cloreto e o potássio, em altas concentrações, são os principais elementos responsáveis pela formação da sujeira que incrusta nas superfícies dos trocadores de calor.

“(Mikkanen, 2000 apud Lang et al., 1973)”, sugeriu a teoria de formação de fumo para caldeira de recuperação, propondo que a formação do fumo é iniciada por conta da decomposição do Na_2CO_3 em Na_2O , na camada, que posteriormente reage, acima do nível de ar secundário com o SO_2 ou CO_2 , para formar Na_2SO_4 ou Na_2CO_3 , respectivamente.

2.4.2 Variação de temperatura e o fenômeno da incrustação

O fenômeno da incrustação de cinzas na caldeira de recuperação varia, principalmente, de acordo com a temperatura da queima dentro da fornalha. Durante a combustão do licor foi observado que existe um intervalo de temperatura específico, para que as partículas que compõem as cinzas formadas, fiquem coesas e pegajosas o suficiente, de tal modo que ao entrar em contato com os trocadores, elas se aderem facilmente às paredes externas de suas tubulações, causando o fenômeno da incrustação.

A tabela 01 indica as temperaturas, os estados físicos e uma breve descrição de cada estado físico, de acordo com a variação de temperatura do processo.

Tabela 1 – Variação do estado físico das cinzas com a mudança de temperatura

Cinzas	Temperatura	Estado	Status
	Até 500 °C	Sólido	As cinzas estão em estado sólido, com as primeiras partículas passando pela mudança de estado físico de sólido para líquido.
	Entre 550 e 700°C	Sólido-Líquido	As cinzas estão parcialmente derretidas, cerca de 15% delas estão em estado líquido.
	A partir de 700°C	Líquido	As cinzas estão completamente derretidas.

Fonte: ZHANG et al., 2024

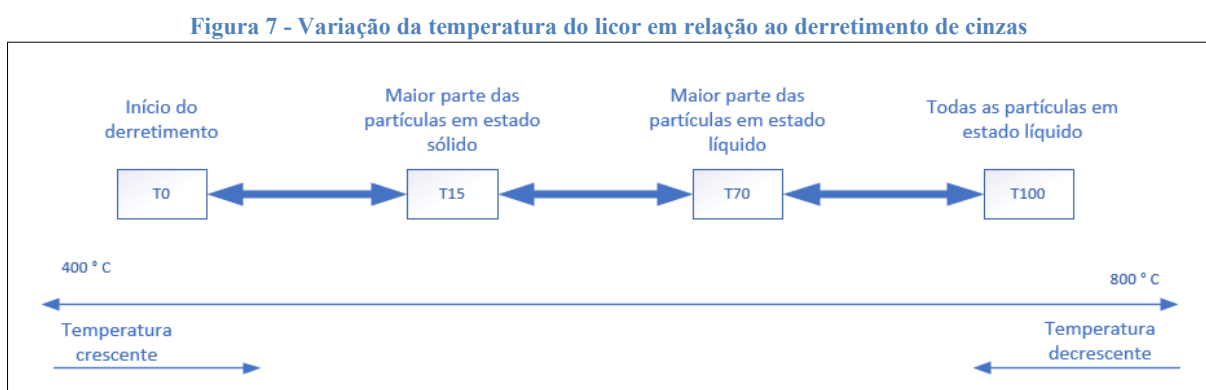
É possível inferir, por meio dos dados fornecidos na tabela, que as cinzas produzidas pela queima do licor, não possuem um ponto definido de fusão, como ocorre no caso de líquidos conhecidos, como a água. A temperatura para a mudança de estado físico das cinzas, de sólido para líquido, ocorre gradualmente.

Em geral, a partir de 700 °C, as cinzas encontram-se em estado líquido e entre 550 °C e 700 °C, uma parte delas encontra-se em estado sólido e outra parte em estado líquido. A partir de 700°C, as cinzas que entram em contato com as superfícies dos trocadores de calor não ficam incrustadas; elas escorrem novamente para a fornalha e depois são vaporizadas, de forma cíclica. (ZHANG et al., 2024)

Contudo, no intervalo de temperatura de 550 a 700°C, é o momento em que de fato ocorrem as incrustações de cinzas nos trocadores, porque é nesta etapa do processo que as cinzas se encontram parcialmente sólidas e parcialmente líquidas.

Os intervalos de temperatura demonstrados na tabela 01 são exemplos da operação de uma CR real, o que significa que uma caldeira com condições de queima ou qualidade do licor negro diferentes, apresentará cinzas com maior ou menor ponto de temperatura de fusão e, conseqüentemente, temperatura de incrustação. Isso ocorre porque o licor pode apresentar mais ou menos material inorgânico em sua composição, além de que se a combustão não estiver ocorrendo de forma eficiente, traços de carbono não queimado e uma maior quantidade de sais podem estar presentes.

Os dados de incrustação das cinzas em relação a variação de temperatura são divididos em quatro etapas: T0, T15, T70 e T100. O índice T0 indica que as partículas de poeira têm 0% de cinzas em estado líquido, o índice T15 indica que as partículas têm 15% de cinzas em estado líquido, o índice T70 indica que as partículas tem 70% de cinzas em estado líquido e o índice T100 indica que as partículas tem 100% de cinzas em estado líquido, conforme mostra a figura 7 (ZHANG et al., 2024).



Fonte: Autoria própria (2025)

A etapa T100 indica que todas as partículas estão derretidas. O derretimento completo ocorre quando a temperatura está em valores bem elevados. Já o momento entre a etapa T15 e T70 é quando as partículas estão mais grudentas e, portanto, mais adesivas e capazes de aderir às paredes dos aquecedores. A etapa T0, caso seja atingida, indica que os tubos dos trocadores de calor da caldeira irão sofrer um processo de corrosão. E, é a partir desta etapa, T0, que se inicia a formação das cinzas (ZHANG et al., 2024).

O licor negro queimado na fornalha é dividido em uma fração orgânica e outra inorgânica. A parte orgânica do licor, formada pela lignina e os carboidratos é volátil, sendo que a queima desses compostos é responsável por gerar o vapor que será utilizado na CR. E, a fração inorgânica, composta basicamente por KCl(cloreto de potássio), NaCl(cloreto de sódio), Na₂CO₃(carbonato de sódio), Na₂SO₄(sulfato de sódio), Na₂S(sulfeto de sódio), não é desfeita

na queima, fazendo com que os compostos Na_2CO_3 e Na_2S formem o Smelt no fundo da fornalha, enquanto o compostos Na_2SO_4 , NaCl e KCl vão produzir as cinzas volantes (FOELKEL, 2012).

Por conta da formação das cinzas volantes geradas na combustão do licor, faz-se necessário a implementação de um sistema que monitore a massa das cinzas que estão sendo produzidas na CR.

O capítulo seguinte deste trabalho explica quais foram os materiais e métodos utilizados para a implementação de um sistema de monitoramento capaz de lidar com o problema decorrente das etapas T15 e T70, desde a etapa de instalação dos sensores em campo até a aquisição de dados para a construção de uma IHM de alta eficiência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

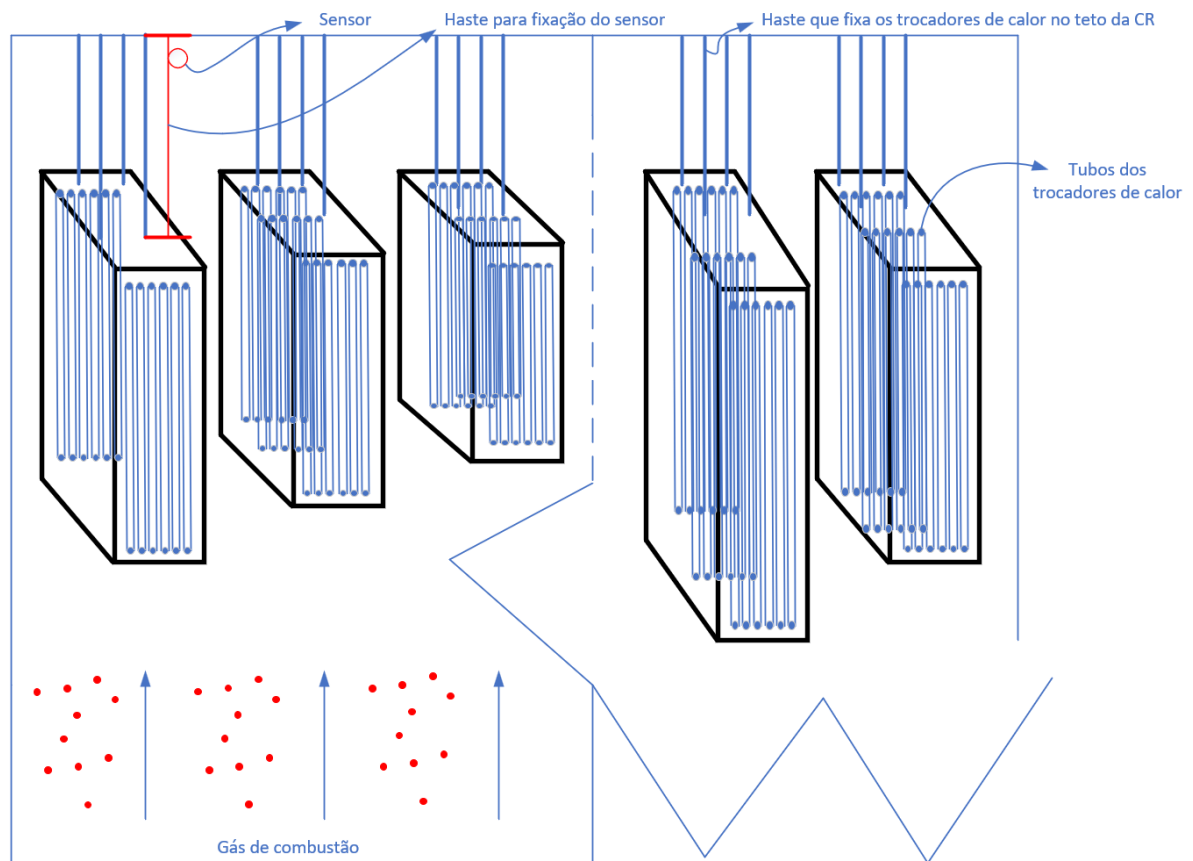
3.1 Implementação do Sistema de monitoramento de massa

3.1.1 Sensores de massa

Os sensores de massa são equipamentos instalados em campo, nas hastes que prendem os trocadores de calor ao teto da caldeira, para realizar a medição da massa ao longo do processo. As células de carga utilizadas neste projeto são compostas por corpo elástico, extensômetros e circuitos em ponte de Wheatstone.

Os sensores são conectados a hastes metálicas, que são fixadas nas hastes que prendem os trocadores de calor ao teto da CR. Portanto, à medida que ocorre a queima do licor na caldeira, o gás de combustão gerado carrega consigo por arrasto as cinzas volantes, que ao se encontrarem com os tubos dos trocadores de calor acabam por aderir a sua superfície externa. A massa das cinzas aderidas às superfícies externas dos tubos dos trocadores gera uma força sobre o corpo elástico da célula, que por conta da força aplicada se deforma. E, os extensômetros colados a este corpo identificam essa deformação, ocasionando a alteração de sua resistência elétrica. Assim que a resistência sofre uma alteração, uma tensão elétrica em milivolts é gerada pela ponte de Wheatstone e o sinal elétrico é calibrado para indicar os valores de massa. A Figura 8 ilustra de forma simplificada os trocadores de calor, o fluxo do gás de combustão gerado pela queima do licor, algumas das hastes que seguram os trocadores no teto da caldeira, sendo que na caldeira real a quantidade de hastes é bem maior, e por fim, exemplifica a instalação de somente um dos vários sensores utilizados para o sistema de monitoramento.

Figura 8 - Visão da CR com os trocadores de calor

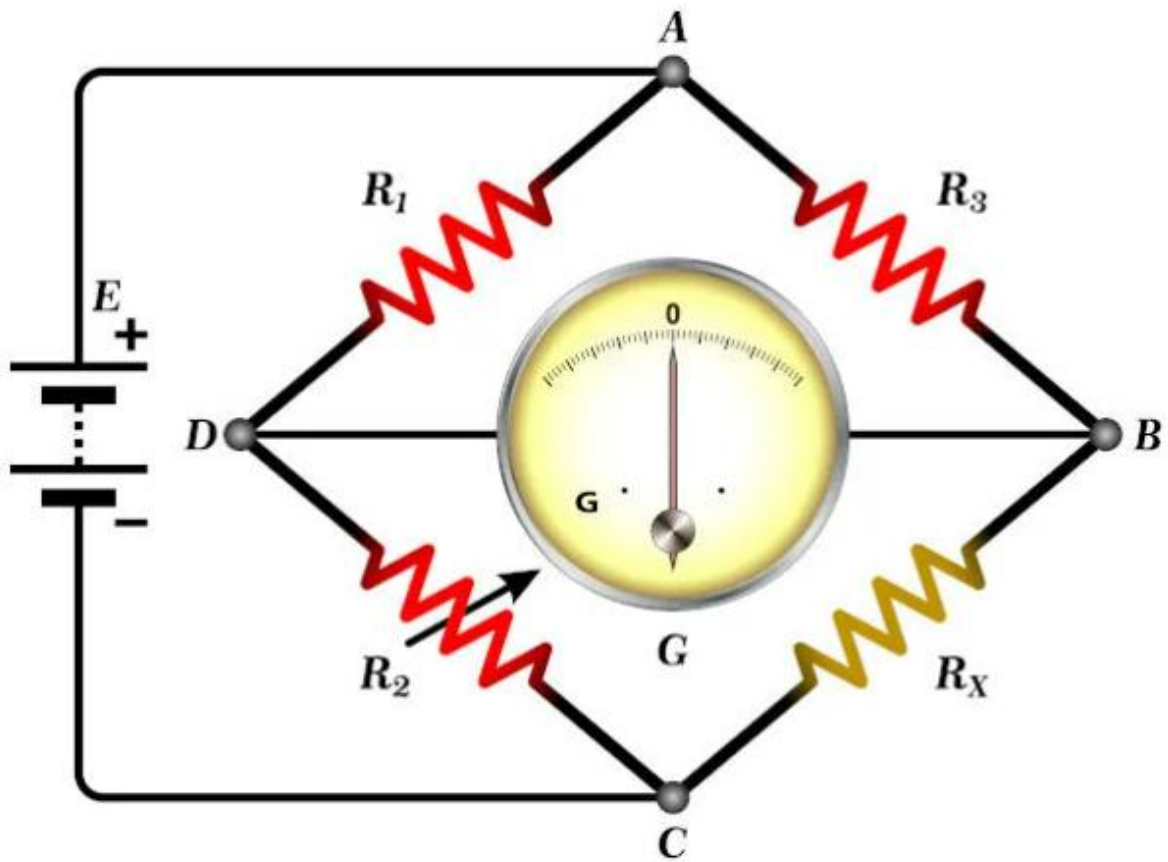


Fonte: Autoria própria (2025)

Para o projeto implementado neste trabalho foram utilizadas células de carga com extensômetro de ponte completa, que são sensores capazes de mensurar a massa por deformação. A configuração escolhida para os sensores foi o de ponte completa ou 4/4 de ponte, devido à maior sensibilidade e precisão obtida.

(Marcelino et al., 2018, p. 8) explica que a ponte de Wheatstone é composta por elementos resistivos que, por meio do desbalanceamento da ponte dos resistores, gera uma tensão na saída do circuito. E, a tensão gerada é proporcional à força aplicada conforme Figura 9.

Figura 9 - Ponte Wheatstone

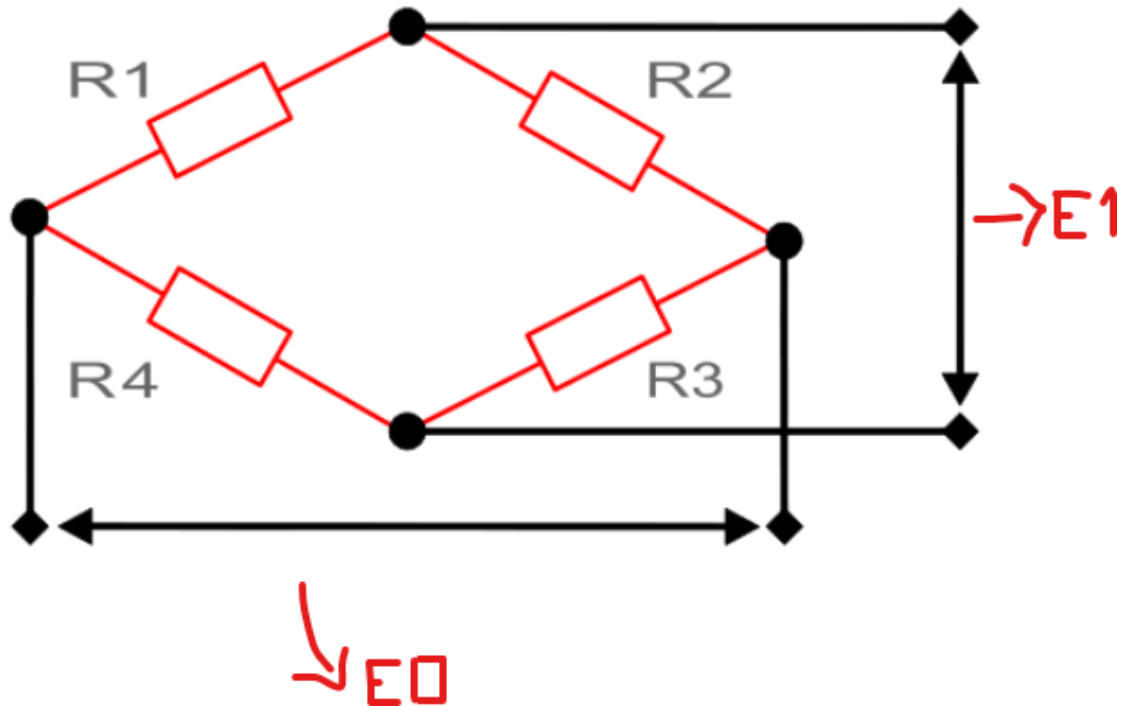


Fonte: WIKIPEDIA (2025)

Em termos práticos, a aplicação de massa sobre o sensor de extensômetro gera uma deformação mecânica no elemento sensível, resultando em uma variação de resistência elétrica. A alteração gerada é processada pelo circuito de medição, e este realiza a conversão da carga mecânica em um sinal elétrico proporcional, que pode então ser interpretado como valor de massa.

Na Figura 9 é possível identificar a aplicação de uma tensão E_0 , e, quando o valor de um resistor muda, a tensão E_1 que sai da ponte também é alterada. (Pärnänen, 2020).

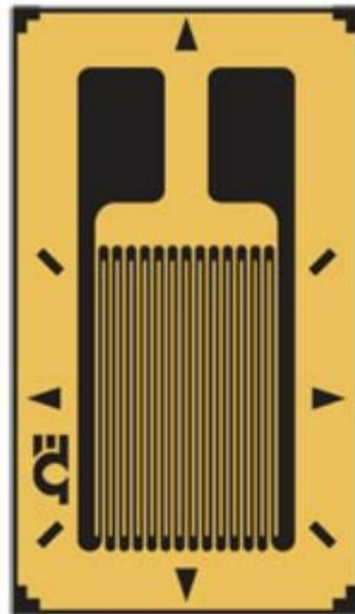
Figura 10 - Ponte de Wheatstone com representação das tensões E_0 e E_1



Fonte: PÄRNÄNEN (2020)

A **Error! Reference source not found.** ilustra o exemplo de um sensor de extensômetro, sendo que os fios internos indicam os resistores e as hastes pretas representam os conectores.

Figura 11 - Exemplo de um sensor de extensômetro



Fonte: OMEGA ENGINEERING (2025)

Os sensores utilizados neste projeto foram previamente calibrados antes do início das atividades. A primeira etapa foi a zeragem para definir o ponto de referência para o sistema de

medição, já que mesmo sem nenhuma carga sobre a célula o extensômetro indica um valor de tensão diferente de 0 mV, que é um ruído eletrônico. Portanto, com a célula sem nenhuma massa sobre ela, foi realizado uma leitura do sinal de saída, e este sinal medido foi adicionado ao PLC para que ele possa ser subtraído dos novos sinais de leitura, e assim, a saída passa a ser 0 mV quando não há carga. Desse modo foi possível assegurar que todas as leituras realizadas começaram pelo zero real.

Após a zeragem foram utilizadas massas de pequeno valor, como 1 kg e 2 kg, para ajuste da curva de calibração, em que cada ponto de massa se refere a um valor de tensão. E, então, pode-se utilizar uma massa de valor conhecido e que não foi utilizada na curva de calibração para garantir a precisão do sensor.

A calibração é um procedimento que pode ser definido como como conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um equipamento de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões. (ACC PR ENGENHARIA DE MEDIÇÃO, 2012).

3.1.2 A plataforma Metris

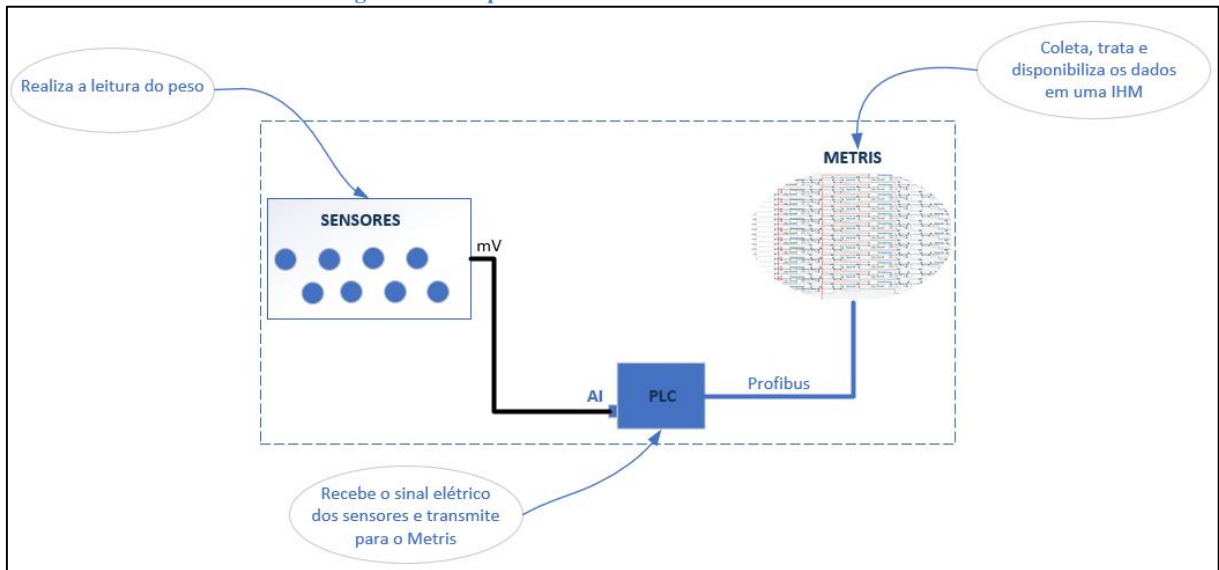
A indústria 4.0 tem como objetivo o fornecimento de soluções capazes de controlar, otimizar e monitorar os mais variados tipos de processo. E para este trabalho foi utilizada a plataforma Metris que é um software de automação avançada que integra uma gama de aplicativos dentro de si. Cada aplicativo da plataforma Metris representa um produto ou solução para a indústria, sendo que o portfólio de produtos vai desde a automação clássica, com soluções como o SDCD e sensores, até a digitalização e serviços de performance avançada, como o PIMS, serviços de segurança cibernética, otimização, simulação, gêmeos digitais e controle avançado. ANDRITZ (2025).

Para o sistema de monitoramento de massa descrito neste trabalho, o Metris foi utilizado como uma ferramenta para adquirir dados através do aplicativo application studio e, consequente, fornecimento de informações úteis para os engenheiros e operadores em uma IHM, através do aplicativo display studio.

3.1.3 Arquitetura do sistema de monitoramento

O sistema de monitoramento de massa é baseado em três pontos principais: a medição de variáveis no chão de fábrica, a aquisição das variáveis pelo CLP e o tratamento dos dados pelo Metris, de modo que as medições feitas se tornem informações úteis para o monitoramento da fábrica Figura 12.

Figura 12 - Arquitetura do sistema de monitoramento



Fonte: Autoria Própria(2025)

Os sensores de monitoramento são instalados em uma barra vertical acoplada aos trocadores de calor. E, à medida que a massa das cinzas varia, os sensores geram sinais elétricos que são enviados ao CLP, por conexão direta ou *hardwired*. O CLP utiliza o barramento Profibus para transmitir os dados adquiridos para o Metris, que calcula a média móvel para remover os possíveis ruídos e determinar o índice de incrustação de cinzas. Com o cálculo do índice realizado é possível gerar a tela de supervisão.

A Figura 13 indica um exemplo real de sensores de extensômetro instalados no segundo e terceiro superaquecedores da fábrica de Varkaus, totalizando 60 sensores.

Figura 13 - Sensores do sistema HEWI na fábrica de Varkaus

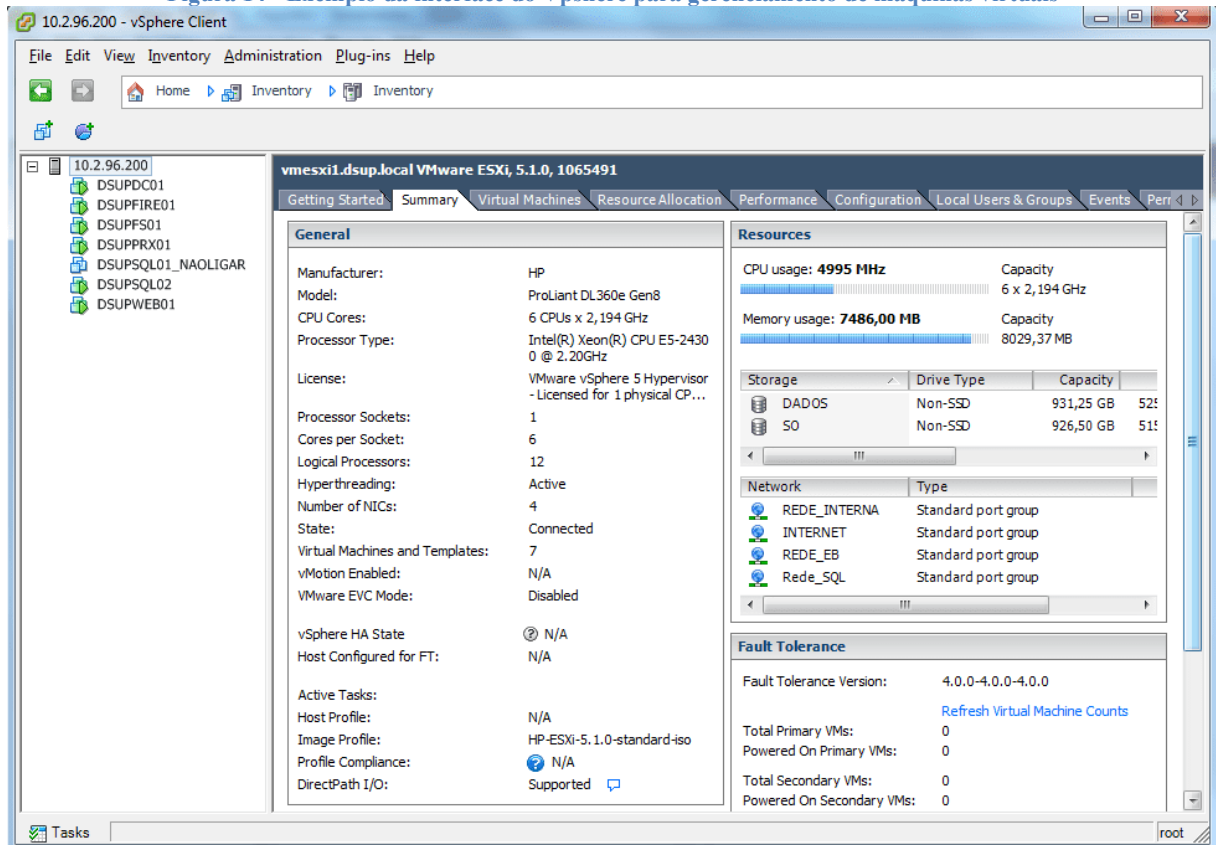


Fonte: PÄRNÄNEN (2020).

3.1.4 Arquitetura para a plataforma Metris

Na execução do projeto descrito neste TCC foi utilizado um servidor Dell para hospedar a máquina virtual com o software Metris instalado, sendo que o sistema operacional utilizado no servidor foi o Vsphere (IBM, 2024), devido a sua robustez e confiabilidade de mercado. O Vsphere é um software de propriedade da empresa Vmware (VMware, Inc., 2025), que oferece diversas ferramentas para gerenciamento de recursos em servidores, além do monitoramento e criação de máquinas virtuais.

Figura 14 - Exemplo da interface do Vsphere para gerenciamento de máquinas virtuais



Fonte: Núcleo do Conhecimento (2018)

Figura 15 - Exemplo de um servidor Dell utilizado para hospedar máquinas virtuais



Fonte: Agis (2025)

E, para o dimensionamento de hardware do servidor foi levado em conta a capacidade de processamento necessária para executar um controlador do Metris e o sistema operacional Microsoft Windows Server 2022, instalados na máquina virtual. Para rodar o Metris e o

windows com a performance adequada foi dimensionado uma máquina virtual com quatro núcleos físicos e oito núcleos lógicos de CPU, sessenta e quatro gigabytes de memória RAM e trezentos gigabytes de espaço interno no disco rígido. Faz-se importante ressaltar que o objetivo do sistema descrito neste trabalho é somente o monitoramento dos dados, portanto não é necessário dispor de uma máquina virtual robusta, como no caso de soluções que buscam realizar o monitoramento e o armazenamento de dados.

4 RESULTADOS

Esse projeto gerou como resultado a criação de duas IHM(s) operacionais com informação das massas de cinzas obtidas por cada um dos sensores utilizados e o desenvolvimento do índice de incrustação das cinzas da CR, que é utilizado como variável de processo para o controle dos sopradores de fuligem.

4.1.1 Lógica do Metris para o índice de incrustação

Conforme descrito na seção 3 foi criada uma máquina virtual com o software MetrisX, de propriedade Andritz, para realizar o tratamento de dados do chão de fábrica. Os dados obtidos pelos sensores de campo são transmitidos até um CLP, que através do protocolo são repassados até o Metris. Assim que chegam ao Metris, as tags passam por uma média móvel simples, que basicamente é um filtro para observar as tendências de aumento ou diminuição dos valores que vêm sendo coletados de ciclos em ciclos. A fórmula utilizada para a média móvel é apresentada na equação (1).

$$Out(n) = \frac{1}{Tags} (In(n) + In(n - 1) + \dots + In(n - Tags + 1)) \quad (1)$$

Em que, o termo $Out(n)$ indica o valor de saída gerado na média móvel, o termo $Tags$ refere-se ao número de $Tags$ que foram coletadas e o termo $In(n)$ são as entradas ou medições coletadas em cada ciclo. Desse modo, a cada novo ciclo de dado coletado a média move-se para adicionar o novo valor ao cálculo conforme a Figura 16.

A Figura 16 é uma imagem retirada da plataforma metris e, portanto, propriedade da empresa Sindus Andritz.

Figura 16 - Lógica para a média móvel no metris



Fonte: Imagem retirada do metris, propriedade Sindus Andritz

Após passar pela lógica de média móvel, os dados são enviados a um bloco chamado Hewi, que calcula a média dos valores coletados pelos sensores frontais e traseiros e gera um índice de incrustação baseado na média dos pares de sensores instalados.

O índice de incrustação é obtido pela equação (2).

$$\text{Índice} = 100 * \left(\left(\frac{\text{Mediapares}}{2} \right) - Lmin \right) / (Lmax - Lmin) \quad (2)$$

Basicamente a equação 2 realiza uma média simples dos valores de massa frontais e traseiros, subtrai-se este valor do limite mínimo, depois divide o resultado obtido pelo valor do limite máximo menos o limite mínimo e multiplica por 100 para obter um valor em porcentagem.

O termo Mediapares é a soma das massas frontais e traseiras, o termo Lmin refere-se ao limite mínimo e o termo Lmax refere-se ao limite máximo. Quanto maior o índice, maior o nível de incrustação.

4.1.2 Dados gerados com o monitoramento

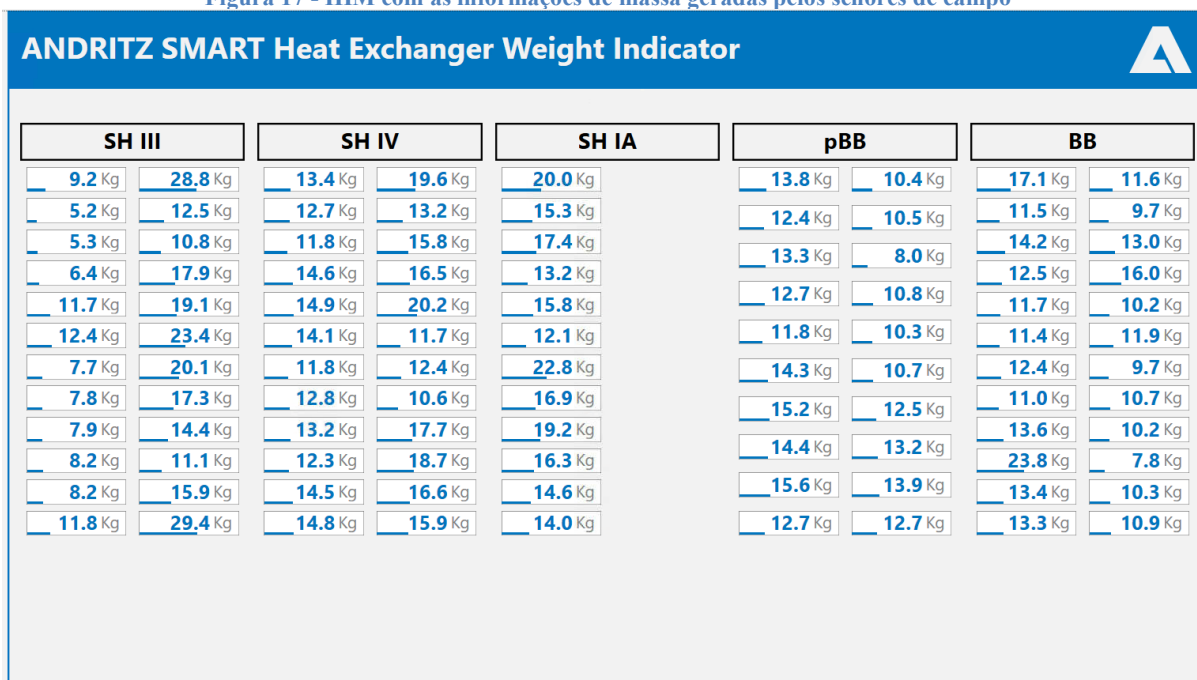
A quantidade de cinzas incrustadas varia de acordo com a qualidade do licor negro queimado na caldeira e, em média, para CR(s) industrias há uma incrustação de cerca de 7

kg/m², ou seja, incrustam cerca de 7kg de cinzas para cada metro quadrado de área de um trocador de calor.

Para a caldeira objeto de estudo deste trabalho foram geradas duas telas, a da Figura 17 e a da Figura 18. A tela da Figura 17 é uma IHM com informações sobre cinco trocadores de calor, que são: o *Super heater III*, o *Super heater IV*, o *Super heater IA*, o *pré boiler bank* e o *boiler bank*, respectivamente. Para cada um dos trocadores foram utilizados pares de sensores, frontal e traseiro, ao longo do aquecedor. As indicações de massa do lado esquerdo do *super heater III*, por exemplo, são as medições geradas pelos sensores frontais, enquanto as indicações do lado direito representam os sensores traseiros. A única exceção a utilização dos pares de sensores é o *Super Heater IA*, que por questões físicas de estrutura da própria caldeira, teve somente os sensores frontais instalados.

A Figura 17 é uma imagem retirada da plataforma metris e, portanto, propriedade da empresa Sindus Andritz.

Figura 17 - IHM com as informações de massa geradas pelos seniores de campo



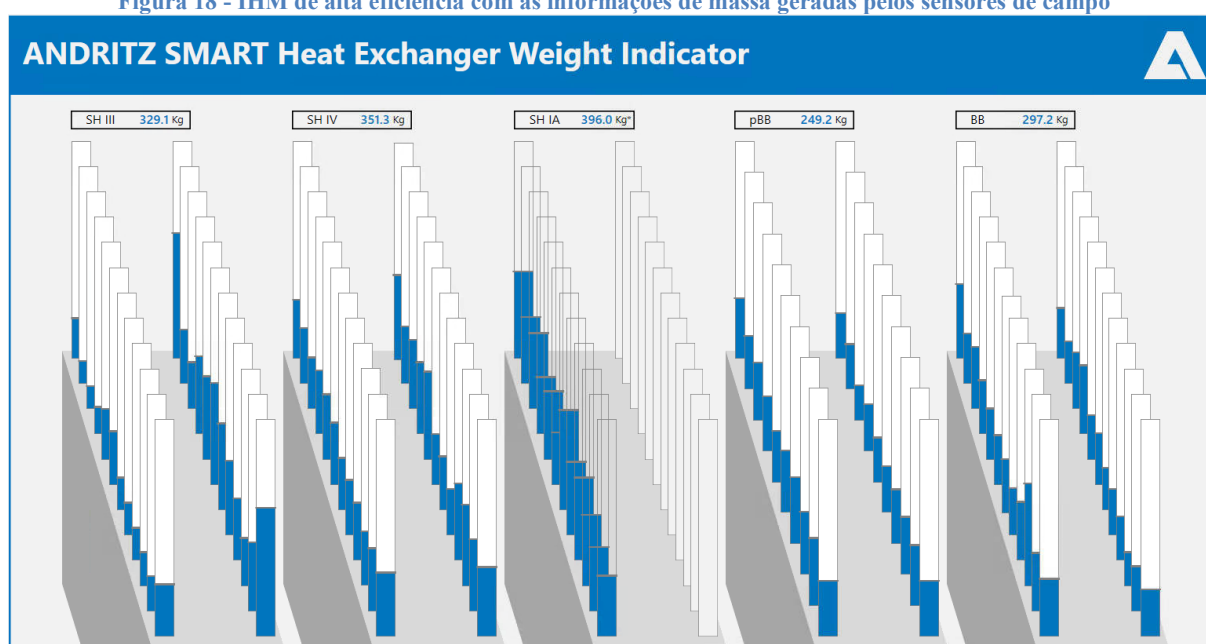
Fonte: Imagem retirada do metris, propriedade Sindus Andritz

A segunda IHM, Figura 18, é uma tela em que os sensores estão representados por vários gráfico de barras, repetindo-se a lógica da primeira IHM, Figura 17, sendo que, para cada trocador, as barras mais a esquerda indicam os sensores frontais e as barras mais a direita indicam os sensores traseiros. As barras representadas na Figura 18 são preenchidas com a cor azul a medida que a indicação de massa aumenta, ou seja, quanto maior for a quantidade de

cinzas medidas pelos sensores, mais preenchidas pela cor azul estarão as barras. E, além disso, também foi adicionado ao topo da tela o somatório do massa mensurada por todos os sensores de cada um dos superaquecedores. No caso do superaquecedor III, por exemplo, é possível identificar que o somatório da massa obtido pelos sensores frontais e traseiros é o total de 329.1 Kg.

Observa-se que os dados de ambas as telas são os mesmos, contudo a segunda IHM, representada pelo gráfico de barras, é considerada uma IHM de alta performance, visto que as informações úteis para os operadores aparecem de forma mais bem consolidada e de rápida visualização.

Figura 18 - IHM de alta eficiência com as informações de massa geradas pelos sensores de campo



Fonte: Imagem retirada do metris, propriedade Sindus Andritz

Com as telas disponíveis na plataforma Metris, os operadores podem monitorar em tempo real o processo de incrustação de cinzas, evitando-se assim que ocorra perda de eficiência no aquecimento do vapor produzido na caldeira de recuperação.

Caso o índice de incrustação gerado pela lógica desenvolvida no Metris indique uma baixa quantidade de cinzas aderidas aos trocadores, nenhuma tomada de ação é necessária, indicando que o processo está ocorrendo de forma adequada. Contudo, se o índice de incrustação estiver elevado, o sistema de controle do *soot blower*, soprador de fuligem, pode ser ativado e, então, inicializar a limpeza das cinzas.

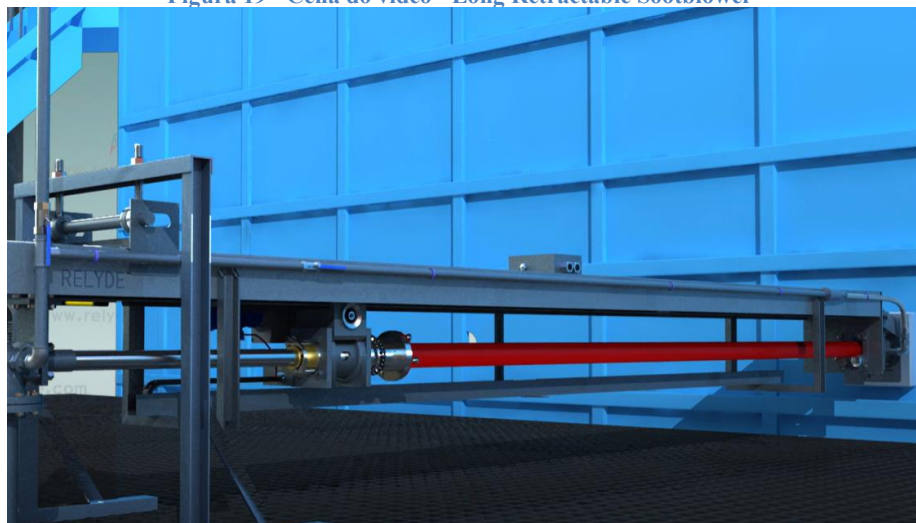
4.1.3 Sistema Sootblower

O sistema *sootblower*, também conhecido como *retractable sootblower*, envolve um grupo de sopradores de fuligem que ficam na parte externa da caldeira e são utilizados para realizar a limpeza das cinzas incrustadas nos trocadores. O sistema de sopragem, em condições normais, é acionado por uma sequência fixa que realiza a limpeza das cinzas de tempos em tempos. Entretanto, para caldeiras modernas, que contam com um sistema de monitoramento do massa das cinzas, conforme o descrito neste artigo, o *sootblower* é ativado por um sistema de controle avançado, que leva em consideração o índice de incrustação gerado como uma das variáveis de processo ou “.PV” que alimentam o controle.

Os sopradores de fuligem consistem em lanças acopladas em motores de duas direções, que expellem jatos de vapor de alta pressão nas paredes dos trocadores para realizar a limpeza das cinzas acumuladas. Assim que o sistema do sootblower é acionado, uma partida em grupo de motores de duas direções é iniciada, e cada motor é responsável por acoplar uma lança na parede da caldeira, que gira no sentido horário liberando um jato de vapor de alta pressão, e depois girando em sentido anti-horário, liberando o mesmo jato. As lanças ficam acopladas por um período previamente definido e depois são retraídas até que o sistema precise ser ativado novamente.

A Figura 19 mostra o momento em que a lança retrátil está preparada para ser inserida na caldeira.

Figura 19 - Cena do vídeo "Long Retractable Sootblower"



Fonte: Adaptado de relyde sb (2018)

Assim que a lança é inserida, os jatos de vapor de alta pressão passam a ser liberados, fazendo com as tubulações ilustradas no início da Figura 18 fiquem limpas,

eliminando-se os pontos pretos, que na animação original foram utilizadas para representar as cinzas Figura 20.

s.

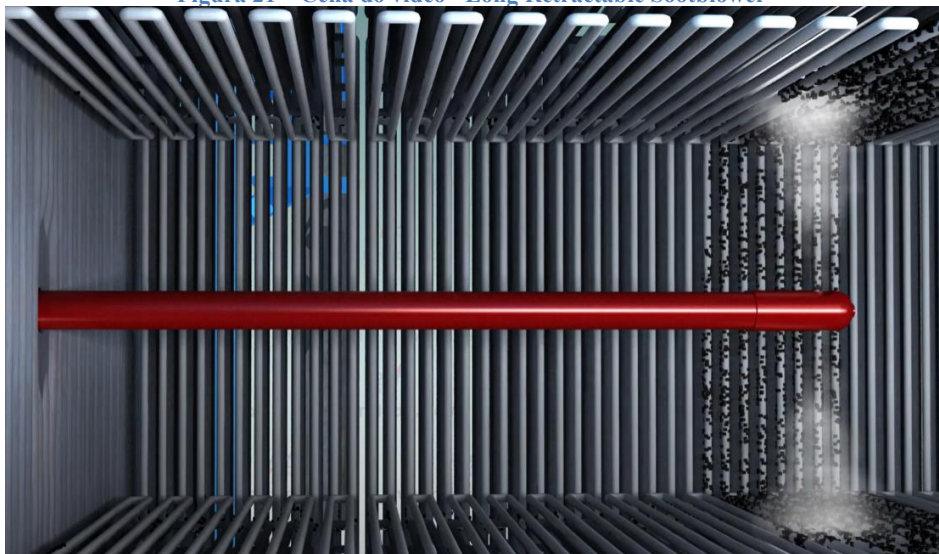
Figura 20 - Cena do vídeo "Long Retractable Sootblower"



Fonte: Adaptado de relyde sb (2018)

Quando toda a parede dos trocadores estiverem livres das cinzas, conforme a Figura 18, a lança é retraída, retornando para a sua posição inicial.

Figura 21 – Cena do vídeo "Long Retractable Sootblower"



Fonte: Adaptado de relyde sb (2018)

Os sopradores de fuligem representam mais um exemplo da importância de se implementar um sistema de automação capaz de monitorar as cinzas na CR, e

exemplificam, como o conceito de indústria 4.0, ou indústria integrada, produzem fábricas mais eficientes e produtivas.

5 CONCLUSÕES

A caldeira de recuperação é o equipamento mais importante de uma fábrica de papel e celulose. E, é devido a utilização do licor negro como combustível da Caldeira, que uma planta de papel e celulose se torna exequível em termos financeiros, já que a utilização de combustíveis tradicionais resultaria em custos extremamente elevados.

A implementação de um sistema de automação para uma planta de papel e celulose, com monitoramento de massa das cinzas na CR se mostrou bastante eficiente no seu objetivo de fornecer dados úteis aos operadores e alimentar o controle dos sopradores. Com os dados gerados pela IHM, os operadores passaram a ser capazes de garantir a máxima eficiência dos trocadores de calor, e, por consequência, os custos do processo puderam ser reduzidos. Caso não houvesse um sistema de monitoramento adequado, os operadores seriam obrigados a ativar os queimadores de carga da caldeira e queimar uma maior quantidade de combustível auxiliar, como o óleo pesado, por exemplo, para garantir o balanço térmico do processo e compensar a perda da eficiência dos trocadores.

Segundo Clyde industries (2012), estima-se que para caldeiras de recuperação que utilizem sistemas de aquisição de dados e estratégias de controle avançado para os sopradores de fuligem, há uma economia de cerca de 5 a 12% do consumo do vapor produzido, isto é, se uma caldeira produz 100 toneladas de vapor por hora, com um sistema de sopragem comum, o consumo é de aproximadamente 5 a 12 toneladas a mais de vapor por hora.

O sistema de monitoramento apresentado neste trabalho segue a tendência de modernização da manufatura para a indústria 4.0, que implica na revolução da indústria tradicional, com o advento da digitalização e integração de tecnologia nas fábricas. E, é diante dessa realidade, que soluções digitais como a apresentada neste trabalho passam a ser cada vez mais comuns e, com o passar do tempo, possivelmente obrigatórias para que o processo produtivo possa ser mais eficiente e viável. Uma analogia comum à indústria 4.0 é a ideia de que a uma década atrás, quando um consumidor buscava comprar um veículo automotor, o foco do consumidor baseava-se, principalmente, no veículo em si e na sua capacidade de levar pessoas de um lugar ao outro. E, quando um consumidor busca adquirir um veículo automotor nos dias de hoje, o foco passa a ser não somente na capacidade de transporte do automóvel, mas sim nas facilidades que este oferece ao motorista. Ao escolher um veículo para compra, atualmente, o cliente passa a exigir itens como sensores para monitoramento da pressão dos pneus, assistente de partida em rampa, rastreamento via GPS, análise de consumo de combustível, assistência de permanência em faixa e várias outras soluções integradas ao funcionamento deste veículo.

No caso das manufaturas modernas, a analogia utilizada para o veículo se comprova a mesma, quando uma empresa ou fábrica planeja comprar um equipamento como uma caldeira de recuperação, o interesse do comprador não é mais somente na capacidade de geração de vapor que a caldeira pode produzir, mas sim nas soluções digitais que a ela podem ser integradas, como o sistema de monitoramento de massa apresentado para a CR objeto de estudo deste trabalho ou o controle avançado implementado para a ativação do sistema de limpeza de cinzas.

Diante do exposto fica de fácil percepção como sistemas digitais integrados a equipamentos fabris são de extrema importância para o correto funcionamento de uma planta de celulose, tornando-se imprescindível, que uma CR moderna não ofereça um sistema de monitoramento de cinzas para os seus operadores, tal qual um carro novo que não possui um sistema de aquisição de dados veiculares baseado em sua rede de sensores não pode ser considerado um produto competitivo para o mercado.

Outrossim, destaca-se ainda que para trabalhos futuros que abordem a temática do monitoramento de cinzas em CR, deve-se monitorar outras variáveis, como temperatura e pressão, para aumentar a precisão do cálculo no índice de incrustação gerado, visto que essas grandezas podem ser utilizadas para fazer uma correlação com a sujeira dos trocadores. Foi observado que com o aumento de cinzas aderidas as paredes dos trocadores de calor, variáveis como a temperatura, na região externa dos trocadores, tendem a aumentar, incrementando a temperatura do gás de combustão. Além disso, o aumento de cinzas aderidas aos trocadores cria uma barreira física para o escoamento dos gases de combustão, gerando um aumento da perda carga, ou seja, a diferença de pressão entre a entrada e a saída do trocador, tendem a aumentar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

KNOWPULP. *Principle of chemical pulping* [imagem]. s.d. Disponível em: https://www.knowpulp.com/www/english/pulping/cooking/1_process/1_principle/frame.htm.

Acesso em: 11 ago. 2025.

FILIPIN, Natália dos Reis. Processo de produção de celulose: uma revisão. Monografia (Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica, Uberlândia, 2024. Defesa em 6 maio 2024.

CASTRO, Heizir F. de. *Apostila 4 – Papel e Celulose: Processos Químicos Industriais II*. Lorena: Escola de Engenharia de Lorena – Universidade de São Paulo, 2009.

THE WOOD PULPING PROCESS: A COMPREHENSIVE GUIDE. *The Wood Pulping Process: A Comprehensive Guide*. 2024. Disponível em: <https://worldpapermill.com/wood-pulping-process/>. Acesso em: 11 ago. 2025.

TRAN, H.; VAKKILAINNEN, E. K. The Kraft Chemical Recovery Process. In: TAPPI Kraft Recovery Operations Short Course, 2008. Disponível em: <https://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/1-1.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2025.

DIAS, Leonardo. *Caldeira de recuperação* [apresentação em Prezi]. 2025. Disponível em: <link>. Acesso em: 3 set. 2025.

OLIVEIRA, B. H. *Estudo de tecnologias para o tratamento de efluentes na indústria de celulose*. 2012. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/19404/1/BHOliveira_compressed.pdf. Acesso em: 3 set. 2025.

KNOWPULP. *Principle of the cooking process*. Disponível em: https://www.knowpulp.com/www/english/pulping/cooking/1_process/1_principle/frame.htm.

Acesso em: 2 jul. 2025. **s.d.**

DANILAS, Renata Maggion. Branqueamento de pastas celulósicas. In: SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. *Celulose e Papel: Tecnologia de Fabricação da Pasta Celulósica*. Coord. Maria Luiza Otero D'Almeida. São Paulo: Escola Theobaldo De Nigris / IPT, 2.^a ed., 1981. v. 1, cap. IX, p. 427–512.

FRIGIERI, Tânia Cristina. *O efeito da lignina residual e dos ácidos hexenurônicos na geração de organoclorado com dióxido de cloro*. 2016. 87 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2016.

CORREIA, F. M.; D'ANGELO, J. V. H.; SILVA JÚNIOR, F. G. *Revisitando número kappa: conceitos e aplicações na indústria de celulose*. Revista O Papel, São Paulo, v. 80, n. 7, p. 77–89, jul. 2019.

Relyde sb. *Long Retractable Sootblower*. YouTube, 2018. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=O0XhpMkr3C4>. Acesso em: dia mês 2025.

PÄRNÄNEN (2020)-> PÄRNÄNEN, Teemu. *HEWI*. 2020. 39 f. Opinnäytetyö (Bachelor's thesis) – Savonia University of Applied Sciences, Varkaus, 2020.

NÚCLEO DO CONHECIMENTO. Acesso via vSphere 5.0 ao servidor VMware. 2018. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/wp-content/uploads/2018/04/f1-acesso-via-vsphere-5-0-ao-servidor-vmware-1.png>. Acesso em: 04 ago. 2025.

AGIS. Servidor Dell PowerEdge R760. 2025. Disponível em: <https://vendas.agis.com.br/servidor-dell-poweredge-r760-210-bgww-wzc4>. Acesso em: 04 ago. 2025.

CLYDE INDUSTRIES. Pulp Mill steam savings. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://clyde-industries.com/wp-content/uploads/2020/02/PulpMill_Steam_Savings.pdf>. Acesso em: 6 ago. 2025.

RAHMAN, Faizur M.C.; LEHTINEN, Markku. A New HERB In Asia. IPPTA, v. 25, n. 1, jan.–mar. 2013. Disponível em: <https://ippta.co/wp-content/uploads/2021/01/2013_Issue_1_IPPTA_Articel_13.pdf>. Acesso em: 7 ago. 2025.

TURBIVAP. Caldeira de Recuperação. 19 fev. 2025. Disponível em: <<https://turbivap.com.br/caldeira-de-recuperacao/>>. Acesso em: 07 ago. 2025.

ANDRITZ. Metris – ANDRITZ Digital Solutions. Disponível em: <<https://www.andritz.com/metris-en>>. Acesso em: 3 set. 2025.

SUSNJARA, Stephanie; SMALLEY, Ian. **O que é VMware? Think – Tópicos**. IBM, 15 ago. 2024. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/vmware>. Acesso em: 03 set. 2025.

VMware, Inc. *Website institucional da VMware* [s.d.]. Disponível em: <https://www.vmware.com/>. Acesso em: 07 set. 2025.

FOELKEL, Celso. *Licor Negro: Origem, composição e aproveitamento energético*. Eucalyptus Online Book & Newsletter, 2012. Disponível em: <http://www.celso-foelkel.com.br>. Acesso em: 5 set. 2025.