

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS (UFSCar)
CAMPUS LAGOA DO SINO - CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

EIARLEY RADICCHI

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SEGUNDO AQUECIMENTO DO CALDO DE
CANA EM AQUECEDORES TUBULARES DE UMA USINA AÇUCAREIRA PARA
ORGANIZAÇÃO DE UM CRONOGRAMA DE LIMPEZA**

BURI/SP

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS (UFSCar)
CAMPUS LAGOA DO SINO - CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

EIARLEY RADICCHI

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SEGUNDO AQUECIMENTO DO CALDO DE
CANA EM AQUECEDORES TUBULARES DE UMA USINA AÇUCAREIRA PARA
ORGANIZAÇÃO DE UM CRONOGRAMA DE LIMPEZA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como exigência parcial para
a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Alimentos na
Universidade Federal de São Carlos.

Orientação: Prof. Dr. Ângelo Luiz Fazani Cavallieri

BURI/SP

2022

FICHA DE CATALOGAÇÃO

Radicchi, Eiarley

Otimização do processo de segundo aquecimento do caldo de cana em aquecedores tubulares de uma usina açucareira para organização de um cronograma de limpeza / Eiarley Radicchi -- 2022.
67f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,
campus Lagoa do Sino, Buri
Orientador (a): Ângelo Luiz Fazani Cavallieri
Banca Examinadora: Larissa Consoli, Juliane Viganó
Bibliografia

1. Eficiência. 2. Temperatura. 3. Área. I. Radicchi,
Eiarley. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539

EIARLEY RADICCHI

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SEGUNDO AQUECIMENTO DO CALDO DE
CANA EM AQUECEDORES TUBULARES DE UMA USINA AÇUCAREIRA PARA
ORGANIZAÇÃO DE UM CRONOGRAMA DE LIMPEZA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Alimentos pela
Universidade Federal de São Carlos.

Aprovado em: 09/08/2022.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
ANGELO LUIZ FAZANI CAVALLIERI
Data: 09/08/2022 19:56:32-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Ângelo Luiz Fazani Cavallieri (Orientador)
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)



Documento assinado digitalmente
LARISSA CONSOLI
Data: 10/08/2022 08:55:49-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof^ª. Dra Larissa Consoli
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)



Documento assinado digitalmente
JULIANE VIGANO
Data: 09/08/2022 20:21:20-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof^ª. Dra Juliane Viganó
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que tem conduzido meu caminho nesta existência para possibilitar que eu evolua espiritualmente, aprendendo e ensinando tudo aquilo que posso, de modo que minhas metas possam ser alcançadas em toda minha trajetória acadêmica e pessoal.

Aos meus pais, Dailton e Luciana, que não mediram esforços para me incentivar e apoiar em minhas decisões, trabalhando arduamente para ajudar no apoio financeiro e emocional durante os anos que morei fora de minha cidade de origem.

Aos meus irmãos, Guilherme e Isabela, e familiares de modo geral, por ajudarem meus pais a superar minha partida para a universidade, minimizando a dor que a minha ausência diária representava no ambiente.

À instituição de ensino Colégio Embraer Casimiro Montenegro Filho de Botucatu/SP que me forneceu as bases morais e técnicas para que eu pudesse aproveitar o máximo possível da vivência universitária.

Ao professor Doutor Ângelo Luiz Fazani Cavallieri, pela oportunidade de realizar dois projetos de iniciação científica contemplados com bolsa auxílio, por ser meu orientador de estágio e também deste trabalho de conclusão de curso, além de ser um grande amigo que levarei para a vida.

À instituição de ensino Universidade Federal de São Carlos, *campus* Lagoa do Sino, que foi fundamental em meu processo de formação profissional, e nas diversas oportunidades extracurriculares que desenvolvi, essenciais para meu aprimoramento técnico e pessoal. Também, agradeço aos professores do curso de Engenharia de Alimentos e do Centro de Ciências da Natureza por todo o aprendizado proporcionado e pelas amizades que serão levadas para a vida.

Ao Núcleo Executivo de Vigilância em Saúde da UFSCar, que habilitou a realização do meu estágio presencial e possibilitou minha entrada no mercado de trabalho.

Ao meu supervisor de estágio, Marcelo, pelos ensinamentos durante todo o período de estágio e por ter a paciência e comprometimento em esperar meu início de atividades enquanto enfrentava problemas com a liberação da universidade.

À empresa na qual realizei meu estágio curricular obrigatório, pois possibilitou minha primeira experiência profissional em um ambiente corporativo e também, pelo fornecimento dos dados que foram de expressiva utilidade para o desenvolvimento desde trabalho.

Agradeço a meus amigos, colegas e todos aqueles que contribuíram, de alguma maneira, para que eu pudesse chegar no local e na condição que estou hoje.

RESUMO

No setor sucroenergético, a eficiência das operações industriais é um dos fatores de maior relevância, pois é partir dela que toda a cadeia de transformação é impactada. A fabricação de açúcar cristal envolve diversos processos de trocas térmicas, sendo que após a moagem da cana, o caldo passa pelo processo de primeiro aquecimento, visando atingir 60 °C para entrar na etapa de sulfitação. Posteriormente, ocorre o processo de segundo aquecimento, visando atingir a temperatura de 105 °C no caldo para ser conduzido à decantação. Os equipamentos empregados são aquecedores tubulares e a danificação de tubos é o principal problema, seja por incrustação irreversível ou corrosão, e por isso, com determinada frequência ocorre a parada dos aquecedores para limpeza, porém o processo industrial não cessa, o que naturalmente gera impactos no sistema de aquecimento como um todo, pois ao realizar a parada, reduz-se a área de troca térmica disponível para a operação. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a relação entre a temperatura final do caldo de cana e a área de troca térmica disponível no segundo aquecimento, visando estabelecer um modelo qualitativo do comportamento do sistema, para estruturar um cronograma de limpeza de 13 aquecedores de uma usina açucareira localizada no interior do estado de São Paulo. A metodologia aplicada no desenvolvimento do trabalho compreendeu quatro etapas: hipótese de resultado, elaboração do modelo, validação dos dados e definição do melhor sistema de trabalho. Partiu-se de uma hipótese teórica do efeito esperado como sendo linear. Evidenciou-se que o modelo não representava os valores reais, exibindo comportamento polinomial de segunda ordem. A análise e o tratamento dos dados por médias aritméticas serviu como base para estabelecer um modelo de comportamento real do sistema. A validação assegurou que ele é passível de ser empregado para tomada de decisão em um processo industrial, pois apresentou confiabilidade de 98,65%. Assim, foi estruturado um cronograma de limpeza dos equipamentos obtido pelas melhores combinações de paradas de aquecedores, baseado nos conjuntos duplos de equipamentos parados que reflete em condições similares de resposta na temperatura do caldo.

Palavras-chave: Eficiência. Aquecedores. Limpeza. Temperatura. Área.

ABSTRACT

In the sugar-energy sector, the efficiency of industrial operations is one of the most relevant factors, because it is from this that the entire transformation process is impacted. The manufacture of crystal sugar involves several heat exchanges processes, and after the cane is milled, the sugarcane juice goes through the first heating process, aiming to reach 60 °C to enter the sulfitation stage. Subsequently, the second heating process takes place, aiming to reach a temperature of 105 °C in the broth to be taken to decantation. The equipment used is tubular heaters and tube damage is the main problem, either by irreversible incrustation or corrosion, and for this reason, with a certain frequency the tubular heaters are stopped for cleaning, but the industrial process doesn't stop, which naturally impacts the heating system as a whole, because when the stop is made, the heat exchange area available for the operation is reduced. Thus, the study aimed to evaluate the relationship between the sugarcane juice final temperature and the heat exchange area available in the second heater, in order to establish a qualitative model of the system behavior, to structure a cleaning schedule of 13 tubular heaters of a sugar mill located in a city in the state of São Paulo. The methodology applied in the development of the work shortened four stages: hypothesis of result, elaboration of the model, validation of data, definition of the best work system. It was based on a theoretical hypothesis of the expected linear effect. It was evidenced that the model didn't represent the real values, exhibiting second-order polynomial behavior. The analysis and treatment of data by arithmetic means served as the basis for establishing a real system behavior model. The validation ensured that it can be used for decision-making in an industrial process, as it presented reliability 98.65%. Thus, a schedule of cleaning of tubular heaters was structured, obtained by the best combinations of stops of heaters, based on the double sets of stationary equipment that reflects in similar conditions of response in the temperature of the sugarcane juice.

Keywords: Efficiency. Heaters. Cleaning. Temperature. Area.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Estrutura de um aquecedor tubular do tipo casco e tubos.....	18
Figura 02 – Principais estruturas do aquecedor casco e tubos	19
Figura 03 – Hidrojateamento de aquecedores	22
Figura 04 – Escoamento contracorrente e concorrente	26
Figura 05 – Escoamento misto	27
Figura 06 – Sistema de fluxo de caldo no segundo aquecimento.....	28
Figura 07 – Unidade do sistema de aquecimento.....	29
Figura 08 – Espelhos superiores projetados dos aquecedores 01 e 02.....	30
Figura 09 – Espelhos superiores projetados dos aquecedores 03 e 04.....	31
Figura 10 – Espelhos superiores projetados dos aquecedores 05 e 06.....	31
Figura 11 – Espelhos superiores projetados dos aquecedores 07 e 08.....	32
Figura 12 – Espelhos superiores projetados dos aquecedores 09 e 10.....	32
Figura 13 – Espelhos superiores projetados dos aquecedores 11 e 12.....	33
Figura 14 – Espelho superior projetado do aquecedor 13	33
Figura 15 – Tubos livres e bloqueados.....	37
Figura 16 – Conferência de incrustação irreversível no tubo.....	38
Figura 17 – Metodologia para determinação do comportamento do sistema.....	40
Figura 18 – Espelhos superiores com tubos bloqueados dos aquecedores 01 e 02.....	46
Figura 19 – Espelhos superiores com tubos bloqueados dos aquecedores 03 e 04.....	46
Figura 20 – Espelhos superiores com tubos bloqueados dos aquecedores 05 e 06.....	47
Figura 21 – Espelhos superiores com tubos bloqueados dos aquecedores 07 e 08.....	47
Figura 22 – Espelhos superiores com tubos bloqueados dos aquecedores 09 e 10.....	48
Figura 23 – Espelhos superiores com tubos bloqueados dos aquecedores 11 e 12.....	48
Figura 24 – Espelho superior com tubos bloqueados do aquecedor 13	49
Figura 25 – Área de troca disponível ao caldo	51
Figura 26 – Temperatura final do caldo	52
Figura 27 – Comparativo de área de troca térmica e temperatura.....	53
Figura 28 – Temperatura média diária	54
Figura 29 – Comparativo de área de troca térmica e temperatura média diária.....	54
Figura 30 – Comparativo de temperatura média e área específica de troca térmica.....	55
Figura 31 – Comparativo de faixa média de área de troca térmica e temperatura	56
Figura 32 – Ajuste do sistema	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Informações técnicas dos aquecedores de caldo	34
Tabela 02 – Relação de tubos bloqueados e da área em operação do conjunto de aquecimento	45
Tabela 03 – Síntese dos modelos de comportamento do sistema.....	57
Tabela 04 – Erro envolvido nas validações do modelo	60
Tabela 05 – Definição das melhores combinações de paradas de aquecedores	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Cronograma mensal do ciclo de limpeza dos aquecedores	35
Quadro 02 – Cronograma alternativo de limpeza dos aquecedores	36
Quadro 03 – Área de troca térmica disponível considerando cronograma mensal do ciclo de limpeza dos aquecedores	50
Quadro 04 – Combinações possíveis de parada dos aquecedores de 2 a 2	59
Quadro 05 – Áreas envolvidas no cronograma alternativo de limpeza dos aquecedores	60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
3 REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1 FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR CRISTAL	15
3.1.1 Aquecimento do caldo	16
3.2 AQUECEDORES DE CALDO TIPO CASCO E TUBOS	17
3.2.1 Estrutura de aquecedores do tipo casco e tubos	18
3.3 INCRUSTAÇÃO EM AQUECEDORES.....	20
3.4 CORROSÃO EM AQUECEDORES	22
3.5 BALANÇO DE MASSA EM AQUECEDORES.....	24
3.6 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM AQUECEDORES.....	25
4 LOCAL DE ESTUDO	28
5 VARIÁVEIS ANALISADAS	28
6 FORMAS DE OBTENÇÃO DE DADOS	29
7 DESCRIÇÕES DAS CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS AQUECEDORES	30
8 CRONOGRAMA DE LIMPEZA DOS AQUECEDORES DE CALDO	34
9 COLETA DE DADOS	36
10 PROCEDIMENTOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE TUBO BLOQUEADO	37
10 METODOLOGIA	38
10.1 HIPÓTESE DE COMPORTAMENTO DO SISTEMA	39
10.2 ELABORAÇÃO DO MODELO DE COMPORTAMENTO DO SISTEMA.....	39
11 ESTUDO DE APLICAÇÃO	41
11.1 DEFINIÇÃO DE POSSIBILIDADES DE PARADA DOS AQUECEDORES	41
11.2 AVALIAÇÃO DO EFEITO DE PARADAS NO SISTEMA DE AQUECIMENTO UTILIZANDO MODELO PROPOSTO	42
11.3 ESTIMATIVA DE ERRO	42
12 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA	43
12.1 MÉDIAS ARITMÉTICAS	43
12.2 REGRESSÕES	43
12.3 COMBINAÇÕES DE AQUECEDORES	43
12.4 ESTIMATIVA DE ERRO	44
13 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
13.1 HIPÓTESE DE COMPORTAMENTO DO SISTEMA	44

13.2	ÁREA DE TROCA TÉRMICA EM OPERAÇÃO APÓS MAPEAMENTO DE TUBOS	44
13.2.1	Descritivo do mapeamento de tubos para cada aquecedor	45
13.3	ÁREA DE TROCA EM CADA PARADA PARA LIMPEZA.....	49
13.4	COMPORTAMENTO DO SISTEMA	51
13.4.1	Área no período de estudo	51
13.4.2	Temperatura no período de estudo	52
13.4.3	Perfil de comportamento do sistema	53
13.4.4	Cálculo de médias das variáveis.....	54
13.4.5	Avaliação dos modelos de comportamento	56
13.5	VALIDAÇÃO DO MODELO DE COMPORTAMENTO DO SISTEMA	58
13.5.1	Possíveis combinações de paradas de aquecedores	58
13.5.2	Estimativa de erro envolvido.....	59
13.6	DEFINIÇÃO DAS MELHORES COMBINAÇÕES DE PARADAS	61
6	CONCLUSÕES.....	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

1 INTRODUÇÃO

As indústrias de transformação objetivam de forma geral o melhor controle de processo possível dos equipamentos para obter elevada eficiência industrial. No setor sucroenergético, o rendimento das operações é um dos fatores de maior relevância, visto que as perdas representam impactos expressivos quando o volume envolvido passa de toneladas diárias. As usinas processadoras de cana-de-açúcar requerem uma significativa quantidade de energia para condução de seus processos, sejam eles térmicos, mecânicos ou elétricos, sendo que o bagaço é o principal subproduto do setor, e que torna possível o suprimento dessa energia, através de sua queima para geração de vapor em caldeiras, e posteriormente ser convertido na energia requerida para operação da planta (SANTOS, 2012).

A fabricação de açúcar envolve uma série de processos de aquecimento e concentração do caldo, em etapas que necessitam de grandes índices de vapor para trocas térmicas. Inicialmente ocorre o primeiro aquecimento do caldo até 60 °C para entrar na etapa de sulfitação. Posteriormente, ocorre o processo de segundo aquecimento, visando atingir a temperatura de 105 °C no caldo para ser conduzido à decantação. Comumente, aquecedores de caldo a placas ou casco e tubos (verticais ou horizontais) são utilizados, sobretudo na etapa de segundo aquecimento, que visa atingir 105 °C, e é crucial para a efetividade das etapas posteriores, visto que a baixa temperatura impacta negativamente na decantação do caldo e assim, com todas as operações físico-químicas aplicadas para tratá-lo antes de ser concentrado (ASSIS, 2015).

Os aquecedores do tipo casco e tubos são largamente utilizados para esse processo devido ao aumento expressivo de área de troca térmica que fornece ao caldo, sobretudo pela disposição de seus tubos, sendo que o mecanismo de transferência de calor pode ser contracorrente, concorrente ou misto (SANTOS; SANTOS; LEITE, 2017).

O fluido de aquecimento é geralmente o vapor advindo do escape das turbinas ou vapor vegetal originário dos efeitos de evaporação, que oferta calor latente ao caldo. Nesse processo, os tubos do equipamento acabam por sofrer incrustação e deposição de sujidades, necessitando constantemente passar por limpeza, que é conduzida com a finalidade de reduzir danos operacionais advindos das baixas trocas térmicas (PIZANI, 2017).

Os principais problemas operacionais relacionados a esses equipamentos se resumem a danificação dos tubos, que pode ocorrer por incrustação irreversível (gerada pelo caldo que passa internamente ao tubo com excesso de cálcio, magnésio, silicato ou carbonato) ou corrosão

(gerada pelo vapor que passa externamente ao tubo com pH ácido, elevados teores de oxigênio, hidróxido de sódio ou cloretos) (TRINDADE, 2012).

Em alguns casos, os tubos acabam por danificar-se de forma irreversível, mesmo com intensa limpeza ou reparo mecânico, e não permitem mais serem utilizados para operação, pois podem contaminar o condensado (vapor de aquecimento que se condensa e retorna para caldeira ou é direcionado para outros usos, necessitando estar sem impurezas), e conseqüentemente, a eficiência das trocas térmicas nesta etapa, fazendo com que a temperatura do caldo não atinja o valor próximo do esperado. Assim, é necessário um controle individual de cada equipamento envolvido em cada etapa de processo, para garantir o máximo rendimento operacional (SANTOS, 2015).

As campanhas de limpeza são fundamentais para garantir a eficiência de operação nas indústrias alimentícias e o *clean in place* (CIP) é a forma mais comum, pois se trata de um método que não necessita da desmontagem do sistema, sendo literalmente a limpeza no local, como a tradução sugere. A importância deste procedimento se dá por distintos fatores, sendo os principais: garantia da segurança do alimento, evitar potencial contaminação entre ciclos de produção, elevação da eficiência do equipamento e acima de tudo, o CIP deve ser conduzido visando o mínimo impacto ambiental, reduzindo gastos com água e outros produtos químicos, além de maximizar a reutilização de recursos sempre que possível (BARBOSA, 2010).

A limpeza de aquecedores do tipo casco e tubos geralmente é realizada por hidrojateamento, por meio de uma mangueira com água à alta pressão, que é inserida dentro de cada tubo do equipamento, visando remover as sujidades aderidas à parede interna do tubo por força mecânica, isto é, pelo cisalhamento criado por meio do escoamento do fluido. Trata-se de uma atividade de risco, pois envolve trabalho em altura e com possibilidades de falha mecânica de válvulas e demais barreiras que são bloqueadas para cessar a passagem dos fluidos (caldo e vapor) durante a realização da atividade (FIUZA et al., 2011).

Cada parada para limpeza pode ocorrer tanto no período de safra de cana quanto em paradas gerais de uma planta industrial. No caso de usinas açucareiras, o mais comum é que essa limpeza seja conduzida com frequência e de acordo com um cronograma específico devido às baixas térmicas ocasionadas pelo excesso de sujidades depositadas nos tubos. Ao realizar a parada de um equipamento que opera em conjunto com outros, reduz-se a área de troca térmica disponível para passagem do caldo, pois enquanto a limpeza é feita não é possível que o aquecedor esteja em operação. Por isso, a temperatura de aquecimento do caldo é fortemente afetada, visto que é dependente da área disponível para essas trocas térmicas (SANTOS; SANTOS; LEITE, 2017).

Nesse sentido, avaliar o efeito da relação entre a área de troca térmica e a manutenção de temperatura no sistema de aquecimento do caldo é fundamental para o controle de processos e organização de um sistema de limpeza dos aquecedores envolvidos, pois possibilitará definir quantos e quais equipamentos podem ser parados ao mesmo tempo e que originarão a mesma resposta na temperatura do caldo. Junto a isso, também é possível dimensionar uma equipe de trabalho para realização da limpeza e assim, reduzir custos (TRINDADE, 2012).

A hipótese teórica existente entre área de troca térmica e temperatura do fluido é linear e diretamente proporcional, visto que tanto em escoamentos contracorrentes, concorrentes ou mistos, a taxa de transferência de calor aumenta ou diminui à medida que ambas as variáveis (área e temperatura) são alteradas (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Em vista do processo de produção de açúcar necessitar que o caldo atinja 105 °C na etapa de segundo aquecimento e que este é conduzido por um conjunto de aquecedores na usina estudada neste trabalho, considera-se que as paradas operacionais dos trocadores de calor são condição necessária para limpeza e identificação obstruções em tubos.

Conhecendo a relação da área de troca térmica no processo com a variação de temperatura, torna-se possível inferir uma condição ótima de paradas (área de troca térmica) que cause menos impacto na temperatura global do sistema.

A otimização de processos decorrente da modelagem de sistemas de limpeza industriais é um assunto novo na literatura, pois trata-se de um tema específico. Em vista disso, não foram encontrados trabalhos que relacionassem diretamente ambas as variáveis (área e temperatura) em trocadores tubulares, sendo este estudo um dos pioneiros na área.

Objetivou-se que utilização do modelo de comportamento do sistema desenvolvido seja empregada para aplicação prática dentro de um processo industrial de fabricação de açúcar, que possui diversos colaboradores com distintos níveis de formação. Portanto, os métodos abordados foram pensados visando a maior abrangência e entendimento possível do público em geral, com cálculos e procedimentos de simples execução e reprodutibilidade.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi estudar o processo de dano e/ou incrustação de trocadores tubulares e a eficiência de manutenção de temperatura no processo de segundo aquecimento do caldo em uma usina açucareira localizada no interior do estado de São Paulo.

Os objetivos específicos foram:

- Determinar a área de troca térmica teórica (projetada) para o conjunto de 13 aquecedores que compõem o processo;

- Determinar a quantidade de tubos danificados no conjunto de aquecimento;
- Obter o valor da área em operação correspondente a cada dia de parada para limpeza dos aquecedores;
- Obter dados de resposta de temperatura mediante variação da área de operação em cada dia de limpeza;
- Determinar um modelo do perfil de comportamento do sistema ao correlacionar área e temperatura;
- Validar dados do modelo na prática para estimar erro associado ao modelo;
- Determinar as melhores combinações de parada do conjunto dos aquecedores para estruturar um novo cronograma de limpeza.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR CRISTAL

A cana-de-açúcar é a matéria prima que origina o açúcar sob a forma de sacarose cristalizada. Também, é o meio no qual pode ser produzido álcool etílico através de fermentação. Resumidamente, para produção de açúcar, são realizadas diversas etapas industriais, como a extração da sacarose dos colmos da cana seguido pela purificação do caldo oriundo da moagem e posterior concentração desse caldo por evaporação até a obtenção de sacarose na forma sólida cristalizada (MACHADO, 2012).

Inicialmente, o processamento da cana-de-açúcar se dá com a colheita, que pode ser manual ou mecânica, seguida pelo carregamento e transporte até as usinas. Ao adentrar, a primeira etapa é a pesagem, que objetiva determinar quanto cada carregamento possui em termos de açúcar presente na cana e assim, a usina possa realizar o pagamento da carga aos fornecedores e parceiros agrícolas. Essa determinação é realizada pelo laboratório de pagamento de cana por teor de sacarose (PCTS), que realiza análises de qualidade da matéria prima, como o teor de sólidos solúveis (brix), açúcares redutores (AR) e fibra. Por fim, o descarregamento da cana em esteiras alimentadoras ocorre com auxílio de guindaste com tombador lateral, direto dos caminhões (FERNANDES, 2011).

Após descarregamento, a cana segue para etapa de picagem, que ocorre em facas ou martelos giratórios e que visa aumentar a área e eficiência de extração. Na sequência, o desfibramento objetiva elevar a densidade para extração, seguido pelo espalhador que descompacta a cana desfibrada. Como existem muitas partículas indesejáveis tal como os metais, um separador magnético atua para retê-los. Por fim, a extração do caldo pode ocorrer

de duas formas: moagem ou difusão. Na moagem, é utilizado um conjunto de 4 a 6 ternos, com embebição simples ou composta, enquanto no difusor de bagaço a extração ocorre por lixiviação ou lavagem (REIN, 2013).

O caldo extraído necessita passar por tratamento, para evitar problemas em processos seguintes e obter um produto com elevada qualidade. Assim, vai inicialmente para peneira estática ou rotativa, visando retirar material grosseiro. Na sequência, ocorre a clarificação, para remoção de material coloidal ou em solução e corrigir o pH para 7,0 através da sulfitação (adição de enxofre) e caleagem (adição de hidróxido de cálcio). Após, o caldo passa por aquecimento até 105 °C visando desnaturar proteínas, aumentar a velocidade de floculação e diminuir a viscosidade do meio. Por fim, a decantação visa coagulação e precipitação de coloides, produzindo caldo com baixa turbidez e lodo. Utilizam-se decantadores do tipo contínuo ou rápido (MACHADO, 2012).

O caldo tratado segue para sucessivas etapas de concentração. A evaporação em múltiplo efeito visa elevar a concentração de sólidos dissolvidos ao redor de 60 °brix. Na sequência, a flotação do xarope (caldo com valor igual ou superior a 60 °brix) objetiva uma clarificação final, com remoção de sujidades por descoloração (LOPEZ, 2011).

O cozimento é a etapa em que ocorre a cristalização da sacarose, por meio da adição de cristais de açúcar, que visam induzir a formação de outros cristais. Geralmente utilizam-se os métodos de espera, choque ou indução e o cozimento pode ser realizado em duas ou três massas. A centrifugação vem na sequência para separar de vez o cristal de sacarose do mel (xarope com perda de pureza). Por fim, a secagem do açúcar ocorre em tambor rotativo e vertical de bandejas, com a finalidade de reduzir a umidade para menos de 0,1%, o que auxilia na proteção contra deterioração microbológica e problemas tecnológicos. O armazenamento deve ser realizado em temperaturas menores que 40 °C e pode ser em sacaria de algodão (50 kg), big bag (1000-1.200 kg) ou a granel em silos verticais (RIBEIRO; BLUMER; HORII, 1999).

3.1.1 Aquecimento do caldo

Após passar pelo tratamento físico e químico, o caldo necessita atingir a temperatura de 105 °C, ideal para entrar na etapa decantação, sendo o aquecimento, um processo intermediário entre ambas. Os principais objetivos da elevação de temperatura do caldo são a remoção de albuminas e impurezas coloidais, provocando a separação de fases através de decantação por meio de floculação e precipitação. Temperaturas muito superiores a 105 °C não devem ser atingidas, visto que isso pode ocasionar emulsificação das ceras, dificultando ainda mais a separação deste composto do caldo. Comumente, as etapas de aquecimento são realizadas em

trocadores de calor, com uso de fontes de energia originadas na própria usina, como o vapor de escape das turbinas ou vapor vegetal dos efeitos de evaporação (RODRIGUES, 2017).

Trocadores de calor a placas e aquecedores tubulares (verticais e horizontais) são os mais comuns nessas etapas, pois proporcionam bons rendimentos nas trocas térmicas com subprodutos da planta industrial, como vinhaça (fabricação de álcool) e vapor vegetal (pré- evaporadores e evaporadores). As incrustações são fenômenos comuns nos aquecedores, visto que após a passagem do caldo, determinadas impurezas se aderem às paredes dos tubos dos equipamentos, originando deposição de silicatos, sulfitos, fosfatos e fibra da cana, o que reduz a eficiência nas trocas térmicas e aumenta a perda de carga do sistema (OLIVEIRA; PONTES; GANDOLFI, 2018).

Após passar por aquecimento e atingir 105 °C o caldo passa por um equipamento intermediário entre os aquecedores e decantadores, chamado balão de *flash*, que consiste na separação de compostos gasosos dissolvidos no caldo, pois a presença destes pode afetar negativamente o processo de decantação pela originação de turbulências devidas à geração de bolhas, o que impacta na formação de flocos. O equipamento consiste em um vaso de expansão submetido à pressão atmosférica, localizado geralmente no plano acima do decantador, visando escoamento por gravidade. Nesse processo, uma reduzida parcela de água é evaporada por *flash*, assim como grande parte dos compostos gasosos que não condensam (SILVA et al., 2009).

A efetividade do processo de aquecimento é verificada na decantação do caldo, pois é a etapa em que flocos com acúmulo de sujidades são originados e decantam, o que reduz o nível de sujidade e impurezas presentes. Os principais fatores relacionados a decantação não ideal são: a precipitação parcial ou lenta dos coloides; elevado volume e a reduzida densidade das borras. Além destes problemas, a decantação também é influenciada por falhas nas etapas de tratamento, seja pela aplicação inadequada de reagentes ou da baixa temperatura que o caldo sai do aquecimento (ARAÚJO, 2017).

3.2 AQUECEDORES DE CALDO TIPO CASCO E TUBOS

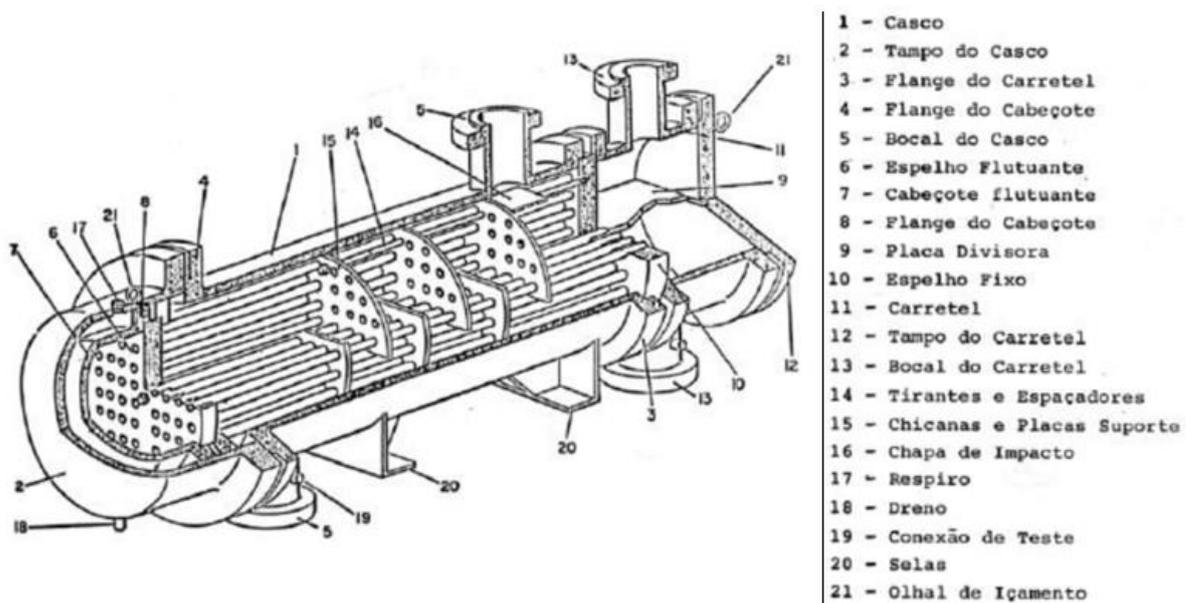
Os trocadores de calor empregados nas usinas açucareiras são equipamentos que objetivam a transmissão de energia na forma de calor indireta entre dois fluidos com distintas temperaturas, sendo essas trocas entre vapor/caldo e condensados/caldo. Comumente, são utilizados para o primeiro, segundo ou terceiro aquecimentos do caldo durante o tratamento físico-químico, e o modelo casco e tubos é o mais comum em decorrência de possuir reduzido custo e elevada eficiência (BICCA, 2006).

O princípio básico de operação do equipamento se dá pela entrada do caldo por dentro dos tubos, que troca calor com vapor, que é inserido fora dos tubos. Caldo e vapor não se misturam, pois existem chapas conhecidas como calandras, limitando a parte superior e inferior dos tubos e também a entrada de vapor, que fica restrita a uma região. Assim, o vapor após trocar calor com caldo, perde energia e condensa, sendo retirado do sistema pela parte inferior do equipamento (SANTOS; SANTOS; LEITE, 2017).

3.2.1 Estrutura de aquecedores do tipo casco e tubos

Esquemáticamente, o trocador casco e tubos é formado por vários tubos paralelos envolvidos por um casco, sendo que o espaço entre ambas as estruturas é onde ocorre a passagem de um dos fluidos que trocam energia térmica. Também, apresenta os cabeçotes e carretéis, elementos fundamentais que garantem a entrada, retorno e saída do segundo fluido envolvido (FALCÃO, 2008). A figura a seguir exemplifica o trocador de calor.

Figura 01 – Estrutura de um aquecedor tubular do tipo casco e tubos



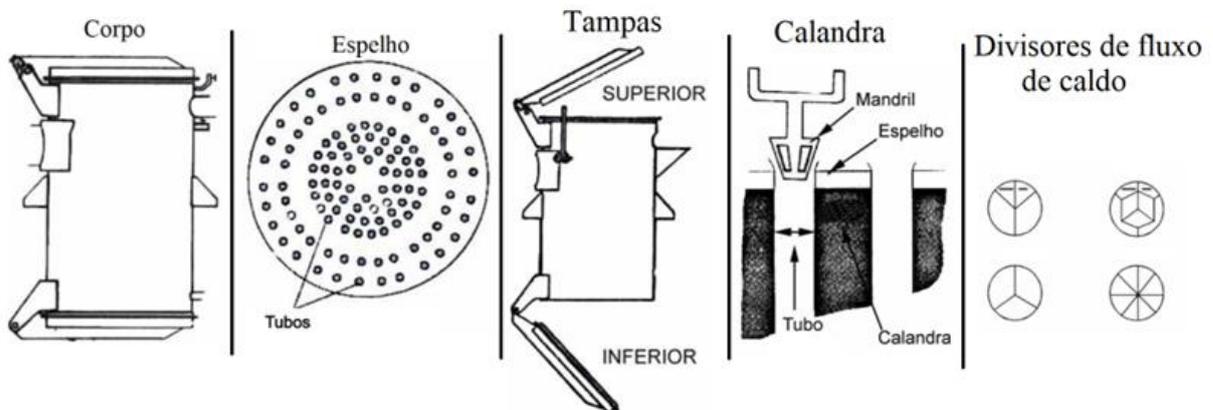
Fonte: Adaptado de Falcão, 2008.

As principais partes que serão apresentadas a seguir são o corpo, espelho, tubos, tampas e calandra. O corpo é composto por um cilindro de chapa de material aço carbono e que origina a parte externa do aquecedor. O espelho se refere a uma circunferência de chapa com furos em que são fixados os tubos, que podem ser de material cobre ou inox. A parte de cima é chamada espelho superior e a de baixo, espelho inferior (SANTOS, 2019).

Os tubos como o nome sugere, são os tubos em que ocorre a passagem do fluido a ser aquecido, no caso o caldo. As duas extremidades do tubo são fixadas por entre os espelhos superior e inferior. O material pode ser aço carbono, cobre ou inox, sendo que o cobre apresenta maior eficiência de troca térmica, porém reduzido tempo de vida, enquanto o inox é mais resistente, porém possui elevado custo e o aço carbono possui baixo custo, no entanto tem reduzida troca térmica e resistência à corrosão (GUSMÃO, 2013).

As tampas são a parte que fecham o equipamento e possibilitam sua operação. Cada aquecedor possui uma tampa superior e outra inferior e elas tem divisões internas que possibilitam a distribuição do fluxo de caldo internamente. Entre a tampa e o corpo do aquecedor existe uma borracha que objetiva vedar o fluxo de caldo. Por fim, a calandra se refere a parte entre os espelhos superior e inferior, sendo que nesta área ocorre a injeção de vapor para aquecer o caldo (FIORILLO; MARTINS, 2010). A figura a seguir exemplifica as estruturas mencionadas.

Figura 02 – Principais estruturas do aquecedor casco e tubos



Fonte: Adaptado de Usaçúcar, 2005.

Nestes equipamentos, o tipo de regime de escoamento dos fluidos é o fator determinante para a operação, podendo ser de três tipos: fluxo paralelo, contrário ou cruzado. No fluxo paralelo, os fluidos se movimentam na mesma direção, no fluxo contrário em sentidos opostos (maior eficiência) e no regime cruzado ocorre interseção entre o escoamento dos fluidos envolvidos (AVANÇO et al., 2010).

Em geral, as usinas de cana utilizam aquecedores tubulares com espelhos fixos, e tubos distribuídos em passes com formato triangular, sendo que cada passe possui quantidade simétrica de tubos e as vezes, um número par de passes é escolhido visando auxiliar o projeto da tubulação de alimentação de caldo para os equipamentos de aquecimento (REIN, 2013).

O principal entrave neste equipamento são as incrustações na parte interna dos tubos, que exige limpeza constante, porém é comum que ocorra deposição intensa e irreversível que leve ao bloqueio na passagem do caldo e conseqüentemente, da livre utilização do tubo. Assim, alguns projetos levam em conta esse fator e dimensionam o processo em questão para possuir mais aquecedores que o suficiente. Os métodos usados para limpeza dos equipamentos são: mecânico, químico e ar comprimido (CASTRO, 2007).

3.3 INCRUSTAÇÃO EM AQUECEDORES

A incrustação é um fenômeno que ocorre devido ao acúmulo de partículas inorgânicas e orgânicas, microrganismos, macromoléculas e produtos oriundos de corrosão em superfícies aquecidas, sendo um processo físico-químico e com natureza dinâmica, visto que vários fatores podem ocasionar a deposição dos elementos. Trata-se de um fenômeno que ocorre internamente às tubulações, em decorrência da adesão de substâncias em suspensão e da precipitação de sólidos dissolvidos que são convertidos em insolúveis pela elevação da temperatura. O aumento do fator incrustação depende de variáveis como: composição do material da tubulação, tipo de equipamento, condições de operação etc (CAMPOS, 2004).

Usinas açucareiras sofrem com efeitos da incrustação, principalmente nas etapas de aquecimento, como no tratamento e concentração do caldo, tanto em aquecedores quanto evaporadores. Queda na produtividade, elevação na frequência de manutenção, redução na eficiência e entupimento irreversível de tubulações acarretam quase sempre em elevação dos custos operacionais. Nos equipamentos mencionados, é comum o fenômeno da incrustação ser notado pela elevação na perda de carga, oriundo de problemas da diminuição de área de troca térmica pela redução do diâmetro interno do tubo por onde flui o caldo de cana, elevando a resistência de troca térmica, com ampliação da camada de incrustação (SANTOS; SANTOS; LEITE, 2017).

Diversos são os elementos químicos que geram a incrustação, sobretudo compostos orgânicos e minerais. Os principais são quatro tipos: dispersões grosseiras, coloidais, moleculares e iônicas. As partículas grosseiras apresentam diâmetro superior a 0,1 μm , sendo as principais espécies o bagacilho, areia, terra e gravetos. Com relação as dispersões coloidais, estão na faixa do diâmetro de 0,001 μm a 0,1 μm e possui as ceras, gorduras, proteínas, gomas, corantes, dextranas e amido como espécies presentes. Por fim, as dispersões moleculares e iônicas possuem diâmetro inferior a 0,001 μm e açúcares, sais minerais e ácidos são os principais elementos, sendo sacarose, glicose, frutose e manose para a classe dos açúcares,

sulfatos, cloretos, silicatos, fosfatos de potássio, cálcio, magnésio e sódio para os sais minerais e ácidos orgânicos aconítico, oxálico e málico para os ácidos (DELGADO; CESAR, 1977).

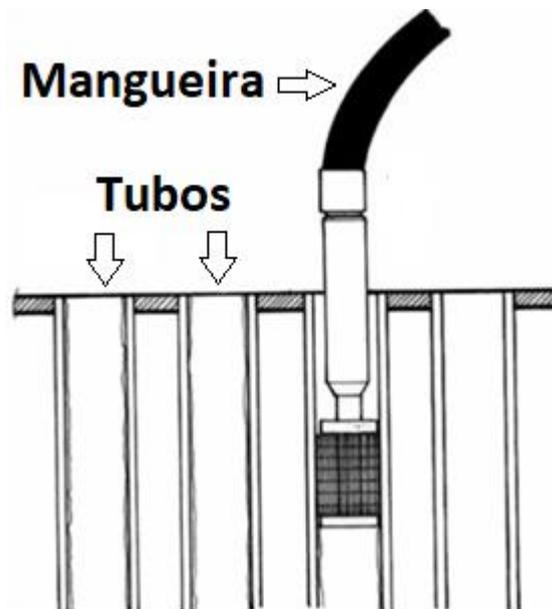
A maior parte das incrustações ocorridas em usinas açucareiras atrelam o cálcio como responsável, geralmente oriundo do excesso adicionado durante etapa de caleagem. A concentração de fosfato de cálcio reduz ao longo do processo, ao passo que a sílica, oxalato de cálcio e sulfato de cálcio se elevam, além da solubilidade dos compostos reduzir (REIN, 1990).

O aumento da temperatura no interior dos tubos e os elementos que se solubilizam no caldo supersaturam e se depositam na parede de troca térmica, originando compostos insolúveis. Os íons que geralmente estão presentes nas incrustações são: cálcio, magnésio, silicatos, carbonatos e também bicarbonatos, que mesmo possuindo baixa contribuição para a formação de compostos insolúveis, possuem propriedade de se decompor em solução e originar íons carbonato e gás carbônico, que reagirão com íons de cálcio, originando incrustação de carbonato de cálcio (KAHSAY; GABBIYE, 2015).

A ineficiência dos aquecedores originada por incrustação ocasiona falhas na decantação do caldo, por não o aquecer de forma suficiente, gerando perdas, atrasos na produção e gastos excessivos com insumos para fabricação do açúcar branco, por aumentar as chances de desqualificar o produto. Por isso, é necessário manter uma campanha de limpeza constante nos equipamentos para evitar a incrustação excessiva que origine danos irreversíveis nos tubos (SANTOS; SANTOS; LEITE, 2017).

A principal forma de limpeza dos aquecedores de caldo é por hidrojateamento. Trata-se de limpeza das incrustações por meio de bicos rotativos com água pressurizada através de bombas de alta pressão, na faixa de até 1.000 bar e água na temperatura ambiente. O processo de limpeza se dá pela remoção da incrustação de forma mecânica da água jateada contra a parede do tubo. As principais vantagens desse modo de limpeza são: boa eficiência, operação simples, baixa manutenção nas instalações, baixo desgaste do tubo metálico e controle da pressão de limpeza pela bomba. No entanto, as principais desvantagens são: necessidade de abrir o equipamento a cada limpeza, água com alta pureza é requerida, alta mão de obra envolvida e requer instalações que garantam a segurança da operação (USAÇÚCAR, 2005). Esquemáticamente, a mangueira é inserida dentro de cada tubo, conforme a figura a seguir.

Figura 03 – Hidrojateamento de aquecedores



Fonte: Adaptado de Usaçúcar, 2005.

3.4 CORROSÃO EM AQUECEDORES

A corrosão dos tubos é um fenômeno que tem relação direta com a danificação de aquecedores casco e tubos, pois pode ser originada por reações eletroquímicas da incrustação excessiva ou vapor/condensado com baixa pureza. Em geral, este é um fator originado na forma localizada por corrosão por pite ou alvéolo. Os fatores que aceleram corrosão nas tubulações são: água de produção de vapor com pH ácido, elevados teores de: oxigênio dissolvido, hidróxido de sódio e cloretos, presença de: cobre e níquel em suspensão, gás sulfídrico, depósitos porosos e complexantes. O vapor após contato com tubos dos aquecedores se condensa e produz condensado, que preserva grande parte das composições que o vapor possui, e como tem contato direto com os tubos dos aquecedores, até a completa remoção pode originar uma série de problemas corrosivos nas tubulações (SILVA; ZANG; ZANG, 2008).

Em vista dos motivos apresentados, o tratamento de água para uso nas caldeiras e posterior geração de vapor deve ser realizado com o máximo de cuidado, além das etapas de geração de vapor vegetal durante evaporação, pois deve-se inserir nos aquecedores de caldo vapor com maior pureza possível, visto que diversos fatores podem contribuir ao longo do tempo para originar corrosão nas tubulações que trocam calor com o caldo de forma indireta (SANTOS; FRAGA, 2018).

A corrosão ácida é originada quando se utiliza água com reduzidos valores de pH para produção de vapor, sendo esse um fato que pode ocorrer durante tratamento da água de recirculação ou contaminação oriunda de produtos químicos inseridos para limpeza das tubulações de caldeiras (PALHARIM; SILVA; RODRIGUES, 2015).

O oxigênio presente em excesso nas tubulações pode causar corrosão por aeração diferencial e fratura da magnetita protetora, pois uma pilha galvânica é estabelecida. Materiais em suspensão podem ser depositados nas tubulações ou precipitados, aderindo-se às paredes externas dos tubos quando vapor é injetado na calandra (OHBA; KAJIMOTO, 1997).

A presença de sais ácidos ou cloretos em geral, dissolvidos na água que produz vapor poderá originar duas situações distintas. A primeira é a concentração elevada de sais ácidos como cloreto de cálcio e magnésio, que podem sofrer hidrólise sob depósitos originando condições específicas de reduzido pH, que é o ambiente favorável para o filme de magnetita protetora formado em reação química, ser dissolvido e o metal da tubulação atacado. Já a segunda situação diz respeito a elevada concentração de cloretos na água, que atuam de forma semelhante aos sais ácidos, iniciando corrosão cíclica sob o depósito ou até mesmo internamente aos pites e frestas (FRAUCHES-SANTOS et al, 2014).

Cobre e níquel são metais geralmente encontrados nas linhas de vapor e condensado e podem ser levados até as caldeiras para recirculação no processo de geração de energia na forma de partículas metálicas, seja por ação da erosão ou da cavitação em tubulações e que impelem fluidos ou também por rotores de bombas. Os elementos químicos mencionados podem se inserir em fendas ou na parte interior dos tubos, originando um elevado número de pilhas galvânicas, que possui o aço como material atuante na forma de ânodo e sofrendo corrosão (PANNONI; WOLYNEC, 2002).

Choques térmicos são fatores que também favorecem a corrosão em tubulações, visto que grandes oscilações são observadas quando vapor de escape (temperatura maior que 100 °C) entra em contato direto com caldo a 60 °C ou menos. Essas variações de temperatura originam contrações e dilatações diferentes entre a magnetita protetora e o aço, de forma que a película de magnetita é removida (JÚNIOR, 2003).

Regiões críticas em tubulações são grandes candidatas a sofrer corrosão, tal como regiões específicas de alta transferência de calor, soldas, mal laminação, fendas e tubos repuxados. As regiões específicas de alta transferência de calor originam gradientes de temperatura entre as tubulações da calandra, criando zonas com maior tendência a danos que outras. Tubos com soldas podem romper-se com altas temperaturas. Tubos mal laminados podem apresentar espessura de parede menor que a exigida para o processo e assim não o

suportar em pressões elevadas, gerando estufamento. A presença de fendas em tubos pode tornar áreas potencialmente perigosas e propensas à corrosão em decorrência do aumento da concentração de determinadas substâncias nesses locais. Já tubos com extremidades repuxadas geram deformações que tornam o material tensionado (BETHLEHEM, 2020).

A danificação irreversível do tubo do aquecedor se dá quando este sofre corrosão generalizada e possibilita o contato direto entre caldo e vapor/condensado, necessitando sofrer um bloqueio nas extremidades superior e inferior para a passagem de caldo, visto que este pode contaminar o condensado. Esse processo costuma ser identificado quando os resultados de análises laboratoriais detectam presença de sacarose ou sólidos solúveis em elevada concentração junto à água condensada. Para verificação de qual tubo e qual equipamento está causando o problema costuma-se realizar teste hidrostático na calandra do aquecedor, abrindo as tampas superior e inferior para visualizar nos espelhos qual a localização específica do tubo que está vazando água (USAÇÚCAR, 2005).

3.5 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA EM AQUECEDORES

O balanço de massa e energia fundamenta-se na 1ª Lei da Termodinâmica, pelo princípio de conservação da massa e energia, através da contabilidade de massa e energia que entra e deixa um sistema, como enuncia o princípio de Joule (JÚNIOR; CRUZ, 2010). A série de equações exibidas nos tópicos a seguir tomam como base Hugot (1969). Os balanços de massa global e parcial do produto são definidos pelas equações a seguir, assim como o balanço global de aquecimento, tendo por base um aquecedor como sistema operando em regime permanente.

$$\dot{m}_F = \dot{m}_Q \quad (01)$$

$$\dot{m}_F X_{Fi} = \dot{m}_Q X_{Qi} \quad (02)$$

$$\dot{m}_H = \dot{m}_C \quad (03)$$

Em que: \dot{m}_F = taxa de entrada de produto frio (kg/h); \dot{m}_Q = taxa de saída de produto quente (kg/h); \dot{m}_H = taxa de vapor de aquecimento (kg/h); \dot{m}_C = taxa de condensado (kg/h); X_{Fi} = fração mássica de um determinado componente do produto frio e X_{Qi} = fração mássica de um determinado componente do produto quente.

No processo de aquecimento, para ocorrência de transferência de calor, o sistema em questão deve seguir o modelo de temperatura dado pelas relações a seguir.

$$T_Q > T_F \quad (04)$$

$$T_H > T_C \quad (05)$$

Em que: T_Q = temperatura do produto quente ($^{\circ}\text{C}$); T_F = temperatura do produto frio ($^{\circ}\text{C}$); T_H = temperatura vapor de aquecimento ($^{\circ}\text{C}$) e T_C = temperatura do condensado ($^{\circ}\text{C}$).

O balanço de energia global, segundo Hugot (1969), considerando operação em regime permanente, e que as perdas de calor são desprezíveis, é dado pela equação a seguir.

$$\dot{m}_F H_F + \dot{m}_H H_H = \dot{m}_C H_C + \dot{m}_Q H_Q \quad (06)$$

Em que: H_F = entalpia específica do produto frio (kJ/kg); H_H = entalpia específica de vapor de aquecimento (kJ/kg); H_C = entalpia específica de condensado (kJ/kg) e H_Q = entalpia específica de produto quente (kJ/kg).

3.6 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM AQUECEDORES

No aquecimento do caldo, o vapor é empregado para transferir o calor exigido ao caldo, sendo que distintos fatores têm influência na efetividade da troca térmica, como: balanço térmico entre os fluidos, taxa e coeficiente de transmissão de calor, área requerida para alcançar as trocas térmicas desejadas, características físico-químicas do caldo, velocidade e tipo de escoamento dentre outros (INCROPERA; DEWITT, 1999).

A taxa de transferência de calor é definida como sendo uma relação entre a quantidade de energia térmica por unidade de tempo. Assim, a diferença de temperatura é a força motriz para o processo térmico, e oscila dentro de um aquecedor, visto as condições operacionais que se apresentam nas distintas regiões do equipamento (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). De forma geral, a taxa de transferência de calor é dada pela equação a seguir.

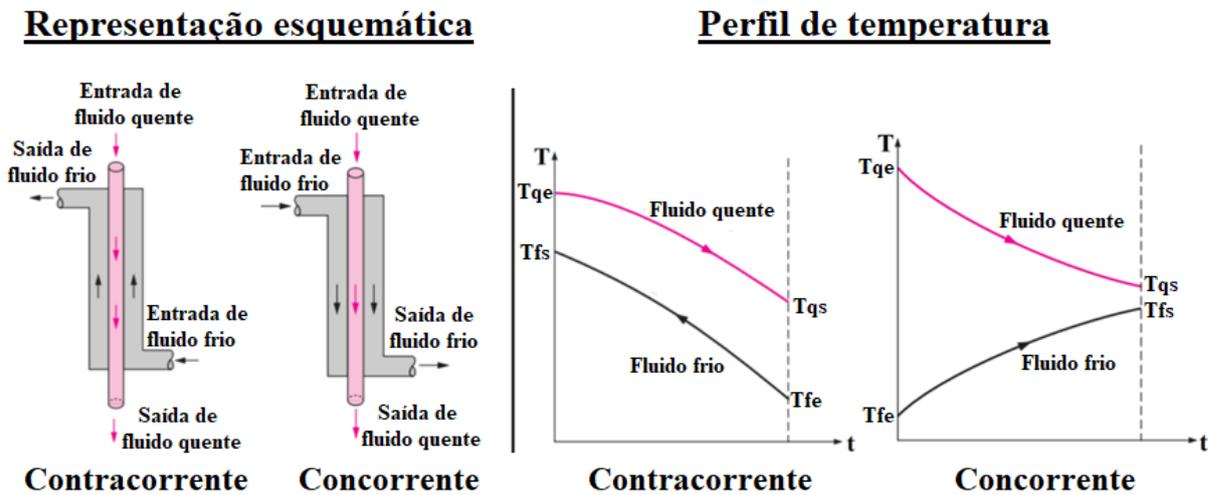
$$\dot{q} = U A \Delta T \quad (07)$$

Em que: U = coeficiente global de transferência de calor ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$); A = área de transferência de calor (m^2) e ΔT = diferença de temperatura entre as correntes de vapor de aquecimento e a solução ($^{\circ}\text{C}$).

Existem dois tipos de escoamento do fluido: contracorrente e concorrente. No primeiro tipo ocorre transferência de energia entre os fluidos que escoam em sentidos opostos e no segundo a troca térmica ocorre com a movimentação dos fluidos na mesma direção (ÇENGEL;

GHAJAR, 2012). As representações esquemáticas e os perfis de temperatura dos tipos de escoamento estão representados na figura a seguir.

Figura 04 – Escoamento contracorrente e concorrente



Fonte: Adaptado de Çengel e Ghajar, 2012.

Para ambos os tipos de escoamento, o potencial térmico é dado pela variação de temperatura entre as extremidades do equipamento. A média a ser calculada deve ser logarítmica, e não aritmética (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). Assim, o potencial térmico médio em fluxo contracorrente (q_1) e concorrente (q_2) está exibido nas equações a seguir.

$$\dot{q}_1 = U A \frac{(T_{qs} - T_{fe}) - (T_{qe} - T_{fs})}{\ln \left(\frac{T_{qs} - T_{fe}}{T_{qe} - T_{fs}} \right)} \quad (08)$$

$$\dot{q}_2 = U A \frac{(T_{qe} - T_{fe}) - (T_{qs} - T_{fs})}{\ln \left(\frac{T_{qe} - T_{fe}}{T_{qs} - T_{fs}} \right)} \quad (09)$$

Em que: T_{qs} = Temperatura de saída do fluido quente (°C); T_{fe} = Temperatura de entrada do fluido frio (°C); T_{qe} = Temperatura de entrada do fluido quente (°C) e T_{fs} = Temperatura de saída do fluido frio (°C).

Existe um terceiro tipo de escoamento, denominado misto, que mescla ambos os tipos (contracorrente e concorrente). O cálculo do potencial térmico inclui um fator de correção da média logarítmica da temperatura (F_{MLDT}) que é adimensional e calculado partindo-se da suposição de um escoamento contracorrente (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). Assim, o potencial térmico médio em fluxo misto (q_3) é dado pela equação a seguir.

$$\dot{q}_3 = U A \frac{(T_{qs} - T_{fe}) - (T_{qe} - T_{fs})}{\ln \left(\frac{T_{qs} - T_{fe}}{T_{qe} - T_{fs}} \right)} F_{MLDT} \quad (10)$$

Para escoamento contracorrente o valor de F_{MLDT} é igual 1,0, e para escoamento misto sempre menor que 1,0. Esse fator é obtido por meio de gráficos ou tabelas, que são elaboradas a partir do número de passes no casco, nos tubos, e se ocorre ou não mistura entre os fluidos. Leva-se em conta as temperaturas de entrada e saída dos fluidos quente e frio para calcular as variáveis R e P, que são cruzadas para obter-se o valor de F_{MLDT} (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). Essas variáveis estão descritas pelas equações a seguir.

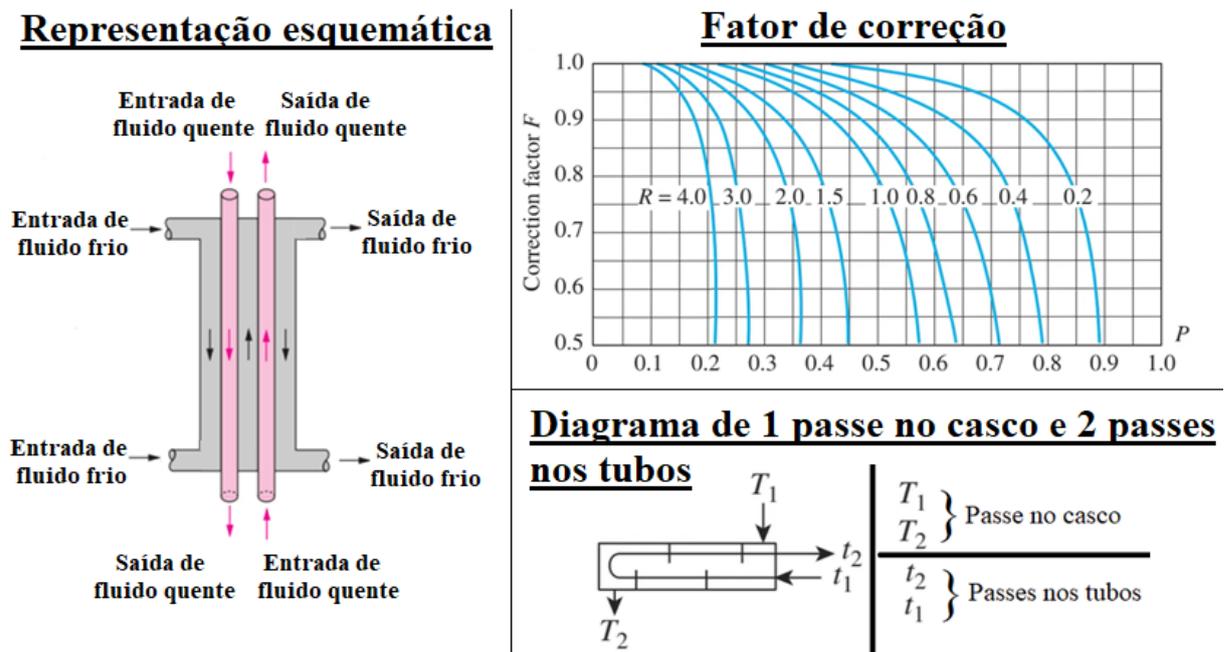
$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad (11)$$

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (12)$$

Em que: T_1 = temperatura de entrada do fluido quente (°C); T_2 = temperatura de saída do fluido quente (°C); t_1 = temperatura de entrada do fluido frio (°C) e t_2 = temperatura de saída do fluido frio (°C).

A figura a seguir apresenta a representação esquemática de um sistema de escoamento misto, com o gráfico padrão do fator de correção para escoamento com 1 passe no casco e múltiplos de 2 passes nos tubos, além do diagrama de temperaturas para cálculo de R e P.

Figura 05 – Escoamento misto



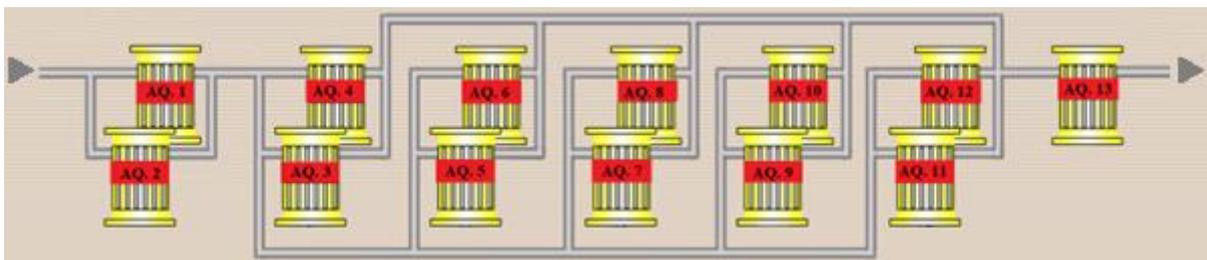
4 LOCAL DE ESTUDO

O estudo referente a este trabalho foi realizado em uma usina do setor sucroenergético, especificamente na área de fabricação de açúcar cristal e subsetor de tratamento do caldo na etapa de segundo aquecimento. A usina açucareira está localizada no interior do estado de São Paulo e produz açúcar cristal, etanol anidro e hidratado além de energia elétrica para consumo interno e exportação.

5 VARIÁVEIS ANALISADAS

Este estudo foi realizado de forma a mapear a segunda etapa de aquecimento de caldo. Para a manutenção das condições essenciais de processo (temperatura de saída do caldo de 105 °C) é necessário a utilização de um parque de 13 aquecedores tubulares arranjados em pares dispostos em série ou em paralelo, exceto pelo último aquecedor do sistema. Este arranjo pode ser melhor visualizado pela figura apresentada a seguir.

Figura 06 – Sistema de fluxo de caldo no segundo aquecimento



Fonte: Próprio do autor, 2022.

Pode-se observar desta figura que os trocadores que constituem a segunda etapa de aquecimento são nomeados por números de 01 a 13 e serão utilizados para relacionar as características construtivas de cada trocador (número de tubos de troca térmica, configurações de arranjos de tubos definidos como espelhos que serão discutidos adiante).

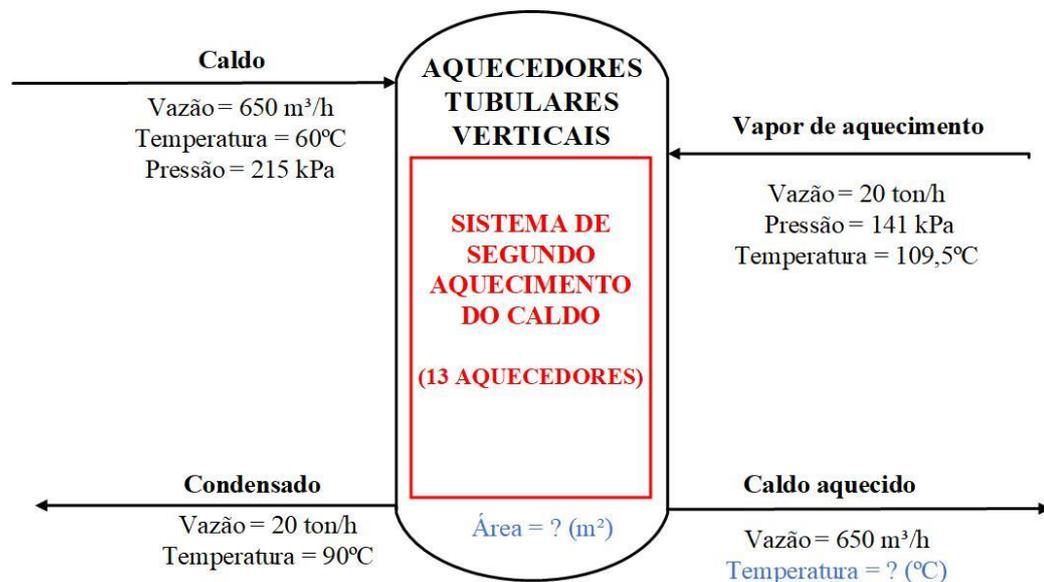
Cada aquecedor tubular define uma unidade de aquecimento do sistema por onde podem ser avaliadas variáveis de processo. Estas variáveis são utilizadas para a construção do modelo matemático proposto agrupadas como variáveis constantes de processo, aquelas que não sofrem inferência, pois correspondem a uma condição operacional, estas variáveis são:

1. Vazão de entrada e saída de caldo = 650 m³/h;
2. Temperatura do caldo na entrada dos aquecedores = 60 °C;
3. Pressão na linha de entrada de caldo = 215 kPa;

4. Vazão de entrada de vapor = 20 ton/h;
5. Vazão de saída de condensado = 20 ton/h;
6. Pressão na linha de entrada de vapor = 141 kPa;
7. Temperatura do vapor na entrada (saturado) = 109,5 °C;
8. Temperatura do condensado na saída = 90 °C;
9. Dados construtivos dos aquecedores tubulares (coeficiente global de troca térmica, diâmetro interno, comprimento e quantidade de tubos) que serão detalhados adiante.

As variáveis dependentes do estudo, ou seja, aquelas que serão monitoradas para avaliar o modelo matemático a ser proposto são: área de troca térmica e temperatura de saída do caldo. O conjunto destas variáveis está esquematizado na figura a seguir, que representa uma unidade de aquecimento para orientar o processo de balanço de energia aplicado no sistema.

Figura 07 – Unidade do sistema de aquecimento



Legenda: • Dado constante • Dado variável

Fonte: Próprio do autor, 2022.

6 FORMAS DE OBTENÇÃO DE DADOS

Os dados que compõem o trabalho foram obtidos no departamento de projetos da unidade industrial e por dois sistemas que centralizam o controle de dados de processos:

Supervisório e PIMS (*Plant Information Management System*, ou pela tradução, sistema de gerenciamento de informações da planta).

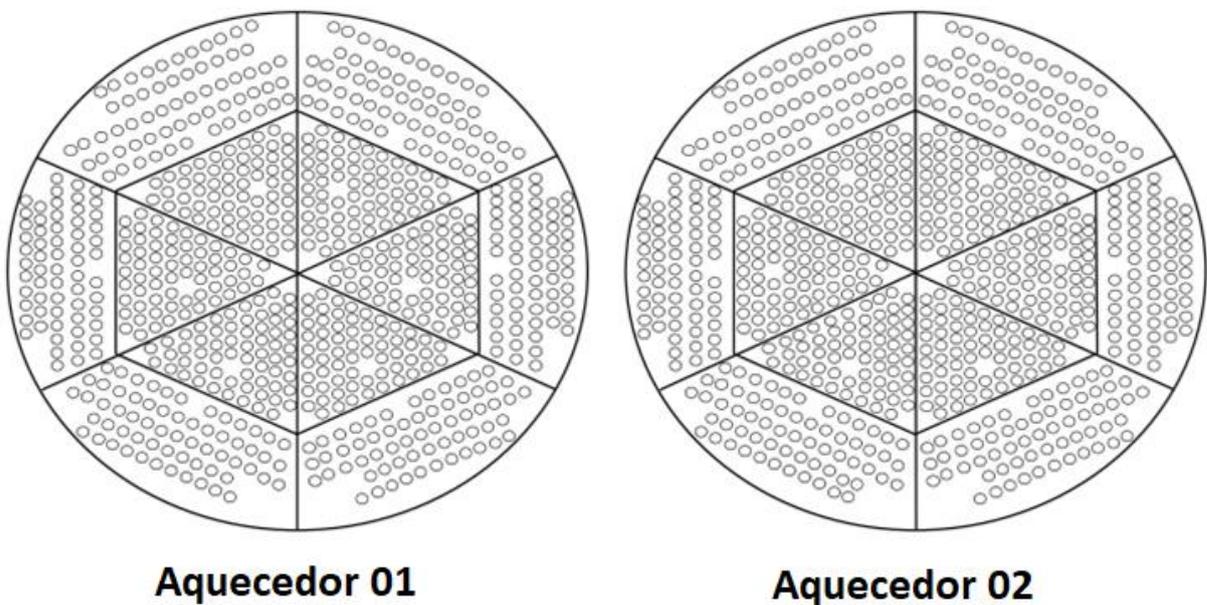
O setor de projetos é área da empresa responsável pelo planejamento e implementação de novos fluxos operacionais e é onde se concentra grande parte das informações técnicas de equipamentos, bem como as principais características projetivas.

O Supervisório é um *software* de acompanhamento do fluxo de processo do segundo aquecimento e o PIMS é o sistema de aquisição e registro de dados, isto é, armazena de dois em dois minutos os dados do processo e os disponibiliza em planilhas eletrônicas.

7 DESCRIÇÕES DAS CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS AQUECEDORES

Os espelhos dos aquecedores foram fornecidos para identificar a quantidade, formato e distribuição dos tubos em cada equipamento, assim como a forma de transporte dos fluidos (número de passes no casco e nos tubos). Nas figuras seguir, estão apresentadas as especificidades de cada aquecedor.

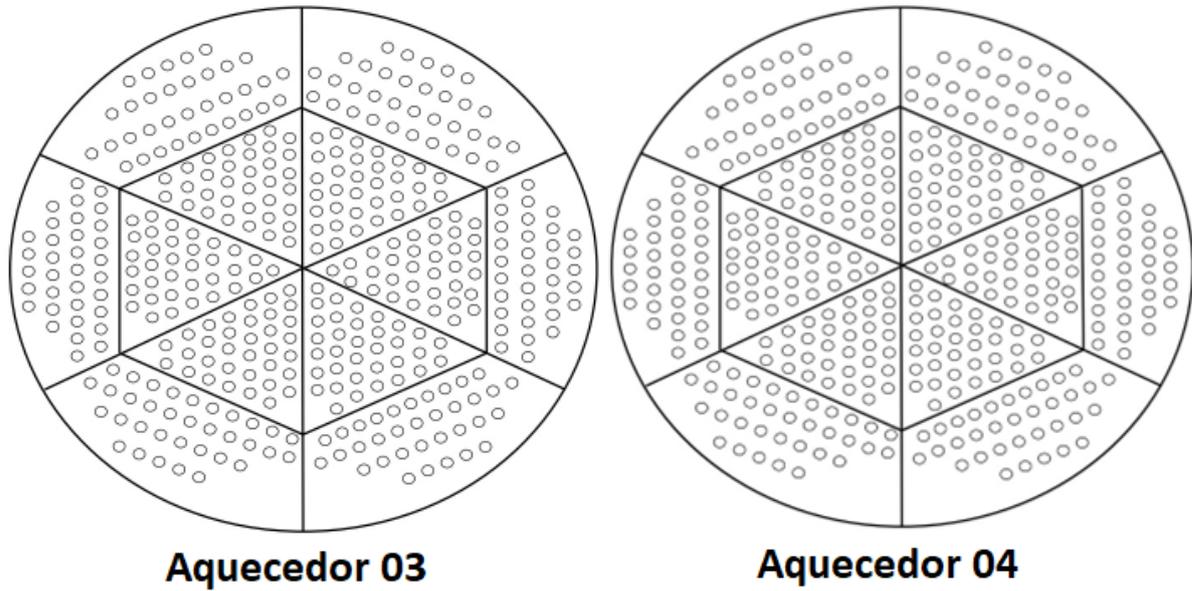
Figura 08 – Espelhos superiores projetados dos aquecedores 01 e 02



Fonte: Próprio do autor, 2022.

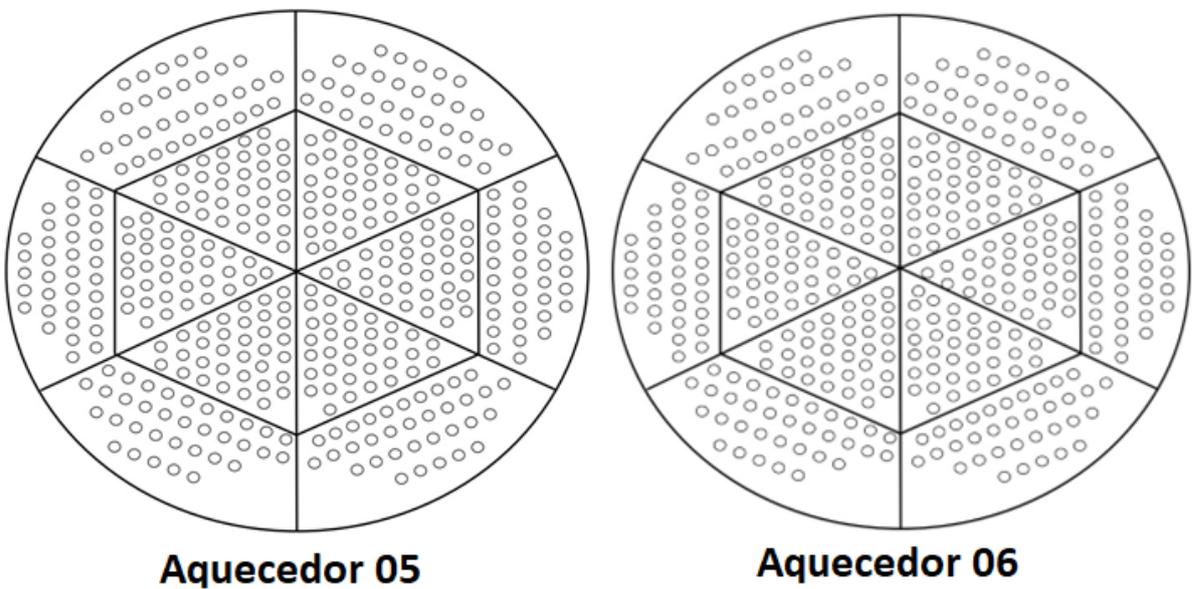
Os aquecedores 01 e 02 contam com 744 tubos cada, divididos em 12 regiões distintas. Possuem o mecanismo de transferência de calor por meio de 1 passe no casco e 12 nos tubos.

Figura 09 – Espelhos superiores projetados dos aquecedores 03 e 04



Fonte: Próprio do autor, 2022.

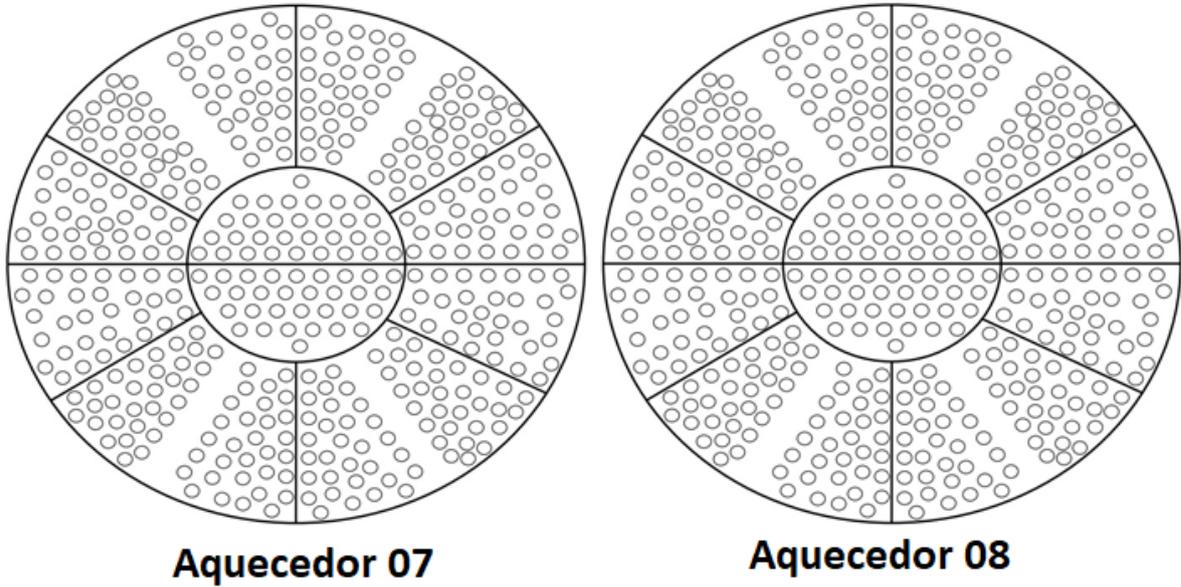
Figura 10 – Espelhos superiores projetados dos aquecedores 05 e 06



Fonte: Próprio do autor, 2022.

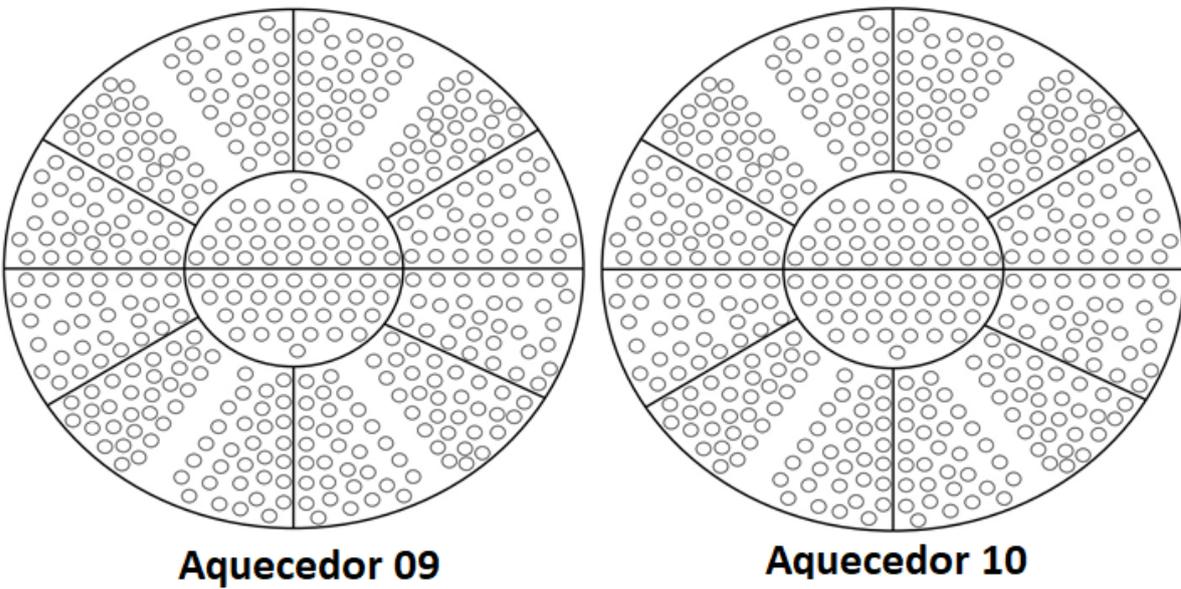
Os aquecedores 03, 04, 05 e 06 contam com 408 tubos cada, divididos em 12 regiões distintas. Possuem o mecanismo de transferência de calor por meio de 1 passe no casco e 12 nos tubos.

Figura 11 – Espelhos superiores projetados dos aquecedores 07 e 08



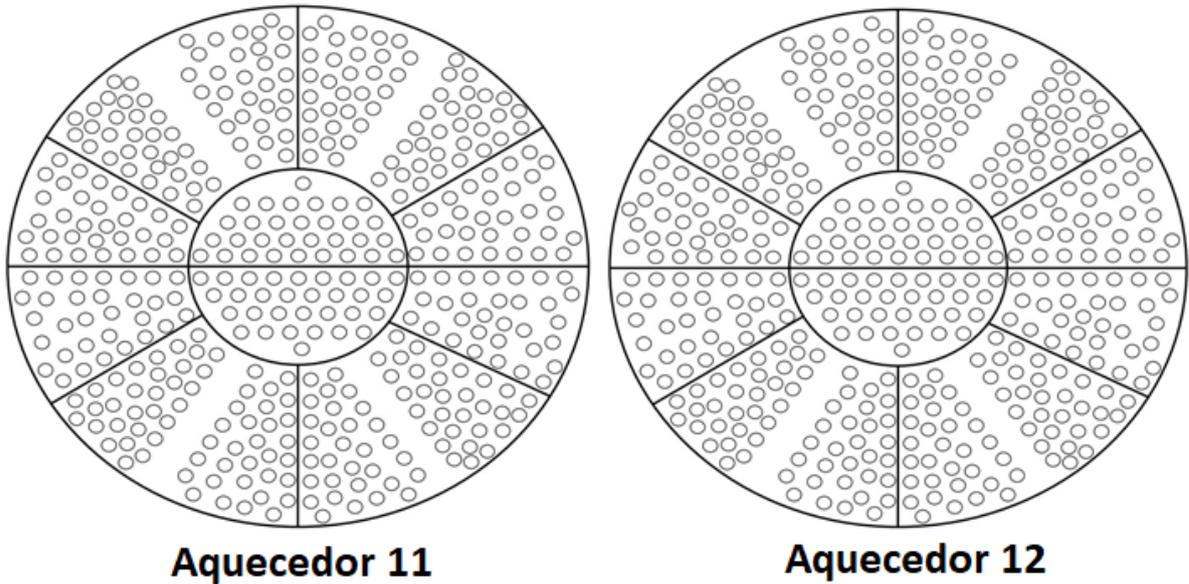
Fonte: Próprio do autor, 2022.

Figura 12 – Espelhos superiores projetados dos aquecedores 09 e 10



Fonte: Próprio do autor, 2022.

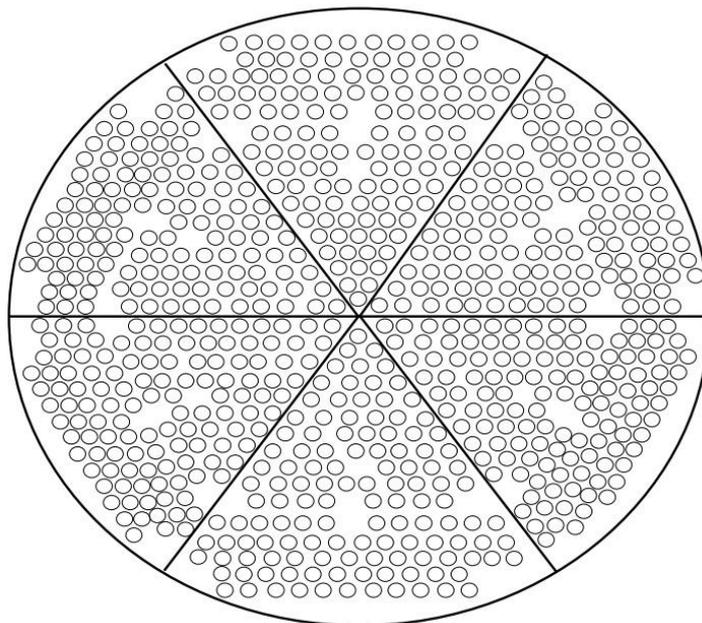
Figura 13 – Espelhos superiores projetados dos aquecedores 11 e 12



Fonte: Próprio do autor, 2022.

Os aquecedores 07, 08, 09, 10, 11 e 12 contam com 434 tubos cada, divididos em 10 regiões distintas. Possuem o mecanismo de transferência de calor por meio de 1 passe no casco e 10 nos tubos.

Figura 14 – Espelho superior projetado do aquecedor 13



Fonte: Próprio do autor, 2022.

O aquecedor 13 conta com 744 tubos, divididos 6 regiões distintas. Possui o mecanismo de transferência de calor por meio de 1 passe no casco e 6 nos tubos.

A partir das características de cada trocador (diâmetro interno, comprimento e quantidade de tubos), foi possível estabelecer a área de troca térmica projetada. Estas informações podem ser visualizadas na tabela apresentada a seguir.

Tabela 01 – Informações técnicas dos aquecedores de caldo

Aquecedor	Diâmetro interno (mm)	Comprimento (m)	Quantidade de tubos	Área de troca térmica (m²)
01	35	3,90	744	319
02	35	3,90	744	319
03	35	3,18	408	143
04	35	3,18	408	143
05	35	3,18	408	143
06	35	3,18	408	143
07	35	3,18	434	152
08	35	3,18	434	152
09	35	3,18	434	152
10	35	3,18	434	152
11	35	3,18	434	152
12	35	3,18	434	152
13	35	3,90	744	319
	Conjunto		6.468	2.348

Fonte: Próprio do autor, 2022.

Esta informação será utilizada para fins de comparação do processo em função das obstruções nos tubos nos trocadores de calor, uma vez que a obstrução de tubos impacta na área efetiva de troca de troca térmica do sistema. Por fim, o coeficiente global de troca térmica do conjunto é de 800 W/m².K (valor determinado em projeto, definido por fabricante).

8 CRONOGRAMA DE LIMPEZA DOS AQUECEDORES DE CALDO

O cronograma de limpeza dos aquecedores foi coletado no período abrangendo os dias 01 a 31 de julho de 2021, o que possibilitou definir a área de troca térmica diária em operação, considerando a redução causada pela parada do(s) equipamento(s) e o quanto ela impactava a

temperatura do caldo na saída do sistema. Esta situação geralmente ocorre dentro de um período de três horas (09:00-12:00h), que é o tempo necessário desde abertura até fechamento das tampas. Os quadros com as informações do ciclo de limpeza estão apresentados a seguir.

Quadro 01 – Cronograma mensal do ciclo de limpeza dos aquecedores

Data	Aquecedor(es) parado(s) para limpeza												
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13
01/07/2021											X	X	
02/07/2021			X	X									
03/07/2021		X											
05/07/2021									X	X			X
06/07/2021	X												
07/07/2021					X	X							
08/07/2021							X	X					
09/07/2021		X									X	X	
12/07/2021									X	X			X
13/07/2021	X				X	X							
14/07/2021							X	X					
15/07/2021											X	X	
16/07/2021		X	X	X									
19/07/2021													X
20/07/2021	X								X	X			
21/07/2021					X	X							
22/07/2021							X	X					
23/07/2021		X									X	X	
24/07/2021			X	X									
26/07/2021									X	X			X
27/07/2021	X				X	X							
28/07/2021							X	X					
29/07/2021											X	X	
30/07/2021		X	X	X									

Fonte: Próprio do autor, 2022.

Nos dias 04, 10, 11, 17, 18, 25 e 31 de julho de 2021 não ocorreram paradas de equipamentos para limpeza, por isso, não foram apresentados no quadro anterior.

Um outro cronograma alternativo foi utilizado, com combinações diferentes das apresentadas em julho de 2021, a fim de validar o modelo de comportamento do sistema desenvolvido no trabalho e será comentado com mais detalhes posteriormente. O quadro com as informações do ciclo de limpeza está apresentado a seguir.

Quadro 02 – Cronograma alternativo de limpeza dos aquecedores

Data	Aquecedor(es) parado(s) para limpeza												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
01/09/2021		X						X					
08/09/2021					X	X		X					
15/09/2021								X					
23/09/2021				X							X	X	
30/09/2021						X	X	X					
13/10/2021					X	X							X

Fonte: Próprio do autor, 2022.

9 COLETA DE DADOS

Em um primeiro período, foram coletados os dados referentes aos tubos que se encontravam bloqueados nos aquecedores de caldo, para serem utilizados como referência na determinação da real área de troca térmica em operação em cada limpeza. Isto ocorreu no período que antecedeu o cronograma de limpeza de julho de 2021, ou seja, antes do início do mês, e por isso, foi realizado na segunda quinzena de junho de 2021.

No segundo período, foram coletadas as temperaturas na rede de saída de caldo após a etapa de segundo aquecimento durante os dias em que ocorreram (ou não) limpezas em determinados equipamentos, o que possibilitou estimar a área de troca térmica e a resposta que a redução de disponibilidade de área causava na temperatura final do caldo. Isto ocorreu entre os dias 01 a 31 de julho de 2021. Já as demais informações auxiliares que serviram de base ao trabalho foram coletadas após o segundo período, entre agosto e outubro de 2021.

A temperatura final do caldo mediante as paradas dos aquecedores foi determinada por meio de um transmissor de temperatura localizado na saída do aquecedor 13, que forneceu resultados de dois em dois minutos, no intervalo das 09:00 h às 12:00 h (período de limpeza

dos equipamentos) durante os dias 01 a 31 de julho de 2021, totalizando uma base de dados com 2.790 resultados.

10 PROCEDIMENTOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE TUBO BLOQUEADO

O procedimento utilizado na usina para identificar tubos bloqueados nos aquecedores consiste em avaliar a presença de incrustação irreversível ou se existe algum tamponamento proposital denominado “batoque” (na terminologia açucareira) para cessar o fluxo.

Tubos livres são aqueles que não apresentam incrustação interna irreversível e nem estão sob tamponamento de algum material. Tubos bloqueados são aqueles que estão visivelmente bloqueados por “batoque” (seja por solda permanente ou inserção de material metálico para bloqueio). A figura a seguir exhibe exemplos.

Figura 15 – Tubos livres e bloqueados

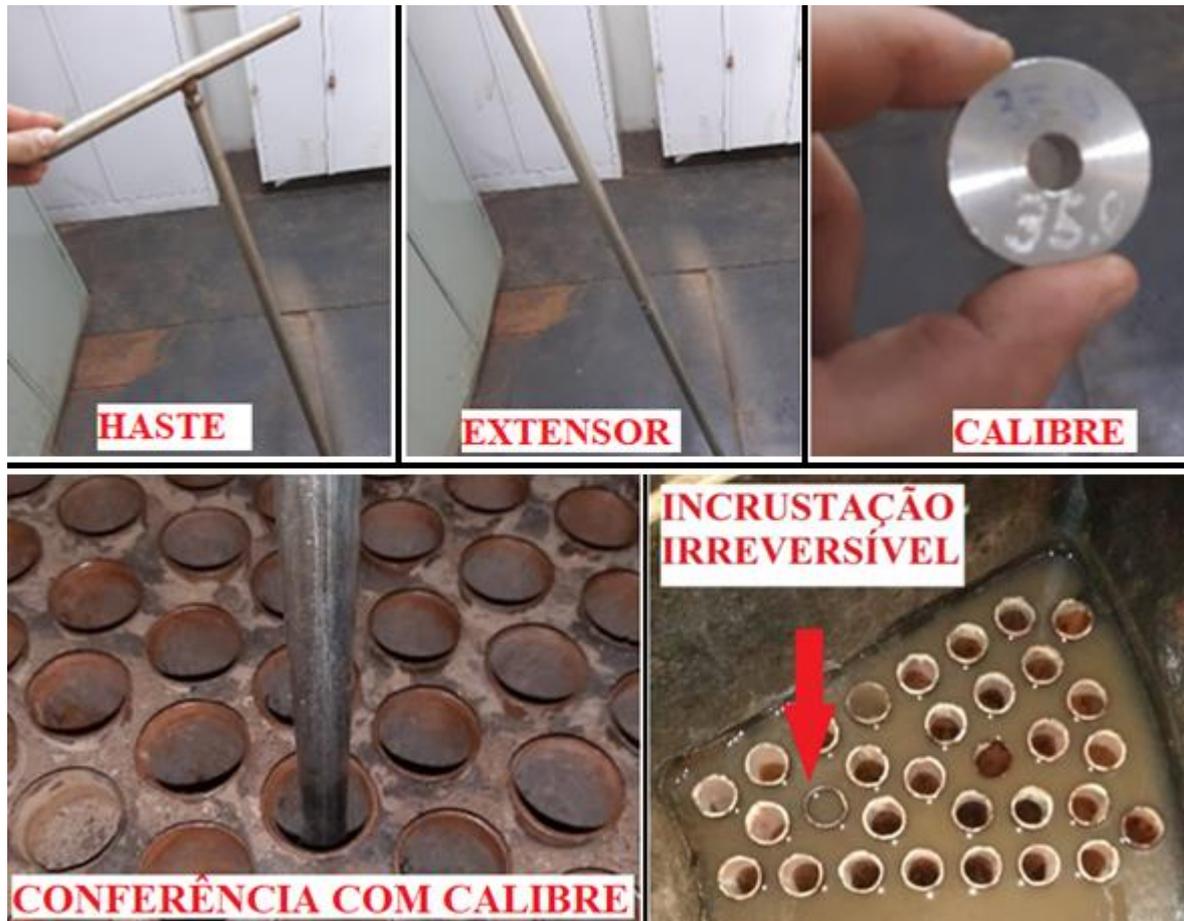


Fonte: Próprio do autor, 2022.

A incrustação interna irreversível é verificada durante realização de teste hidrostático na calandra do aquecedor, quando não ocorre passagem de água da parte superior do tubo até a inferior, pois uma haste (do comprimento do tubo) com um calibre (do diâmetro do tubo) é inserida internamente com auxílio de um extensor, que é conectado diretamente no final da haste de ferro, juntamente com o calibre, possibilitando inseri-lo até o final de cada tubo.

Se o calibre não desce mais a partir de determinado ponto, mesmo realizando força para empurrá-lo, a barreira física (incrustação) possivelmente já chegou ao ponto de aderência total às paredes internas e se alastrou por entre o diâmetro interno todo do tubo. Assim, a equipe de manutenção é acionada e recorre ao tamponamento com “batoque” ou solda. Também, é possível identificar visivelmente a incrustação, quando há acúmulo de água no tubo após a limpeza com hidrojato. As figuras a seguir exemplificam os expostos.

Figura 16 – Conferência de incrustação irreversível no tubo



Fonte: Próprio do autor, 2022.

10 METODOLOGIA

A metodologia aplicada no desenvolvimento deste projeto compreendeu quatro etapas: a primeira foi a hipótese de resultado, a segunda foi a elaboração do modelo, a terceira a validação dos dados e a última a definição do melhor sistema de trabalho. Assim, partiu-se de uma hipótese fundamentada em teoria sobre o efeito esperado da redução de área de troca térmica e a temperatura final do caldo.

A análise dos dados coletados serviu como base para estabelecer um modelo de comportamento real do sistema e sua posterior validação poder fornecer indícios de que ele é passível de ser empregado para tomada de decisão em um processo industrial, na elaboração de um cronograma de limpeza de equipamentos de aquecimento, sendo os dados obtidos pelas melhores combinações de paradas dos equipamentos.

10.1 HIPÓTESE DE COMPORTAMENTO DO SISTEMA

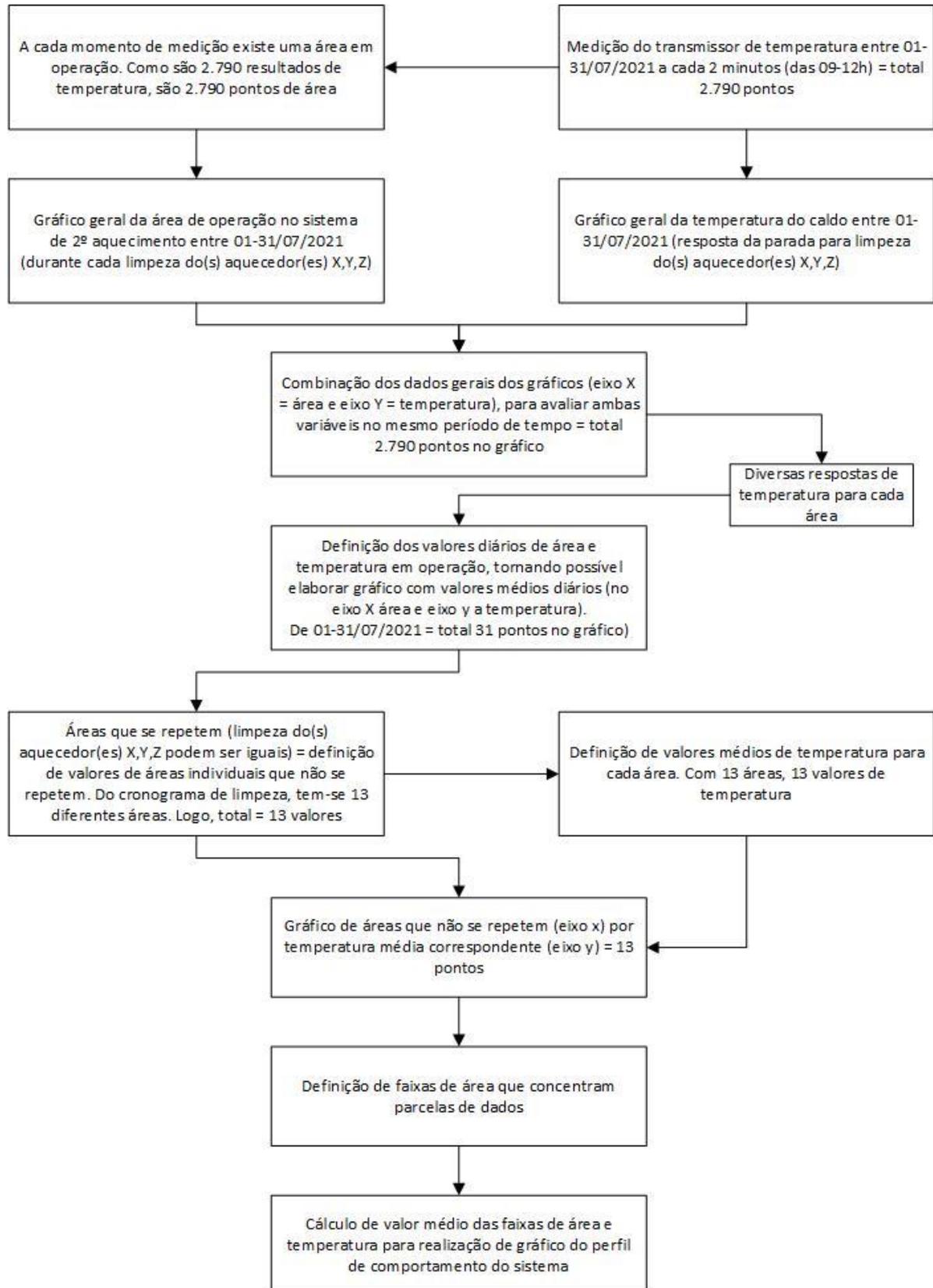
A fundamentação teórica sobre as principais equações envolvendo aquecedores tubulares já foi apresentada anteriormente e serviu como base para prever um comportamento do sistema, considerando o potencial térmico médio de um escoamento misto (contracorrente e concorrente), que é a forma de operação dos aquecedores da usina. Assim, foi avaliado pela carga térmica (ou taxa de transferência de calor) um possível cenário a ser encontrado ao correlacionar área e temperatura.

10.2 ELABORAÇÃO DO MODELO DE COMPORTAMENTO DO SISTEMA

O mapeamento dos tubos bloqueados em cada aquecedor serviu de base para estimar a real área de troca térmica em operação no conjunto como um todo e aquela em operação correspondente para cada dia de parada durante a limpeza, ou seja, se os aquecedores 01 e 04, por exemplo, apresentassem 42 e 36 tubos bloqueados (de 744 e 408 projetados, respectivamente), a real área de troca térmica de cada aquecedor corresponderia a 301 m² e 130 m², e não a 319 m² e 143 m² que são as áreas sem considerar tubos bloqueados.

O desenvolvimento do modelo de comportamento do sistema foi determinado por uma sequência de etapas e está apresentado no fluxograma a seguir.

Figura 17 – Metodologia para determinação do comportamento do sistema



Fonte: Próprio do autor, 2022.

O comportamento do sistema foi determinado por algumas etapas: definição do comportamento individual da área e da temperatura ao longo do tempo de estudo; combinação dos valores de área e temperatura no mesmo intervalo de tempo para avaliar o comportamento geral do sistema; cálculo de área e temperatura média de cada dia, para avaliar o comportamento médio diário do sistema.

Posteriormente, agrupar os dias em que o sistema foi submetido às mesmas áreas e assim, estimar um valor único de área e a correspondente temperatura média; subdivisão de faixas de área que concentram grandes parcelas de dados para possibilitar uma estimativa média geral de área e sua resposta de temperatura. Por fim, avaliar a forma como as variáveis área e temperatura se correlacionam qualitativamente, se considerar todo o detalhamento apresentado acima (será discutido no tópico de avaliação estatística).

11 ESTUDO DE APLICAÇÃO

O estudo de aplicação do modelo de comportamento do sistema foi realizado em três etapas: determinação das possíveis combinações de paradas de aquecedores que se situavam na faixa de área delimitada pelo modelo; aplicação da equação obtida mediante o valor de área definido e estimativa do erro relacionado ao modelo.

11.1 DEFINIÇÃO DE POSSIBILIDADES DE PARADA DOS AQUECEDORES

A determinação das possíveis combinações de paradas de aquecedores que se situaram na faixa de área delimitada pelo modelo foi realizada de acordo com o mapeamento de tubos bloqueados, excluindo-se as combinações utilizadas para determinação do modelo durante o período de coleta de dados. Dessa forma, como existem 13 aquecedores, e estes podem se combinar de inúmeras formas, seja por parada individual ou combinação mútua (2 em 2, 3 em 3 etc), foi possível definir quantos conjuntos são possíveis de serem aplicados para testagem no modelo e quais são os de maior potencial, visto que existe um objetivo por trás de cada parada, que é a manutenção de temperatura, gerada pela redução de área. Para isso, foi utilizada a equação matemática de combinação simples.

A determinação das melhores combinações de paradas dos aquecedores foi elaborada visando organizar um cronograma de limpeza dos equipamentos, considerando que cada equipamento deve ser limpo pelo menos uma vez a cada 14 dias. Assim, foram avaliados diferentes cenários de combinações de aquecedores.

Através da contabilização do total de combinações possíveis, foram avaliados os casos em que se situavam na faixa numérica contemplada pelo modelo de comportamento do sistema

desenvolvido, e assim foram definidos por um ranqueamento as melhores combinações e que menos impactavam a temperatura final do caldo após o segundo aquecimento. Buscou-se também, avaliar o impacto da limpeza realizada de forma constante, isto é, com dois aquecedores por vez sendo limpos por dia.

11.2 AVALIAÇÃO DO EFEITO DE PARADAS NO SISTEMA DE AQUECIMENTO UTILIZANDO MODELO PROPOSTO

A aplicação da equação do comportamento do sistema mediante o valor de área definido pelo conjunto a ser parado foi a base para confirmação e validação do modelo, pois dentro da área definida para aplicação, em teoria esperava-se um resultado de temperatura final, que também deveria se situar dentro da faixa definida. Assim, foi necessário alinhar com representantes da usina dias específicos para alterar o cronograma de limpeza visando variar a faixa de área envolvida para validar o modelo na prática, obtendo-se a possibilidade de 6 alterações, conforme exibido no Quadro 02.

Um ponto a se destacar é que as combinações de aquecedores propostas se diferiram de todas as apresentadas no cronograma de limpeza de julho/2021. Nos dias que ocorreram as modificações de área, os aquecedores se mantiveram conforme a área definida por mapeamento de tubos bloqueados, com os mesmos valores dos que o modelo do sistema foi realizado.

A partir das áreas definidas por essas modificações de conformação de parada nos aquecedores, o sistema PIMS possibilitou coletar os dados de resposta da temperatura final do caldo no segundo aquecimento, e semelhante ao tratamento de dados apresentado anteriormente, foi obtido um valor médio da temperatura para o dia em questão, e esse valor foi o utilizado para comparação da estimativa de erro.

11.3 ESTIMATIVA DE ERRO

A estimativa do erro relacionada à aplicação do modelo comparando-se a aplicação prática foi o fator determinante para validação, pois possibilitou afirmar ou não que o sistema se comportará de fato em uma operação industrial próximo de um dado resultado.

A média aritmética entre os erros encontrados, de acordo com as submissões do sistema para com as áreas envolvidas possibilitou estimar um erro envolvido na aplicação do modelo, ou seja, uma margem de tolerância e confiabilidade para uso rotineiro do modelo em uma indústria açucareira.

12 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA

As avaliações estatísticas utilizadas foram a base para determinação do modelo de comportamento do sistema, sendo realizadas médias aritméticas e cálculos de regressão. Para determinação das combinações de aquecedores, foi utilizada a equação de combinação simples e para estimativa de erro, a diferença entre valor teórico e prático.

12.1 MÉDIAS ARITMÉTICAS

As médias aritméticas foram utilizadas para determinação do modelo de comportamento do sistema, tanto para temperatura quanto área (valores diários, gerais, por faixas etc) e do erro envolvido no modelo. Consiste em somar os n valores que compõem o conjunto e dividi-lo pelo valor do número de dados que compõem o conjunto, como mostra a equação a seguir.

$$\bar{X} = \frac{X1+X2+X3+\dots+Xn}{n} \quad (13)$$

Em que: \bar{X} = Média aritmética; X1 = Dado 1; X2 = Dado 2; X3 = Dado 3; Xn = Dado final do conjunto e n = Número de dados que compõem o conjunto.

12.2 REGRESSÕES

Para avaliação de relação entre área e temperatura, foi utilizada regressão por meio do Microsoft Excel, versão 2016, de forma a avaliar o valor de R² em diferentes modelos, sendo: polinomial, exponencial, linear e logarítmico. O valor de R² deve se apresentar o mais próximo possível de 1, para uma boa confiabilidade da análise. As linhas de tendência de cada modelo também foram avaliadas, assim como as equações envolvidas.

12.3 COMBINAÇÕES DE AQUECEDORES

A determinação das possíveis combinações de paradas de aquecedores foi calculada pela equação de combinação simples e está descrita a seguir.

$$C_{n,p} = \frac{n!}{(n-p)! p!} \quad (14)$$

Em que: C_{n,p} = Combinação de n elementos, tomados por p unidades (adimensional); n! = número de elementos fatorial (adimensional) e p! = número de unidades fatorial (adimensional). Uma observação é que a equação apenas é válida se n e p pertencerem ao conjunto dos números naturais e se p for menor ou igual a n.

12.4 ESTIMATIVA DE ERRO

A estimativa de erro envolvido no modelo foi calculada pela relação do valor teórico (advindo do modelo) e do valor encontrado na prática (após submeter o sistema às combinações do Quadro 02). A equação está apresentada a seguir.

$$\text{Erro} = \left(1 - \left(\frac{\text{Valor encontrado na prática}}{\text{Valor teórico esperado}} \right) \right) * 100 \quad (15)$$

Em que: Erro = estimativa do erro relacionado com a aplicação do modelo (%); Valor encontrado na prática = Média da temperatura após submetida na prática à determinada área de troca térmica (°C) e Valor teórico esperado = Valor da temperatura encontrada após aplicação do valor de área envolvido na equação definida pelo modelo (°C).

A partir do resultado dos seis erros relacionados à aplicação do modelo (oriundos da validação prática (Quadro 02)), foi realizada uma média simples dos módulos dos valores (desconsiderando o sinal) para composição de um valor geral associado ao erro.

13 RESULTADOS E DISCUSSÃO

13.1 HIPÓTESE DE COMPORTAMENTO DO SISTEMA

Para prever o comportamento do sistema, foi considerado o potencial térmico médio de um escoamento misto (contracorrente e concorrente), visto que os aquecedores apresentam essa configuração em seu funcionamento. Assim, foi avaliado pela carga térmica (ou taxa de transferência de calor) um possível cenário a ser encontrado ao correlacionar área e temperatura.

O cálculo da carga térmica sugere que existe uma relação de linearidade e proporcionalidade entre área e temperatura, pois à medida que ambas aumentam ou diminuem, eleva-se ou reduz-se, respectivamente, a taxa de transferência de calor em um dado sistema.

13.2 ÁREA DE TROCA TÉRMICA EM OPERAÇÃO APÓS MAPEAMENTO DE TUBOS

No processo de segundo aquecimento no conjunto de aquecedores, as condições de alteração da operação são decorrentes de:

- 1) Bloqueio de tubos, gerados por incrustação irreversível ou corrosão;
- 2) Paradas para limpeza, originados por desvios de fluxo em função do impedimento do conjunto de trocadores.

Quando todos os trocadores estão em operação, as reduções de troca são devidas unicamente à condição 1, no entanto, nas condições em que os equipamentos são isolados, isto é, condição 2, a condição 1 sempre acontece, uma vez que ela reflete uma obstrução permanente nos equipamentos.

Após coleta de dados referentes aos tubos bloqueados em cada aquecedor, constatou-se que 9,21% da área de troca térmica total do conjunto (13 aquecedores) estava bloqueada. Em alguns aquecedores com maior, outros em menor intensidade. Para cada trocador de calor, está descrita a quantidade de tubos totais e bloqueados, além da área disponível para troca térmica efetiva. A tabela a seguir exhibe os resultados.

Tabela 02 – Relação de tubos bloqueados e da área em operação do conjunto de aquecimento

Aquecedor	Tubos totais	Tubos bloqueados	% Bloqueada	Tubos disponíveis	Área de troca (m²)
01	744	70	9,40	674	289
02	744	23	3,09	721	309
03	408	49	12,01	359	126
04	408	12	2,94	396	138
05	408	59	14,46	349	122
06	408	18	4,41	390	136
07	434	57	13,13	377	132
08	434	10	2,30	424	148
09	434	34	7,83	400	140
10	434	79	18,20	355	124
11	434	91	20,97	343	120
12	434	35	8,06	399	140
13	744	59	7,93	685	294
Conjunto	6.468	596	9,21	5.872	2.218

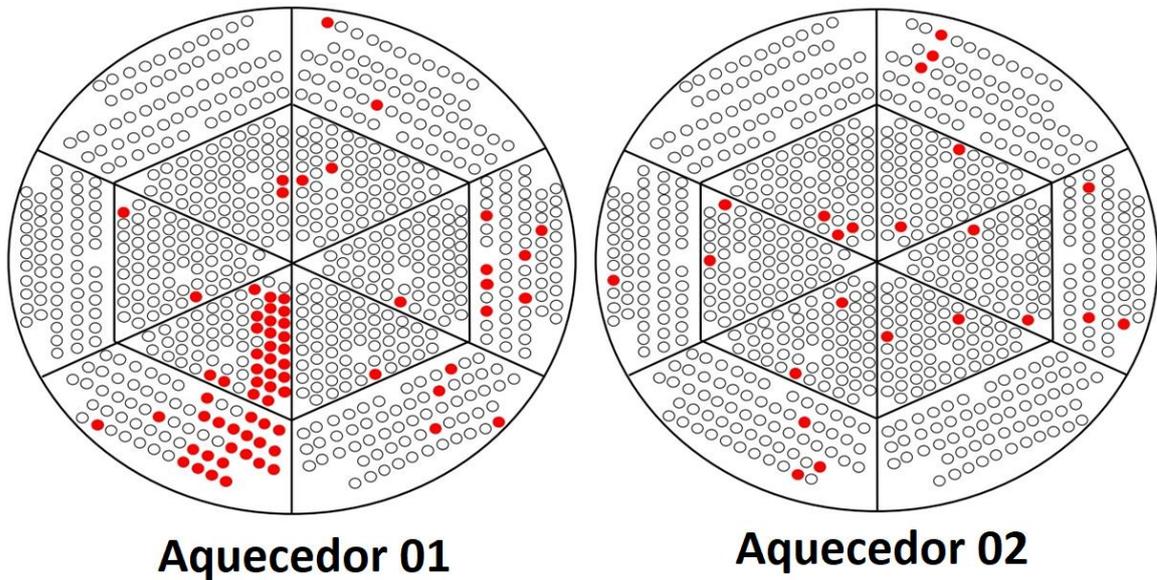
Fonte: Próprio do autor, 2022.

Dessa, forma a real área de troca térmica em operação no sistema de segundo aquecimento não é 2.348 m², mas sim 2.218 m², em vista dos bloqueamentos e incrustações.

13.2.1 Descritivo do mapeamento de tubos para cada aquecedor

Como o mapeamento de tubos foi realizado pelo espelho superior de cada aquecedor e em cada figura o preenchimento do tubo em vermelho indica que ele está bloqueado para passagem de caldo, a seguir estão expostas as localizações específicas de cada equipamento.

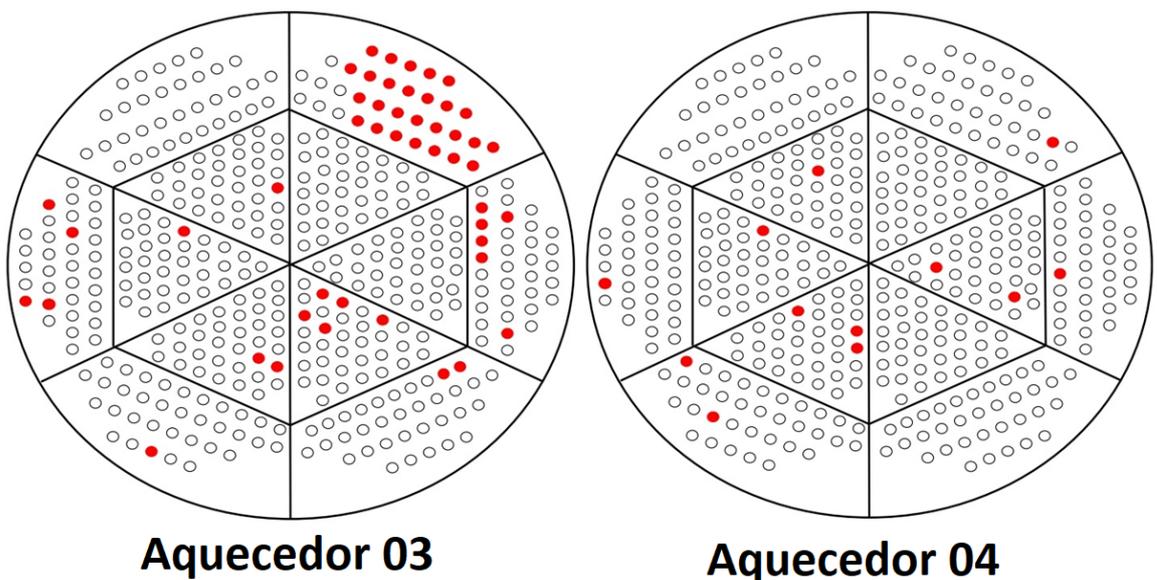
Figura 18 – Espelhos superiores com tubos bloqueados dos aquecedores 01 e 02



Fonte: Próprio do autor, 2022.

No aquecedor 01, mais de 70% dos bloqueios estão concentrados numa região específica, enquanto no aquecedor 02, há homogeneidade na distribuição.

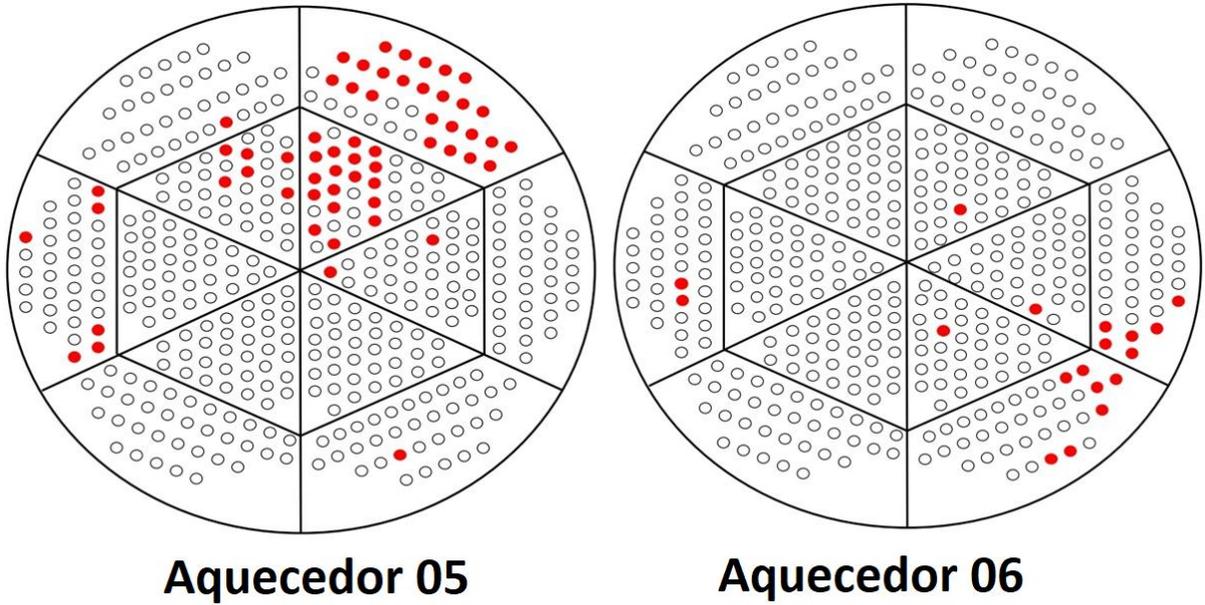
Figura 19 – Espelhos superiores com tubos bloqueados dos aquecedores 03 e 04



Fonte: Próprio do autor, 2022.

No aquecedor 03, aproximadamente um passe da divisória de fluxo está bloqueada (mais de 50% dos bloqueios) e no aquecedor 04 existem poucas obstruções, bem distribuídas.

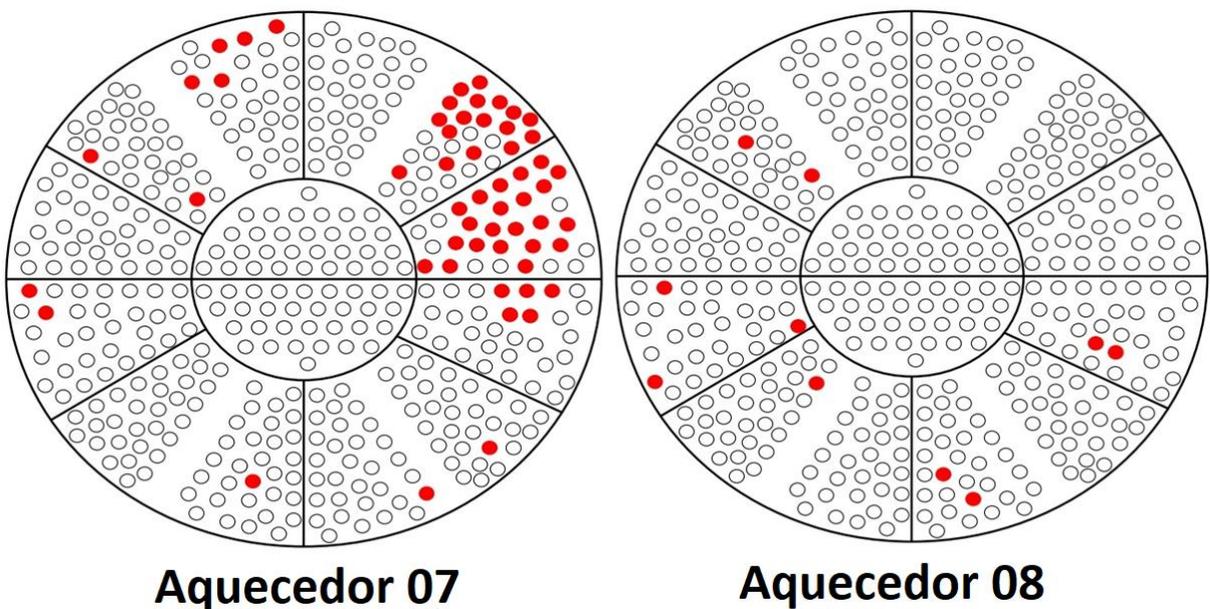
Figura 20 – Espelhos superiores com tubos bloqueados dos aquecedores 05 e 06



Fonte: Próprio do autor, 2022.

O aquecedor 05 é o terceiro equipamento com mais bloqueios e mais de 70% do valor total se concentra numa região específica. O aquecedor 02 é o segundo com menos bloqueios.

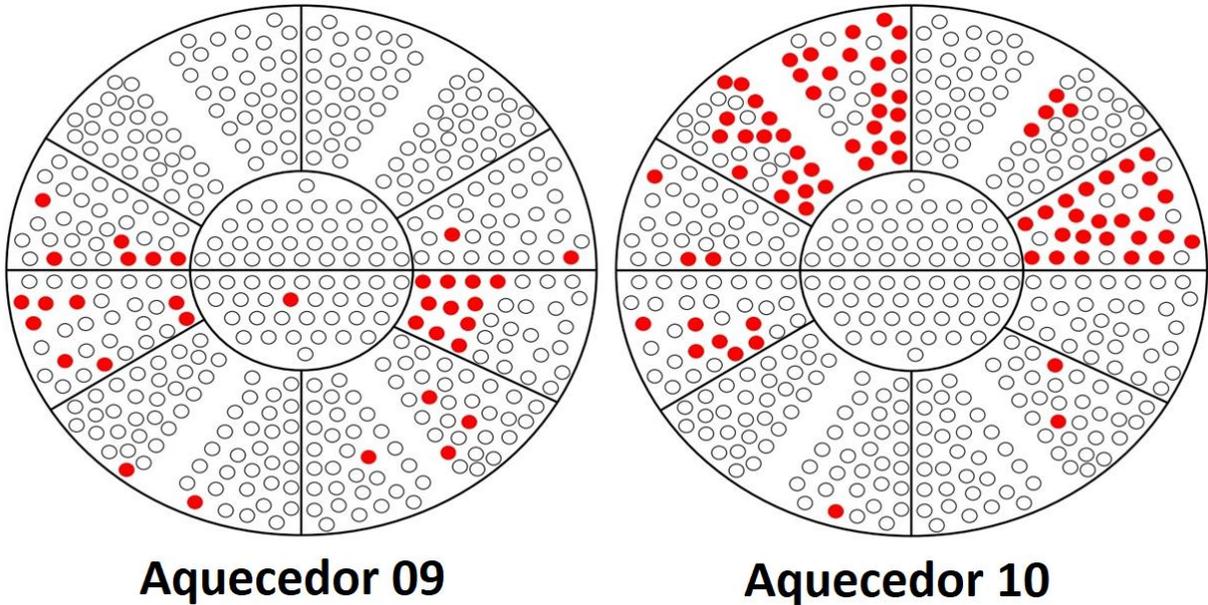
Figura 21 – Espelhos superiores com tubos bloqueados dos aquecedores 07 e 08



Fonte: Próprio do autor, 2022.

O aquecedor 07 apresenta duas regiões de fluxo de caldo com alta concentração de bloqueios. Já o aquecedor 08 é o que menos possui obstruções dentre o conjunto.

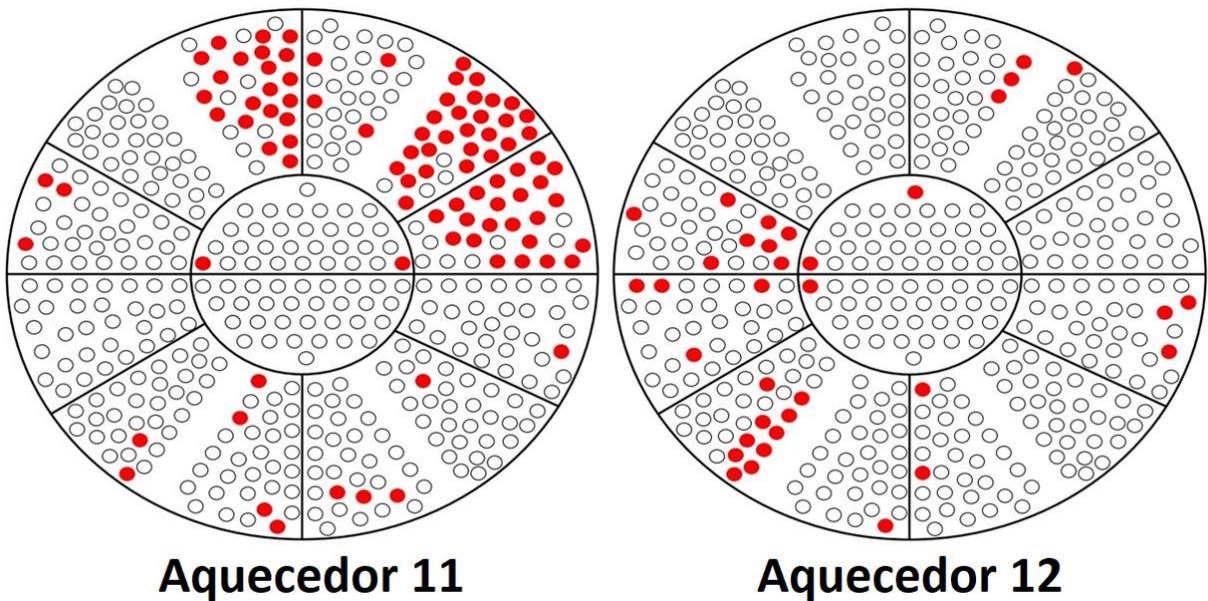
Figura 22 – Espelhos superiores com tubos bloqueados dos aquecedores 09 e 10



Fonte: Próprio do autor, 2022.

O aquecedor 09 concentra mais de 75% dos bloqueios distribuídos em uma metade do espelho enquanto o aquecedor 10 é o segundo com mais obstruções do conjunto.

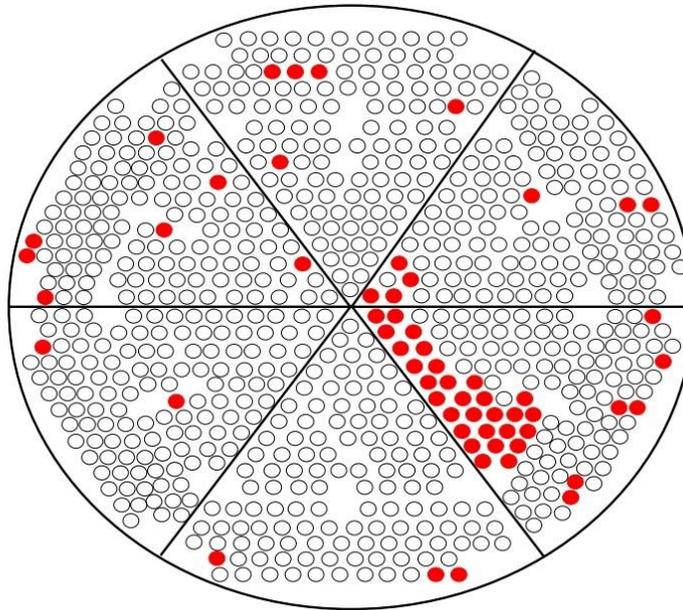
Figura 23 – Espelhos superiores com tubos bloqueados dos aquecedores 11 e 12



Fonte: Próprio do autor, 2022.

O aquecedor 11 é o que mais possui obstruções no conjunto, e elas se concentram em 3 regiões distintas. Já no aquecedor 12 os bloqueios se distribuem em mais regiões.

Figura 24 – Espelho superior com tubos bloqueados do aquecedor 13



Fonte: Próprio do autor, 2022.

O aquecedor 13 apresenta concentração dos bloqueios em uma região, e distribuição semelhante em outras.

13.3 ÁREA DE TROCA EM CADA PARADA PARA LIMPEZA

Durante o mês de julho de 2021, a usina realizou diversas paradas de aquecedores para limpeza com hidrojato, visando manter a campanha planejada e reduzir perda de eficiência nos equipamentos. Pelo menos a cada 14 dias cada aquecedor era parado. Como a limpeza é feita por empresa terceirizada, a usina opta por parar um, dois ou três aquecedores de uma vez, a depender da quantidade de colaboradores disponíveis, pois é a máxima quantidade possível de trocadores serem limpos em um dia, sem causar tantos danos ao processo.

Mediante a tabela apresentada do cronograma de limpeza mensal, foi possível estabelecer a área de troca térmica realmente disponível para o processo em cada dia, através das combinações dos equipamentos parados. Ao submeter determinados conjuntos de aquecedores à parada para limpeza, a área de troca térmica disponível nos aquecedores restantes pode ser determinada individualmente em cada aquecedor, considerando que 2.218 m² é a área total efetivamente disponível para o sistema. O quadro a seguir exhibe os resultados.

Quadro 03 – Área de troca térmica disponível considerando cronograma mensal do ciclo de limpeza dos aquecedores

Data	Aquecedor(es) parado(s) para limpeza													Área disponível (m ²)
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	
01/07/2021											X	X		1.959
02/07/2021			X	X										1.954
03/07/2021		X												1.909
05/07/2021									X	X			X	1.661
06/07/2021	X													1.929
07/07/2021					X	X								1.960
08/07/2021							X	X						1.938
09/07/2021		X									X	X		1.650
12/07/2021									X	X			X	1.661
13/07/2021	X				X	X								1.670
14/07/2021							X	X						1.938
15/07/2021											X	X		1.959
16/07/2021		X	X	X										1.645
19/07/2021													X	1.925
20/07/2021	X								X	X				1.665
21/07/2021					X	X								1.960
22/07/2021							X	X						1.938
23/07/2021		X									X	X		1.650
24/07/2021			X	X										1.954
26/07/2021									X	X			X	1.661
27/07/2021	X				X	X								1.670
28/07/2021							X	X						1.938
29/07/2021											X	X		1.959
30/07/2021		X	X	X										1.645

Fonte: Próprio do autor, 2022.

Nos dias 04, 10, 11, 17, 18, 25 e 31 de julho de 2021 como não ocorreram paradas de equipamentos para limpeza, a área de troca foi de 2.218 m².

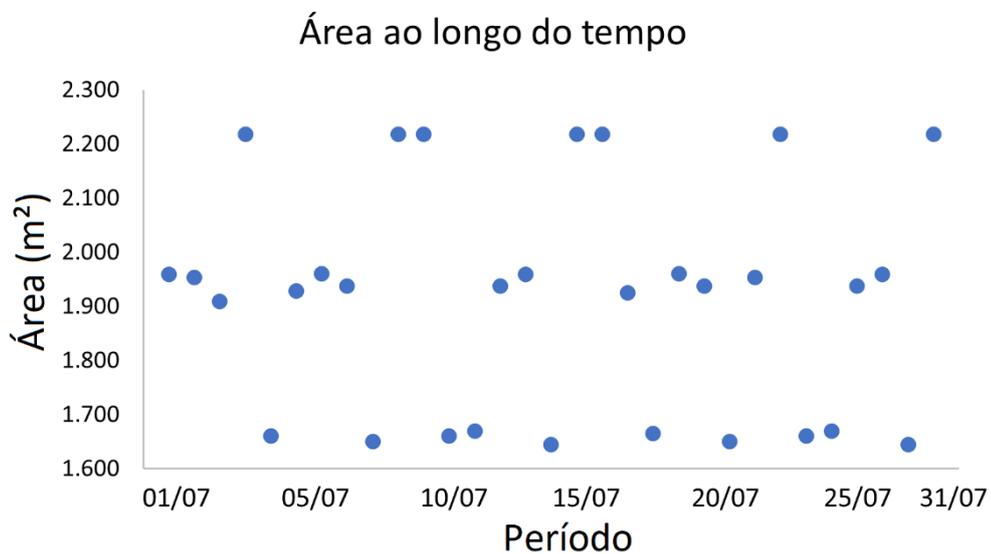
13.4 COMPORTAMENTO DO SISTEMA

A primeira etapa da análise consistiu em analisar individualmente a área e a temperatura que o caldo foi submetido por meio de dois gráficos cartesianos. Conhecendo esses valores, e sabendo que ambos foram mensurados nos mesmos instantes, foi possível combiná-los em outro gráfico para avaliar a relação existente entre as variáveis (se apresentam perfil linear, polinomial, logarítmico etc). O cálculo da média aritmética dos valores obtidos em cada dia (da área e temperatura) proporcionou o ajuste para visualização e conclusão do perfil de comportamento do sistema.

13.4.1 Área no período de estudo

A área é uma variável controlada do sistema, isto é, fixa no momento da análise. Foi obtida após o mapeamento de tubos bloqueados e do cronograma de limpeza dos aquecedores, visto que com o primeiro caso foi possível obter a real área de troca térmica em operação e no segundo caso a variação que o sistema é submetido, a depender das diferentes combinações de paradas dos equipamentos. O gráfico a seguir exhibe os resultados.

Figura 25 – Área de troca disponível ao caldo



Fonte: Próprio do autor, 2022.

É possível observar que ocorre considerável variação da área ao longo do tempo de estudo, sendo esses valores os mencionados no cronograma de limpeza dos aquecedores, que variam de 1.645 m² a 2.218 m².

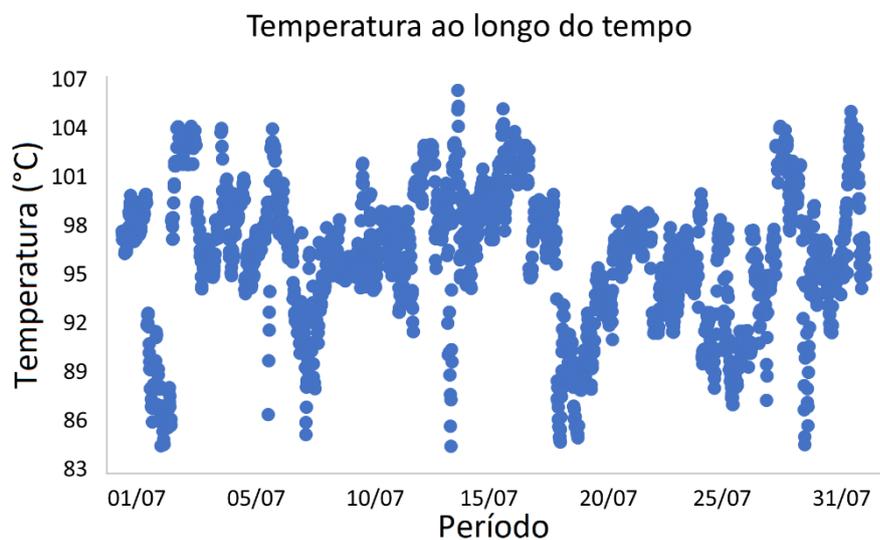
Três regiões que concentram os pontos são notadas, sendo 1.600-1700 m²; 1.800-2.000 m² e ao redor de 2.200 m². A região com menor valor de área corresponde aos dias que equipamentos com grande quantidade de tubos bloqueados ou aqueles com grande área de operação (aquecedores 01, 02 ou 13) foram parados para limpeza.

Já a região intermediária concentra os dias em que foram limpos aquecedores com áreas intermediárias de troca, isto é, paradas de equipamentos combinados que possuem muita e pouca quantidade de tubos bloqueados ou com alta e baixa área de operação. Por fim, a última região corresponde aos dias que não ocorreram limpeza e o sistema manteve todos os aquecedores em operação (2.218 m²).

13.4.2 Temperatura no período de estudo

A temperatura é uma variável não controlada do sistema, isto é, oscila no momento da análise. Foi obtida por meio de um transmissor, e de acordo com cada área que o sistema foi submetido, gerou-se uma resposta específica. O gráfico a seguir exhibe os resultados.

Figura 26 – Temperatura final do caldo



Fonte: Próprio do autor, 2022.

É possível observar que ocorre variação da temperatura ao longo do tempo de estudo, sendo que esses valores oscilam de 107,7 °C (máximo) a 85,18 °C (mínimo).

As elevadas temperaturas correspondem aos dias que ocorreu limpeza de equipamentos com poucos tubos bloqueados ou quando nenhum aquecedor foi limpo. A faixa intermediária remete-se aos dias em que foram limpos aquecedores com áreas intermediárias de troca, isto é,

paradas de equipamentos combinados que possuem muita e pouca quantidade de tubos bloqueados ou com alta e baixa área de operação.

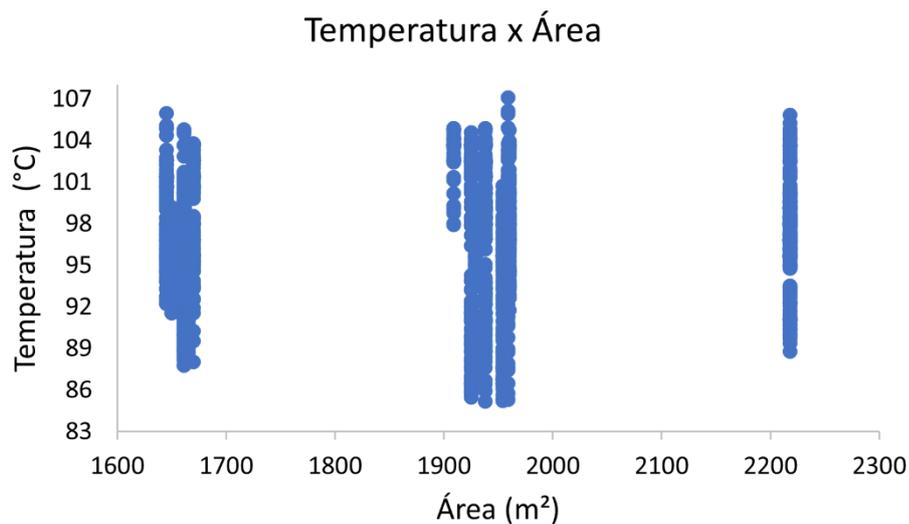
Já as menores temperaturas referem-se aos dias que trocadores com grande quantidade de tubos bloqueados ou aqueles com grande área de operação (aquecedores 01, 02 ou 13) foram parados para limpeza.

Também, é possível notar o quanto a temperatura verificada durante os processos de parada para limpeza se distancia da ideal para o processo (105 °C), pois em raros momentos foi constatado esse valor.

13.4.3 Perfil de comportamento do sistema

Em posse das duas variáveis mensuradas no mesmo período de tempo, foi possível realizar um comparativo geral entre ambas, que está apresentado no gráfico a seguir.

Figura 27 – Comparativo de área de troca térmica e temperatura



Fonte: Próprio do autor, 2022.

Nota-se que a combinação das variáveis apresenta uma nítida concentração de pontos em três regiões de área, que são as correspondentes às combinações de paradas dos aquecedores. Cada conjunto de pontos que se repete na vertical equivale às temperaturas obtidas por uma área específica.

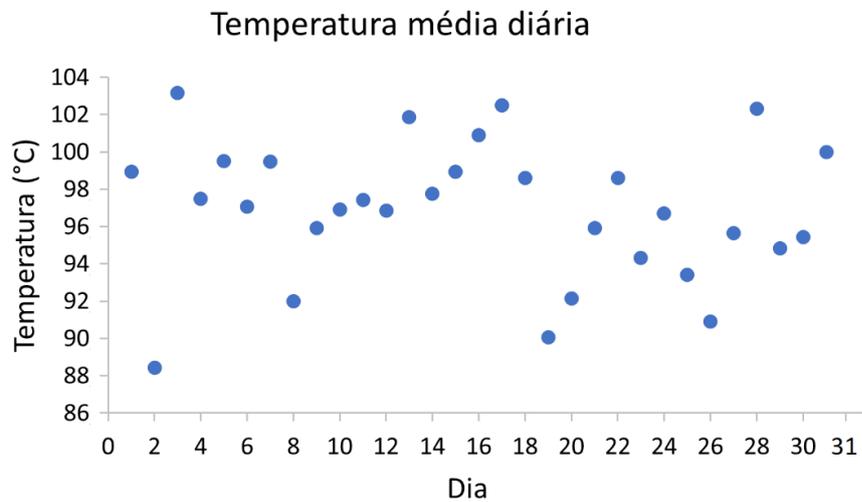
No entanto, a partir do gráfico apresentado não é possível tirar conclusões efetivas sobre a relação entre área e temperatura, pois existe uma infinidade de respostas na temperatura para cada valor de área.

13.4.4 Cálculo de médias das variáveis

Foi realizado um cálculo de média aritmética dos valores da temperatura para cada dia de análise, a fim de estimar um valor médio diário da operação. Como a área é fixa, ou seja, a mesma para cada dia em todos os momentos de medição, foi mantida a mesma da Figura 25 para média diária.

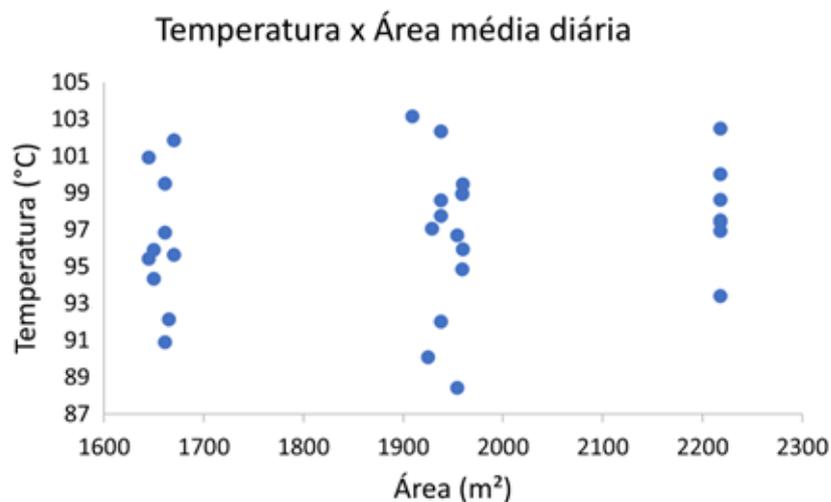
Com as duas variáveis mensuradas pela mesma média no mesmo período de tempo, foi realizado um comparativo dos valores de forma semelhante ao apresentado na combinação geral dos dados, por um gráfico cartesiano. As figuras a seguir exibem os resultados.

Figura 28 – Temperatura média diária



Fonte: Próprio do autor, 2022.

Figura 29 – Comparativo de área de troca térmica e temperatura média diária

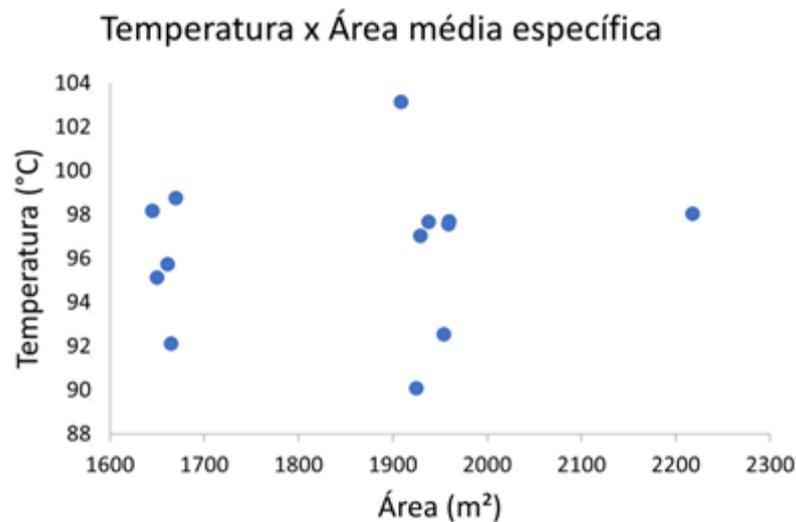


Fonte: Próprio do autor, 2022.

A combinação das variáveis exibe um comportamento semelhante ao daquele relacionado ao geral dos dados, devido à concentração de pontos em três regiões de área. No entanto, a partir do gráfico apresentado ainda não é possível tirar conclusões efetivas sobre a relação entre área e temperatura, pois existem áreas que possuem mais de um valor de temperatura, isto é, se repetiram no cronograma de limpeza dos aquecedores.

Por isso, foi realizado o cálculo das médias de temperatura para cada área específica, ou seja, que se distingue das demais e assim, realizado um novo gráfico cartesiano combinando as variáveis. Os resultados estão apresentados a seguir.

Figura 30 – Comparativo de temperatura média e área específica de troca térmica

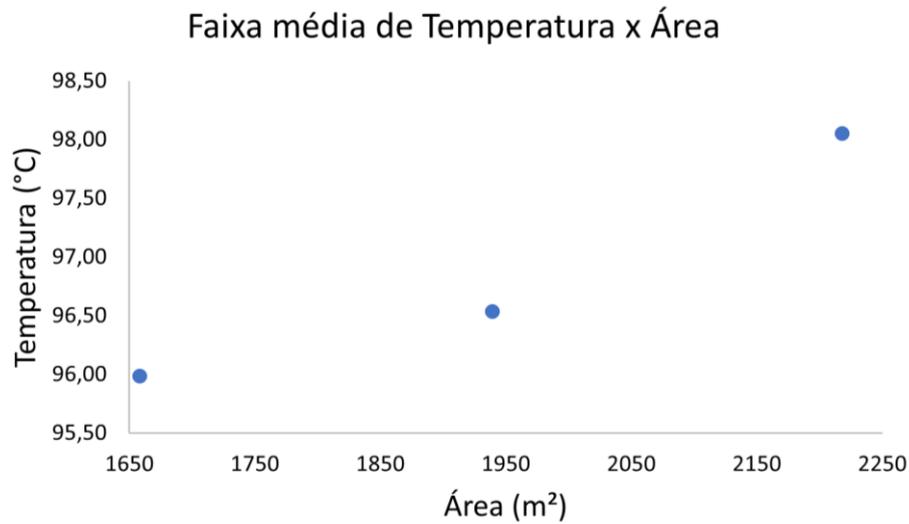


Fonte: Próprio do autor, 2022.

A partir do gráfico apresentado ainda não é possível tirar conclusões efetivas sobre a relação entre área e temperatura, pois para áreas próximas existem resultados de temperatura que oscilam consideravelmente.

Foi realizado o cálculo das médias aritméticas de temperatura e área para as faixas de valores apresentados no gráfico anterior, objetivando encontrar um ponto médio para cada uma das três regiões que concentram os dados (1.600-1.700 m², 1.900-2.000 m² e 2.218 m²). A figura a seguir apresenta os resultados.

Figura 31 – Comparativo de faixa média de área de troca térmica e temperatura



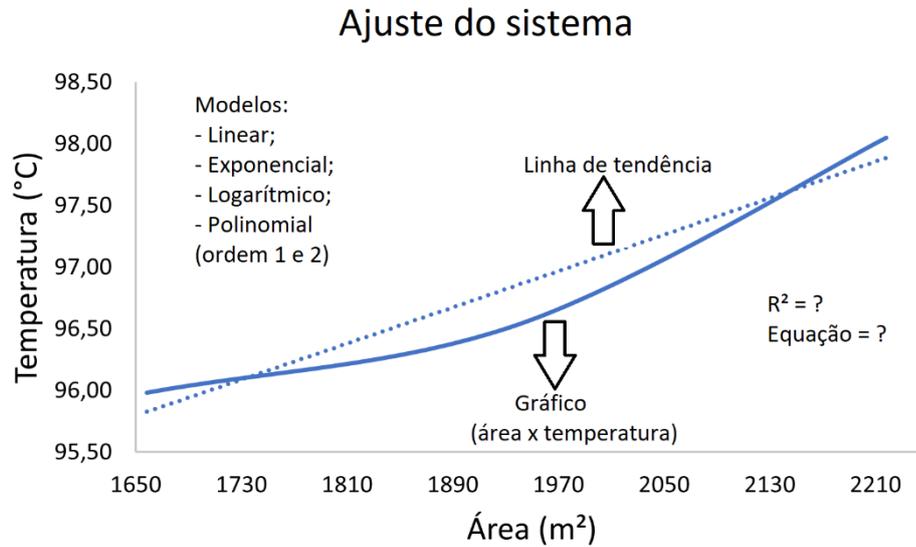
Fonte: Próprio do autor, 2022.

Observa-se que o gráfico geral apresenta três pontos, sendo que cada um destes concentra centenas de dados, tratados por médias aritméticas, de acordo com as regiões de área que o sistema foi submetido.

A relação apresenta um perfil de crescimento ao relacionar área e temperatura, ou seja, se aumenta o valor de uma variável, aumenta o da outra. No entanto, é necessário avaliar qual o modelo de comportamento mais se encaixa no sistema (linear, polinomial, logarítmico e exponencial) e será discutido no tópico a seguir.

13.4.5 Avaliação dos modelos de comportamento

Foram avaliados cinco diferentes modelos: logarítmico, exponencial, linear e polinomial (ordem 1 e 2). Através do gráfico da Figura 31 e por meio do Microsoft Excel, foi traçada linha de tendência e calculado R^2 para cada caso, além da equação envolvida. A figura a seguir apresenta a forma de análise gráfica e a tabela sintetiza os resultados de cada modelo, considerando que a linha contínua é a representação de um gráfico de linhas, realizado por meio dos pontos da Figura 31 e que a linha tracejada corresponde à linha de tendência do Microsoft Excel.

Figura 32 – Ajuste do sistema

Fonte: Próprio do autor, 2022.

Tabela 03 – Síntese dos modelos de comportamento do sistema

Modelo	R ²	Equação
Logarítmico	0,9088	$y = 6,9999\ln(x) + 43,919$
Exponencial	0,9329	$y = 89,977e^{4E-05x}$
Linear	0,9314	$y = 0,0037x + 89,712$
Polinomial de ordem 1	0,9105	$y = 56,119x^{0,0722}$
Polinomial de ordem 2	1	$y = 6E-06x^2 - 0,0203x + 112,64$

Fonte: Próprio do autor, 2022.

Conclui-se, portanto, que o modelo que melhor representa o sistema é o polinomial de ordem 2, por apresentar R² igual a 1. Os modelos exponencial e linear se apresentam similares, porém com R² distante do ideal, chegando a quase 7% de diferença. Já os modelos logarítmico e polinomial de ordem 1 não são representativos do sistema, visto que possuem R² em torno de 10% distante do ideal. Assim, o modelo a ser utilizado para validação será o polinomial de ordem 2, e a equação está apresentada a seguir.

$$y = 6E-06x^2 - 0,0203x + 112,64 \quad (16)$$

Em que: y = Temperatura esperada para o caldo no final do segundo aquecimento (°C) e x = área de troca térmica do sistema de segundo aquecimento (m²).

Uma observação importante de se destacar é que o modelo apenas é válido para a faixa de 1.645 m² a 2.218 m², pois é o intervalo de dados que possibilitaram sua criação. Portanto, para validação, é necessário que o intervalo de área que o sistema deve ser submetido esteja nessa faixa de valores.

13.5 VALIDAÇÃO DO MODELO DE COMPORTAMENTO DO SISTEMA

O modelo proposto apenas pode ser considerado válido se atende aos requisitos de aplicabilidade prática, isto é, se atinge na prática valores próximos ou exatamente iguais aos planejados. Assim, a validação do modelo seguiu três etapas, a primeira foi determinar quais são as possíveis combinações de paradas de aquecedores que atendem a usina, a segunda foi a aplicação da equação envolvida para prever uma resposta específica. Por último, após a obtenção do valor testado na prática, foi realizada uma estimativa de erro envolvido no modelo.

13.5.1 Possíveis combinações de paradas de aquecedores

Por meio da equação de combinação simples, foi possível estimar quantos são os conjuntos possíveis de serem realizados em paradas. A somatória totaliza 8.198 formas de realizar as paradas, no entanto, a determinação das possíveis combinações de paradas de aquecedores deve respeitar o cronograma de limpeza da usina, isto é, que cada parada seja realizada de um em um, dois em dois ou no máximo três equipamentos por vez, pois é a máxima quantidade capaz de ser realizada dentro do tempo de limpeza proposto pela usina.

No entanto, este estudo tem por objetivo elaborar um cronograma de limpeza a cada 14 dias dos aquecedores, de forma a impactar o menos possível a temperatura do caldo, e por isso, foi decidido estabelecer conjuntos de paradas de dois em dois equipamentos, pois caso seja realizada limpeza de um aquecedor num determinado dia, será necessário limpar três em outro, o que pode prejudicar o sistema. O quadro a seguir apresenta as 78 possibilidades de combinação. O cruzamento de cada linha e cada coluna representa uma possível combinação.

Quadro 04 – Combinações possíveis de parada dos aquecedores de 2 a 2

		Aquecedores												
Aquecedores		02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	
	01	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	02		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	03			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	04				X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	05					X	X	X	X	X	X	X	X	
	06						X	X	X	X	X	X	X	
	07							X	X	X	X	X	X	
	08								X	X	X	X	X	
	09									X	X	X	X	
	10										X	X	X	
	11											X	X	
	12												X	

Fonte: Próprio do autor, 2022.

Cada combinação apresenta uma área de troca que fica parada ao realizar limpeza. Para validação do modelo é necessário que a combinação esteja na área que compreende a aplicação, isto é, de 1.645 m² a 2.218 m².

Conclui-se, portanto, que apenas três combinações de aquecedores não são passíveis de aplicação perante o modelo de comportamento elaborado neste trabalho, pois possuem valores de área disponível para segundo aquecimento inferiores a 1.645 m², sendo: conjunto 01+02 (1.619 m²), conjunto 01+13 (1.635 m²) e conjunto 02+13 (1.615 m²). Todos os demais (75 conjuntos) podem ser testados para avaliar validação do modelo.

13.5.2 Estimativa de erro envolvido

A usina alterou em determinados dias a ordem de limpeza dos equipamentos para possibilitar a validação do modelo de comportamento proposto. As áreas de troca térmica disponíveis em cada dia são possíveis de utilização para validação do modelo, pois contemplam o intervalo exigido (1.645 m² a 2.218 m²) e estão apresentadas no quadro a seguir.

Quadro 05 – Áreas envolvidas no cronograma alternativo de limpeza dos aquecedores

Data	Aquecedor(es) parado(s) para limpeza													Área disponível (m ²)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
01/09/2021		X						X						1.761
08/09/2021					X	X		X						1.812
15/09/2021								X						2.070
23/09/2021				X							X	X		1.820
30/09/2021						X	X	X						1.802
13/10/2021					X	X							X	1.666

Fonte: Próprio do autor, 2022.

Utilizando a equação proposta pelo modelo (equação 22), foi possível estimar as temperaturas esperadas para as áreas envolvidas na testagem do modelo. Juntamente com a validação prática, isto é, submeter o sistema às áreas de troca apresentadas, realizou-se um comparativo de erro envolvido no modelo. A tabela a seguir apresenta os resultados.

Tabela 04 – Erro envolvido nas validações do modelo

Área (m ²)	Temperatura estimada pelo modelo (°C)	Temperatura real encontrada (°C)	Similaridade (%)	Erro envolvido (%)
1.666	95,47	97,54	102,17	2,17
1.761	95,50	97,50	102,10	2,10
1.802	95,54	95,50	99,96	-0,04
1.812	95,56	98,07	102,63	2,63
1.820	95,57	95,47	99,90	-0,10
2.070	96,33	95,29	98,92	-1,08

Fonte: Próprio do autor, 2022.

Observa-se que para valores de área entre 1.666 m² e 1.820 m² a temperatura estimada pelo modelo oscila apenas 0,10 °C (entre 95,47 °C e 95,57 °C), já para o valor de 2.070 m² tem-se a elevação de quase 1,0 °C.

Analisando os valores reais encontrados na prática, notou-se o oposto, isto é, o maior valor de área registrou o menor valor de temperatura, assim como as demais áreas. A única

exceção foi a área de 1.812 m², que apresentou a maior temperatura, mesmo sendo o valor intermediário de testagem do modelo.

Com relação à similaridade entre modelo e prática, o valor de 1.802 m² exibiu o valor mais próximo de 100 %, semelhante à 1.820 m² que ficou apenas 0,10 % de atingir 100 %. Já nos demais casos, houve similaridade considerável, oscilando até no máximo 2,17 %.

Os valores de erro envolvidos com valores negativos indicam que a temperatura na prática superou a teórica, e os resultados positivos mostram que a temperatura teórica foi maior que a da prática.

Com base na média dos módulos (valores absolutos, desconsiderando o sinal), foi estimado um erro associado ao modelo, que resultou em $\pm 1,35$ % (para mais ou para menos) e o índice de confiabilidade é de 98,65 %.

13.6 DEFINIÇÃO DAS MELHORES COMBINAÇÕES DE PARADAS

Ao final do estudo foram avaliadas as principais combinações de paradas de aquecedores para montar um sistema de limpeza da usina, buscando manter o máximo possível de temperatura final do caldo e que este valor seja similar em todos os dias.

Como o modelo se mostrou válido para a faixa de valores que foi estruturado (1.645 m² a 2.218 m²), foi possível ranquear aquelas combinações duplas em que o sistema mais tende a reduzir perdas térmicas, mantendo área considerável para trabalho de troca térmica.

Como a exigência é que seja realizada limpeza em cada equipamento pelo menos uma vez a cada 14 dias, e considerando que aos domingos não ocorre limpeza, foi estabelecido um cronograma com início na segunda-feira de uma semana e finalização no sábado de outra. O calendário proposto está apresentado na tabela a seguir.

Tabela 05 – Definição das melhores combinações de paradas de aquecedores

Dia	Dia da semana	Aquecedores parados	Temperatura esperada (°C)
01	Segunda-feira	05+07	95,92
02	Terça-feira	01+11	95,55
03	Quarta-feira	08+09	95,81
04	Quinta-feira	04+06	95,85
05	Sexta-feira	02+03	95,52
06	Sábado	10+13	95,54
07	Domingo	Nenhum	97,13
08	Segunda-feira	11+12	95,90
09	Terça-feira	03+10	95,93
10	Quarta-feira	06+07	95,87
11	Quinta-feira	02+08	95,50
12	Sexta-feira	04+13	95,52
13	Sábado	01+05	95,55
14	Domingo	Nenhum	97,13

Fonte: Próprio do autor, 2022.

Conclui-se que para manter o sistema o mais constante possível durante limpeza dos equipamentos, as combinações de aquecedores que se concentram em 95 °C são as com maior potencial de aplicação.

Quando não existem paradas, o modelo aponta uma temperatura de 97,13 °C. Importante lembrar que nesses valores de temperatura pode haver variação de $\pm 1,35$ %, conforme descreve o erro associado.

6 CONCLUSÕES

A cana de açúcar é um produto de destaque no setor agroindustrial, sendo que a sacarose é o principal alvo de extração, pois é a partir deste composto que se realiza a fabricação de açúcar industrial. O processo de obtenção é altamente complexo, sendo a etapa de segundo aquecimento crucial para a efetividade das posteriores, visto que a baixa temperatura impacta negativamente na decantação e assim, com toda a físico-química aplicada para tratar o caldo antes de ser concentrado.

Nesta etapa, comumente são empregados aquecedores tubulares, em vista do aumento expressivo de área de troca térmica que o equipamento fornece pela disposição de seus tubos. O mecanismo de transferência de calor pode ser contracorrente, concorrente ou misto. Os principais problemas operacionais se resumem a danificação dos tubos, que pode ser por incrustação irreversível ou corrosão.

Verificou-se que a hipótese de comportamento teórica do sistema exibiu perfil de linearidade e proporcionalidade entre aumento/redução de temperatura e área. No entanto, como o sistema não opera na prática com a conformação inicialmente projetada (possui apenas 2.218 m² dos 2.348 m² passíveis de uso) o comportamento se mostrou polinomial de segunda ordem.

Assim, foi criado um modelo qualitativo para tomada de decisão por meio da média global das faixas de área e temperatura, que após validação, apresentou um erro estimado no valor de $\pm 1,35\%$. O ajuste de dados e todas demais análises apenas valem para aplicação na faixa de 1.645 m² a 2.218 m² de área de troca térmica, e também se mantidas constantes todas demais variáveis de processo (vazão de: caldo, vapor, condensado e pressão nessas linhas).

Em vista da frequente alteração na ordem de parada de aquecedores para limpeza durante a safra de cana, que é uma ação que impacta o processo de segundo aquecimento, foi proposto a elaboração de um novo cronograma de paradas dos conjuntos, considerando combinações de dois equipamentos sendo limpos por dia. Esta determinação foi baseada nos aquecedores que refletem condições similares de resposta na temperatura do caldo (95 °C), se parados em dias distintos.

Torna-se fundamental para estudos futuros, avaliar as regiões dos espelhos que concentram a maior parte dos danos em tubos e junto a isso, investigar os motivos que levam a tais acontecimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, F. A. D. **Intensificação do processo de purificação do caldo da cana-de-açúcar por decantação química e adsorção**. 2017. Tese de Doutorado – Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, 2017.
- ASSIS, A. S. P. **Modelagem e controle de uma planta piloto térmica do tipo casco-tubos utilizando a tecnologia WirelessHART**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande/PB, 2015.
- AVANÇO, R. H. et al. Modelo numérico de desempenho de evaporadores com tubos aletados. **VI Congresso nacional de engenharia mecânica**, Campina Grande/PB, 2010.
- BARBOSA, T. J. A. **Optimização de sistemas CIP**. 2010. Dissertação de Mestrado – Mestrado em Engenharia Química, Universidade do Porto, 2010.
- BETHLEHEM, X. M. **Caldeiras industriais: principais corrosões e suas formas de prevenção**. Jan/2020. Disponível em: <<https://xhmarbethlehem.com.br/blog/caldeiras-industriais-corrosoes/>>. Acesso em 13/04/2022.
- BICCA, G. B. **Modelagem hierárquica de trocadores de calor casco e tubos**. 2006. Dissertação de Mestrado – Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2006.
- CAMPOS, V. S. C. **Simulação numérica de formação e incrustação de coque de gasóleo pesado (GOP) em aquecedores tubulares**. 2004. Dissertação de Mestrado – Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 2004.
- CASTRO, S.B. **Tecnologia do açúcar**. 1ª ed. Recife/PE: Editora Universitária UFPE, 2007.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática** 4ª ed. AMGH editora, São Paulo/SP, 2012.
- DELGADO, A. A.; CESAR, M. A. A. **Elementos de tecnologia e engenharia do açúcar de cana**. v.3, 1977.
- FALCÃO, C. **Projeto mecânico vasos de pressão e trocadores de calor casco e tubos**. Texto registrado sob o nº 284827 do livro 514 folha 847 do Escritório de Direitos Autorais da Fundação Biblioteca Nacional do Ministério da Cultura. 2008. Disponível em< <http://www.falcaoconsult.com.br/Sinopse%20da%20Apostila.pdf>>. Acesso em 01/06/2022.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. 3ª ed. Piracicaba/SP: Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 2011.

FIORILLO, D.; MARTINS, P. N. **Comissionamento de trocadores de calor do tipo casco e tubos**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso – Pós Graduação – Lato Sensu em Engenharia de Condicionamento/Comissionamento, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória/ES, 2010.

FIUZA, D. et al. **Considerações sobre bancada experimental usada para estudos de otimização de sistemas de limpeza CIP**. IX Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, promovida pela Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG. 2011.

FRAUCHES-SANTOS, C. et al. A corrosão e os agentes anticorrosivos. **Revista virtual de química**, Seropédica/RJ, v. 6, n. 2, p. 293-309, 2014.

GUSMÃO, W. C. **Comparação da eficiência térmica de trocadores de calor no laboratório de sistemas térmicos da faculdade de engenharia**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá/SP, 2013.

HUGOT, E. **Manual da engenharia açucareira**. v.1. São Paulo/SP: Mestre Jou, 1969.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor**. 4ª ed. Pearson Educación, México, 1999.

JÚNIOR, A. C. B.; CRUZ, A. J. G. **Fundamentos de balanço de massa e energia**. São Carlos: Editora EdUFSCar, 2010.

JÚNIOR, L. C. M. **Geradores de vapor**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ), Panambi/RS, 2003.

KAHSAY, A.; GABBIYE, N. Characterization and effects of scale formation on heat transfer system of multiple-effect evaporator units in cane sugar industry. **Journal of Chemical Engineering & Process Technology**, v. 6, n. 255, p. 3-4, 2015.

LOPEZ, C. H. **Tecnologia Sucroalcooleira**. São Carlos: EdUFSCar, 2011.

MACHADO, S. S. **Tecnologia da Fabricação do Açúcar**. Inhumas/MG: IFG; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

OHBA, M.; KAJIMOTO, Z. P. **Corrosão por aeração diferencial**. 1997. Dissertação de Mestrado – Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 1997.

OLIVEIRA, M. P.; PONTES, W.; GANDOLFI, M. V. C. Clarificação do caldo da cana-de-açúcar: Relação entre a turbidez, pH e teor de impurezas minerais. **Revista Engenharia em Ação UniToledo**, Araçatuba/SP, v. 3, n. 2, 2018.

PALHARIM, P.; SILVA, S. N.; RODRIGUES, L. M. Efeito da Concentração de H₂SO₄ na Corrosão Atmosférica de Tubos de Trocadores de Calor. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 7, n. 2, 2015.

PANNONI, F. D.; WOLYNEC, S. **Efeito do cobre, do fósforo, do níquel e do molibdênio sobre a resistência à corrosão atmosférica de aços carbono**. 2002. Tese de Doutorado – Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2002.

PIZANI, L. E. S. **Estudo da viabilidade técnico econômica para a substituição de um sistema de aquecimento de água com injeção direta de vapor por um sistema de aquecimento indireto através de um trocador de calor tipo placa**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de São Paulo, Guaratinguetá/SP, 2017.

REIN, P. W. Encrustation and scaling in continuous sugar vacuum pans. **Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association**, 204-208, 1990.

REIN, P. **Engenharia do açúcar de cana**. Berlim – Alemanha: Bartens, 2013.

RIBEIRO, C. A.; BLUMER, S. A.; HORII, J. **Fundamentos de tecnologia sucroalcooleira**. 1ª parte: Tecnologia do açúcar. Piracicaba/SP: USP/ESALQ/LAN, 1999.

RODRIGUES, T. A. F. **Clarificação do caldo de cana-de-açúcar por aquecimento e fosfatação auxiliado por caleação e centrifugação contínua**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso – Tecnólogo em Produção Sucroalcooleira, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa/PB, 2017.

SANTOS, C. S. **Estudo de caso da eficiência energética na geração de vapor através do uso do bagaço de cana-de-açúcar em uma usina sucroalcooleira no centro oeste mineiro**. 2015.

Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia de Produção, Centro Universitário de Formiga, Formiga/MG, 2015.

SANTOS, E. J. N.; FRAGA, F. E. **A importância do tratamento e cuidados com a água de caldeira**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró/RN, 2018.

SANTOS, F. A. **Análise da aplicação da biomassa da cana como fonte de energia elétrica: usina de açúcar, etanol e bioeletricidade**. 2012. Dissertação de Mestrado – Pós-Graduação em Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2012.

SANTOS, F. G. **Cálculo mecânico de um trocador de calor do tipo casco e tubo (*shell and tube*)**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz Das Almas/BA, 2019.

SANTOS, M. M., SANTOS, D. J. D.; LEITE, I. R. Avaliação de aquecedores do tipo casco e tubos utilizados no sistema de aquecimento de caldo de cana caledado. **Revista produção em destaque**, Bebedouro/SP, 1, (1), p. 149-172, 2017.

SILVA, E. P.; ZANG, W. A. F.; ZANG, J. W. **Corrosão de tubulação de cobre caracterizada por íons de Cu^{2+} na Água**. 2ª Jornada da produção científica da educação profissional e tecnológica da região centro oeste, Cuiabá/MT, 2008.

SILVA, R. B et al. Aplicação da produção mais limpa no processo de clarificação do caldo de cana para produção de açúcar. **Revista Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 1, n. 1, p. 59, 2009.

TRINDADE, A. C. R. **Desenvolvimento e aplicação de metodologia para otimização de processos em uma indústria sucroenergética**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia de Produção, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados/MS, 2012.

USAÇÚCAR (Usina De Açúcar Santa Terezinha Ltda.). **Pré-Fabricação do Açúcar**. Curso básico industrial desenvolvido pela consultoria empresarial da unidade Tapejara, março/2005. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/5596003/>>. Acesso em 15/03/2022.