

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Química - Câmpus de Araraquara

Vinícius Sichieri Fernandes

Quantificação de vapor gerado por caldeira a lenha e usado por setor em uma
microcervejaria

Araraquara
2024

Vinícius Sichieri Fernandes

Quantificação de vapor gerado por caldeira a lenha e usado por setor em uma microcervejaria

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como parte dos requisitos para obtenção do título de Pós-Graduação Lato Sensu em Tecnologia Cervejeira.

Orientador(a): Prof. Dr. Leinig Antonio Perazolli

Araraquara

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

F383q	<p>Fernandes, Vinícius Sichieri Quantificação de vapor gerado por caldeira a lenha e usado por setor em uma microcervejaria / Vinícius Sichieri Fernandes. – Araraquara : [s.n], 2024 35 f. : il.</p> <p>Trabalho de conclusão de curso (Lato Sensu – Tecnologia Cervejeira) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Química Orientador: Leinig Antonio Perazolli Coorientador: João Fernando Sacilotto</p> <p>1. Cerveja. 2. Vapor. 3. Geração. 4. Sustentabilidade. 5. Caldeira I. Título.</p>
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Química, Araraquara. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

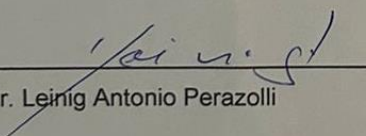
Vinicius Sichieri Fernandes

Quantificação de vapor gerado por caldeira a lenha e usado por setor em uma microcervejaria.

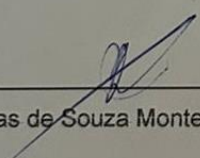
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" como parte dos requisitos para obtenção do título de Especialista em Tecnologia Cervejeira.

Araraquara, 19 de abril de 2024

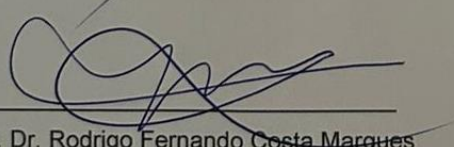
Banca examinadora



Prof. Dr. Leinig Antonio Perazolli



Prof. Dr. Elias de Souza Monteiro Filho



Prof. Dr. Rodrigo Fernando Costa Marques

RESUMO

Este é um trabalho voltado à tecnologia cervejeira, onde é apresentado um método para quantificação de vapor gerado e usado por setor em uma microcervejaria real, sendo abastecido por equações teóricas que envolvem mecânica dos fluidos, termodinâmica e fenômenos de transportes para sua resolução. O mesmo apresenta dois métodos práticos, sendo um deles para quantificação de água usada para abastecimento de uma caldeira flamotubular à lenha, e outro para quantificação do uso de lenha para abastecimento da mesma. Por fim, têm-se a conclusão de ambos os gastos, sendo, aproximadamente, 100 e 580 L/h, e para consumo de lenha, entre 1 e 4 m³. Este estudo propõe uma análise prática para avaliar a eficiência da caldeira em fábricas sem válvulas medidoras de vazão e microcervejarias, destacando a importância da lenha de eucalipto e da reutilização da água para economizar energia e melhorar a sustentabilidade do processo de geração de vapor.

Palavras-chave: cerveja, vapor, geração, sustentabilidade, caldeira.

ABSTRACT

This is a work focused on brewing technology, presenting a method for quantifying steam generated and used per sector in a real microbrewery, supported by theoretical equations involving fluid mechanics, thermodynamics, and transport phenomena for its resolution. It presents two practical methods, one for quantifying water used to supply a wood-fired fire-tube boiler, and another for quantifying the use of wood for fueling the boiler. Finally, conclusions are drawn regarding both expenditures, approximately 100 and 580 L/h for water consumption and between 1 and 4 m³ for wood consumption. This study proposes a practical analysis to evaluate boiler efficiency in factories without flow metering valves and microbreweries, emphasizing the importance of eucalyptus wood and water reuse to save energy and improve the sustainability of the steam generation process.

Keywords: beer, steam, generation, sustainability, boiler.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma de produção de chope.....	12
Figura 2: Estoque de lenha para abastecimento da caldeira.	24
Figura 3: Abastecimento de lenha.....	24
Figura 4: Filtro, retentor e purgador inline.	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores reais da caldeira utilizada.....	17
Tabela 2: Tanque de retorno do condensado e abastecimento da caldeira....	22
Tabela 3: Valores reais da caldeira e geração de vapor.	27
Tabela 4: Uso de lenha e setores ativos.	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A.C.	Antes de Cristo
v/v	Volume por Volume
PCP	Planejamento e Controle de Produção

LISTA DE SÍMBOLOS

m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro quadrado
cm ³	Centímetro cúbico
kgf	Quilograma força
kgf/cm ²	Quilograma força por centímetro quadrado
kgf/cm ³	Quilograma força por centímetro cúbico
Mpa	Megapascal
mm	Milímetro
L	Litro
h	Hora
L/h	Litro por hora
kJ/kg	Quilojoule por quilograma
kW/m ³	Quilowatt por metro cúbico
kW	Quilowatt

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos gerais.....	14
1.2 Objetivos específicos	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Planejamento e controle da produção: fundamentos	15
2.2 Geração e utilização do vapor.....	15
3 METODOLOGIA	16
3.1 Medições reais da caldeira.....	16
3.2 Transferência de calor.....	18
3.3 Quantificação do volume de água	22
3.4 Consumo de lenha	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5 CONCLUSÃO	30
6 REFERÊNCIAS	30
ANEXO A – TABELA DE DIMINUIÇÃO DO NÍVEL DO TANQUE DE RETORNO DO CONDENSADO	32
ANEXO B – TABELA DO USO DE LENHA PARA ABASTECIMENTO DA CALDEIRA	34

1 INTRODUÇÃO

A cerveja, um produto 100% natural, pode ser genericamente descrita como uma bebida carbonatada com teor alcóolico entre 3 e 8% (v/v), preparada usando malte de cevada, lúpulo, fermento e água (e possíveis adjuntos). Encontra-se vestígios de cervejas feitas em 12.000 A.C.. Há indícios que os babilônios tinham ciência da fabricação de mais de 16 tipos de “cervejas” de cevada, trigo e mel há 4.000 A.C. (SIQUEIRA, 2008).

A Figura 1 demonstra as etapas do processo de fabricação de cerveja atualmente, assim sendo utilizado uma série de equipamentos que serão abordados a seguir, sendo o foco deste trabalho, o equipamento de geração de vapor, tinas de maceração, fervura e tanques de água quente.

Figura 1: Fluxograma de produção de chope.



Fonte: Autor, (2024).

A arte da fabricação de cerveja é uma tradição antiga que une saberes científicos, métodos tradicionais e toques inovadores para criar a amada bebida fermentada (BARBOSA, 2018). Desde o início, com a geração de vapor em uma

caldeira a lenha, até o momento do envasamento em barris, cada fase desse processo desempenha um papel crucial na qualidade e no sabor da cerveja final (BATISTA, 2021).

Tudo começa com a escolha dos ingredientes: malte, lúpulo, água e levedura. O malte passa por um processo de malteação, onde os grãos são germinados e secos (BARBOSA, 2018). Depois, temos a brassagem, na qual o malte moído é misturado com água aquecida na caldeira a lenha. Isso ativa enzimas que transformam os amidos em açúcares fermentáveis, criando o mosto (BATISTA, 2021).

A próxima etapa envolve a fervura do mosto, geralmente feita em um caldeirão alimentado por lenha. Durante esse processo, o lúpulo é adicionado para proporcionar amargor, aroma e sabor à cerveja, além de agir como conservante. A fervura também remove impurezas e esteriliza o líquido (BARBOSA, 2018).

Depois de ferver, o mosto é resfriado e transferido para os fermentadores, onde a levedura é adicionada. A fermentação é crucial, pois a levedura converte os açúcares em álcool e dióxido de carbono, um processo que pode levar dias ou semanas, dependendo do tipo de cerveja desejado (BARBOSA, 2018).

Em seguida, a cerveja passa por um período de maturação para aprimorar o sabor e eliminar subprodutos indesejados, enquanto ocorre a clarificação e a carbonatação natural (BATISTA, 2021). Após isso, a cerveja é filtrada e encaminhada para o processo de envase, que pode incluir a carbonatação forçada (BARBOSA, 2018).

Quando a cerveja atinge a maturidade desejada, está pronta para ser envasada. Algumas cervejarias optam por garrafas, enquanto outras preferem barris, especialmente para cervejas que passam por um amadurecimento adicional ou são destinadas a serem servidas como chope (BATISTA, 2021).

Por fim, o processo culmina na etapa de embarrilamento, onde a cerveja é transferida para barris, pronta para ser distribuída e apreciada pelos consumidores (BARBOSA, 2018). Cada fase do processo cervejeiro, desde a geração de vapor com caldeira a lenha até o envasamento, contribui para a complexidade e riqueza de sabores que caracterizam essa bebida única (BATISTA, 2021).

A transferência térmica em geradores de vapor constitui um conjunto intrincado de fenômenos, abrangendo a troca de calor por meio de radiação, convecção e

condução térmica. Os eventos físicos e químicos que ocorrem em uma caldeira ou forno, incluindo combustão, transferência de calor e movimento de fluidos, constituem uma área especializada da engenharia mecânica. Não é possível abordá-la aqui com profundidade suficiente para permitir uma compreensão completa e aplicação eficaz no projeto e dimensionamento das superfícies de troca de calor (WALDIR; BIZZO, [s.d.]).

1.1 Objetivos gerais

Quantificação de volume de vapor gerado e utilizado em cada setor de uma microcervejaria e volume de lenha utilizado para abastecimento de caldeira flamotubular.

1.2 Objetivos específicos

Para que o trabalho esteja completo, os seguintes objetivos foram definidos:

- i) Entendimento do processo produtivo;
- ii) Revisão bibliográfica do controle das áreas citadas;
- iii) Estudo da planta de geração de vapor de uma microcervejaria e cálculos da mesma.
- iv) Estabelecer método simples, sem uso de válvulas medidoras de vazão, para microcervejarias.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O trabalho de revisão será baseado em livros, artigos e trabalhos publicados voltados para as disciplinas do mundo da engenharia química e mecânica, tais como: Mecânica de Fluidos, Termodinâmica e Fenômenos de Transporte.

2.1 Planejamento e controle da produção: fundamentos

O desenvolvimento industrial e amadurecimento trouxeram a necessidade de um planejamento e controle mais eficazes nas atividades produtivas, visando superar desafios como gargalos na produção e disparidades entre oferta e demanda. Originando-se na revolução industrial, os estudos de Planejamento e Controle de Produção (PCP) evoluíram ao longo do século XX, destacando-se na década de 1970 com a adoção de sistemas MRP (*Material Requirement Planning*). A computação impulsionou esses sistemas, culminando no surgimento dos ERPs (*Enterprise Resource Planning*), representando uma evolução do MRP II e integrando funções diversas nas empresas (O'BRIEN; MARAKAS, 2013).

No cenário atual, módulos de otimização de produção, como os APS (*Advanced Planning System*), tornaram-se essenciais para enfrentar a competitividade global, buscando redução de lead times e custos (FERNANDES; FILHO, 2010). A influência japonesa, notadamente a filosofia Just-In-Time e a produção enxuta, desempenham papel crucial nos sistemas de PCP (Lustosa, 2008). O aumento da competitividade global impõe desafios às empresas, tornando o PCP uma área-chave para vantagens competitivas, impactando positivamente em custos, qualidade e desempenho de entregas, especialmente em setores complexos como a indústria cervejeira (Guerrini et al., 2019; Carmo, 2020).

Atuando como órgão de *staff*, o PCP exerce função coordenadora, influenciando decisões operacionais em toda a organização e desenvolvendo relacionamentos cruciais com áreas como *Marketing/Vendas* e *Produção*. No entanto, a complexidade dessas funções pode resultar em objetivos conflitantes, exigindo uma abordagem equilibrada (Erdmann, 1994; Moreira, 1993, p. 392). Essa capacidade de adaptação e coordenação do PCP reflete sua importância estratégica no contexto atual de competitividade global (MARIZ, 2022).

2.2 Geração e utilização do vapor

A geração de vapor é um componente crucial no processo de fabricação de cerveja, desempenhando um papel significativo na fervura do mosto e na esterilização do equipamento. Segundo Bamforth (2006), a eficiência da geração de vapor pode ter

um impacto direto na qualidade da cerveja produzida, bem como na sustentabilidade ambiental da cervejaria. A utilização eficiente do vapor pode resultar em economia de energia e redução das emissões de gases de efeito estufa.

O uso de vapor na fabricação de cerveja tem um impacto significativo no sabor final da cerveja. Durante o processo de mosturação, o vapor é usado para aquecer a mistura de malte e água, ajudando a extrair os açúcares que serão convertidos em álcool. Este processo pode influenciar o perfil de sabor da cerveja, pois diferentes temperaturas e tempos de mosturação podem resultar em variações no sabor.

Além disso, o vapor é usado no aquecimento da água para limpeza e esterilização do equipamento de fabricação de cerveja. Se o equipamento não for adequadamente limpo e esterilizado, pode haver contaminação, o que pode afetar adversamente o sabor da cerveja.

No entanto, é importante notar que os componentes sensíveis ao calor desempenham um papel na composição de um aroma, ele pode ser afetado por altas temperaturas. Portanto, o uso de vapor na fabricação de cerveja deve ser cuidadosamente controlado para garantir que não afete negativamente o sabor (LIN *et al.*, 2021).

3 METODOLOGIA

Será descrito neste capítulo os principais cálculos para quantificação de vapor gerado por caldeira a lenha feita a partir da necessidade, ou seja, uma operação unitária sob medida para a real situação fabril.

3.1 Medições reais da caldeira

A Tabela 1 apresenta os dados obtidos da caldeira utilizada para geração de vapor da fábrica BOREAL CHOPP.

Tabela 1: Valores reais da caldeira utilizada.

Dados reais da caldeira e geração de vapor		
Parâmetro	Valor	Unidade
Altura da fornalha	0,6	m
Altura da caldeira	2,24	m
Diâmetro da grelha	0,9	m
Tubos da caldeira	ASTM A178	-
Quantidade de tubos na caldeira	87	-
Limite de resistência a tração	325	MPa
Limite de escoamento	180	MPa
Diâmetro externo do tubo	48,2	mm
Espessura do tubo	3,7	mm
Pressão máxima de trabalho	12	kgf/cm ²
Pressão normal de trabalho	6	kgf/cm ²
Abertura da primeira	7	kgf/cm ²
Abertura da segunda	8	kgf/cm ²
Vazão volumétrica de vapor	536,0	L/h
Tubos de saída do vapor	ASTM A53	-
Limite de resistência a tração	330	MPa
Limite de escoamento	205	MPa
Diâmetro externo do tubo	41,27	mm
Espessura do tubo	2	mm

Fonte: Autor, (2024).

Atualmente, a fábrica necessita de uma pressão de trabalho da caldeira de 6 kgf/cm², portanto, a primeira válvula de segurança é acionada com uma pressão de 6,5 kgf/cm², e a segunda com 7 kgf/cm², portanto, para realização dos cálculos, foi determinado uma pressão de trabalho ideal de 6 kgf/cm².

A tubulação de saída deve ser mandrilada, para evitar possíveis golpes de aríete, sendo assim a mais recomendada para tubulação de caldeiras.

3.2 Transferência de calor

Os cálculos referentes à transferência de calor foram baseados em diversos artigos com objetivos de dimensionamento de caldeiras simples ou mistas, mas nenhum trabalho foi achado com o objetivo de determinação de vapor gerado em qualquer indústria possível, tornando esse trabalho único.

Para cálculo da quantidade de energia inserida na caldeira, foram utilizados dados obtidos da tabela apresentada no Anexo A, sendo a equação 1 alimentada por eles:

$$\dot{q}_{req} = (h_{vapor} - h_{Alim}) \cdot m_{vapor} \quad (1)$$

Sendo:

$$\dot{q}_{req} = \text{Fluxo de calor requerido} \left(\frac{kJ}{h} \right)$$

$$h_{vapor} = \text{Entalpia do vapor} \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

$$h_{Alim} = \text{Entalpia do água de alimentação} \frac{kJ}{kg}$$

$$m_{vapor} = \text{Quantidade de água entrando na caldeira} \left(\frac{L}{h} \right)$$

As perdas de energia estão presentes, tanto no ato de acender a caldeira quanto para mantê-la acesa, portanto, adota-se uma eficiência térmica de 70%, para que assim seja possível realizar o cálculo da quantidade de energia liberada pela combustão (LUFT, 2017). Os cálculos referidos acima serão feitos pela equação 2.

$\eta = 0,7$ (eficiência térmica)

$$\dot{q}_{comb} = \frac{\dot{q}_{req}}{\eta} \quad (2)$$

Sendo:

$$\dot{q}_{comb} = \text{Fluxo de calor liberado pelo processo de combustão (MW)}$$

$\eta = \text{Eficiência térmica}$

A determinação da quantidade de lenha requerida por hora de operação é realizada considerando a energia que será liberada durante a combustão. Essa avaliação demanda o conhecimento da quantidade de energia liberada por unidade de massa do combustível utilizado, sendo o Poder Calorífico Inferior (PCI) da lenha um parâmetro essencial para esse cálculo. No presente estudo, optou-se por utilizar lenha de eucalipto em toras, com sua composição química em base seca e teor de umidade conforme detalhado por NOGUEIRA *et al.*, 2000 citado em SCHÜRHAUS, 2007.

$$T_C = 0.49 \text{ (Teor de carbono)}$$

$$T_H = 0.0599 \text{ (Teor de hidrogênio)}$$

$$T_O = 0.4397 \text{ (Teor de oxigênio)}$$

$$T_N = 0.003 \text{ (Teor de nitrogênio)}$$

$$T_S = 0.0001 \text{ (Teor de enxofre)}$$

$$T_{Cz} = 0.0072 \text{ (Teor de cinzas)}$$

$$T_w = 0.35 \text{ (Teor de umidade)}$$

Então, é calculado o PCI e PCS, e em seguida a massa de combustível necessária:

$$PCS = 33900.T_C + 141800 * \left(T_H - \frac{T_O}{8} \right) + 9200.T_S \quad (3)$$

$$PCI = PCS - 2440 * (9 * T_H + T_w) \quad (4)$$

$$mcb = \frac{q_{req}}{PCI} \quad (5)$$

Sendo:

$$mcb = \text{Massa de combustível necessária} \left(\frac{kg}{h} \right)$$

$$PCS = \text{Poder calorífico superior} \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

$$PCI = \text{Poder calorífico inferior} \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

Os gases resultantes da combustão podem ser representados através de correlações, diagramas e tabelas específicas, ou por meio de equações elaboradas com esse propósito. Para realizar essa modelagem, é essencial ter informações precisas sobre a massa e o volume de ar introduzidos no equipamento, o excesso de ar empregado, bem como a massa e o volume dos gases resultantes da combustão, conforme apresentados pelas equações 6, 7, 8 e 9.

$$M'ar = 138,2 * \left(\frac{TC}{12} + \frac{TH}{4} + \frac{TS}{32} + \frac{TO}{32} \right) \quad (6)$$

$$M'gases = 44 * \frac{TC}{12} + 9 * \left(TH + \frac{TW}{9} \right) + 64 * \frac{TS}{32} + 0,7685 * M'ar \quad (7)$$

$$V'ar = 106,7 * \left(\frac{TC}{12} + \frac{TH}{4} + \frac{TS}{32} + \frac{TO}{32} \right) \quad (8)$$

$$V'gases = 22,4 * \left(\frac{TC}{12} + \frac{TH}{2} + \frac{TW}{18} + \frac{TO}{32} \right) + 0,79 * V'ar \quad (9)$$

Sendo:

$$M'ar = \text{Massa estequiométrica do ar de combustão} \left(\frac{kg}{kgdecombustível} \right)$$

$$M'gases = \text{Massa esteq. dos gases de combustão} \left(\frac{kg}{kgdecombustível} \right)$$

$$V'ar = \text{Volume esteq. do ar de combustão} \left(\frac{N * m^3}{kgdecombustível} \right)$$

$$V'gases = \text{Volume esteq. dos gases de combustão} \left(\frac{N * m^3}{kgdecombustível} \right)$$

As equações mencionadas anteriormente estão associadas a valores estequiométricos, contudo, em situações práticas de combustão, é necessário empregar ar em excesso. Seguindo a recomendação de Considine (1977), citado por Pinheiro e Valle (1995), para a queima de lenha, é aconselhável utilizar um coeficiente de excesso de ar (α) que varie entre 1,3 e 1,6. Portanto, adotou-se $\alpha = 1,4$.

$$Mar = \alpha * M'ar \quad (10)$$

$$Mgases = M'gases + (\alpha - 1) * M'ar \quad (11)$$

$$Var = \alpha * V'ar \quad (12)$$

$$V_{gases} = V'_{gases} + (\alpha - 1) * V'_{ar} \quad (13)$$

Sendo:

$$M_{ar} = \text{Massa real de ar de combust\~ao} \left(\frac{kg}{kg_{decombust\~ivel}} \right)$$

$$M_{gases} = \text{Massa real dos gases de combust\~ao} \left(\frac{kg}{kg_{decombust\~ivel}} \right)$$

$$V_{ar} = \text{Volume real do ar de combust\~ao} \left(\frac{N * m^3}{kg_{decombust\~ivel}} \right)$$

$$V_{gases} = \text{Volume real dos gases de combust\~ao} \left(\frac{N * m^3}{kg_{decombust\~ivel}} \right)$$

É preciso calcular o volume dos gases na base seca para saber o percentual de CO₂ e H₂O.

$$V_{gs} = 22,4 * \left(\frac{TC}{12} + \frac{TS}{32} \right) + 0,79 * V_{ar} \quad (14)$$

$$CO_2 = 2240 * \left(\frac{TC}{12 * V_{gs}} \right) \quad (15)$$

$$H_2O = 100 * \left(\frac{Tw}{M_{ar} + 1} \right) \quad (16)$$

Sendo:

$$V_{gs} = \text{Volume de gases secos} \left(\frac{kg}{kg_{combust\~ivel}} \right)$$

CO_2 = Percentual de CO₂ nos gases de combust\~ao

H_2O = Percentual de H₂O nos gases de combust\~ao

O volume da fornalha, carga térmica volumétrica e área da grelha, foram calculados com base em alguns dos itens apresentados na Tabela 1, usados nas seguintes equações. Lembrando que, BAZZO, 1995, recomenda uma carga térmica volumétrica maior ou igual a 350 kW/m³.

$$H_{fornalha} = \frac{V_{fornalha}}{A_{grelha}} \quad (17)$$

$$V_{fornalha} = \pi * r_{grelha}^2 * H_{fornalha} \quad (18)$$

$$CTV = \frac{q_{comb}}{V_{fornalha}} \quad (19)$$

Sendo:

$H_{fornalha}$ = Altura da fornalha (m)

$V_{fornalha}$ = Volume da fornalha (m³)

A_{grelha} = Área da grelha (m²)

r_{grelha} = Raio da grelha (m)

CTV = Carga térmica volumétrica (kW/m³)

q_{comb} = Fluxo de calor liberado pelo processo de combustão (kW)

3.3 Quantificação do volume de água

A planta de geração de vapor da cervejaria conta com uma linha de retorno do condensado, que é depositado diretamente no tanque de reposição de água para a caldeira, portanto, para cálculos práticos, foi retirado a tubulação de retorno de dentro do tanque e calculado através no nível do tanque a quantidade de água utilizada para uso na caldeira, a Tabela 2 apresenta todas as dimensões do tanque em questão.

Tabela 2: Tanque de retorno do condensado e abastecimento da caldeira.

Parâmetro	Valor	Unidade
Altura	1,89	m
Diâmetro externo	1,27	m
Espessura	0,003	m
Volume total	1961,1	m ³

Fonte: Autor, (2024).

Para calcular o volume usado, foram feitas medições da diferença do nível entre o tanque cheio e o volume final em determinado tempo decorrido, a equação 20 demonstra o cálculo usado. Assim foi possível determinar a quantidade de vapor usado por cada setor ativo em determinado momento (sala de brassagem, filtração e embarrilamento).

$$V = \left(\frac{\pi * h}{3} \right) * (R^2 + r^2 + R * r) + (\pi * r^2 * \left(hc - \left(\frac{X}{100} \right) \right)) * 1000 \quad (20)$$

Sendo:

h = Altura do cone do tanque (m)

R = Raio superior do cone (m)

r = Raio inferior do cone (m)

hc = Altura da parte cilíndrica do tanque (m)

X = Diferença de nível (cm)

3.4 Consumo de lenha

Para cálculo do consumo de lenha, foi determinado que o abastecimento de lenha seria feito no período matutino, portanto, foram medidos com auxílio de trena a altura (A), largura (L) e comprimento (C) do estoque de lenha no começo do dia (Figura 2), ao final do abastecimento e ao final do dia, usando esses dados, foi calculado o volume utilizado por dia (A x L x C), e possibilitando o estudo de quantidade de lenha usada para cada setor ativo.

Figura 2: Estoque de lenha para abastecimento da caldeira.



Fonte: Autor, (2024).

O abastecimento da caldeira é realizado conforme a Figura 3, uma lenha mais grossa no centro e algumas mais finas ao redor (apenas para manter a pressão da caldeira, e não para acender).

Figura 3: Abastecimento de lenha.



Fonte: Autor, (2024).

Afim dos cálculos de consumo de lenha, foi medido o consumo baseado em cada setor, assim como o consumo de vapor, portanto, nos mesmos dias de medições

de consumo de vapor, foi calculado o consumo de lenha, possibilitando assim, ser feita uma comparação com os resultados finais de geração de vapor e consumo de lenha, chegando aos resultados apresentados a seguir de geração e consumo por setor, e também, por todos eles juntos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Anexo A apresenta os dados obtidos de modo prático na fábrica, diariamente, pela diferença de nível do tanque de retorno do condensado. A diminuição medida foi usada na Equação 20 no lugar do X, para descobrir o Vol. Util. e a vazão.

É de fácil percepção que os dias com vazões médias maiores representam os dias de fabricação de tanques grandes, ou seja, quanto maior a vazão média, maior o tanque feito, sendo que, no máximo, são feitos 15.000 litros diariamente. Em dias como 26/01/2024, foi realizado apenas o embarrilamento na fábrica, portanto, a necessidade de vapor é menor que no dia 29/01/2024, que foi realizado embarrilamento e filtração, que por sua vez também é menor que um dia de fabricação de 10.000 L, ou seja, dia 25/01/2024, mantendo a proporção de menor necessidade como por exemplo, dia 30/01/2024, cuja fabricação foi de 15.000 L.

Notou-se que ao abrir a válvula de pressão, o aumento repentino de necessidade por vapor nos cozinhadores faz a vazão chegar a 1.100 L/h, como por exemplo, no dia 07/01/2024 – 07:39h às 08:10h e 08:50h às 09:56h, mas em constante uso pelos mesmos, mantém-se em 580 L/h aproximadamente.

Os valores médios obtidos foram:

- Envase: 100 L/h;
- Filtração: 60 L/h;
- Brassagem: 220 - 250 L/h;
- Envase + Filtração: 130 L/h;
- Envase + Filtração + Brassagem: 400 - 580 L/h sendo: 400 L/h → fabricos pequenos (1700 L); 580 L/h → fabricos grandes (2700 L).

A fábrica conta com um método de recuperação de condensado através de válvulas e tubulações, mantendo a água utilizada na caldeira e alguma porcentagem do seu aquecimento prévio, aumentando assim a eficiência da caldeira. A Figura 3

apresenta as válvulas de retorno do condensado na linha ao final de cada cozinhador, tina de maceração e tanques de água quente.

Figura 4: Filtro, retentor e purgador *inline*.



Fonte: Autor, (2024).

O sistema de recuperação de água condensada começa com a coleta do condensado através da saída principal, passando então por um filtro para remover impurezas e partículas sólidas. Em seguida, o retentor controla o fluxo de água condensada, garantindo sua segurança e o fluxo adequado. O purgador é responsável por remover o ar acumulado na linha, assegurando vazão e fluxo contínuos. Por fim, a água condensada é enviada pela linha de retorno para reutilização, contribuindo assim para a conservação e eficiência hídrica e térmica do processo de geração de vapor.

A Tabela 3 apresenta os valores dos cálculos de geração de vapor.

Tabela 3: Valores reais da caldeira e geração de vapor.

Dados reais da caldeira e geração de vapor		
Parâmetro	Valor	Unidade
Fluxo de calor	1.420.970,82	kJ/h
Entalpia do vapor	105,00	kJ/kg
Entalpia da água de alim.	2.755,86	kJ/kg
Vazão volumétrica de água de alim.	536,04	L/h
Fluxo de calor liberado	0,28	MW
PCS	17.312,06	kJ/kg
PCI	15.134,65	kJ/kg
Massa de combustível necessária	93,89	kg/h
Massa estequiométrica do ar	9,62	kg/kg de comb.
Massa estequiométrica dos gases	10,08	kg/kg de comb.
Volume estequiométrico do ar	7,43	N*m ³ /kg de comb.
Volume estequiométrico dos gases	8,20	N*m ³ /kg de comb.
Massa real de ar	13,47	kg/kg de comb.
Massa real de gases	13,93	kg/kg de comb.
Volume real do ar	10,40	N*m ³ /kg de comb.
Volume real dos gases	11,17	N*m ³ /kg de comb.
Volume de gases secos	9,13	kg/kg de comb.
Altura da fornalha	0,45	m
Volume da fornalha	0,29	m ³
Área da grelha	0,64	m ²
Raio da grelha	0,45	m
Carga térmica volumétrica	965,92	kW/m ³
Fluxo de calor liberado	276,52	kW

Fonte: Autor, (2024).

O Anexo B apresenta os valores reais obtidos na prática para uso de lenha no abastecimento da caldeira. O volume foi calculado multiplicando o comprimento pela largura e pela altura.

Sabendo que os tanques de água quente utilizam vapor a todo momento para esquentar a água, e que, se a caldeira foi acesa naquele dia, alguma parte da fábrica estará funcionando, os seguintes resultados aproximados apresentados pela Tabela 4 foram obtidos baseados no Anexo B.

Tabela 4: Uso de lenha e setores ativos.

Uso de lenha para abastecimento da caldeira			
Dia	Pressão (kgf/cm ²)	Volume Usado (m ³)	Setores funcionando
24/01/2024	3,6	2,82	Env. + Filt. + Coz.
25/01/2024	4,5	2,99	Env. + Filt. + Coz.
26/01/2024	5	0,63	Env.
29/01/2024	4,5	0,54	Env. + Filt.
30/01/2024	6	2,99	Env. + Filt. + Coz.
31/01/2024	6	3,81	Env. + Filt. + Coz.
05/02/2024	5	1,55	Env. + Filt.
06/02/2024	6	3,24	Env. + Filt. + Coz.
07/02/2024	6	4,22	Env. + Filt. + Coz.
08/02/2024	5	1,38	Env. + Filt. + Coz. (PQ)
09/02/2024	5	0,72	Env. + Filt. (manhã)
14/02/2024	5	2,1	Env. + Filt.
21/02/2024	4	1,62	Env. + Filt. + Coz. (PQ)
22/02/2024	5	1,51	Env. + Filt. + Coz. (PQ)

Fonte: Autor, (2024).

Env. sendo envase; **Filt.** sendo filtração; **Coz.** sendo cozimentos de 2700 L; **Coz. (PQ)** sendo cozimentos de 1700 L.

Os valores médios obtidos foram:

- Envase: 1,25 m³;
- Filtração: 1 m³;
- Brassagem: 3 m³;
- Envase + Filtração: 1 - 1,6 m³;
- Envase + Filtração + Brassagem: 1,25 - 4 m³ sendo: aproximadamente 1,6 m³ para envase + filtração; 2,75 m³ → fabricos pequenos (1700 L); 4 m³ → fabricos grandes (2700 L).

Todos os resultados obtidos de quantificação de m³ usado foram baseados no cálculo de volume apresentado pela Figura 2, na seção acima, sendo medido por trena a diferença de volume inicial e final, como apresentado no Anexo B.

É notável que nos dias que englobam filtração, envase e brassagem, o consumo de lenha é de aproximadamente 4 metros cúbicos. Já nos dias que se restringem apenas ao envase, o consumo é de 1,25 metros cúbicos, enquanto nos dias de envase com filtração, o consumo é de cerca de 1,6 metros cúbicos. Esses dados destacam a variação significativa no consumo de lenha conforme as atividades realizadas na fábrica. Por exemplo, no dia 26/01/2024, quando apenas o envase ocorreu, o consumo foi de 1,25 m³, contrastando com o dia 29/01/2024, quando ocorreram envase e filtração, resultando em um consumo de aproximadamente 1,6 m³, diferentemente de dias como 31/01/2024, que todos os setores estavam ativos, resultando em um gasto aproximado de 4 m³ de lenha.

Os dias de menores resultados quando comparados aos outros que possuem as mesmas operações, podem nos mostrar que, provavelmente, aquela operação aconteceu apenas em um período curto do dia, ou até o dia todo, ou seja, dependendo da quantidade de lenha usada está diretamente relacionada ao tempo que a caldeira precisa ficar acesa e com pressão, sendo assim, menor essa necessidade em dias que possuem envase e filtração, ou apenas um deles, por poucas horas (um único período – 5 horas), contrastando em dias de fabricação, que a caldeira precisa ficar acesa e com pressão por mais de 14h (dependendo do tamanho do tanque produzido e da necessidade de continuar outras operações além do horário normal de trabalho, como acontece normalmente ao fim do ano, que a fábrica pode chegar a operar 24h por alguns dias consecutivos).

O fato de o abastecimento de lenha ser algo manual, faz também que ocorram variações de diversos tamanhos em seus resultados, portanto, é de extrema importância manter treinamentos ativos para que a eficiência alta por m³ de lenha seja realmente alcançada, refletindo diretamente no custo de operação da geração de vapor.

O uso de lenha de eucalipto é deveras importante para o meio ambiente assim como a reutilização da água para geração de vapor, diminuindo a quantidade de lenha necessária para manter a mesma quantidade de pressão na linha, e, conseqüentemente, a temperatura e eficiência do vapor em questão, diminuindo também a quantidade de energia usada, tanto humana quanto mecânica e química.

Essas diferenças de consumo refletem a complexidade das operações e o planejamento necessário para garantir o abastecimento adequado de lenha.

5 CONCLUSÃO

Foi desenvolvido um método para quantificação de vapor gerado e utilizado em cada setor da microcervejaria.

Os resultados são quantitativamente satisfatórios e permitem a elaboração de planos de consumo e prever pontos de perdas de vapor (energia), em cada ponto da planta de geração de vapor e consumo de vapor.

6 REFERÊNCIAS

SIQUEIRA, Priscila Becker. et al. **O processo de fabricação da cerveja e seus efeitos na presença de polifenóis**. Alim. Nutri., Campinas – SP, out./dez. 2008.

Disponível em: <<http://servbib.fcfar.unesp.br/seer/index.php/alimentos/article/view/660/556>> Acesso em: 15 jan. 2024.

WALDIR, P.; BIZZO, A. EM 722 - **Geração, Distribuição e Utilização de Vapor cap. 5 - CÁLCULO TÉRMICO E FLUIDOMECÂNICO DE CALDEIRAS**. [s.l.: s.n.].

Disponível em: <https://eva.fing.edu.uy/file.php/392/14-GERVAP5_calc_termico_caldeiras.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2024.

BARBOSA, L, M. **A PRODUÇÃO DE CERVEJA AO LONGO DA HISTÓRIA**.

Disponível em: <<https://brt.ifsp.edu.br/phocadownload/userupload/213354/A%20PRODUO%20DE%20CERVEJA%20AO%20LONGO%20DA%20HISTRIA.pdf>>. Acesso em: 19 jan. 2024.

BATISTA, E. L. A. **CERVEJA ARTESANAL: UMA REVISÃO SOBRE O SEU PROCESSO DE PRODUÇÃO E SEU POTENCIAL ANTIOXIDANTE**. Disponível em:

<<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/32568/1/CervejaArtesanalRevis%c3%a3o.pdf>>. Acesso em: 19 jan. 2024.

Bamforth, C. (2006). **Scientific Principles of Malting and Brewing**. American Society of Brewing Chemists.

LIN, C. L. et al. **Packing a punch: understanding how flavours are produced in lager fermentations**. FEMS Yeast Research, v. 21, n. 5, p. foab040, 6 jul. 2021.

O'BRIEN, J. A.; MARAKAS, G. M. **Administração de Sistemas de Informação**. Porto Alegre: AMGH, 2013.

FERNANDES, F. C. F.; FILHO, M. G. **Planejamento e controle da produção: dos fundamentos ao essencial**. Editora Atlas. 2010.

LUSTOSA, L. et al. **Planejamento e controle da produção**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.

GUERRINI, F, M.. et al. **Planejamento e controle da produção: modelagem e implementação**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2019.

CARMO, W, J. **Indústria e Varejo: Estratégias de competitividade**. 1. ed. Curitiba: Appris, 2020.

MOREIRA, D, A. **Administração da Produção e Operações**. Cengage Learning, 2ª Edição, São Paulo, 2008.

ERDMANN, Rolf Hermann. **Modelo organizativo pra sistemas de planejamento e controle da produção**. Florianópolis: UFSC, 1994. Tese (doutorado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.

LUFT, A. L. **DIMENSIONAMENTO TÉRMICO DE UMA CALDEIRA MISTA**. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/15204/1/PB_DAMEC_2017_2_01.pdf>. Acesso em: out. 2023.

CONSIDINE, D. M. **Energy technology handbook**. McGraw-Hill, Inc., New York, 1977.

PINHEIRO, P.; VALLE, R. M. **Controle de combustão: Otimização do excesso de ar**. In: **II Congresso de equipamentos e automação da indústria química e petroquímica**. [S.l.: s.n.], 1995. p. 157–162.

Silva, Cíntia & Casagrande, Diego. (2022). **QUALIDADE NO PROCESSO PRODUTIVO DA CERVEJA: uma análise a partir das ferramentas Ciclo PDCA e 5W2H**. Revista Interface Tecnológica. 19. 378-388. 10.31510/infa.v19i1.1381.

MARIZ, S. M. S. **PRÁTICAS E SISTEMAS DE PLANEJAMENTO E CONTROLE DE PRODUÇÃO PARA INDÚSTRIAS CERVEJEIRAS**. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/25038/1/TFC%20-%20SILAS%20MARIZ%20.pdf>>. Acesso em: 16 mar. 2024.

ANEXO A – Tabela de diminuição do nível do tanque de retorno do condensado

Diminuição do nível do tanque de retorno do condensado								
Dia	Hora Inicial	Hora Final	Δt	Pressão (kgf/cm ²)	Diminuição (cm)	Vol. Util. (L)	Q (L/h)	Média (L/h)
24/01/2024	07:50	08:23	00:33	3	20	251,0	456,3	
24/01/2024	08:28	08:58	00:30	4	16,5	207,0	414,1	
24/01/2024	09:01	09:33	00:32	5	17	213,3	400,0	
24/01/2024	09:36	10:08	00:32	6	12	150,6	282,3	
24/01/2024	10:10	10:42	00:32	5	17	213,3	400,0	
24/01/2024	10:47	11:18	00:31	4	26	326,3	631,5	
24/01/2024	11:23	11:58	00:35	5	13	163,1	279,6	
24/01/2024	12:01	14:03	02:02	4	61	765,4	376,4	405,0
25/01/2024	07:38	10:38	03:00	4	77	966,2	322,1	
25/01/2024	10:50	11:56	01:06	4,5	44,5	558,4	507,6	
25/01/2024	12:03	14:00	01:57	4	69	865,8	444,0	
25/01/2024	14:10	17:30	03:20	4,5	62	778,0	233,4	376,8
26/01/2024	07:50	11:00	03:10	6	27,5	345,1	109,0	109,0
29/01/2024	07:38	13:32	05:54	4,5	80	1003,9	170,1	
29/01/2024	14:00	17:30	03:30	4	45	564,7	161,3	165,7
30/01/2024	07:35	08:55	01:20	5,5	65	815,6	611,7	
30/01/2024	08:55	09:55	01:00	6	55	690,2	690,2	
30/01/2024	09:55	10:53	00:58	5	35	439,2	454,3	
30/01/2024	11:13	13:31	02:18	5	55	690,2	300,1	
30/01/2024	14:42	15:43	01:01	5	42	527,0	518,4	
30/01/2024	15:43	16:09	00:26	5	16	200,8	463,3	
30/01/2024	16:09	16:38	00:29	5	28,5	357,6	739,9	
30/01/2024	16:38	17:16	00:38	6	20	251,0	396,3	521,8
31/01/2024	07:47	08:34	00:47	6	84	1054,1	1345,6	
31/01/2024	08:49	09:17	00:28	6	58,5	734,1	1573,0	
31/01/2024	09:22	10:32	01:10	6	58,5	734,1	629,2	1182,6
06/02/2024	07:48	08:59	01:11	6	48	602,3	509,0	
06/02/2024	09:05	09:31	00:26	6	33	414,1	955,6	
06/02/2024	09:35	09:55	00:20	6	18	225,9	677,6	
06/02/2024	09:58	10:18	00:20	5	17	213,3	640,0	

Continuação Anexo A.

Diminuição do nível do tanque de retorno do condensado								
Dia	Hora Inicial	Hora Final	Δt	Pressão (kgf/cm ²)	Diminuição (cm)	Vol. Util. (L)	Q (L/h)	Média (L/h)
06/02/2024	10:22	11:22	01:00	6	49	614,9	614,9	
06/02/2024	11:22	12:00	00:38	5	30	376,4	594,4	
06/02/2024	12:03	13:19	01:16	4	46	577,2	455,7	
06/02/2024	13:25	15:29	02:04	6	57	715,3	346,1	
06/02/2024	15:30	16:26	00:56	6	60	752,9	806,7	
06/02/2024	16:26	17:26	01:00	4	16	200,8	200,8	580,1
07/02/2024	07:39	08:10	00:31	6,5	46	577,2	1117,2	
07/02/2024	08:10	08:47	00:37	6,5	24	301,2	488,4	
07/02/2024	08:50	09:56	01:06	6	99	1242,3	1129,3	
07/02/2024	10:02	10:59	00:57	6	44	552,1	581,2	
07/02/2024	11:03	13:06	02:03	4	75	941,1	459,1	
07/02/2024	13:15	16:25	03:10	5	94	1179,5	372,5	
07/02/2024	16:26	17:21	00:55	4	14	175,7	191,6	619,9

Fonte: Autor, (2024).

ANEXO B – Tabela do uso de lenha para abastecimento da caldeira

Uso de lenha para abastecimento da caldeira				
Dia	Hora	Pressão (kgf/cm ²)	Volume Atual (m ³)	Volume Utilizado (m ³)
24/01/2024	04:00	0	3,75	-
24/01/2024	07:50	3	3,45	0,30
24/01/2024	08:57	5	3,24	0,21
24/01/2024	10:13	6	3,02	0,23
24/01/2024	11:23	4	2,97	0,04
25/01/2024	07:40	4,5	1,53	1,44
25/01/2024	07:40	4,5	1,53	2,22
25/01/2024	09:30	5	4,87	-
25/01/2024	16:45	4	3,41	1,46
26/01/2024	11:01	6	2,78	0,63
29/01/2024	07:38	4,5	2,24	0,54
29/01/2024	09:55	4,5	4,74	-
30/01/2024	07:45	6	3,70	1,04
30/01/2024	17:22	6	1,75	1,95
31/01/2024	08:49	6	0,94	0,82
31/01/2024	11:30	6	4,87	-
31/01/2024	17:10	5	4,14	0,73
05/02/2024	15:15h	5	5,76	-
05/02/2024	17:29	5	5,28	0,48
06/02/2024	07:50	6	3,66	1,62
07/02/2024	07:36	6,5	1,07	2,60
07/02/2024	11:00	5	0,50	0,57
07/02/2024	12:00	5	4,02	-
07/02/2024	16:30	4	3,24	0,78
08/02/2024	11:15h	6	5,76	-
09/02/2024	07:58	5	4,38	1,38
09/02/2024	15:13	0	3,66	0,72
14/02/2024	07:44	5	2,80	0,86
14/02/2024	15:50	5	4,92	-
16/02/2024	07:41	5	1,85	3,07

Continuação Anexo B.

Uso de lenha para abastecimento da caldeira				
Dia	Hora	Pressão (kgf/cm ²)	Volume Atual (m ³)	Volume Utilizado (m ³)
19/02/2024	08:00	5	3,60	-
21/02/2024	07:10	4	1,98	1,62
21/02/2024	10:00	5	3,94	-
22/02/2024	08:03	5	2,43	1,51
22/02/2024	11:10	5	3,54	-

Fonte: Autor, (2024).