

ESTUDO PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UMA CALDEIRA EM HOSPITAL DE MÉDIO PORTE

Emanuel Cella Winckler¹, Maurício Rodrigues Policena²,
Emerson dos Santos Passari³

Resumo: Os hospitais utilizam vapor saturado em diversas aplicações como no cozimento de alimentos, desinfecção, esterilização e aquecimento. As caldeiras são usadas no ambiente hospitalar para redução de custos com energia elétrica no aquecimento da água. O objetivo do trabalho foi estudar a implantação de uma caldeira flamotubular para suprir demandas de vapor e água aquecida em um hospital com 100 leitos. O dimensionamento térmico seguiu o método do calor introduzido na câmara de combustão e a teoria dos trocadores de calor. No desenvolvimento, foram realizadas entrevistas e visitas ao hospital referido, levantados dados de consumo de vapor e água aquecida em diferentes temperaturas. Foi calculado o calor trocado e realizado o dimensionamento térmico da câmara de combustão com o cálculo iterativo das temperaturas dos gases de exaustão. Como resultados, no aquecimento da água aferiu-se uma vazão necessária de 300 kg/h, considerando uma expansão de até 50% das atividades do hospital. A caldeira flamotubular projetada consome cerca de 26,8 m³/h de gás natural, produzindo 252,6 kW de calor, trocado em seus 11,21 m² de área superficial, com vapor saturado a 151° C de temperatura e 5 bar de pressão.

Palavras-chave: implantação de caldeira; hospital; dimensionamento térmico; trocadores de calor; vapor saturado.

1 INTRODUÇÃO

A utilização do vapor como um fluido de energia abundante, desempenha um papel crucial em variados segmentos industriais em escala global. Sua versatilidade e eficácia o tornam um recurso valioso, amplamente

1 Engenheiro mecânico pelo Instituto Federal Sul-rio-grandense – Campus Passo Fundo – Analista na Ezata Industrial - emanuelcella@hotmail.com

2 Doutor em Engenharia Mecânica – Professor do Instituto Federal Sul-rio-grandense – Campus Passo Fundo - mauriciopolicena@ifsul.edu.br

3 Mestre em Engenharia Mecânica - Professor do Instituto Federal do Rio Grande do Sul – Campus Ibirubá - emersonpassari@gmail.com

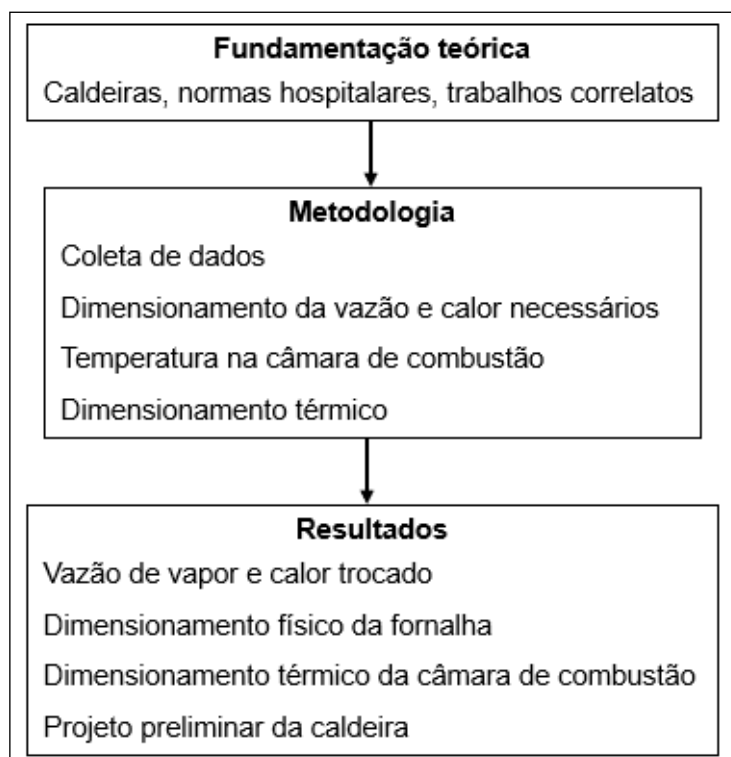
empregado em processos de cocção, desinfecção e aquecimento. Tal importância transcende para o âmbito hospitalar, onde o vapor se torna fundamental em diversas operações, desde a esterilização de instrumentos cirúrgicos até o aquecimento de espaços e a execução de atividades essenciais, como o preparo de alimentos, a higienização de roupas e o fornecimento de água aquecida para banhos dos pacientes (Otter *et al.*, 2009; Whitcher, 1975).

A necessidade de água aquecida para as operações hospitalares torna-se notória, abrangendo funções primordiais, como a preparação de refeições, na lavanderia, higiene dos pacientes e desinfecção de equipamentos médicos. Contudo, à medida que a necessidade por vapor e água aquecida aumentam, a utilização de eletricidade torna-se uma opção economicamente dispendiosa (Loaiza-Pereira, 2020).

Nesse cenário, as caldeiras são uma alternativa confiável e economicamente vantajosa para a geração de vapor e aquecimento de água em ambientes hospitalares. Com uma história consolidada, elas são equipamentos para aquecimento industrial, desenvolvidas desde o século XVIII, respaldadas por normas internacionais de segurança e operação, como o código da Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME) para Caldeiras e Vasos de Pressão (BPVC - *Boiler and Pressure Vessel Code*), que evoluíram ao longo de um século e com avanços significativos. Atualmente, as caldeiras se beneficiam dos avanços em eficiência energética, variedade de combustíveis e aprimoramentos em segurança (Urcia; Sandoval, 2018).

Dessa forma, o presente trabalho se propõe a explorar a utilização de caldeiras flamotubulares em ambientes hospitalares, com uma análise sobre o projeto e metodologias de dimensionamento térmico. A análise se fundamenta em dados de um hospital com capacidade de 100 leitos. O tema é relevante e visa suprir a lacuna de estudos voltados às ciências térmicas no cenário brasileiro. A seqüência do trabalho segue o fluxograma da Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma de desenvolvimento do artigo



Fonte: Elaborado pelos autores.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As caldeiras são divididas basicamente em aquatubulares, flamotubulares, mistas e elétricas. Nas flamotubulares a câmara de combustão é o local onde o combustível é queimado, liberando gases do processo de combustão que passam por dentro dos tubos, presos por espelhos. Os tubos podem fornecer uma, duas ou três passagens dos gases. Ao redor desses tubos, em uma casca fechada (vertical ou horizontal), fica a água a ser aquecida que não deve preencher totalmente este recipiente, sendo que o espaço vazio até o topo, deve ser preenchido com o vapor gerado (Bazzo, 1995). O dimensionamento de caldeira flamotubulares compreende equações de termodinâmica e transferência de calor (Annaratone, 2008; Çengel; Ghajar, 2012; Van Wylen; Sonntag; Borgnakke, 1997).

No processo de desinfecção hospitalar, o Ministério da Saúde (2001) define que um material está estéril quando a probabilidade de haver um microrganismo nele é 1 em 1.000.000 (um em um milhão). No ambiente hospitalar é necessário evitar infecções nos procedimentos diários realizados, visto que

esses são evasivos e expõem o corpo humano a perigos como bactérias, fungos e vírus. Os artigos hospitalares são classificados em 3 categorias, como: críticos, semicríticos e não-críticos. Os críticos entram em contato com áreas estéreis do corpo humano e se estiverem contaminados, o risco de infecção é muito grande, por isso devem ser esterilizados. O método mais comum e eficiente de esterilização nos hospitais é a autoclavagem que usa vapor saturado a uma temperatura superior a 121 °C sob um tempo de exposição pré-determinado.

Alguns estudos sobre as caldeiras flamotubulares: compreendem a variação de cargas térmicas para um mesmo volume da fornalha a fim de determinar a tensão térmica e a resistência de projeto (Ovchinnikova *et al.*, 2019). Consideram um modelo para análise do desempenho da caldeira, com informações sobre o desempenho dinâmico em condições nominais de operação e comportamento transitório quando um parâmetro foi alterado. O modelo proposto pôde ser facilmente implementado e auxiliar no treinamento de futuros operadores (Ortiz, 2011). A transferência de calor em uma caldeira 4 passagens dos gases de combustão foi investigada numericamente. O programa simulou as densidades de fluxo de calor e as temperaturas de parede correspondentes para diferentes condições operacionais entre os gases quentes e as paredes internas dos tubos. O modelo foi comparado com os dados operacionais da caldeira, com proximidade nos valores (Rahmani; Trabelsi, 2014).

Apesar de sua relevância, o tema do projeto de caldeiras flamotubulares é pouco explorado no cenário brasileiro. Cruz *et al.* (2022), analisaram a eficiência térmica de uma caldeira que operava com toras de madeira em um laticínio. As propostas de melhoria foram baseadas nas condições de operação e manutenção, o que resultou em um rendimento de mais de 74%. Jorge, Mazzarotto e Rocha (2019), avaliaram a emissão de monóxido de carbono (CO) em uma caldeira alimentada com gás natural em um período de 3 anos. Os resultados das análises indicaram que o equipamento está conforme a resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA).

3 METODOLOGIA

No processo para implantação de uma caldeira do tipo flamotubular, primeiro foram coletados os dados de consumo de vapor. Após, é apresentado o equacionamento da vazão, o calor necessário, o dimensionamento térmico da câmara de combustão com o cálculo iterativo das temperaturas dos gases de exaustão. As equações seguem a metodologia proposta por Annaratore (2008).

3.1 Coleta de dados

Foram feitas visitas *in loco* para realizar levantamentos do consumo de vapor e água aquecida, em um hospital com capacidade máxima de 100 leitos. A esterilização e desinfecção é realizada no Centro de Materiais Estéreis

(CME). Há a necessidade de fornecimento de vapor a uma temperatura superior a 121° C para a esterilização via autoclaves do instrumental cirúrgico e materiais hospitalares com capacidade infecciosa. As autoclaves funcionam continuamente durante o dia.

Em relação à rotina dos banhos diários, as informações obtidas com os funcionários do hospital indicam que o tempo médio é de 12 minutos, com vazão dos chuveiros de 15 L/min. A Empresa Brasileira de Serviços Hospitalares (2022) indica que a temperatura do banho não deve ultrapassar 40° C. As informações obtidas na cozinha indicam que são preparadas 200 refeições por dia utilizando um total de 200 litros de água aquecida. Os dados dos equipamentos, capacidades e temperaturas estão presentes na Tabela 1.

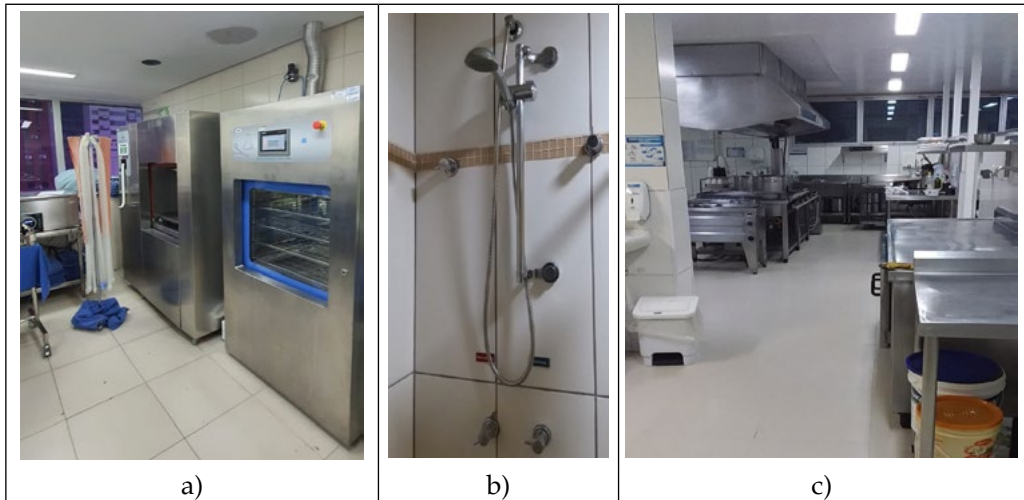
Tabela 1 - Equipamentos do setor de CME no hospital analisado

Equipamentos	Volume	Temperatura
2 Autoclaves	490 L	Vapor: 121 - 134° C
1 Autoclave	310 L	Vapor: 121 - 134° C
2 Termodesinfectoras	270 L	Água: 60 – 93° C
1 Limpadora Ultrassônica	35 L	Água: 40 – 60° C

Fonte: Elaborado pelos autores.

A água aquecida é utilizada em quatro locais: nas termodesinfectoras (Figura 2a) que realizam aproximadamente 8 ciclos completos por dia na desinfecção de artigos que não são críticos; nos chuveiros (Figura 2b) para banho diário dos pacientes; na cozinha (Figura 2c) para preparação dos alimentos; e na lavanderia para limpeza das roupas de cama.

Figura 2 - Equipamentos do hospital analisado: a) termodesinfectoras; b) chuveiro; c) cozinha

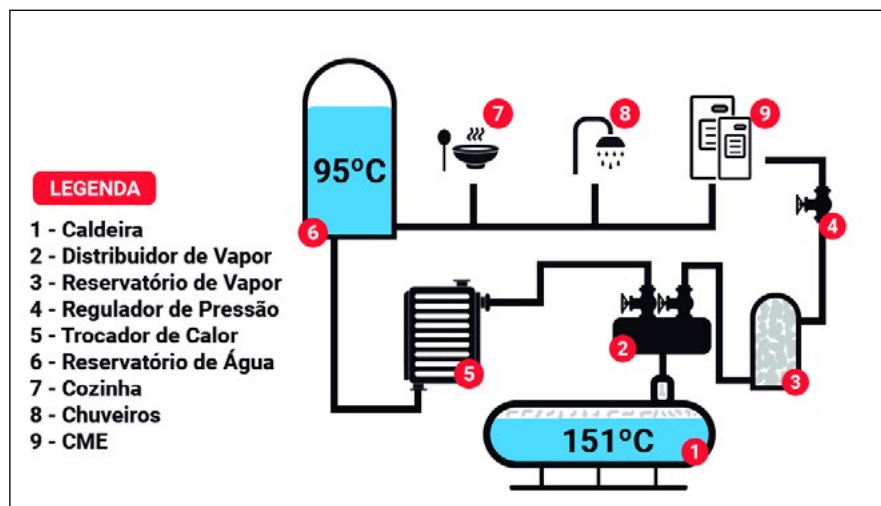


Fonte: Elaborado pelos autores.

3.2 Distribuição de vapor e água aquecida

Para a distribuição de vapor e da água aquecida da caldeira até os pontos de consumo, pensou-se em um sistema de alimentação de todos os setores a partir de um reservatório de água a temperatura de 95° C. Ela é distribuída conforme a necessidade dos setores, para temperaturas menores que 95° C a água aquecida é misturada com a da rede que está na temperatura ambiente, considerada 5° C (temperatura mínima do inverno conforme a cidade onde o hospital está instalado). A água do reservatório é aquecida mediante um trocador de calor, utilizando-se do vapor produzido na caldeira. A Figura 3 apresenta o processo de distribuição.

Figura 3 - Esquema de distribuição da água aquecida e vapor no hospital



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para o dimensionamento da caldeira é necessária a vazão mássica de vapor. Inicialmente, calculou-se o volume de água aquecida necessária para o dia, e dividiu-se pelas horas de funcionamento da caldeira. Assim, obteve-se a vazão de água aquecida para distribuição nos chuveiros, CME e cozinha.

3.3 Dimensionamento e Equações

3.3.1 Vazão e calor requerido

Çengel e Ghajar (2012), afirmam que em um trocador de calor, a magnitude do fluxo de calor do fluido frio precisa ser a mesma do fluido quente, considerando um isolamento ideal. Assim utiliza-se a Equação 1 para calcular o valor do fluxo térmico.

$$(\dot{m} \cdot h)_A = (\dot{m} \cdot h)_B = \dot{Q} [W] \quad (1)$$

No estado termodinâmico “A” estão os valores requeridos por setor, com as temperaturas determinam-se as entalpias (h). O estado B considera o consumo no reservatório e a vazão mássica do reservatório, (\dot{m}_B) é a incógnita do dimensionamento.

O calor latente de vaporização corrigido é expresso por “ h_{fg}^* ” e leva em consideração a transferência adicional pela película, que nesse caso é superior em 10% ao calor latente de vaporização sem correção.

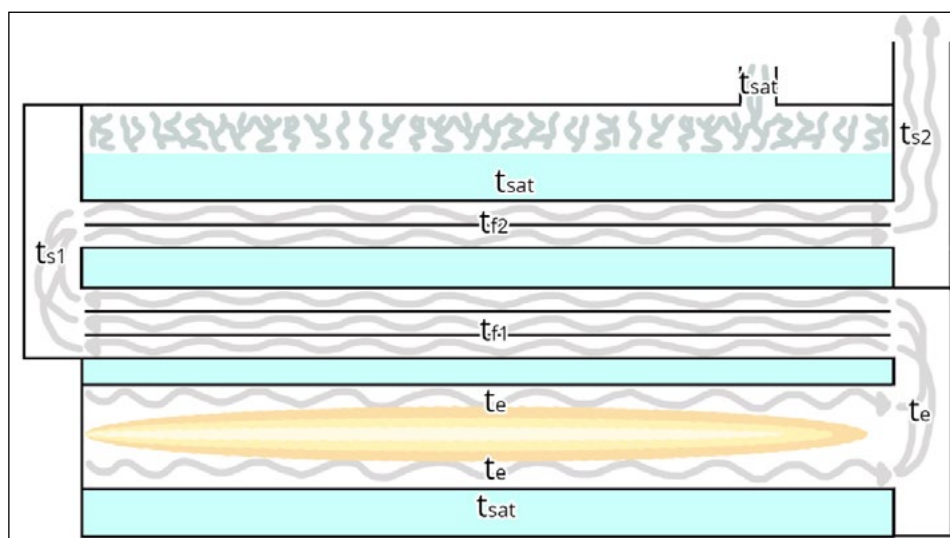
Calcula-se o calor requerido, através da Equação 2, para o processo de aquecimento (\dot{Q}_{Req}) e evaporação da água, considerando também o rendimento da caldeira (η).

$$\dot{Q}_{Req} = \frac{\dot{m}_{tot} \times (h_{fg} + (h_{151^{\circ}C} - h_{20^{\circ}C}))}{\eta_r} \quad (2)$$

3.3.2 Temperatura na câmara de combustão

Para vencer as perdas de carga e suprir as demandas dos setores, a caldeira foi projetada para operar a 5 bar de pressão, com 3 passagens, queimando gás natural na primeira, aproveitando os gases da combustão na segunda e terceira passagens (Figura 4). Na primeira passagem de tubos, o calor é trocado na temperatura de saída da câmara de combustão (t_e), na segunda é trocado na temperatura média logarítmica entre " t_e " e a temperatura de saída da segunda passagem (t_{s1}), enquanto na terceira o calor é trocado na temperatura média logarítmica entre " t_{s1} " e " t_{s2} ".

Figura 4 - Esquema de funcionamento da caldeira



Fonte: Elaborado pelos autores.

A temperatura na saída da câmara de combustão (t_e) é determinada com a Equação 3 pelo método de Orrok corrigido, adequado para caldeiras flamotubulares, segundo Bazzo (1995).

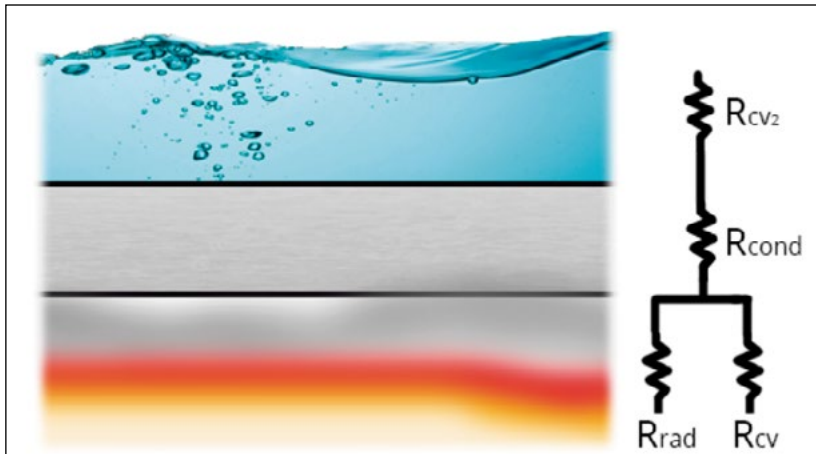
$$t_e = 20 + \frac{1000}{\frac{2.52 \left(\frac{H_n}{G_v}\right)^{0.15}}{\sqrt{\dot{Q}_{req}/S_f}} + \frac{c_p}{(H_n/G_v)}} \quad (3)$$

Encontra-se o calor específico (c_p) de maneira iterativa, já que este varia conforme a temperatura de saída da câmara (t_e). Van Wylen *et al.* (1997), indicam equações para o calor específico de diferentes gases em função da temperatura. Para os gases da combustão, multiplica-se seu calor específico pela parcela na mistura, em massa.

3.3.3 Dimensionamento térmico da câmara de combustão

Para o dimensionamento térmico da câmara de combustão, conforme a metodologia adotada, a transferência de calor na fornalha se dá quase inteiramente pela radiação emitida pela queima do combustível (R_{rad}), com uma pequena parcela correspondente a convecção (R_{cv}), tem-se a resistência condutiva do tubulão (R_{con}) e a resistência convectiva da água em ebulição (R_{cv2}). Essas 2 últimas resistências são desprezíveis devido aos valores muito pequenos, ficando a rede de resistências dependente apenas da convecção interna inerente ao fluxo de gases de combustão, conforme apresentado na Figura 5 (Annaratone, 2008).

Figura 5 - Rede de resistências térmicas na câmara de combustão



Fonte: Elaborado pelos autores.

A troca térmica por radiação (\dot{Q}_r) na câmara de combustão é calculada com a Equação 4. Ela considera a constante de Stefan Boltzman (σ) para a radiação em corpos negros e a emissividade do corpo (ε).

$$\dot{Q}_r = \sigma \times \varepsilon \times t_g^4 \quad (4)$$

O calor oriundo da convecção pode ser calculado utilizando a equação geral dos trocadores de calor (Equação 5), sendo “R” a resistência térmica global.

$$\dot{Q} = \frac{1}{R} \times S \times \Delta T \quad (5)$$

O número de Reynolds (Re) pode ser calculado com a Equação 6, em função da massa específica do gás (ρ_g), da velocidade do gás (V_g), do diâmetro interno do tubo (d_i) e da viscosidade dinâmica do gás (μ_g).

$$Re = \frac{\rho_g \times V_g \times d_i}{\mu_g} \quad (6)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Vazão de vapor e calor trocado

Com as informações de funcionamento diário dos setores, tais como volume consumido, tempo de funcionamento, vazão de funcionamento e quantidade de equipamentos calculou-se as demandas dos setores, e as respectivas temperaturas (Equação 1), considerando o sistema fechado e em regime permanente.

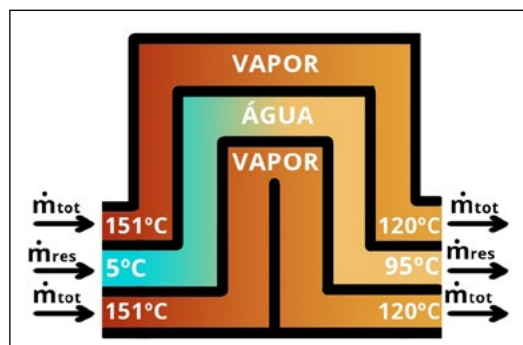
Os valores de vazão foram calculados e são apresentados na Tabela 2. O valor de 868 kg/h representa a vazão mássica de água aquecida. Dividindo-se tal valor por 3600, obtém-se a vazão mássica por segundo que é aproximadamente 0,24 kg/s. A água do reservatório será aquecida usando o próprio calor da caldeira (Figura 6).

Tabela 2 - Vazões do reservatório

Símbolo	Destino	Vazão "A" [Temperatura]	Consumo reservatório (B)
\dot{m}_{ban}	Banhos	1262 kg/h [40° C]	557 kg/h
\dot{m}_{coz}	Cozinha	25 kg/h [95° C]	25 kg/h
\dot{m}_{ter}	Termodesinfectoras	265 kg/h [93° C]	271 kg/h
\dot{m}_{ult}	Limpadoras ultrassônicas	23 kg/h [60° C]	15 kg/h
\dot{m}_{res}	Vazão total do reservatório		868 kg/h

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 6 - Esquema para aquecimento da água do reservatório



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para o vapor saturado que alimenta as autoclaves, o fabricante Tuttnauer (2022) indica 35 kg/h para autoclaves de 310 litros a 500 litros, com isso a demanda por vapor para as 3 autoclaves foi de 105 kg/h. A caldeira foi dimensionada considerando a expansão das atividades do hospital em até 50%. Por fim, exibe-se o resultado dos cálculos na Tabela 3.

Tabela 3 - Vazão de vapor requerida e calor trocado

Símbolo	Descrição	Valor	Unidade
h_{fa}	Calor latente de vaporização	2203	kJ/kg
h_{fg}^*	Calor latente de vaporização corrigido	2419	kJ/kg
\dot{Q}_{frio}	Calor trocado pelo fluido aquecido	90	kW
\dot{m}_{vcm}	Vazão de vapor para aquecimento	90	kg/h
\dot{m}_{vp}	Vazão de vapor autoclaves	105	kg/h
f_e	Fator de expansão	1,5	adimensional
\dot{m}_{tot}	Vazão de vapor total	292	kg/h

Fonte: Elaborado pelos autores.

No dimensionamento da caldeira a vazão mássica de vapor será considerada 300 kg/h, por ser um valor comercial, encontrada em catálogos.

4.2 Dimensionamento físico da fornalha

Devido à baixa demanda de vapor e pressão, o modelo de caldeira flamotubular é o mais adequado pelo seu menor valor de compra, menor espaço ocupado, manutenção facilitada e custo de operação reduzido. Calculou-se o calor requerido, através da Equação 2, para o processo de aquecimento (\dot{Q}_{Req}) e evaporação da água, considerando um rendimento de 80% da caldeira (η_p).

Como combustível optou-se por gás natural devido ao pequeno espaço disponível no hospital. O gás natural fornecido pela distribuidora brasileira Copergás (2022), possui um poder calorífico superior (PCS = 9205 kcal/m³ a 20° C e 1 atm, tal valor equivale a 38510 kJ/kg). Para o dimensionamento da câmara de combustão o PCS (H_n) é requerido. Para calcular a vazão de combustível, divide-se o calor requerido pelo PCS do gás natural. O tamanho da câmara de combustão foi dimensionado conforme a carga volumétrica (C_v) e um fator que depende do tipo de fornalha. Flamotubulares costumam ter valores entre 900 e 1600 kW/m³. O comprimento da fornalha (L) foi fixado em 1,6 m. Os valores são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados calculados para a combustão e a fornalha

Símbolo	Descrição	Valor	Unidade
\dot{Q}_{Req}	Calor requerido	287	kW
\dot{m}_{cb}	Vazão de combustível na fornalha	26,8	m ³ /h
d	Diâmetro interno da fornalha	0,48	m
S_f	Área superficial interna da fornalha	2,41	m ²
A_{tv}	Razão teórica de ar	9,81	m ³ /m ³
G_v	Razão de gases por massa	11,85	kg/kg

Fonte: Elaborado pelos autores.

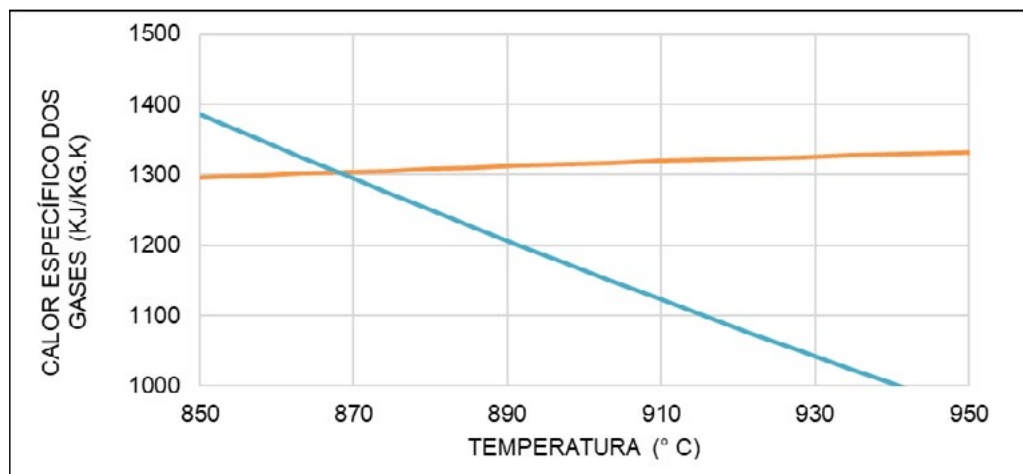
Com a geometria e o tipo de combustível definidos, calculam-se os parâmetros estequiométricos da caldeira: razão de ar teórica necessária a combustão completa (A_{tv}) e a razão de gases de combustão por kg de combustível (G_v). A área superficial de troca térmica na fornalha ($S_f = 2,41 \text{ m}^2$) corresponde a área de um cilindro ($S = \pi dL$).

4.3 Dimensionamento térmico

4.3.1 Câmara de combustão

A Figura 7 apresenta o calor específicos dos gases em função da temperatura. A linha azul é o calor específico isolado da Equação 3, a linha laranja representa o calor específico calculado via porcentagem de massa. O ponto de cruzamento dessas funções é a temperatura de saída da câmara ($t_e = 866^\circ \text{ C}$). O calor trocado por radiação foi calculado com a Equação 4. Assim, o calor convectivo trocado na câmara de combustão compreende a porção convectiva na segunda e terceira passagem de tubos e foi calculado com a Equação 5, o que torna necessário conhecer a temperatura de saída das passagens (Batrakov, Mikhailov; Ignatov, 2018). Determinam-se essas temperaturas por processos iterativos, nesse trabalho foi construído um algoritmo no *software Octave* para realizar tais iterações.

Figura 7 - Convergência das equações térmicas



Fonte: Elaborado pelos autores.

Em sequência, calculou-se coeficiente de convecção interna para um fluxo turbulento no interior de um tubo circular seguindo a metodologia de Çengel e Ghajar (2012). O fluxo é turbulento, pois o número de Reynolds calculado com a Equação 6 foi superior a 2100. A Tabela 5 apresenta os valores do calor trocado na câmara de combustão.

Tabela 5 - Calor trocado na fornalha

Símbolo	Descrição	Valor	Unidade
t_e	Temp. de saída dos gases na fornalha	866	°C
ε	Emissividade da queima de gás natural	0,75	adimensional
\dot{Q}	Calor trocado por radiação	175,67	kW
q_{cv}	Calor trocado por convecção	4,88	kW
α_{cv}	Coef. de convecção interna da fornalha	2,83	W/m ² K
R_e	Reynolds do fluxo interno	4805	adimensional

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.3.2 Segunda e terceira passagem dos gases

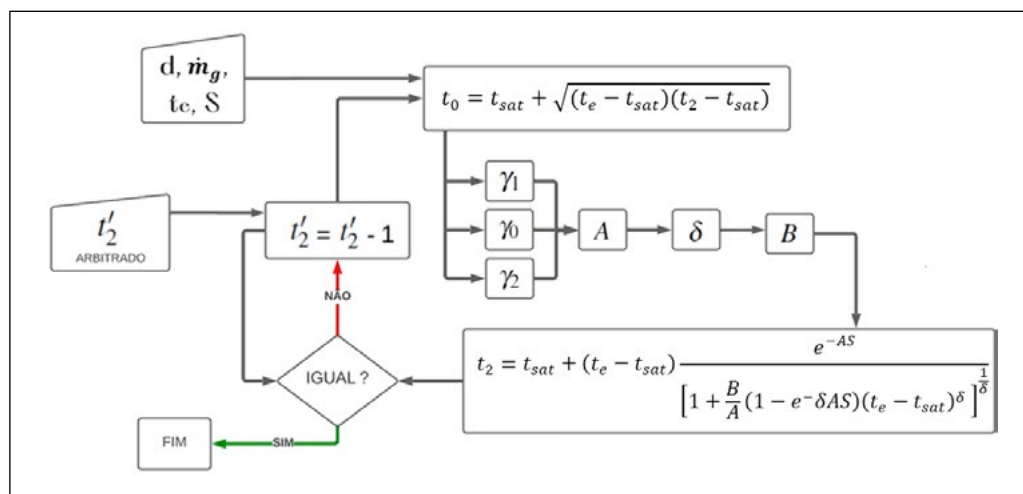
O cálculo da troca térmica na segunda e terceira passagem requer o estabelecimento de algumas condições relacionadas ao design e configuração

do feixe tubular: o diâmetro interno dos tubos (d_2), a quantidade deles (n_{tub}) e a sua divisão entre a segunda e a terceira passagem (δ).

Essas características iniciais determinam a eficiência da troca térmica. Para o diâmetro e a quantidade de tubos, seguiu-se os valores indicados por Annaratone (2008), que variam segundo a potência térmica da caldeira. Adotou-se 50 tubos no total com uma distribuição de 56% deles na segunda passagem (28 tubos) e 44% na terceira (22 tubos). O diâmetro interno dos tubos foi considerado 35 mm para as 2 passagens.

A lógica da programação é exposta no fluxograma da Figura 8. Primeiro, alimenta-se o programa com os dados previamente calculados, usados no cálculo das constantes, como o diâmetro do tubo (d), a área superficial total (S), a massa de gases (\dot{m}_g) e a temperatura de saída da câmara de combustão (t_e). Arbitra-se uma temperatura inicial (t'_2), inferior à temperatura de saída dos gases na câmara de combustão. Após, calcula-se a temperatura média de troca (t_0) e as constantes "A", " δ " e "B". Por fim, realizam-se incrementos negativos até o valor arbitrado no começo para " t'_2 " convergir com o calculado na equação de " t_2 ", apresentada no final do fluxograma.

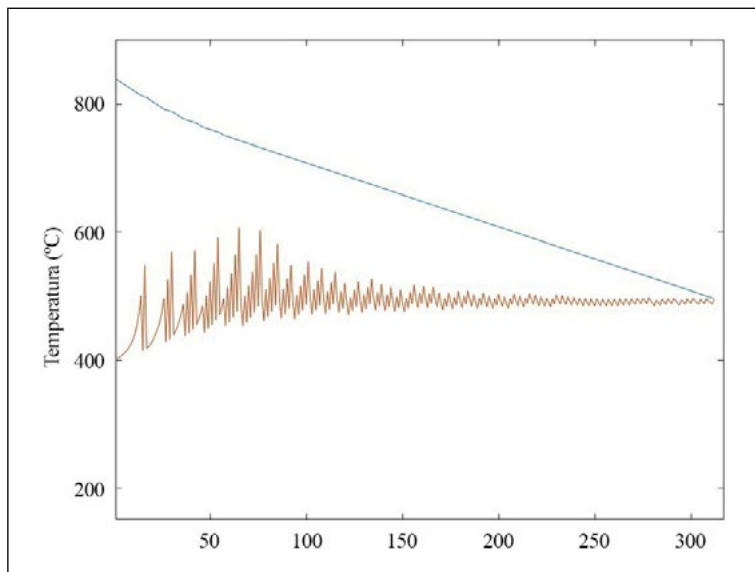
Figura 8 - Lógica de programação para o cálculo do "te"



Fonte: Elaborado pelos autores.

Este processo foi realizado para as duas passagens dos gases. Observe a convergência da segunda passagem (Figura 9) e terceira passagem (Figura 10). Em ambos os casos, a temperatura é representada no eixo das ordenadas e o número de iterações, no eixo das abscissas. Na segunda passagem, o valor de temperatura convergiu para 495° C, com uma área superficial de 4,93 m² de troca térmica.

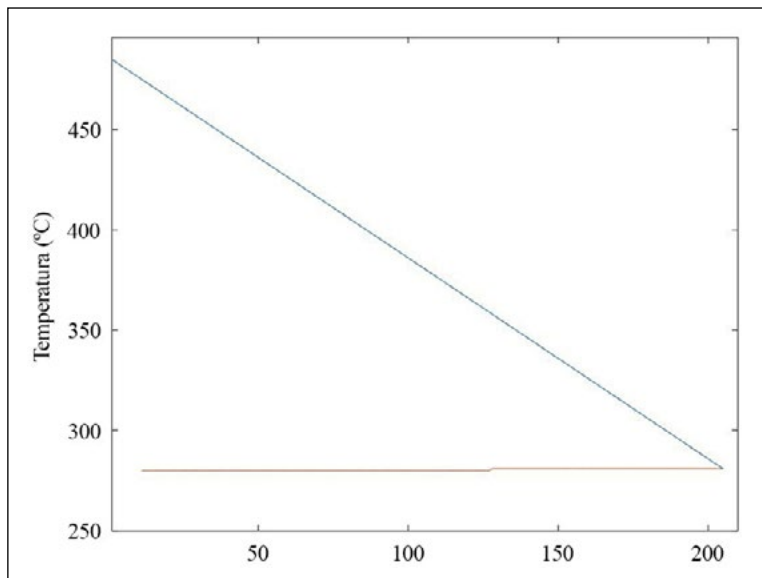
Figura 9 - Convergência da temperatura da segunda passagem



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na terceira passagem, a temperatura de convergência foi de 281° C e uma área superficial de 3,87 m².

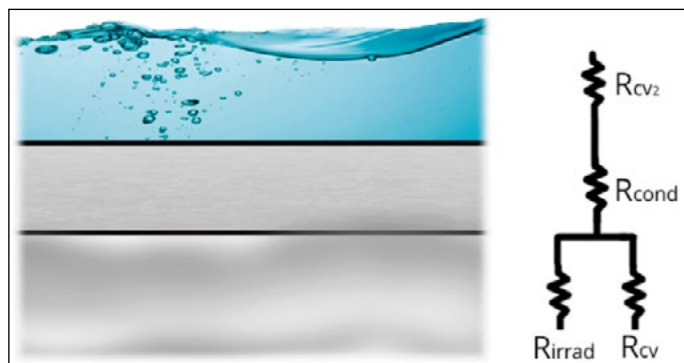
Figura 10 - Convergência da temperatura da segunda passagem



Fonte: Elaborado pelos autores.

A rede de resistências das passagens dos gases é apresentada na Figura 11. Tem-se a resistência imposta pelo calor irradiado (R_{irrad}) em função do dióxido de carbono (CO_2) e pelo vapor d'água (H_2O), somada a resistência de convecção (R_{cv}), por estarem em paralelo. Novamente, as resistências de convecção da água em ebulição (R_{cv_2}) e condutiva (R_{cd}) são desprezíveis, assim como na análise da câmara. Usam-se os dados da Tabela 5 em conjunto com a Equação 5, para calcular a parcela convectiva da segunda e terceira passagem. A irradiação gasosa é calculada com base na pressão parcial de cada gás na mistura e sua temperatura, em Kelvin (Bazzo, 1995). A pressão parcial para o dióxido de carbono e para o vapor d'água, foi determinada com base na estequiometria da combustão, considerando o percentual de hidrogênio e carbono, em massa, presentes no combustível. Para o gás natural brasileiro, $H = 0,748$ e $C = 0,228$. Assim, a pressão parcial de CO_2 calculada foi de 0,116 atm e 0,210 atm para H_2O .

Figura 11 - Rede de resistências na câmara de combustão



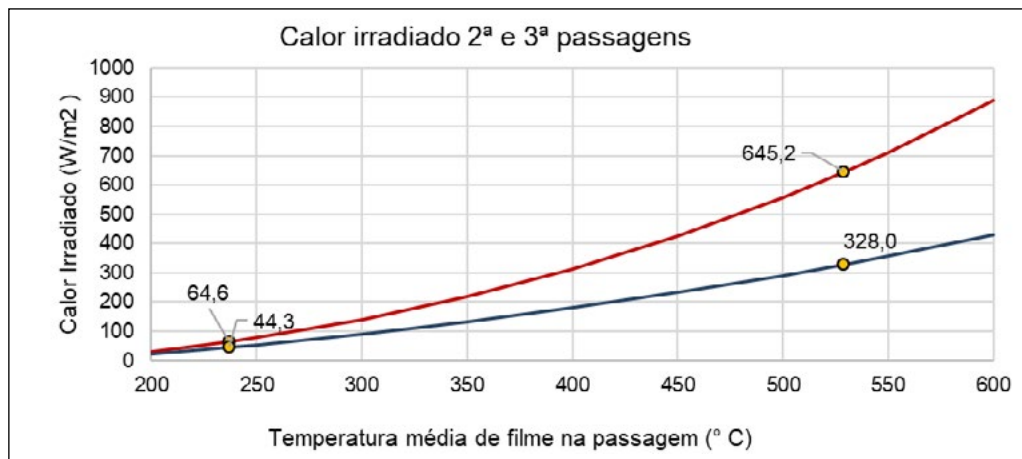
Fonte: Elaborado pelos autores.

Para determinar o calor irradiado por cada gás, foram considerados o comprimento médio do feixe ($x_f = 90\%$ do diâmetro interno do tubo) e a absorvidade das superfícies ($B = 0,95$ para caldeira flamotubular).

Annaratone (2008), afirma que a temperatura externa da parede (T_w) para o feixe tubular é até 20°C superior à temperatura de saturação do fluido aquecido (Figura 12). Ao variar apenas a temperatura de filme obtém-se 2 curvas do calor irradiado, uma para o dióxido de carbono (vermelho) e outra para o vapor d'água (azul). A temperatura do filme pode ser calculada fazendo-se a média entre as temperaturas de saída da câmara (866°C) e da 2ª passagem (495°C) menos a temperatura do vapor (151°C). Os valores pontuais superiores se dão na segunda passagem ($645,2\text{ W/m}^2$ para CO_2 e $328,0\text{ W/m}^2$ para H_2O) para uma temperatura de filme de 529°C . Os valores inferiores para o calor irradiado, são na terceira passagem ($64,6\text{ W/m}^2$ para CO_2 e $44,3\text{ W/m}^2$ para H_2O). A temperatura de filme foi calculada considerando a média

entre as temperaturas de saída da 2ª passagem (495° C) e 3ª passagem (281° C), descontando a temperatura do vapor (151° C), resultando em 237° C.

Figura 12 - Calor irradiado pelos gases, em função da temperatura



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 6 - Potência térmica da caldeira projetada

Símbolo	Descrição	Valor
$q_{H_2O_2}$	Calor total irradiado pelo H ₂ O	392 W/m ²
$q_{CO_2_2}$	Calor total irradiado pelo CO ₂	710 W/m ²
q_{cv_2}	Calor convectivo, 2ª passagem	46,6 kW
q_{cv_3}	Calor convectivo, 3ª passagem	18,6 kW
q_1	Calor na câmara de combustão	180,55 kW
q_2	Calor total trocado na 2ª passagem	53,10 kW
q_3	Calor total trocado na 3ª passagem	18,98 kW
q_{tot}	Potência térmica total	252,6 kW

Fonte: Elaborado pelos autores.

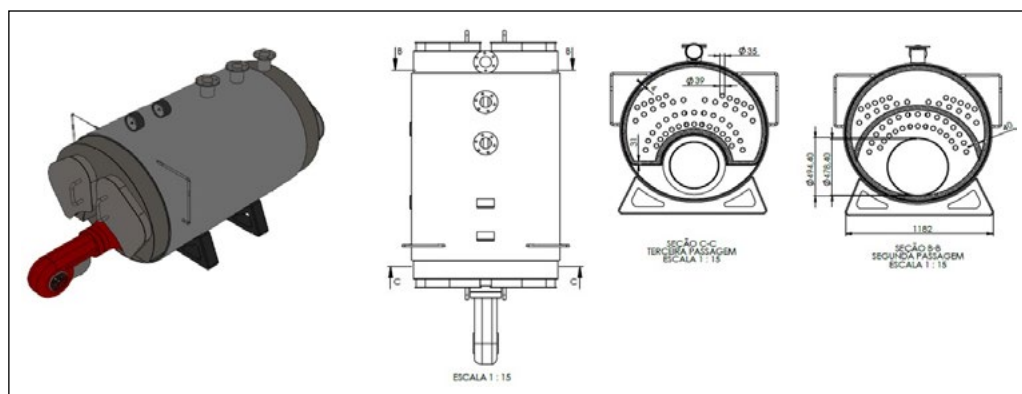
O total de calor na segunda ($q_2 = 53,10$ kW) e terceira passagem ($q_3 = 18,98$ kW) é apresentado na Tabela 6, assim como o transferido em toda a caldeira, sendo esse valor a potência térmica teórica de projeto (252,6 kW). Dessa forma, a área total de troca térmica corresponde soma das áreas da

câmara de combustão (2,41 m²), área dos tubos de 2^a passagem (4,93 m²) e 3^a passagem (3,87 m²) o que totaliza 11,21 m² de área de troca térmica.

4.4 Projeto preliminar da caldeira flamotubular

Com as dimensões calculadas modelou-se a caldeira dimensionada (Figura 13). Trata-se de um projeto preliminar, pois não cobre a parte de automação, tiragem, processos de fabricação, escolha de queimadores, espaço físico, custos, lista de materiais e análise de riscos. Observa-se a configuração dos feixes tubulares da segunda passagem, contendo os 28 tubos de aço carbono, com 35 mm de diâmetro. Na terceira passagem, tem-se 22 tubos da mesma bitola.

Figura 13 - Projeto preliminar da caldeira flamotubular



Fonte: Elaborado pelos autores.

Há dispositivos de segurança obrigatórios segundo a NR-13 (2020), como manômetros, indicadores de nível da água e válvulas de segurança. Cada um destes dispositivos tem redundância, para no caso de mau funcionamento de um deles. A caldeira tem três saídas flangeadas em sua parte superior, duas para o vapor saturado que será destinado ao hospital e uma para os gases da combustão.

5 CONCLUSÕES

Neste estudo de caso, foram avaliadas as necessidades operacionais de um hospital de 100 leitos, que demanda água aquecida para cozimento, desinfecção e banhos diários, além de vapor para esterilização. Foi analisada a utilização de uma caldeira flamotubular, com um rendimento estimado em torno de 80%, capaz de produzir 300 kg/h de vapor saturado a 151° C de temperatura, 5 bar de pressão e com uma área total de troca térmica de 11,21 m², considerada suficiente para manter o pleno funcionamento do hospital. Essa

avaliação foi feita levando em conta uma projeção de expansão de até 50% em suas atividades, contanto que a operação incluía um reservatório atuando como um “pulmão” para a água aquecida.

O modelo flamotubular apresenta vantagens expressivas em relação ao modelo aquatubular, especialmente em termos de eficiência, menor espaço físico, custo e facilidade de manutenção. O gás natural, escolhido como combustível, possui alto poder calorífico e, por ser mais leve que o ar, facilita a ventilação em caso de vazamento. Além disso, não enfrenta restrições ambientais rigorosas, tornando-se uma alternativa viável à dependência da energia elétrica.

A escolha do tipo de caldeira e do combustível não apenas atende às demandas operacionais atuais do hospital, mas também permite acomodar um aumento nas atividades. Representa uma escolha eficiente, confiável e ambientalmente adequada para as necessidades do hospital. A inclusão de um reservatório térmico otimiza a capacidade operacional, demonstrando uma abordagem abrangente para sustentar as demandas energéticas do hospital. Por fim, contribui para as pesquisas na área de projetos de caldeiras, consolidando conhecimentos para a literatura.

REFERÊNCIAS

ANNARATONE, D. **Steam Generators: description and design**. 1. ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008.

ARAUJO, W.; TEODÓSIO, F.; CAMPOS, P. Study of the inspection of a flamotubular boiler through the codes ASME and NR-13. **ITEGAM-JETIA**. v. 5, n. 19, p. 90-97. 2019.

BAZZO, E. **Geração de Vapor**. 1. ed. Editora da UFSC. 1995.

BATRAKOV, P. A.; MIKHAILOV, A. G.; IGNATOV, V. Y. Fire-tube boiler optimization criteria and efficiency indicators rational values defining. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, p. 012009. 2018.

ÇENGEL, Y.; GHAJAR, A. **Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática**. 4. ed. Editora McGrawHill. 2012.

COPERGÁS. Disponível em: <<https://novo.copergas.com.br>> Acesso em: 27 set. 2022.

CRUZ, M. L. *et al.* Estudo da eficiência energética de uma caldeira flamotubular em uma indústria de laticínios. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**. v. 8, n. 2, p. 14015–01e. 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE SERVIÇOS HOSPITALARES. Disponível em: <<https://www.gov.br/ebserh/pt-br/hospitais-universitarios/regiao-centro-oeste/hc-ufg/comunicacao/noticias/qual-e-a-temperatura-ideal-para-o-banho#:~:text=Segundo%20Camilla%20de%20Barros%20Borges,de%20dores%20musculares%20e%20articulares.>> Acesso em: 20 jun. 2022.

JORGE, G. G.; MAZZAROTTO, A. A. V. S.; ROCHA, M. C. Avaliação das emissões de monóxido de carbono (CO) em uma caldeira flamotubular utilizando gás natural. **Revista Saúde e Meio Ambiente – RESMA**. v. 9, n. 2, p. 84-91. 2019.

LOAIZA-PEREIRA, S. I. **Modelo de gestión de la energía para el sistema de vapor del Hospital San Juan de Dios bajo los criterios de la Norma INTE/ISO 50001**. [Monografia, Licenciatura em Manutenção Industrial]. 2020.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Secretaria de Educação a Distância. Coordenação-Geral das Unidades Hospitalares Próprias do Rio de Janeiro. Divisão de Controle Hospitalar. **Orientações gerais para central de esterilização**, 2001. Disponível em: <<https://bvsm.sau.gov.br>>. Acesso em: 05 out. 2023.

NORMA REGULAMENTADORA 13, de 22 de outubro de 2020. **Condiciona a operação de vasos de pressão e caldeiras**. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/norma-regulamentadora-no-13-nr-13>>. Acesso em: 21 dez. 2022.

ORTIZ, F. J. G. Modeling of fire-tube boilers. **Applied Thermal Engineering**. v. 31, n. 16, p. 3463-3478. 2011.

OTTER, J. A. *et al.* Feasibility of routinely using hydrogen peroxide vapor to decontaminate rooms in a busy United States hospital. **Infection Control & Hospital Epidemiology**. v. 30, n. 6, p. 574-577. 2009.

OVCHINNIKOVA, S. *et al.* Optimizing the temperature stress for the furnace volume of a fire-tube boiler. In: Murgul, V., Pukhkal, V. (eds) International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. EMMFT 2019. **Advances in Intelligent Systems and Computing**, 1259. Springer, Cham. 2019.

RAHMANI, A.; TRABELSI, S. Numerical Investigation of Heat Transfer in 4-Pass Fire-Tube Boiler. **American Journal of Chemical Engineering**. v. 2, n. 5, p. 65-70. 2014.

TUTTNAUER AUTOCLAVES (2022). Disponível em: <<https://tuttnauer.com>>. Acesso em: 22 set. 2022.

URCIA, K. V. R.; SANDOVAL, S. S. **Implementación de un plan de mantenimiento preventivo para incrementar la confiabilidad del sistema de generación de vapor del Hospital Essalud, Chimbote-2018**. [Monografia, Escuela Profesional de Ingeniería Industrial]. 2018.

VAN WYLEN, G.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. 5. ed. Editora Edgard Blücher Ltda. 1997.

WHITCHER, C. E. **Development and evaluation of methods for the elimination of waste anesthetic gases and vapors in hospitals**. US Department of Health, Education, and Welfare, Public Health Service, Center for Disease Control, National Institute for Occupational Safety and Health, Division of Field Studies and Clinical Investigations. 1975.