

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

EDUARDO GUERRA

**ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DE UM QUEIMADOR A GÁS NATURAL POR
RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS EM UM TANQUE DE LAVAGEM DE PEÇAS**

BENTO GONÇALVES

2023

EDUARDO GUERRA

**ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DE UM QUEIMADOR A GÁS NATURAL POR
RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS EM UM TANQUE DE LAVAGEM DE PEÇAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Me. Eng. Marcelo Dall'Onder Michelin

BENTO GONÇALVES

2023

EDUARDO GUERRA

**ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DE UM QUEIMADOR A GÁS NATURAL POR
RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS EM UM TANQUE DE LAVAGEM DE PEÇAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Me. Eng. Marcelo Dall'Onder Michelin.

Aprovado em ___/___/____

Banca Examinadora

Prof. Me. Eng. Marcelo Dall'Onder Michelin
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Eng. Matheus Poletto
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Eng. Giovani Dambros Telli
Universidade de Caxias do Sul

RESUMO

Queimadores são equipamentos utilizados para transferir calor para um objeto através de chama. Estes podem ser alimentados através de tubulações de gás, tanto natural quanto Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), ou de outros combustíveis como óleo e gasolina, a depender da necessidade da aplicação e fatores econômicos/financeiros. O funcionamento de um queimador parte de um princípio básico de combustão. A mistura entre oxigênio, combustível e faísca, proveniente de uma ignição, promovem o acendimento da chama do queimador. Desta forma, o equipamento inicia o processo de aquecimento de qualquer objeto e/ou superfície que for do desejo. Entre uma das aplicações dos queimadores, está o aquecimento de tanques para lavagem de peças que sofreram processos de conformação mecânica e, portanto, necessitam de banhos com soluções em alta temperatura para remover a oleosidade da superfície e qualquer resíduo indesejado que restou sob a peça. O projeto em questão realizou a análise da troca de um queimador a gás natural por resistências elétricas em um tanque de lavagem de peças de uma empresa fabricante de bens de consumo. Os objetivos deste trabalho se baseiam na análise de custo do processo ao realizar a troca de aquecimento com queimador a gás natural por resistências elétricas, mantendo, ou até mesmo melhorando, a eficiência do aquecimento da solução do banho através da simulação computadorizada do modelo real. Os resultados obtidos, após a realização das simulações computacionais, demonstram que o sistema de aquecimento do fluido através de resistências elétricas atende a demanda de elevar a temperatura do fluido à, no mínimo 50°C , se comparado ao sistema atual de aquecimento por queimador a gás natural com menor número de iterações demonstrados com melhor custo. A redução de custo mensal ao substituir o processo de aquecimento com gás GLP para resistências elétricas é de R\$ 17.796,24.

Palavras-chave: natural; GLP; Queimador; Tanque; Resistências.

ABSTRACT

Burners are devices used to transmit heat to an object through a flame. These can be fed through gas pipes, both natural and Liquefied Petroleum Gas (LPG), or other fuels such as oil and gasoline, depending on the need for the application and economic/financial factors. The operation of a burner starts from a basic principle of combustion. The mixture of oxygen, fuel and spark, from an ignition, promote the ignition of the burner flame. In this way, the equipment starts the heating process of any object and/or surface that you desire. One of the applications of the burners is the heating of tanks for washing parts that have undergone mechanical conformation processes and, therefore, need baths with high temperature solutions to remove surface oiliness and any unwanted residue that remains under the part. The project in question carried out the analysis of the replacement of a natural gas burner by electrical resistances in a parts washing tank of a consumer goods manufacturing company. The objectives of this work are based on reducing the cost of the process by replacing the heating with a natural gas burner with electrical resistances, maintaining, or even improving, the efficiency of heating the bath solution. The results obtained, after carrying out the computer simulations, demonstrate that the fluid heating system using electrical resistances meets the demand of raising the fluid temperature to at least 50° C, compared to the current heating system using a gas burner. natural with fewer iterations demonstrated with better cost. The monthly cost reduction when replacing the heating process with LPG gas for electrical resistances is R\$17,796.24.

Keywords: natural; LPG; Burner; Tank; Resistances.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Transferência de calor por condução em um campo tridimensional.	16
Figura 2: Transferência de calor através da convecção em campo bidimensional.....	18
Figura 3: Espectro da radiação eletromagnética.....	18
Figura 4: Formas de transferência de calor.	20
Figura 5: Processo de queima entre ar-combustível.....	22
Figura 6: Matriz energética do Brasil em 2021.	23
Figura 7: Exemplo de sólido convertido para o <i>software</i> de simulação.....	30
Figura 8: Queimador Weishaupt.	31
Figura 9: Túnel de aquecimento.	32
Figura 10: Dimensões do tanque em milímetros.	33
Figura 11: Vista em perspectiva do tanque.	33
Figura 12: Fluxograma de tarefas.....	35
Figura 13: Ilustração do tanque.	38
Figura 14: Informações sobre o tanque.	38
Figura 15: Resistência real.	42
Figura 16: Corpo cilíndrico (resistência) utilizado na simulação.....	42
Figura 17: Linhas de fluxo no sistema atual.....	45
Figura 18: Linhas de fluxo em corte no sistema atual.....	46
Figura 19: Temperatura demonstrada em diferentes tonalidades no sistema atual.	48
Figura 20: Linhas de fluxo do fluido.....	49
Figura 21: Fluxo do fluido demonstrado por esferas.....	49
Figura 22: Disposição de resistências no tanque em vista lateral com dimensões em milímetros.	50
Figura 23: Disposição de resistências elétricas em vista tridimensional.....	50
Figura 24: Linhas de fluxo no sistema proposto.	51
Figura 25: Linhas de fluxo em corte no sistema proposto.....	52
Figura 26: Temperatura demonstrada em diferentes tonalidades no sistema proposto.....	53
Figura 27: Linhas de fluxo em corte transversal da seção.....	54
Figura 28: Comparativo entre sistemas de aquecimento.....	55
Figura 29: Sugestão de análise 1.	59
Figura 30: Sugestão de análise 2.	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Valores de emissividade de algumas superfícies a 300 K.....	19
Quadro 2: Poder calorífico do bagaço de cana de açúcar (MJ/kg).....	26
Quadro 3: Lista de propriedades do material.....	44
Quadro 4: Resultados da primeira simulação com sistema atual de aquecimento.	47
Quadro 5: Resultados da segunda simulação com sistema proposto de aquecimento.	533
Quadro 6: Síntese de custos.....	537

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área (m^2)
c_p	Calor específico (J/kg.K)
Q	Calor transferido (J)
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção W/(m^2K)
k_T	Condutividade térmica (W/ $m^2.K$)
U	Diferença de potencial elétrico (V)
ϵ	Emissividade da superfície emissora (-)
ΔH_{vap}	Entalpia específica de vaporização (kJ/kg)
H_{Final}	Entalpia final (J)
$H_{Inicial}$	Entalpia inicial (J)
m	Massa (kg)
γ	Peso específico em kgf/ m^3
q	Pressão dinâmica do sistema em kg/ m^2
b	Pressão dinâmica do sistema em kgf/ m^2
R	Resistência (Ω)
p	Resistividade do condutor ($\Omega.m$)
T_S	Temperatura da superfície ($^{\circ}C$)
T_{∞}	Temperatura do fluido envolvido ($^{\circ}C$)
ΔH	Varição de entalpia
ΔT	Varição de temperatura ($^{\circ}C$)
J	Vazão em m^3/s

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	JUSTIFICATIVA	12
1.2	OBJETIVO GERAL	12
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.4	LIMITAÇÕES	12
1.5	DELINEAMENTO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	TRANSFERÊNCIA DE CALOR	14
2.1.1	Condução	15
2.1.2	Convecção	16
2.1.3	Radiação.....	18
2.1.4	Condução, Convecção e Radiação Simultâneos	20
2.2	COMBUSTÃO	20
2.3	COMBUSTÍVEIS	23
2.3.1	Combustíveis fósseis.....	23
2.3.2	Combustíveis de biomassa.....	24
2.4	QUEIMADORES	27
2.5	RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS	27
2.6	SIMULAÇÃO COMPUTADORIZADA	29
2.6.1	Método dos Elementos Finitos	29
2.6.2	Método dos Volumes Finitos	30
3	PROPOSTA DE SOLUÇÃO	31
3.1	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	31
3.2	OBJETO A SER ESTUDADO	34
3.3	FLUXOGRAMA DE EXECUÇÃO	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	GÁS NATURAL	36
4.2	RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS	36
4.3	QUEIMADOR	36
4.4	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	37
4.5	TANQUE	37
4.6	FLUIDO PARA LAVAGEM DE PEÇAS	39
4.7	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	40

4.8	CUSTOS E INVESTIMENTOS.....	43
4.9	CONDIÇÕES DE CONTORNO	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
5.1	FLUXO DO FLUIDO.....	45
5.2	AQUECIMENTO ATUAL – QUEIMADOR A GÁS NATURAL	46
5.3	AQUECIMENTO PROPOSTO – RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS	50
5.4	GÁS NATURAL <i>VERSUS</i> RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS	54
5.5	ANÁLISE DE CUSTO	55
6	CONCLUSÃO	58
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
7.1	DESLOCAMENTO DO PONTO DE ENTRADA	59
7.2	PLACA SEPARADORA.....	60
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

A utilização do fogo é relatada na história como o primeiro método de aquecimento que o ser humano descobriu para realizar simples tarefas, como aquecer a água, quando a palavra “tecnologia” ainda não era conhecida na língua falada. Com o passar dos anos, foram desenvolvidas diversas técnicas e equipamentos que poderiam realizar o mesmo trabalho de forma mais eficiente e com menor esforço.

Assim como a tecnologia avança diariamente em busca de melhorar a eficiência de toda e qualquer tipo de atividade, a preocupação com a emissão de gases nocivos à saúde segue em crescimento na mesma proporção. Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, o gás natural, apesar de não produzir emissões visíveis à olho nu, é responsável por expelir óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono, dióxido de enxofre, metano e outros gases durante a sua queima (CETESB, 2015). Além das questões ambientais comentadas, é notável o aumento no preço do metro cúbico do gás natural, muito comumente utilizado em larga escala na indústria. Este aumento de preço do metro cúbico do gás natural é diretamente repassado aos preços de muitos produtos encontrados nos mercados, uma vez que este combustível está diretamente ligado ao processo produtivo, portanto, todo e qualquer reajuste no preço deste combustível influenciará no preço dos produtos.

Conhecendo as atuais políticas de redução de emissão de gases poluentes, buscam-se novas alternativas de aquecimento no cenário industrial, que costumam apresentar os maiores índices de utilização de sistemas de aquecimento para a realização das mais diversas tarefas. O Mercado Livre de Energia é um ambiente onde indústrias que necessitam do fornecimento de energia elétrica e fornecedores de energia elétrica podem realizar acordos bilaterais de acordo com suas necessidades. Ou seja, as indústrias têm liberdade para escolher entre diferentes fornecedores de energia de acordo com a sua capacidade de geração, demanda e preço por MWh. Assim, o custo da energia elétrica é altamente afetado, reduzindo-o, pela grande quantidade de competidores engajados em fornecer energia para as grandes consumidoras, as indústrias. Ao se tratar de um baixo custo de MWh de energia elétrica, é passível de estudo a troca do aquecimento através de gás natural por resistências elétricas.

Neste trabalho foi analisado o cenário atual de aquecimento via queimador alimentado por gás natural *versus* aquecimento através de resistências elétricas. Foram elencados todos os custos operacionais do sistema atual e do sistema proposto, além dos custos de instalação do sistema proposto com resistências elétricas.

Em um primeiro momento, foram levantados os dados de consumo médio mensal do sistema de aquecimento por gás natural, custo do metro cúbico do gás natural, cálculos de poder calorífico do aquecimento com queimador, cálculos de poder calorífico do aquecimento com resistências elétricas e média de custo de MWh nos últimos meses.

1.1 JUSTIFICATIVA

Este trabalho tem como objetivo realizar o estudo técnico da troca de um queimador alimentado por gás natural, para resistências elétricas, com a finalidade de realizar o aquecimento de um fluido específico utilizado para limpeza de peças que apresentem oleosidade em sua superfície. Além disso, busca a redução de custo no processo de lavagem de peças através da não utilização do gás natural como combustível e do fortalecimento de projetos de alterações de processos que provoquem menor impacto ambiental.

1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade técnica de substituição de um sistema de aquecimento a gás natural para resistências elétricas.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analisar os custos atuais de funcionamento do sistema de aquecimento com queimador alimentado por gás natural;
- b) Analisar os dados de poder calorífico do queimador alimentado por gás natural com a finalidade de realizar a simulação computadorizada do processo atual;
- c) Analisar os dados de potência das resistências elétricas disponibilizadas pela empresa com a finalidade de realizar a simulação computadorizada do processo proposto;
- d) Avaliar os custos de instalação e funcionamento das resistências especificadas.

1.4 LIMITAÇÕES

- a) Custo do investimento;
- b) Realização de manutenção sem movimentação do tanque;
- c) Tempo de instalação.

1.5 DELINEAMENTO

- a) Pesquisa bibliográfica;
- b) Análise do sistema atual;
- c) Análise do sistema proposto;
- d) Análise financeira;
- e) Implementação do sistema;
- f) Conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta etapa do projeto serão abordados todos os tópicos relacionados à utilização de um sistema de aquecimento através da queima de gás natural *versus* o aquecimento através de resistências elétricas. Mais especificamente, pode-se citar como tópicos principais a transferência de calor, queimadores, resistências elétricas e demais assuntos de relação direta.

2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor pode ser definida como a transferência de uma fração de energia de um corpo devido a uma diferença de temperatura entre estes. Esta fração de energia é por dois tipos de energia: sensível e latente (LABVIRTUAL, s.d.).

Calor sensível é denominado o fenômeno de alteração da temperatura de um corpo. Já o calor latente trata-se da quantidade de calor necessária para mudança de estado físico de um corpo (SOFISICA, 2008).

É possível observar que, ao dispor dois corpos com temperaturas diferentes em contato, o corpo “mais frio” terá sua temperatura aumentada e o corpo “mais quente” terá sua temperatura diminuída. Este fenômeno acontecerá até o momento em que ambos possuam a mesma temperatura (SOFISICA, 2008).

Ao analisar um corpo em um meio cuja temperatura é diferente da que possui, este corpo pode receber ou perder energia, ou seja, aumentar ou diminuir seu nível energético. A energia transferida é comumente conhecida como “calor” e este processo como “transferência de calor”. Caso não ocorra uma mudança no estado físico do corpo, a variação de energia deste objeto de massa m , será igual ao calor transferido (Q) e poderá ser mensurada através da variação de temperatura (ΔT), sendo necessário conhecer o calor específico (C_p), como deduz a Equação 1 a seguir (LABVIRTUAL, s.d.).

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad 01$$

Caso ocorra a mudança de estado do corpo, a temperatura do mesmo se manterá constante, como, por exemplo, durante a evaporação de uma massa m de um líquido, e o calor transferido poderá ser calculado com auxílio da Equação 2, onde ΔH_{vap} refere-se à entalpia específica de vaporização (LABVIRTUAL, s.d.).

$$Q = m \cdot \Delta H_{vap} \quad 02$$

A existência de pontos no espaço com diferentes temperaturas e sendo esta diferença a força-motriz, a transferência de calor ocorrerá no sentido da zona onde a temperatura é mais baixa. Essa transferência de calor poderá acontecer através da condução, convecção e/ou radiação, a depender do estado dos corpos (LABVIRTUAL, s.d.).

2.1.1 Condução

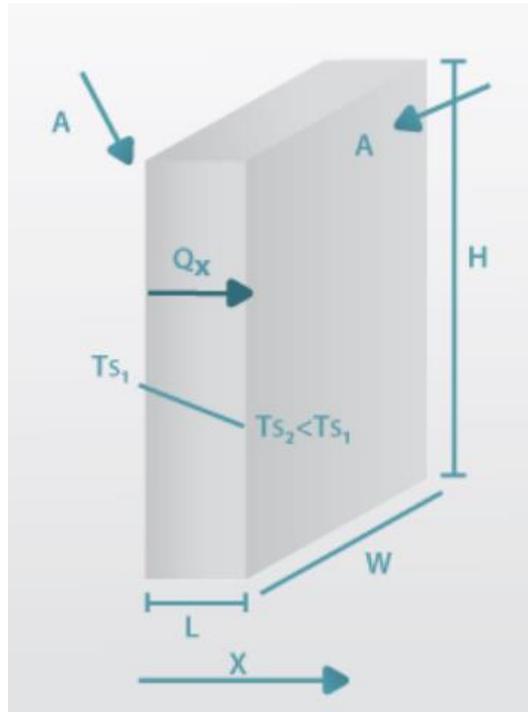
A transferência de calor através da condução ocorre à nível molecular por transferência de energia sensível, onde as partículas com maior nível de agitação, e, por consequência, em locais onde há maior temperatura, transferem uma parte da sua energia para outras partículas, com menor nível de agitação, através do contato (LABVIRTUAL, s.d.).

Quando uma colher é deixada encostada em uma panela que está sobre o fogo durante o cozimento de algum alimento, ela terá sua temperatura aumentada com o passar do tempo. Como as moléculas que constituem a panela se agitarão devido ao aquecimento, essas provocarão uma agitação nas moléculas da colher devido à sua agitação ser mais intensa. (SOFISICA, 2008).

A lei que descreve a transferência de calor através da condução é a Lei de Fourier (Joseph Fourier, 1768 – 1830). A partir da Figura 1 e da Equação 3 demonstradas é possível verificar que o calor transferido por unidade do tempo é proporcional à área de transferência perpendicular ($A = W \times H$) ao fluxo de calor e ao gradiente de temperaturas (dT/dx). A condutividade térmica (k_T) é uma propriedade física do material em análise (LABVIRTUAL, s.d.).

$$\dot{Q}_{Cond} = -k_T \cdot A \frac{dT}{dx} \quad 03$$

Figura 1: Transferência de calor por condução em um campo tridimensional.



Fonte: Adaptado de (LABVIRTUAL, s.d.).

2.1.2 Convecção

A convecção é a transferência de calor que pode ser explicada através da troca de energia entre fluidos (líquidos ou gasosos) em movimento. O processo de convecção forçada é caracterizado pelo movimento provocado por um agente externo. Como por exemplo, pode-se citar um agitador, uma bomba centrífuga ou uma ventoinha. Quando o movimento ocorre pela diferença de densidade de fluidos provocado pelo aquecimento do próprio fluido, diz-se que a convecção é natural/livre (LABVIRTUAL, s.d.).

Existem outras duas formas de classificação da convecção, isto é, além da convecção forçada e da convecção livre, ainda é possível que ela possa ser na forma de ebulição ou condensação. Na ebulição é observada a formação rápida e tumultuosa de vapores ao elevar a temperatura do fluido. Desta forma, é possível afirmar que cada fluido tem temperatura específica para alcançar seu ponto de ebulição; é necessário fornecer uma determinada quantidade de calor, comumente conhecido por calor latente de vaporização, ao fluido a fim de que o mesmo permaneça no seu ponto de ebulição; verifica-se que a temperatura do fluido se mantém constante ao mesmo ponto que se fornece calor a este e que o vapor formado se encontra à mesma temperatura do líquido. Já no processo de condensação, é retirado o calor do

vapor de uma substância que esteja a uma temperatura superior ao seu ponto de ebulição. Desta forma, a temperatura do vapor diminuirá e este se condensará quando a sua temperatura atingir o mesmo valor no qual aconteceu a ebulição. Pode-se dizer que a condensação é o processo inverso da vaporização, ou seja, o vapor deverá liberar calor para se liquefazer (ALVARENGA e MÁXIMO, 1980, p. 458).

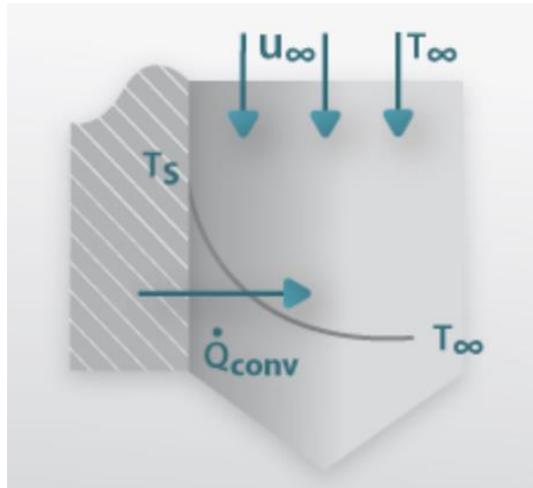
Em outras palavras, a convecção pode ser exemplificada através de um fenômeno natural, o vento. “O ar que está nas planícies é aquecido pelo sol e pelo solo, assim ficando mais leve e subindo. Então as massas de ar que estão nas montanhas, e que está mais frio que o das planícies, toma o lugar vago pelo ar aquecido, e a massa aquecida se desloca até os lugares mais altos, onde resfriam. Estes movimentos causam, entre outros fenômenos naturais, o vento.” (SOFISICA, 2008).

Embora o movimento aleatório do fluido acrescente complexidade matemática, um modelo simples foi desenvolvido para calcular a velocidade de transferência de calor, representando a interação desses dois fenômenos. Quando a velocidade do fluido diminui e se aproxima de zero, a contribuição do movimento macroscópico do fluido se torna menos relevante em comparação com o processo de condução de calor (LABVIRTUAL, s.d.).

A Figura 2 apresenta uma projeção bidimensional da transferência de calor e é complementada pela Equação 4, onde “h” é o coeficiente de transferência de calor, “A” a área de transferência de calor perpendicular ao fluxo de calor e “ ΔT ” a força-motriz que é a causa da transferência de calor (“ T_S ” = temperatura da superfície, “ T_∞ ” = temperatura do fluido envolvido) (LABVIRTUAL, s.d.).

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot (T_S - T_\infty) \quad 04$$

Figura 2: Transferência de calor através da convecção em campo bidimensional.

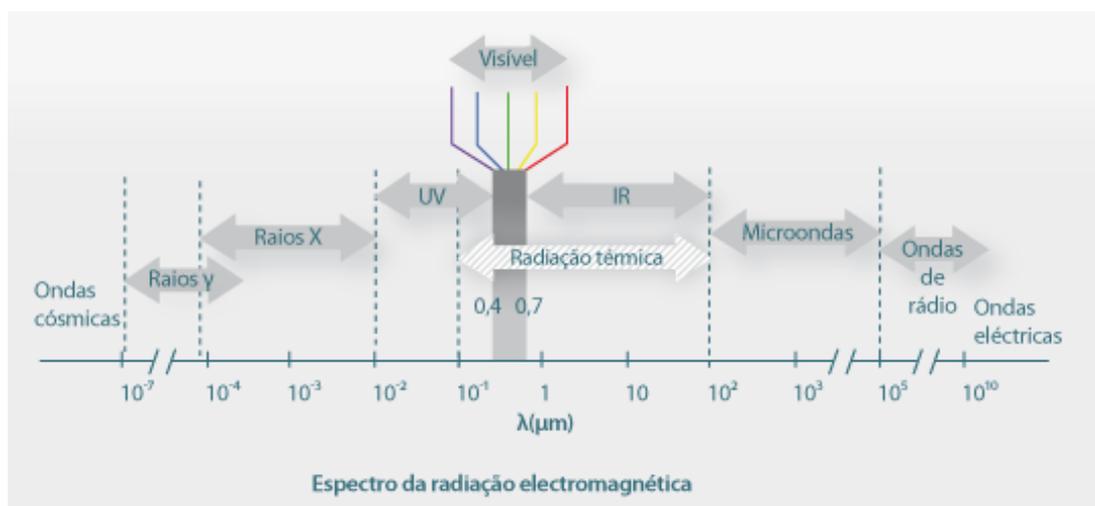


Fonte: Adaptado de (LABVIRTUAL, s.d.).

2.1.3 Radiação

A transferência de calor por radiação pode ser descrita como toda energia emitida com comprimentos de onda de 0,1 a 100 μm do espectro eletromagnético, conforme Figura 3. A radiação é o resultado da emissão de ondas eletromagnéticas devido a alterações na configuração de átomos e moléculas. É possível afirmar que qualquer corpo com temperatura superior a 0 K ou $-273,15^\circ\text{C}$ emite radiação (LABVIRTUAL, s.d.).

Figura 3: Espectro da radiação eletromagnética.



Fonte: Adaptado de (LABVIRTUAL, s.d.).

A radiação térmica pode ocorrer através de corpos sólidos, líquidos e gases e no vácuo. Os corpos sólidos e líquidos que são opacos à radiação térmica são afetados através de um fenômeno de superfície, já em gases e sólidos semitransparentes são acometidos por um fenômeno volumétrico (LABVIRTUAL, s.d.).

O forno micro-ondas é um dos aparelhos que exemplifica a atuação da propagação de energia térmica através da radiação. O aquecimento do alimento disposto dentro do aparelho é “bombardeado” com milhares de microondas que fazem a energia térmica do alimento aumentar, aumentando a temperatura do mesmo (SOFISICA, 2008).

Através da Lei de Stefan-Boltzmann (Josef Stefan, 1835 – 1893, Ludwig Boltzmann, 1844 – 1906) é possível calcular a energia térmica radiante que um corpo emite, sendo “ $\sigma=5,67 \times 10^{-8}$ ” a constante de Stefan-Boltzmann, “ ε ” a emissividade da superfície emissora, “A” a sua área e “ T_s ” a sua temperatura absoluta (K), conforme descrito pela Equação 5 (LABVIRTUAL, s.d.).

$$\dot{Q} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot T_s^4 \quad 05$$

É conhecido por “corpo ideal (negro)” aquele que emite a máxima radiação possível uma vez que a sua emissividade é unitária. O Quadro 1 apresenta alguns valores de emissividade de algumas superfícies à uma temperatura de 300 K (LABVIRTUAL, s.d.).

Quadro 1: Valores de emissividade de algumas superfícies a 300 K.

Material	Emissividade, ε
Vegetação, solo, água, pele	0,92 – 0,96
Asfalto	0,85 – 0,93
Aço inox polido	0,17
Ouro, prata ou cobre polidos	0,018 – 0,035

Fonte: Adaptado de (LABVIRTUAL, s.d.).

Entende-se que, a radiação emitida por um corpo está ligada diretamente à temperatura do objeto de análise, ou seja, quanto mais elevada a temperatura, maior o índice de radiação emitida. Porém, em um caso em que todas as superfícies emitem radiação térmica, se um corpo emitir mais energia do que a recebida pelas superfícies próximas, a sua temperatura diminuirá. Assim, o resultado da troca de energia radiante entre superfícies em uma perspectiva global é o que busca ao realizar o cálculo.

2.1.4 Condução, Convecção e Radiação Simultâneos

Pode-se explicar as três de formas de transferência de calor através da Figura 4, onde a convecção é explicada através da troca de calor entre as moléculas de água mais quentes com as mais frias, a condução através do aumento da temperatura da superfície da chaleira e a radiação através do calor emitido para o meio.

Figura 4: Formas de transferência de calor.



Fonte: (MUNDO EDUCAÇÃO, s.d.).

2.2 COMBUSTÃO

A combustão pode ser definida como uma reação química entre um combustível e um comburente. Os combustíveis mais conhecidos são o álcool, carvão, gasolina, gás e o querosene e são classificados como tais devido a sua volatilidade, inflamabilidade, resistência à compressão, viscosidade, entre outros. Já os comburentes, podem ser sólidos como o perclorato de amônia (utilizado em alguns foguetes), líquidos como peróxido de hidrogênio, ou gasosos como o oxigênio, que é o comburente mais conhecido. A junção do combustível e do comburente não é suficiente para realizar o processo de combustão. É necessária uma ignição,

como por exemplo a faísca elétrica produzida por uma vela em um motor, para que seja iniciada a combustão e, por consequência, a liberação de energia em forma de calor (LAS, s.d.).

Pode-se classificar a combustão em completa e incompleta. A combustão completa ocorre quando toda a massa de combustível reage com o oxigênio, gerando calor, e não há substâncias combustíveis presentes nos gases resultantes da combustão. Ex.: $C + O_2 \rightarrow CO_2$. Quando nos gases da combustão encontra-se ainda substâncias combustíveis a combustão é dita incompleta. Ex.: $C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$. Em caldeiras os subprodutos de combustão incompleta são CO, HC's (hidrocarbonetos), H_2S (sulfeto de hidrogênio, H_2 e fuligem). A forma incompleta de combustão é caracterizada pela presença de material finamente particulado, composto principalmente por carbono (PUSTELNIK, 2019).

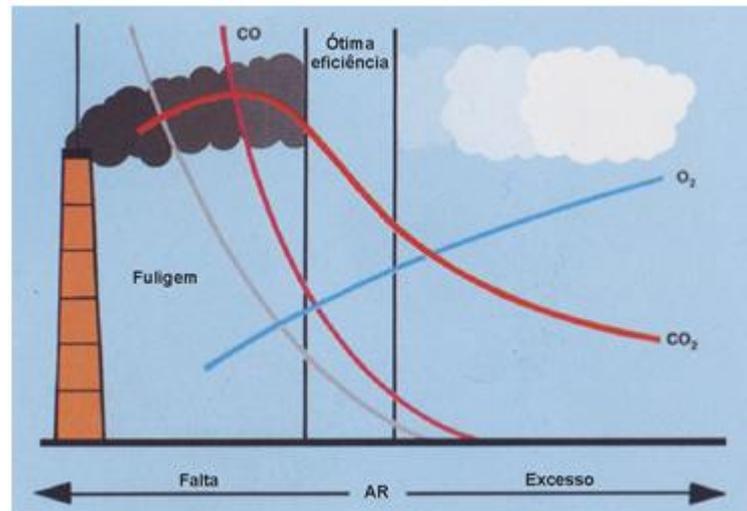
Durante o processo de combustão entre o combustível e o comburente pode-se observar duas situações distintas: a queima com a quantidade ideal de oxigênio e a queima com excesso de oxigênio. Na situação denominada “excesso de oxigênio” entende-se que está sendo usado maior quantidade de comburente necessária para a realização da combustão completa. Esta situação é comprovada pela presença de fuligem e combustível “não queimado” nos produtos combustíveis. Já a situação em que o oxigênio é inserido no processo de combustão de forma a produzir uma reação completa, não são visualizados resíduos após a queima. A quantidade ideal de oxigênio para realizar a combustão completa pode ser calcular através da estequiometria. Como parâmetro para os cálculos de proporção teórica ideal da mistura ar/combustível, assume-se que o ar atmosférico possui, em massa, 23,2% de oxigênio (BIZZO; SANCHEZ, s.d.).

A relação entre a queima de ar-combustível é exemplificada pela Figura 5, onde é possível verificar que o ponto de ótima eficiência da queima é quando as concentrações de O_2 são reduzidas para evitar a perda de calor para as tubulações, mas também não são mínimas a fim de evitar a formação de excesso de fuligem.

A entalpia (H) corresponde à quantidade de energia presente em um sistema que pode ser absorvida ou liberada. Quando há liberação de energia, o processo é chamado de exotérmico, já quando há absorção de energia o processo é chamado de endotérmico. Para determinar a variação de entalpia (ΔH), diminui-se a entalpia final dos produtos (H_{Final}) pela entalpia inicial dos reagentes ($H_{Inicial}$), conforme Equação 6. Quando o resultado da variação da entalpia for negativo, entende-se que a entalpia dos reagentes é maior que a dos produtos. Já quando for positiva, a entalpia dos produtos é maior que a dos reagentes (FOGAÇA, s.d.).

$$\Delta H = H_{Final} - H_{Inicial}$$

Figura 5: Processo de queima entre ar-combustível.



Fonte: (CONFOR, 2019).

As reações de combustão sempre envolvem um combustível e um comburente e podem ser completas ou incompletas. A variação de entalpia padrão é calculada apenas para combustões completas uma vez que a combustão completa é uma reação amplamente conhecida e calculada, servindo de referência para o cálculo da variação de entalpia padrão. Quando a combustão ocorrer de forma completa, os produtos serão gás carbônico e água. Já quando a combustão for incompleta, os produtos podem incluir partículas sólidas, hidrocarbonetos não queimados e monóxido de carbono (DIAS, s.d.).

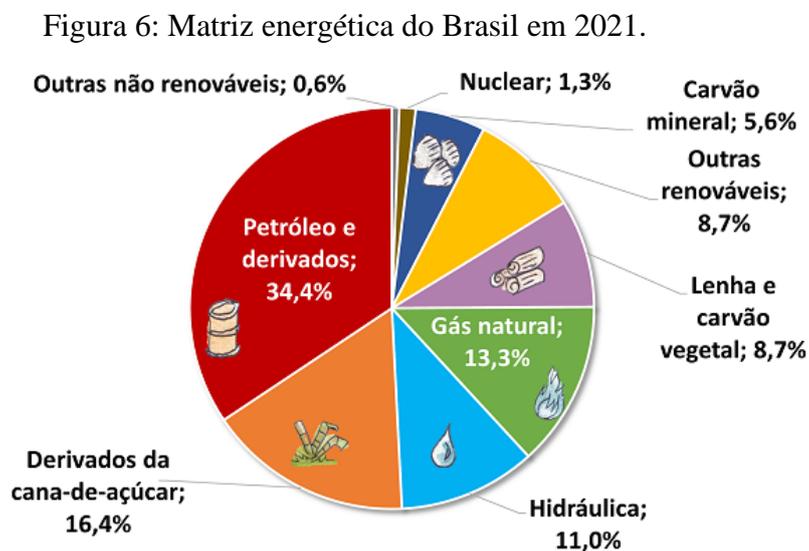
A transformação adiabática é um processo em que não ocorre transferência de energia na forma de calor entre um sistema e o ambiente. De acordo com a primeira lei da termodinâmica, é possível alterar a energia interna de um gás ideal sem a presença de calor, apenas por meio da transferência de energia na forma de trabalho (BERTULANI, s.d.).

“O poder calorífico é uma medida termodinâmica que representa a variação de entalpia (quantidade de calor liberado) durante a queima (combustão completa) de um mol de substância a temperatura de 25 °C e 760 mmHg de pressão (Russel, 1994, Wylen e Sonntag, 1993). Na avaliação de combustíveis o poder calorífico pode ser classificado de duas formas: poder calorífico superior e inferior. Segundo Potter e Scott (2007) se os produtos contêm água na fase líquida, a entalpia de combustão é chamada de poder calorífico superior (PCS). Já se os

produtos contêm água na fase gasosa, tem-se o poder calorífico inferior (PCI). Acrescenta-se ainda que, o primeiro representa o calor produzido por 1 kg de combustível quando este entra em combustão, e os gases produzidos são resfriados de maneira a condensar os vapores de água produzidos, ou seja, todos os produtos da combustão retornam a temperatura inicial dos reagentes (ANP, 2008). O PCI considera o resfriamento dos gases, até o ponto de ebulição da água, evitando assim que a água contida na combustão seja condensada (ANP, 2008). Assim, a diferença em valor entre os dois, é a quantidade de calor necessária para evaporar a água contida nos gases de exaustão” (COSTA et al., 2009, p.2).

2.3 COMBUSTÍVEIS

O conjunto de fontes de energia utilizadas para realizar atividades cotidianas é chamado de matriz energética. A matriz energética do Brasil difere-se muito do que é visto no resto do mundo, visto que o Brasil é o país que mais utiliza fontes renováveis para gerar energia no mundo. Na figura 6 é possível observar as principais fontes de energia utilizadas no Brasil no ano de 2021 (EPE, 2022).



Fonte: Adaptado de (EPE, 2022).

2.3.1 Combustíveis fósseis

Os combustíveis fósseis são recursos não-renováveis originados de restos orgânicos acumulados na crosta terrestre durante milhares de anos. São assim denominados devido à sua origem a partir de restos de animais e plantas que ali viveram e se decompuseram. Estudos

indicam que os gases produzidos na queima deste tipo de combustível são apontados como responsáveis pelo agravamento do efeito estufa e aquecimento global (TODA MATÉRIA, s.d.).

2.3.1.1 Gás natural

O gás natural é um combustível sólido encontrado na natureza e é resultado da degradação de matéria orgânica pré-histórica. É composto por metano (de 80 a 90%), etano (de 5 a 10%) e outros gases em menores proporções como butanos, pentanos, nitrogênio, entre outros. O poder calorífico inferior do gás natural varia entre 45 a 50 MJ/m³ e é a quantidade de calor liberado durante a combustão deste gás. Já o poder calorífico superior varia entre 50 a 55 MJ/m³ (GARCIA, 2013).

2.3.1.2 Petróleo

O petróleo é uma substância inflamável, de origem orgânica composto por uma combinação inicial de moléculas de carbono e hidrogênio. Atualmente é o combustível fóssil mais utilizado, uma vez que através da sua extração e refino são derivados diversos produtos como a gasolina, óleo diesel, gás liquefeito de petróleo, entre outros (UNICAMP, 2018).

2.3.1.3 Carvão mineral

O carvão mineral é um combustível que possui reservas no mundo todo e tem larga utilização na geração de eletricidade. É considerado como fonte não renovável e com maior disponibilidade no mundo segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Composto por, principalmente, carbono, com teor de 55 a 95% do elemento, fazendo com que seja possível encontrar carvão mineral com maior ou menor concentração de carbono. Além de carbono, são encontrados também o enxofre, nitrogênio, oxigênio e hidrogênio neste mineral (SOUZA, s.d.).

2.3.2 Combustíveis de biomassa

A biomassa é um recurso natural renovável proveniente de organismos vivos utilizados como combustíveis ou para a sua produção. O processo de combustão de material orgânico produzido e acumulado em um ecossistema é a formato utilizado para a geração de energia através da biomassa. Através da queima de biomassa acontece a liberação de dióxido de carbono na atmosfera, porém pode-se dizer que o balanço de emissões deste gás é nulo, uma

vez que, este composto havia sido previamente absorvido pelas plantas que deram origem à biomassa (SANCHES, 2015).

A seguir são apontados alguns combustíveis de biomassa mais comumente conhecidos.

2.3.2.1 Lenha

A lenha é um combustível ainda muito utilizado no Brasil, tanto para uso doméstico quanto para uso industrial. A queima deste material é característica pelo baixo teor de cinzas e ausência de enxofre. Quando cortada, a lenha pode possuir, aproximadamente, 50% de umidade. A depender do método de estocagem, dentro de 3 a 6 meses o valor da umidade pode ser reduzido para 25%. O poder calorífico da lenha pode variar devido à umidade, tipo de árvore, método de estocagem, entre outros. O poder calorífico inferior pode variar entre 16 a 20 MJ/kg, já o poder calorífico superior pode variar entre 17 e 22 MJ/kg (BIZZO, 2003).

2.3.2.2 Bagaço de cana

O bagaço de cana de açúcar é um combustível utilizado diretamente na produção de açúcar e álcool. O bagaço, proveniente da colheita, é queimado com uma umidade de 50%. Sua composição elementar é bastante semelhante à da lenha, e suas propriedades podem ser consideradas semelhantes, exceto pela diferença em sua forma física. Devido ao avanço da tecnologia quanto à eficiência dos processos de combustão, as usinas não costumam consumir todo o bagaço produzido, fazendo com que o excedente seja comercializado. Desta forma, o ciclo econômico do bagaço da cana de açúcar é muito proveitoso uma vez que mesmo o excedente é uma fonte de renda. O Quadro 2 apresenta o poder calorífico do bagaço de cana de açúcar (BIZZO, 2003).

Quadro 2: Poder calorífico do bagaço de cana de açúcar (MJ/kg).

Biomassa	PCS	PCI	Desvio
Casca de arroz	16,1	15,3	
	15,7		
	15,6	13,0	0,2
Bagaço de cana	17,3	16,2	
	19,1	17,9	
	16,7	14,4	0,3

Fonte: Adaptado de (BIZZO, 2003).

2.3.2.3 Carvão vegetal

O carvão vegetal é obtido através da queima ou carbonização da madeira. Além de ser amplamente utilizado no dia a dia como combustível em aquecedores, lareiras, churrasqueiras e fogões a lenha, o carvão vegetal também desempenha um papel importante em diversos setores industriais, incluindo a siderurgia. No Brasil, em particular, o segmento siderúrgico tem apresentado um crescimento significativo na produção de aço utilizando carvão vegetal como agente redutor, ou seja, para a produção de ferro gusa. Nos últimos três anos, o consumo de carvão vegetal proveniente de plantações florestais para a produção de ferro gusa aumentou em 86%, refletindo esse crescimento na indústria siderúrgica brasileira. As empresas produtoras de aço possuem uma área plantada de aproximadamente 939,6 mil hectares destinados à produção de carvão vegetal, além de apoiarem financeiramente e tecnicamente o plantio realizado por terceiros, incentivando assim a atividade de silvicultura. É importante ressaltar que o Brasil é o líder mundial absoluto na produção de aço utilizando carvão vegetal como agente redutor, graças às condições favoráveis existentes no país para a produção de biomassa (IBÁ, s.d.).

Segundo Monteiro et al. (2019), o poder calorífico inferior do carvão vegetal pode variar de 25 a 33 MJ/kg. Já o poder calorífico superior pode variar de 26 a 36 MJ/kg.

2.4 QUEIMADORES

Os queimadores são utilizados para realizar a reação de combustão entre substâncias de forma eficiente a depender do tempo, temperatura e turbulência. Podem ser classificados como três tipos básicos, apresentados abaixo (BIZZO, 2003).

Queimadores de chama de difusão: Neste modelo de queimador, o fluxo de gás é direcionado do bico para a zona de combustão com uma velocidade adequada para arrastar o ar de combustão circundante e criar uma chama de intensidade necessária. Normalmente este tipo de queimador produz uma chama muito intensa devido à sua grande área disponível para difusão do ar (BIZZO, 2003).

Queimadores com pré mistura: Este modelo de queimador é indicado apenas para pequenos equipamentos devido à possibilidade de retorno da chama quando dentro do tubo em queimadores maiores. Ao passar por um orifício, a pressão do gás causa o arraste de ar para o tubo de mistura. No entanto, quando usando gás canalizado, apenas 50% do ar de combustão é arrastado dessa forma, sendo necessário fornecer o restante como ar secundário (BIZZO, 2003).

Queimadores com bicos de mistura: São aqueles em que o gás e o ar são misturados no ponto em que ocorre a combustão. Este modelo de queimador é largamente utilizado quando é necessária uma grande capacidade de aquecimento e em que não existe a possibilidade de retorno da chama. Este modelo por contar com bicos de mistura que podem ser do tipo “registro”, onde a combustão ocorre na saída do queimado ou do tipo túnel onde a combustão ocorre em um tubo refratário (BIZZO, 2003).

2.5 RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS

A Lei de Ohm estabelece as relações entre as três principais grandezas elétricas: tensão, corrente e resistência. Georg Simon Ohm, físico e matemático alemão, ao estudar esse fenômeno, observou que a corrente variava de acordo com a tensão fornecida por uma fonte. Cada tensão aplicada resultava em uma corrente diferente, conforme registrado em suas anotações. Ao analisar esses resultados, ele percebeu que havia uma relação constante entre a tensão e a corrente. Georg denominou esse número constante como resistência elétrica. A partir dessa descoberta, foi possível estabelecer uma fórmula matemática que relaciona as grandezas elétricas: tensão, corrente e resistência elétrica (ARAÚJO et al., s.d., p.3).

A Lei de Ohm é dividida em outras duas leis. A Primeira Lei de Ohm estabelece que, em um condutor ôhmico com resistência constante e temperatura constante, a intensidade da corrente elétrica (i) é diretamente proporcional à diferença de potencial (ddp) aplicada entre as extremidades do condutor. Em outras palavras, a resistência elétrica do condutor permanece constante nessa situação. Já a segunda Lei de Ohm, estabelece que a resistência elétrica de um material é diretamente proporcional ao seu comprimento e inversamente proporcional à sua área de secção transversal. Isso significa que, mantendo-se o material constante, se o comprimento do condutor aumentar, sua resistência também aumentará, enquanto que se a área de secção transversal diminuir, a resistência aumentará (ARAÚJO et al., s.d., p.4).

A Primeira Lei de Ohm é expressa pela equação 7 e a Segunda Lei de Ohm é expressa pela equação 8, onde R é a resistência em Ohm (Ω), U é a diferença de potencial elétrico (ddp) em Volts (V), I é a intensidade da corrente elétrica medida em Ampère (A), p é a resistividade do condutor medido em $\Omega.m$, L é o comprimento em metros e A é a área da secção transversal em mm^2 .

$$R = U/I \quad 07$$

$$R = p.L/A \quad 08$$

De acordo com as informações dispostas no site “Império das Resistências” (s.d.), as resistências elétricas utilizadas para o aquecimento, tanto doméstico quanto industrial, possuem o mesmo princípio de funcionamento. Funcionam como uma espécie de armazenador de energia, transformando a energia elétrica em energia térmica. Fatores como a espessura do material utilizado para a fabricação da resistência, formato e tamanho, são determinantes para identificar o potencial de resistividade.

No meio industrial é possível encontrar três tipos de resistências elétricas para aquecimento: resistência tipo cartucho, resistência tipo coleira e resistência tubular. As resistências elétricas industriais do tipo cartucho, são comumente indicadas para baixa e média potência. Porém, nada impede que sejam utilizadas como grandes fontes de calor, bastando que o tamanho e matéria prima sejam capazes de suportar altas cargas elétricas. Este modelo de resistência é normalmente utilizado na indústria para gerar calor e controlar temperatura no processamento de alimentos. Já o modelo tipo coleira tem formato circular, são produzidas com materiais que apresentem alta resistividade, possui capa cerâmica isolante e é mais utilizado em extrusoras de perfil e injetoras de polímeros. Por fim, a resistência elétrica tubular é a mais

conhecida atualmente, uma vez que é utilizada em fornos elétricos domésticos, ar-condicionado e na indústria como fonte de calor para aquecer tanques.

Segundo a Sensortemp, fornecedor de resistências e sensores, em uma resistência flangeada, o elemento interno é composto por “fio resistivo roch 0Cr23A15”, tem sua isolamento composta por cerâmica e óxido de magnésio e como matéria prima da superfície de aquecimento o aço inoxidável 304. Além disso, esse modelo de resistência pode trabalhar entre 20 a 400°C e sempre submersa em líquido.

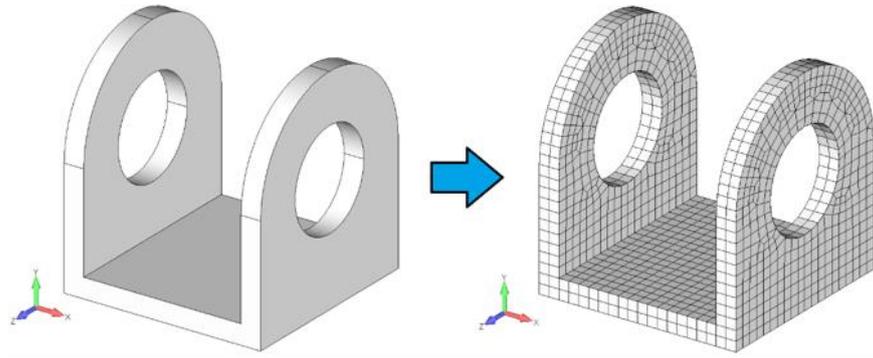
2.6 SIMULAÇÃO COMPUTADORIZADA

Neste subcapítulo serão abordados os conceitos da simulação computadorizada. É de fundamental importância realizar um panorama geral sobre a simulação computadorizada uma vez que este trabalho foi inteiramente realizado no *software* de simulação *Ansys Discovery*.

2.6.1 Método dos Elementos Finitos

A análise de um modelo, situação e/ou estrutura através de métodos convencionais de cálculos manuais pode se tornar algo complexo quando inúmeras condições de contorno são impostas no problema. Desta forma, os *softwares* de simulação auxiliam os profissionais da área executando simulações através do Método dos Elementos Finitos (MEF). Através do MEF, quando um sólido é inserido e composto por uma quantidade aparentemente infinita de pontos, ele se transforma em uma geometria que se divide em formas geométricas mais simples e bem conhecidas, como triângulos, hexaedros e tetraedros. Esse processo de subdivisão simplifica os cálculos necessários para prever o comportamento de materiais sólidos em diversas condições (BRASIL, 2020). A Figura 7 demonstra um sólido a esquerda, proveniente de um *software* de modelagem, e a direita o mesmo sólido, porém já convertido para o *software* de simulação, demonstrando os inúmeros elementos finitos criados.

Figura 7: Exemplo de sólido convertido para o *software* de simulação.



Fonte: (KOT Engenharia, 2020)

O ato de dividir o domínio em sub-regiões é conhecido como geração de malha. Para obter resultados mais precisos, é fundamental empregar um maior número de nós e elementos. Quanto maior o número de nós e elementos, ou seja, quanto maior o refino da malha, maior capacidade de processamento a máquina deverá possuir.

Definir as condições de contorno e outras formas de restrição é geralmente a parte mais desafiadora da modelagem de uma estrutura para uma análise de elementos finitos. Ao definir essas restrições, é relativamente fácil cometer erros por omissão ou interpretação incorreta. O profissional da área deve explorar diversas abordagens em relação às restrições mais complexas do modelo, e as simulações devem ser restritas a problemas simples, em vez de estruturas complexas e extensas que demandariam uma capacidade de processamento considerável (BUDYNAS, 2016).

2.6.2 Método dos Volumes Finitos

Uma característica fundamental do Método de Volumes Finitos (FVM) é que ele assegura, por definição, a preservação dos princípios de conservação, como massa, momento e energia, que formam a base da modelagem matemática na mecânica do contínuo. Além disso, o método não se limita apenas a problemas de mecânica de fluidos e costuma resolver os problemas em uma determinada ordem: divisão do domínio em volumes de controle, derivação das equações integrais de conservação para cada volume de controle, realiza aproximações numéricas das integrais, estima os valores das variáveis nas faces dos volumes de controle e calcula as derivadas com base nas informações das variáveis nodais e, por último, constrói e resolve o sistema algébrico resultante (OSSES, 2016).

3 PROPOSTA DE SOLUÇÃO

Nesta seção será apresentado o obstáculo a ser ultrapassado na segunda etapa do trabalho de conclusão, os métodos utilizados para tal, dados de entrada e atividades planejadas.

3.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Atualmente o tanque que comporta o fluido de lavagem de peças é aquecido através de um queimador do modelo WM-G10/3-AZM R1 ½” da fabricante Weishaupt, demonstrado na figura 8. Este queimador é alimentado com gás natural diretamente das tubulações disponíveis na fábrica.

Figura 8: Queimador Weishaupt.

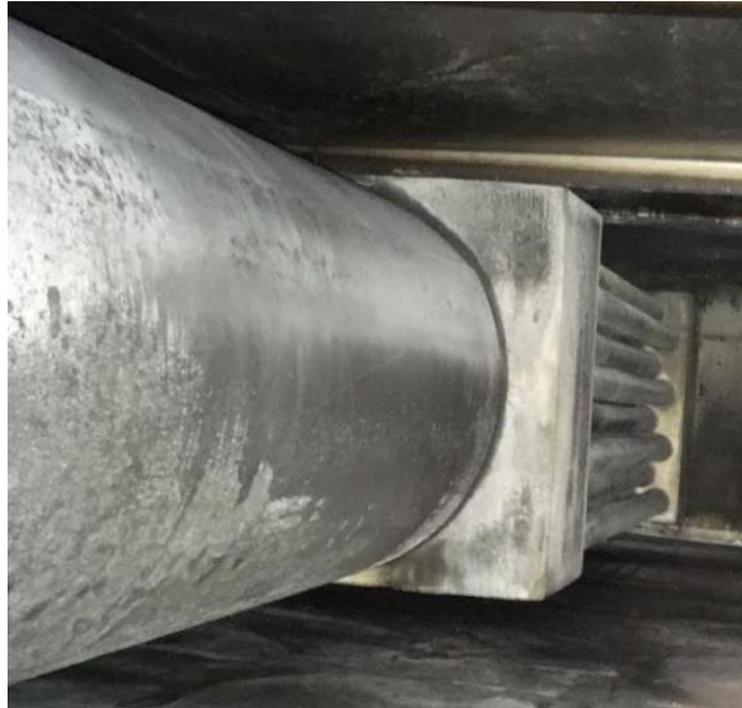


Fonte: Site da Weishaupt¹.

O queimador fica localizado na área externa do tanque, fixado à uma placa de aço inoxidável e transmite a chama para dentro de um túnel inicialmente composto por um cilindro único e dividido em diversos tubos ao fim do seu comprimento, conforme figura 9.

¹ Disponível em: <<https://www.weishaupt.com.br/produtos/queimador/queimadores-weishaupt-linha-wm-monarchr-55-12000-kw>>. Acesso em: 06 maio 2023.

Figura 9: Túnel de aquecimento.

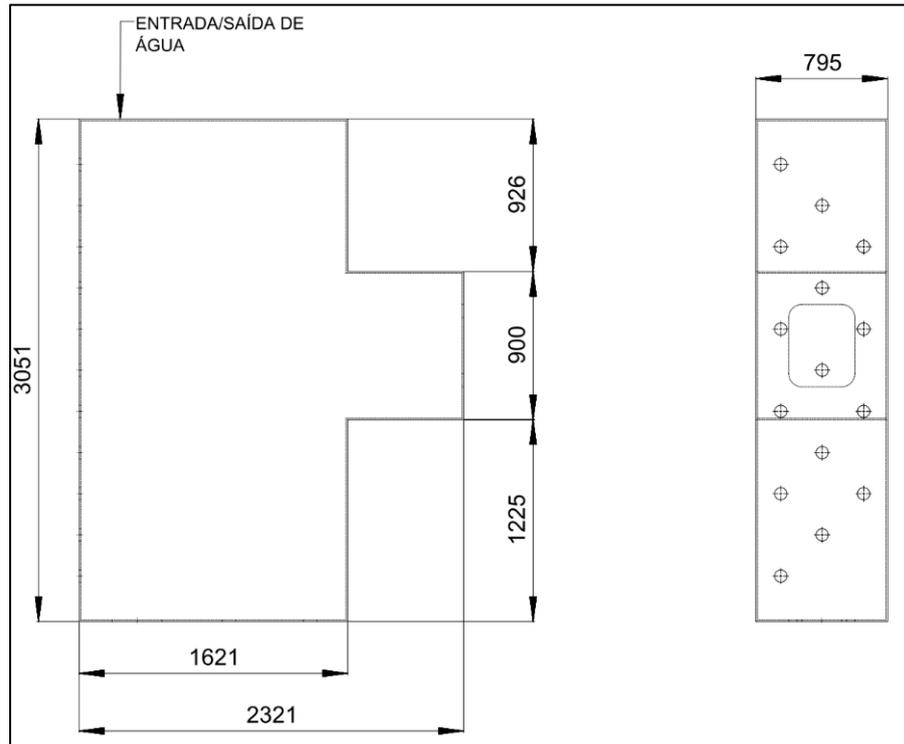


Fonte: Do autor (2023).

Desta forma, o fluido específico para lavagem de peças tem sua temperatura aumentada através da transferência de calor emitida pelo processo térmico de condução pela superfície do túnel de aquecimento.

A figura 10 apresenta as dimensões do tanque utilizado para armazenagem do fluido específico para lavagem de peças.

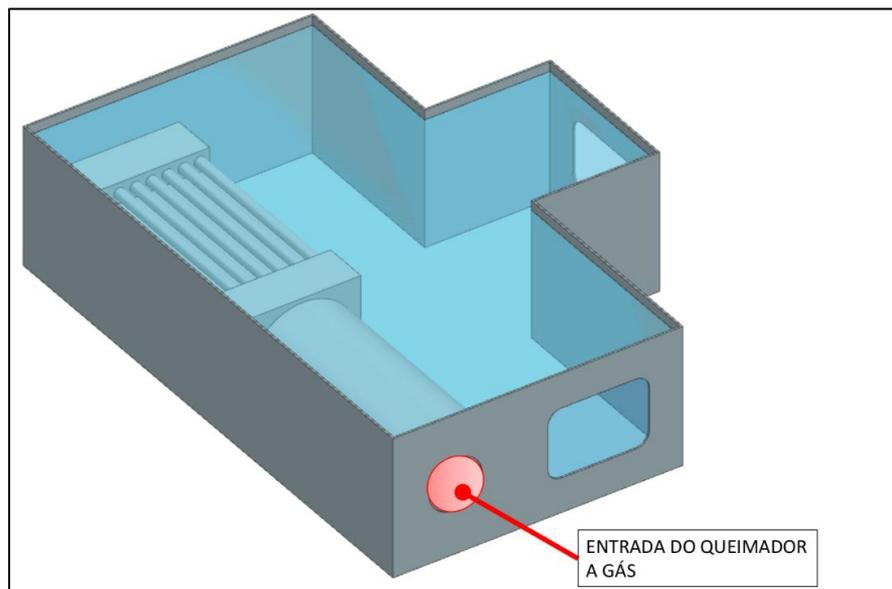
Figura 10: Dimensões do tanque em milímetros.



Fonte: do autor (2023).

A figura 11 apresenta uma vista tridimensional do tanque com o sistema atual de aquecimento alimentado por gás natural.

Figura 11: Vista em perspectiva do tanque.



Fonte: do autor (2023).

O aumento do custo do metro cúbico do gás natural tem provocado os interessados da área técnica a buscarem por soluções que substituam este combustível sem comprometer a eficiência do processo, e que se apresentem como uma alternativa mais sustentável no viés ambiental.

3.2 OBJETO A SER ESTUDADO

Este trabalho objetiva a substituição do queimador alimentado por Gás Natural por resistências elétricas. A substituição foi realizada através do fechamento da abertura atual em que o queimador está localizado e abertura de furações em uma das laterais do tanque para acomodar as resistências elétricas que farão o aquecimento da solução para lavagem de peças.

Após a demonstração da análise de viabilidade e aprovação do projeto por parte da empresa, pretende-se reduzir o custo do processo e melhorar a eficiência do aquecimento através de um controle mais preciso das curvas de potência das resistências elétricas além de reduzir o consumo de um combustível que emite diversos gases tóxicos e que apresenta maior risco no seu manuseio e armazenamento se comparado à energia elétrica.

Foram levantados dados de entrada como:

- Consumo mensal de gás natural;
- Custo médio mensal do metro cúbico de gás natural;
- Custo médio mensal do kW de energia elétrica do Mercado Livre de Energia;
- Custo de material e instalação das resistências elétricas.

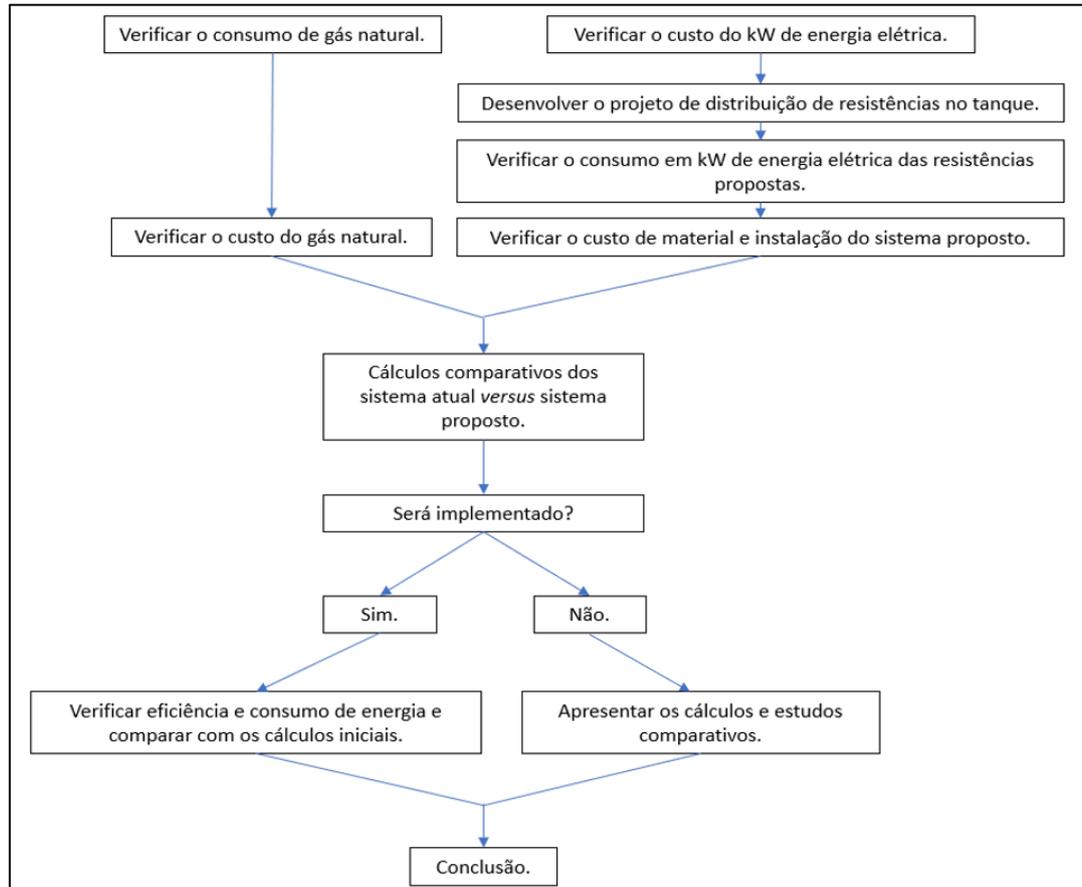
Demais dados técnicos encontrados e, sendo considerados relevantes para a execução do trabalho, serão apresentados.

Na próxima etapa do trabalho de conclusão será apresentado o projeto em si, características relevantes, cálculos envolvidos e os métodos utilizados.

3.3 FLUXOGRAMA DE EXECUÇÃO

É apresentado na figura 12, o fluxograma de atividades relacionadas a este trabalho.

Figura 12: Fluxograma de tarefas.



Fonte: Do autor (2023).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados alguns dados relacionados ao combustível utilizado na situação atual com aquecimento através de queimador alimentado por gás natural, como seu coeficiente calorífico, pressão na tubulação, consumo e demais dados pertinentes à execução da simulação computacional. Além disso, serão apresentados os dados referentes às resistências elétricas que são propostas para substituir o sistema atual.

Será apresentado também o queimador atual e as especificações da máquina utilizada para a simulação computacional.

4.1 GÁS NATURAL

O combustível utilizado para alimentar o queimador é o gás natural. Este combustível é “transportado” até o queimador em uma tubulação de diâmetro 1.1/2” até o queimador. A pressão de gás na linha, analisada através de um manômetro instalado próximo a entrada de gás no queimador é de 2 bar. O poder calorífico inferior e superior do gás natural, respectivamente, informado pelo fornecedor Sulgás, é de 8600 kcal/m³ e 9400 kcal/m³.

4.2 RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS

As resistências elétricas utilizadas na simulação e cotadas pelo possível fornecedor são fabricadas em aço inoxidável 304 do tipo “imersão”, específicas para aquecimento de água e demais fluidos. A temperatura máxima de funcionamento informada pelo fabricante, quando alimentada pela potência máxima de 10kW, é de 400°C, temperatura esta considerada na simulação computadorizada.

4.3 QUEIMADOR

O queimador, utilizado para aquecimento do fluido de lavagem, é do modelo WM-G10/3-AZM R1 ½” da fabricante Weishaupt. De acordo com o fabricante, o queimador tem potência de aquecimento de 600 kW quando conectado a uma tubulação de diâmetro 1.1/2” de gás a uma pressão de 2 bar. A potência de aquecimento considerada na simulação computadorizada foi de 297 kW. Para se obter essa potência líquida, foi verificada a vazão instantânea de gás natural de 29,7 m³/h, disponível em um medidor do equipamento, enquanto

o queimador estava funcionando em potência máxima e considerado o poder calorífico inferior de 8600 kcal/m³ do gás natural. Assim:

$$Potência\ máxima = Vazão\ Instantânea \cdot PCI \quad 09$$

O resultado obtido para a potência máxima foi de 255.420,00 kcal/h. Sabendo que 1 kW corresponde a 859.845,00 kcal/h, foi realizado uma regra de três para descobrir a potência líquida em kW:

$$Potência\ máxima = \frac{255.420,00}{860} = 297\ kW \quad 10$$

Assim, foi possível encontrar a potência líquida de 297 kW para o queimador. É importante mencionar que o queimador não está configurado para trabalhar em potência máxima de 600 kW. A potência configurada atualmente é de 370 kW, fazendo com que o queimador esteja trabalhando com 80% de eficiência ao considerar a potência líquida de 297 kW.

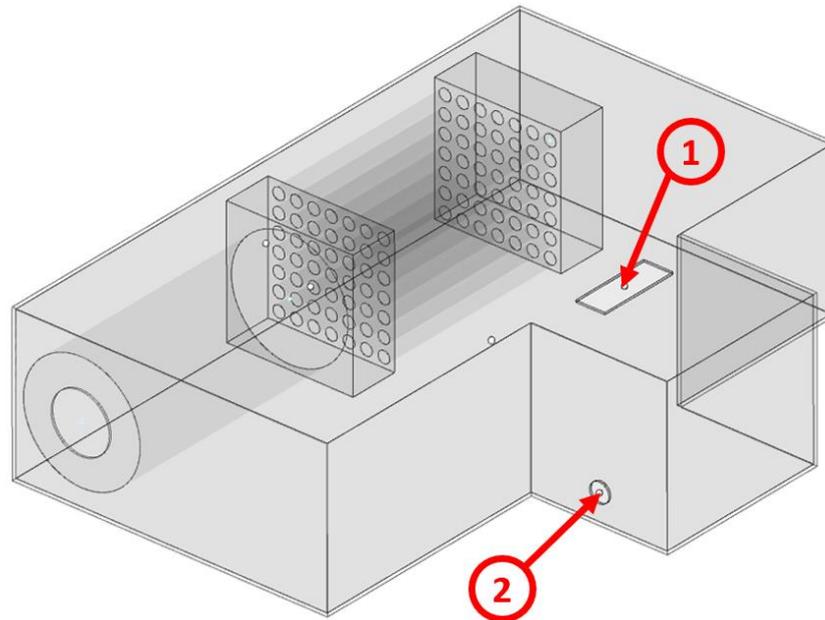
4.4 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Para execução das simulações computadorizadas foi utilizado um notebook com processador *Intel Core i7* de sexta geração, 16 *gigabytes* de memória *ram*, SSD de 500 *gigabytes* de armazenamento e placa de vídeo GTX 960 e Windows 10. O *software* utilizado para simulação é a versão estudantil do *Ansys Discovery*.

4.5 TANQUE

O tanque para lavagem de peças é utilizado como um armazenador e aquecedor de fluido. A entrada do fluido é demonstrada pelo “ponto 1” e a saída pelo “ponto 2” na figura 13.

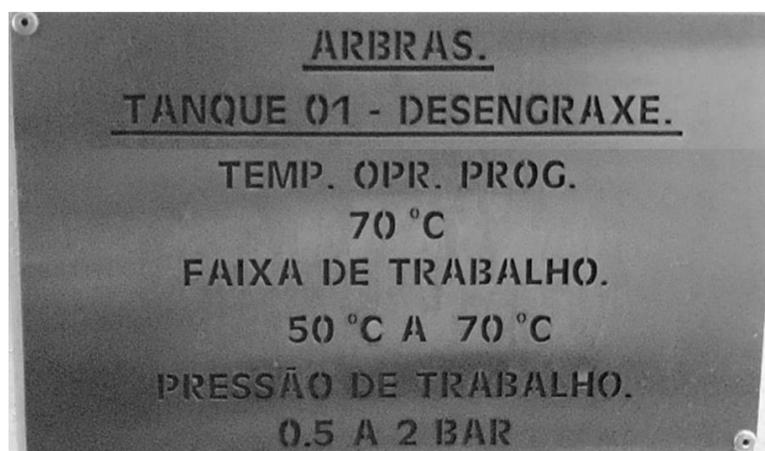
Figura 13: Ilustração do tanque.



Fonte: Do autor (2023).

A figura 14 apresenta alguns dados fixados ao tanque para instrução dos operadores. Demais informações sobre as dimensões do tanque são encontradas nas figuras 10 e 11 deste trabalho. O volume do tanque sem nenhuma fonte de aquecimento, aferido através do *software* de modelagem *Siemens NX* com a ferramenta *measure*, que informa o volume total de um sólido, é de 4238,18 litros. Já o volume com o sistema de aquecimento com queimador alimentado por gás natural é de 3631,16 litros. Por último, o volume com as resistências elétricas é de 4205,15 litros.

Figura 14: Informações sobre o tanque.



Fonte: Do autor (2023).

A vazão de entrada e saída da máquina é definida pela pressão de trabalho da bomba e pela geometria de bicos externos ao tanque que realizam a lavagem das peças. Considerando a área de um bico externo de $8,51 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ e que a máquina dispõe de 128 unidades deste mesmo bico; e a pressão apresentada no manômetro instalado entre a saída do tanque e os bicos externo é de $0,65 \text{ kgf/cm}^2$.

A equação utilizada para cálculo de vazão é uma expressão da Lei de Torricelli para a vazão de fluidos em um orifício. Ela não é atribuída a um autor específico, mas é uma aplicação da equação de Bernoulli e da equação de continuidade em fluidodinâmica. É uma fórmula clássica que descreve a vazão de um fluido em um orifício em um recipiente, onde a área da seção transversal, a altura da coluna de fluido e o peso específico do fluido desempenham um papel fundamental na determinação da taxa de vazão. Sendo assim, “ J ” representa a vazão em m^3/s , “ A ” representa a área do duto em m^2 , “ g ” representa a gravidade em m/s^2 , “ b ” representa a pressão dinâmica do sistema em kgf/m^2 e “ γ ” representa o peso específico em kgf/m^3 .

$$J = A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot b}{\gamma}} \quad 11$$

Assim,

$$A = 128 \cdot 8,51 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2\text{)}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$b = 6500 \text{ kgf/m}^2$$

$$\gamma = 988 \text{ kgf/m}^3$$

A partir da realização do cálculo é possível chegar ao valor de vazão “ J ” de $0,012375 \text{ m}^3/\text{s}$ ou $12,375 \text{ l/s}$.

4.6 FLUIDO PARA LAVAGEM DE PEÇAS

Para remover a oleosidade da superfície das peças é utilizada uma mistura de água e soda cáustica em flocos. De acordo com o responsável pelo setor de lavagem, são adicionados

6,88 gramas de soda cáustica para cada litro de água do tanque. Assim, para obter um fluido que seja eficiente na remoção da oleosidade da superfície da peça, são adicionados 25 kg de soda cáustica em 3631,16 litros de água do tanque, de acordo com as informações recebidas.

4.7 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação foi realizada em regime permanente, uma vez que a máquina não possui capacidade de processamento suficiente para realizar a simulação em regime transitório.

Os modelos foram exportados do *software* de modelagem *Siemens NX* em formato “*step*”, conhecido e compatível mundialmente com todos os *softwares* de modelagem disponíveis no mercado. A partir da importação dos modelos, foram definidas as condições de contorno, como áreas de aquecimento, volume (fluido), posições de entrada e saída do fluido, fluxo mássico de entrada e saída, potência e temperatura da tubulação de gás e resistências elétricas, e temperaturas de entrada do fluido e inicial do volume dentro do tanque. Na simulação computacional foi adotado a transferência de calor do tanque para com o ambiente e o valor utilizado para o coeficiente de convecção foi de, e padrão no software, $10 \text{ W/m}^2\text{C}$ a uma temperatura ambiente de 22°C .

O *software* de simulação *Ansys Discovery* utiliza o método de elementos finitos para realizar as simulações de engenharia. Existem duas opções para realizar as simulações dentro do *software*. A opção “*explore*” permite que computadores com menor capacidade de processamento executem simulações com malhas mais grosseiras, reduzindo a precisão do resultado. Já a opção “*refine*”, aumenta drasticamente a qualidade do resultado apresentado, porém necessita de uma unidade de processamento com grande capacidade.

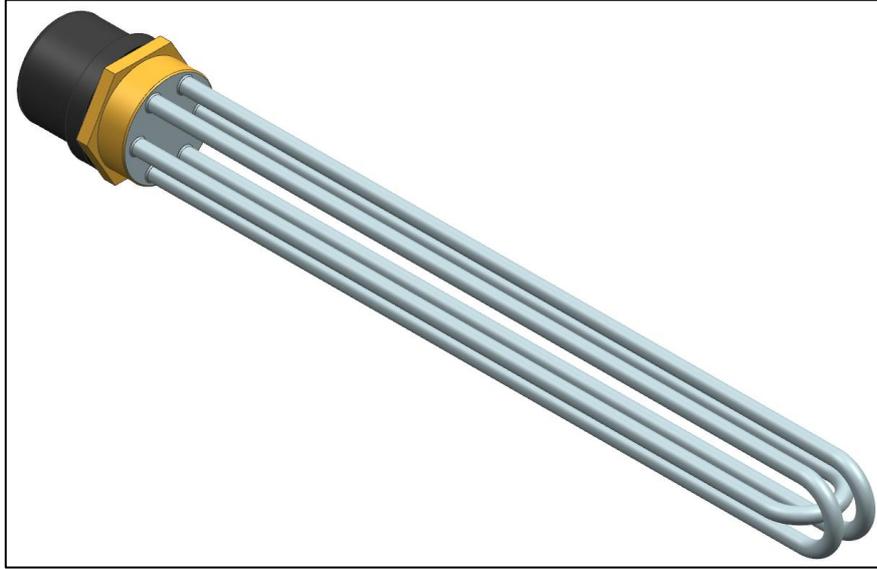
O *software Ansys Discovery* utiliza uma abordagem de modelagem direta e automatizada, o que significa que não há criação manual de malhas, número de nós e elementos. O *software* usa técnicas de discretização adaptativa para garantir que as simulações sejam precisas e eficientes. Ele ajusta automaticamente a resolução da malha conforme necessário para obter resultados precisos, sem que o usuário precise especificar o número de nós ou elementos. Essa abordagem é uma das vantagens do *software*, pois simplifica significativamente o processo de configuração de simulações, economizando tempo e tornando a simulação mais acessível para engenheiros e projetistas que podem não ser especialistas em malhas ou simulação numérica (ANSYS, s.d., tradução do autor).

No caso estudado, foi utilizada a opção "*explore*" com refino de 14,96mm, sendo este o melhor refino possível considerando a unidade de processamento disponível para realizar a simulação. Uma vez que as resistências possuem filetes de diâmetro 11,4mm, o software não realizaria a simulação pois o diâmetro é menor do que o melhor refino disponível. Sabendo disso, foram redesenhadas as resistências considerando a área total superficial de todos os filetes. Assim, através da equação da área superficial,

$$A_s = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h + 2 \cdot \pi \cdot r^2 \quad 12$$

onde, "*A_s*" representa a área superficial em mm², "*r*" representa o raio do cilindro e "*h*" representa a altura do cilindro, e com auxílio do *software* de modelagem *Siemens NX*, foi desenhado um corpo cilíndrico de diâmetro 75 mm e altura 498,52 mm, de modo que a soma da área superficial da face de topo e da superfície lateral resultasse em 121.878,87 mm², área superficial esta correspondente à soma das áreas dos filetes. Assim como dito no referencial teórico deste trabalho a respeito da simplificação de modelos muito complexos e de elevada necessidade de processamento, a simplificação da geometria da resistência, desde que respeitada a área superficial, pode ser tida como alternativa à realização da simulação computadorizada em máquinas que não possuam elevada capacidade de processamento. Definidas estas condições, foram iniciadas as simulações do modelo com resistências elétricas. No modelo com a tubulação de aquecimento via queimador a gás não foi necessário redesenhar a estrutura, uma vez que a menor geometria é maior que o melhor refino disponível. Na simulação computacional foi assumido a potência de 10 kW e temperatura máxima de trabalho de 400°C para cada resistência, como informado na especificação do produto. A Figura 15 apresenta o modelo real da resistência elétrica desenhada no *software* de modelagem.

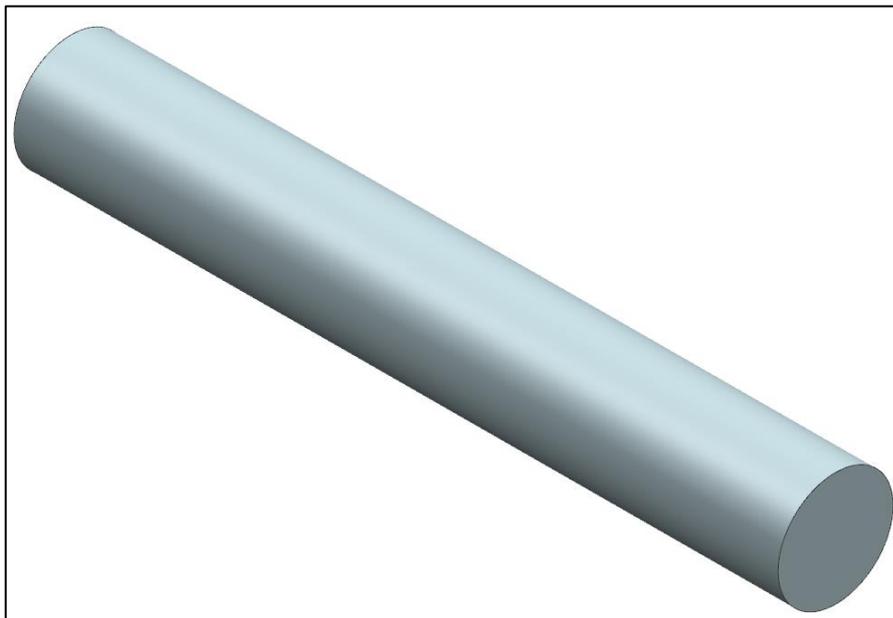
Figura 15: Resistência real.



Fonte: Do autor (2023).

Através da figura 16 é apresentado o corpo cilíndrico utilizado na simulação, contendo a mesma área superficial do modelo real.

Figura 16: Corpo cilíndrico (resistência) utilizado na simulação.



Fonte: Do autor (2023).

4.8 CUSTOS E INVESTIMENTOS

São dispostos abaixo os custos relacionados ao processo atual de aquecimento via queimador alimentado por gás natural e o investimento estimado para compra e instalação das resistências elétricas.

Custo do m³ de gás natural, baseado na média mensal dos últimos 6 meses (04/2023 – 10/2023): R\$ 3,60.

O consumo mensal em m³ de gás natural, baseado na média mensal dos últimos 6 meses, não foi possível mensurar uma vez que não há medidores de consumo em cada unidade de lavagem de peças. Além disso, o equipamento não está operando todos os dias do mês devido à baixa demanda dos últimos meses. Pode-se utilizar do consumo total da máquina, que possui mais 2 tanques para lavagens de peças. O consumo de gás natural, baseado na média mensal dos últimos 6 meses, foi de: 53m³/h.

Custo para aquisição das 15 unidades de resistências elétricas do modelo de imersão com potência unitária de 10 kW: R\$ 9.000,00.

A quantidade de resistências foi mensurada por uma empresa terceira que orçou o material necessário para adoção de tal proposta. Para fins de cálculo, pode ser utilizada a Equação 13 que realiza o cálculo de potência necessária, em kW, para aquecer determinada quantidade de um fluido, considerando a capacidade térmica específica do fluido, onde “*m*” representa a massa do fluido em kg, “*c*” representa a capacidade térmica específica do fluido em kcal/kg, “*T2*” representa a temperatura final desejada em °C, “*T1*” representa a temperatura inicial em °C e “*h*” representa o tempo em horas que se deseja atingir determinada temperatura.

$$P = \frac{m * c * (T2 - T1)}{860 * h} \quad 13$$

Desta forma, utilizando a Equação 13 para cálculo da potência necessária para aquecer o fluido de 10 a 50°C, tem-se o valor de 197,12 kW.

$$P = \frac{4238,18 * 1 * (50 - 10)}{860 * 1} = 197,12 \text{ kW} \quad 14$$

Custo com componentes eletrônicos, como controladoras, sensores, painéis e cabos, necessários para realizar o controle das resistências elétricas, informado pelo departamento de

elétrica da empresa, para um tanque: R\$ 50.000,00

Custo do kWh no mercado livre de energia, informado pelo departamento técnico da empresa: R\$0,21.

4.9 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Algumas condições de contorno foram definidas como padrões para o início das simulações, tanto no modelo atual quanto no modelo proposto.

A temperatura inicial do fluido dentro do tanque foi definida em 10°C, simulando uma situação em que a temperatura do ambiente é mais baixa, como acontece no inverno. Tal temperatura é verificada nos meses de junho e julho e foi informada pelo responsável pela área. A vazão de entrada e saída do fluido foi definida em 12,375 litros por segundo, de acordo com os cálculos realizados. Alguns parâmetros, como as propriedades dos materiais, foram utilizados do próprio banco de dados do *software* de simulação, abaixo listados no quadro 3.

Quadro 3: Lista de propriedades do material.

Condutividade térmica do aço inoxidável	14,6 W/m.K
Calor específico do aço inoxidável	0,486 kJ/kg.C
Densidade	7,97 g/cm ³

Fonte: *Ansys Discovery*.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

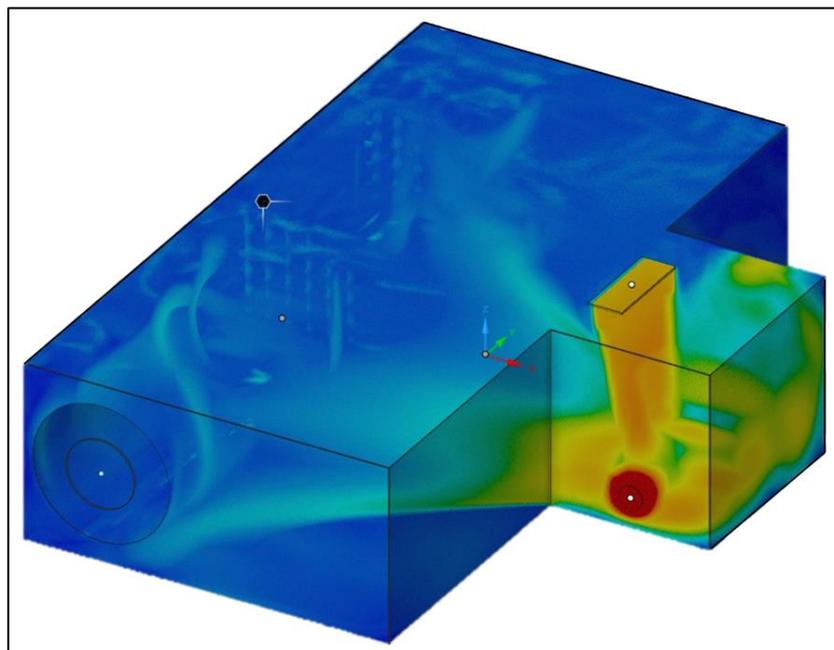
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através das simulações computadorizadas e demais discussões relevantes sobre os resultados obtidos.

5.1 FLUXO DO FLUIDO

Ao concluir o desenho do tanque no *software* de modelagem, percebeu-se a proximidade do bocal de entrada e saída. Antes mesmo de iniciar as simulações; se constatou que parte do fluido que entra no tanque, possivelmente, não realiza troca térmica com o aquecedor, fazendo com que se desloque diretamente para o bocal de saída.

A primeira simulação realizada demonstrou o que foi constatado. Observa-se na figura 17 as linhas de fluxo do fluido, demonstrando a baixa troca térmica entre o aquecedor e o fluido que, imediatamente, está entrando no tanque. As cores mais claras, assim como o amarelo, verde e azul claro demonstram onde o fluido tem maior velocidade. Já as tonalidades mais escuras como o azul marinho, demonstram velocidades menores.

Figura 17: Linhas de fluxo no sistema atual.

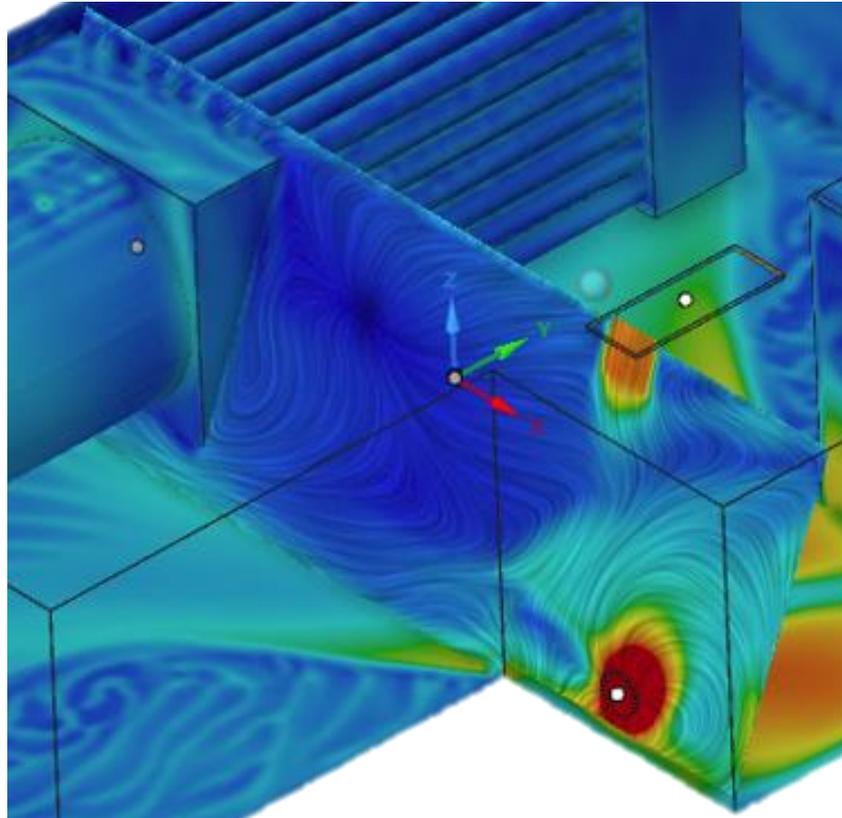


Fonte: Do autor (2023).

Realizando um corte bidimensional para demonstrar, literalmente, as linhas de fluxo do fluido na figura 18, constata-se a necessidade de adoção de um equipamento agitador

posicionado entre o aquecedor e a entrada/saída de fluido de tanque, com a finalidade de “movimentar” o fluido que está próximo do aquecedor e a entrada/saída de fluido do tanque e, assim, aumentar a temperatura do fluido na saída.

Figura 18: Linhas de fluxo em corte no sistema atual.



Fonte: Do autor (2023).

5.2 AQUECIMENTO ATUAL – QUEIMADOR A GÁS NATURAL

Tendo em vista o regime permanente da simulação computadorizada, foram realizadas sete simulações em sequência, adotando a temperatura inicial de 10°C para a primeira simulação tanto na entrada quanto interna do tanque, e para as demais seis simulações a temperatura de entrada considerada foi a temperatura de saída anterior. Assim, após realizar as simulações foi possível obter a temperatura de saída do fluido de $64,3^{\circ}\text{C}$. Sabendo que a faixa de temperatura de trabalho de fluido, segundo instruções passadas pelos responsáveis, deve estar entre 50°C e 70°C , considera-se que a simulação da situação atual, adotando as condições de contorno previamente explanadas, está de acordo com o que acontece na prática. O quadro

4 apresenta os dados obtidos através da primeira simulação com o sistema atual de aquecimento com queimador alimentado por gás natural.

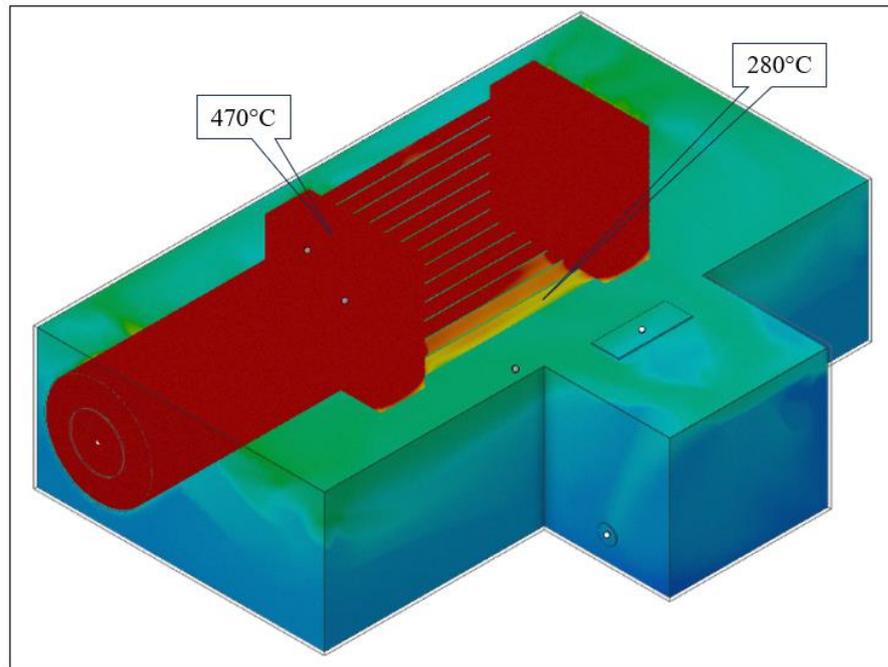
Quadro 4: Resultados da primeira simulação com sistema atual de aquecimento.

Sequência	Vazão de entrada (l/s)	Vazão de saída (l/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)
1	12,375	12,375	10	17,5
2	12,375	12,375	17,5	25,5
3	12,375	12,375	25,5	33,5
4	12,375	12,375	33,5	41,1
5	12,375	12,375	41,1	49
6	12,375	12,375	49	56,3
7	12,375	12,375	56,3	64,3

Fonte: do autor (2023).

Através da figura 19 é possível verificar os coeficientes de temperatura em toda a estrutura do tanque, tanto na entrada e saída do fluido quanto no aquecedor.

Figura 19: Temperatura demonstrada em diferentes tonalidades no sistema atual.

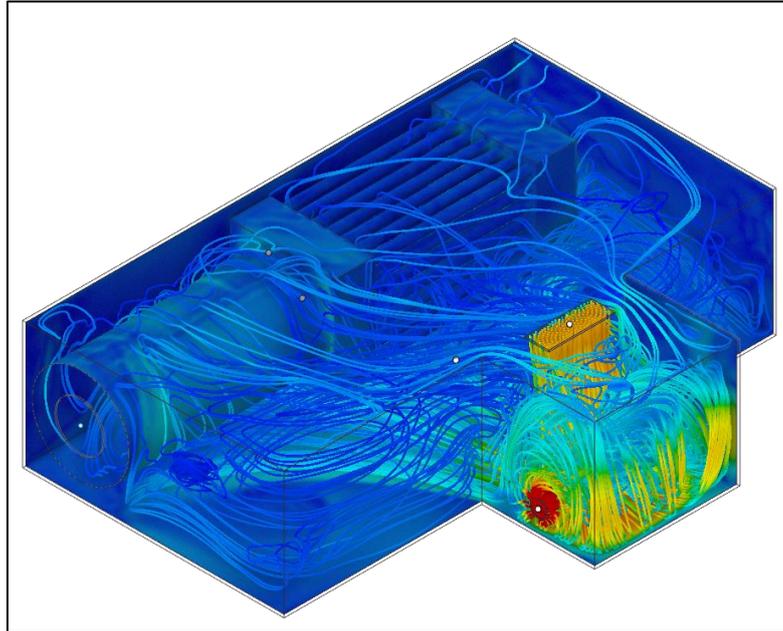


Fonte: Do autor (2023).

Através da simulação computadorizada é possível também demonstrar de diferentes formas o fluido e sua movimentação que podem auxiliar na resolução de problemas, como neste caso, um possível estudo para melhorar a troca térmica entre o aquecedor e o fluido que está entrando no tanque.

A figura 20 ilustra as linhas de fluxo do fluido, demonstrando através de diferentes tonalidades de cores o “percurso” do fluido que está em movimento dentro do tanque.

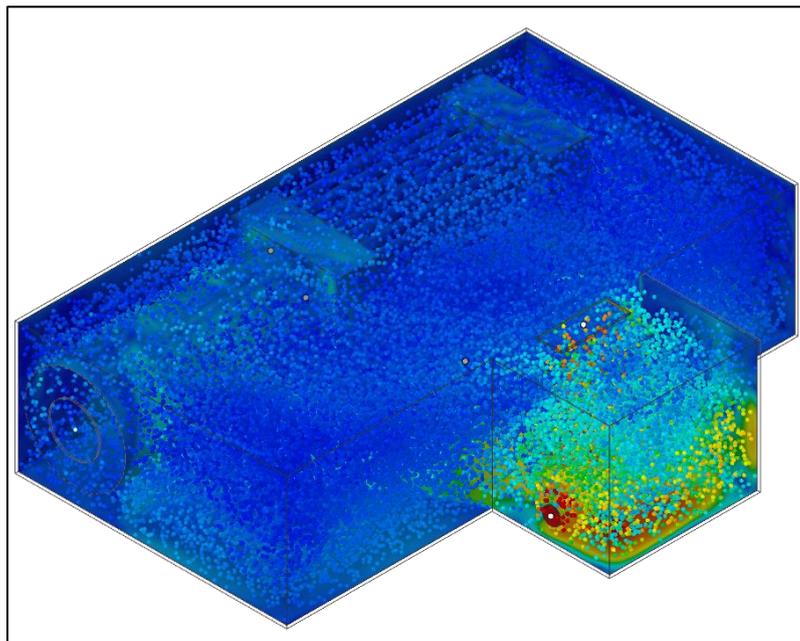
Figura 20: Linhas de fluxo do fluido.



Fonte: Do autor (2023).

A figura 21 demonstra o mesmo fluxo do fluido da figura anterior, porém utilizando esferas para demonstrar tal comportamento.

Figura 21: Fluxo do fluido demonstrado por esferas.

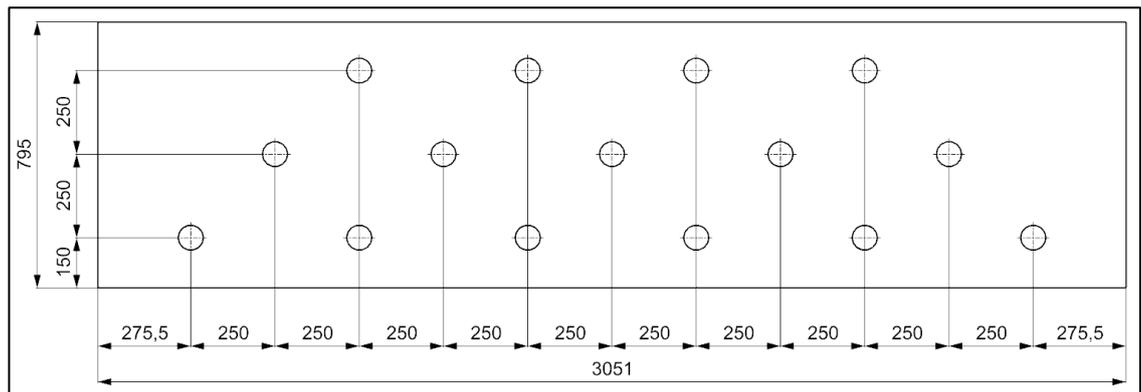


Fonte: Do autor (2023).

5.3 AQUECIMENTO PROPOSTO – RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS

A figura 22 demonstra a separação de resistências elétricas na parede lateral do tanque. As dimensões estão cotadas em milímetros. Tal disposição foi recomendada pelo fabricante e fornecedor de resistências.

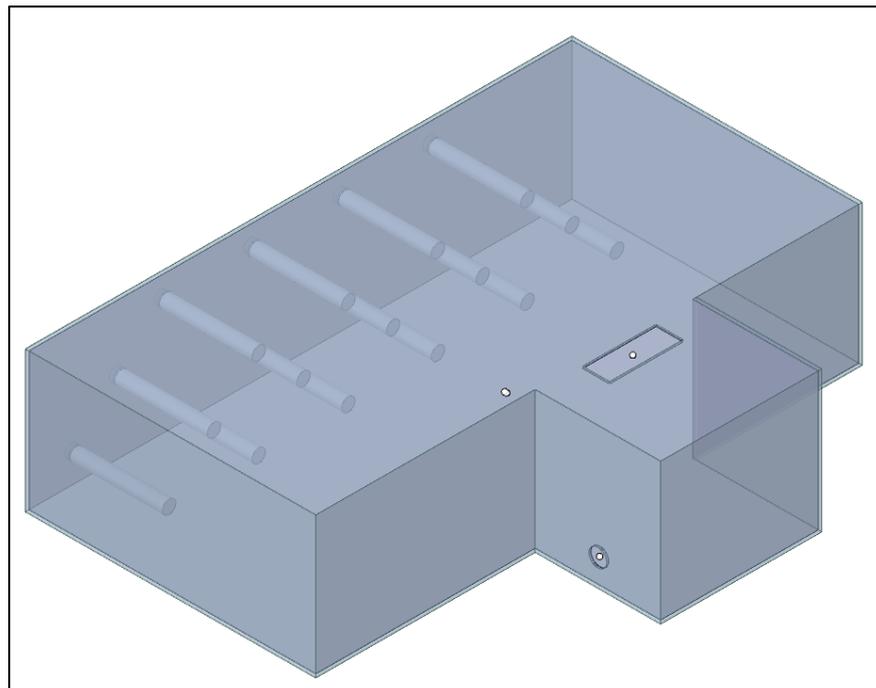
Figura 22: Disposição de resistências no tanque em vista lateral com dimensões em milímetros.



Fonte: Do autor (2023).

Já a figura 23 demonstra em perspectiva tridimensional a disposição das resistências no tanque.

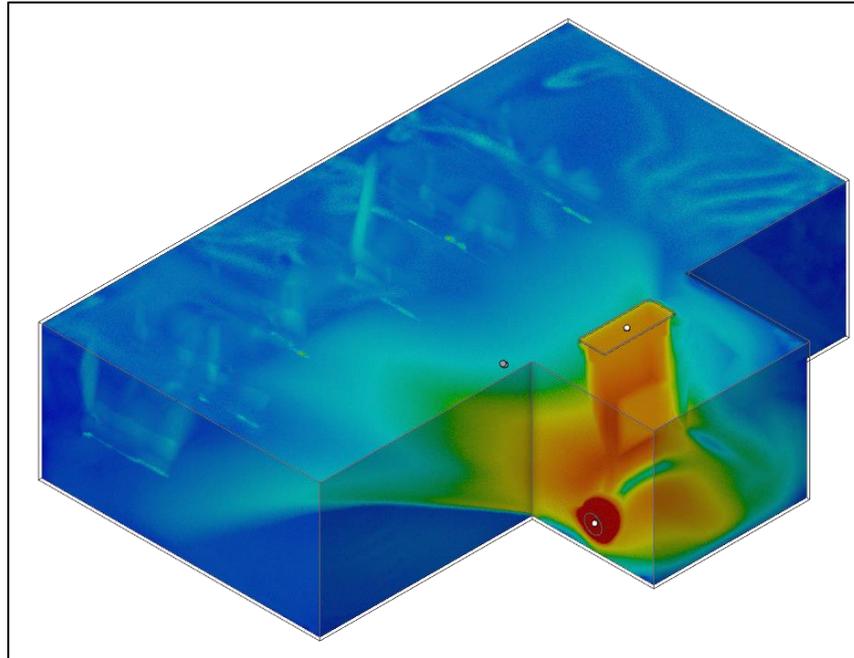
Figura 23: Disposição de resistências elétricas em vista tridimensional.



Fonte: Do autor (2023).

Alterando o sistema de aquecimento do fluido percebe-se o mesmo fenômeno de baixa interação entre o fluido que entra no tanque e as unidades de aquecimento, como ilustra a figura 24.

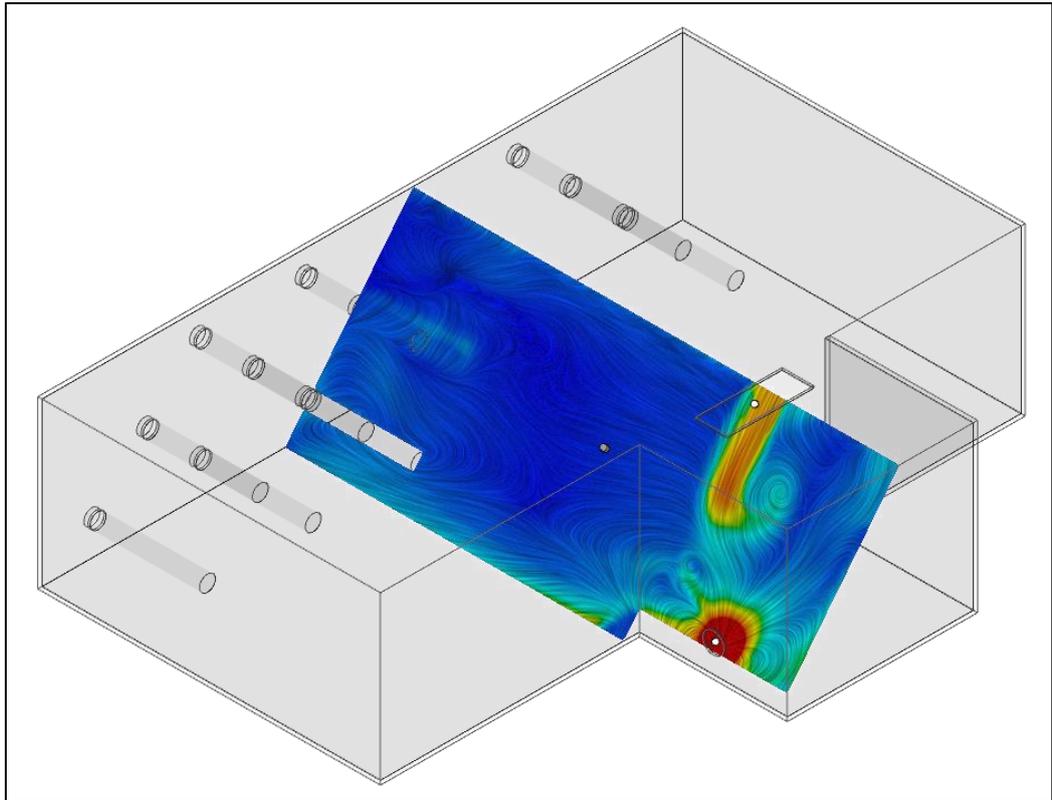
Figura 24: Linhas de fluxo no sistema proposto.



Fonte: Do autor (2023).

Para demonstrar de maneira bidimensional as linhas de fluxo, assim como no modelo atual, foi realizado um corte inclinado para evidenciar o deslocamento de parte do fluido que entra para a saída, conforme ilustrado na figura 25. Nota-se que a simplificação da geometria da resistência atendeu a necessidade de ilustrar as fontes de calor.

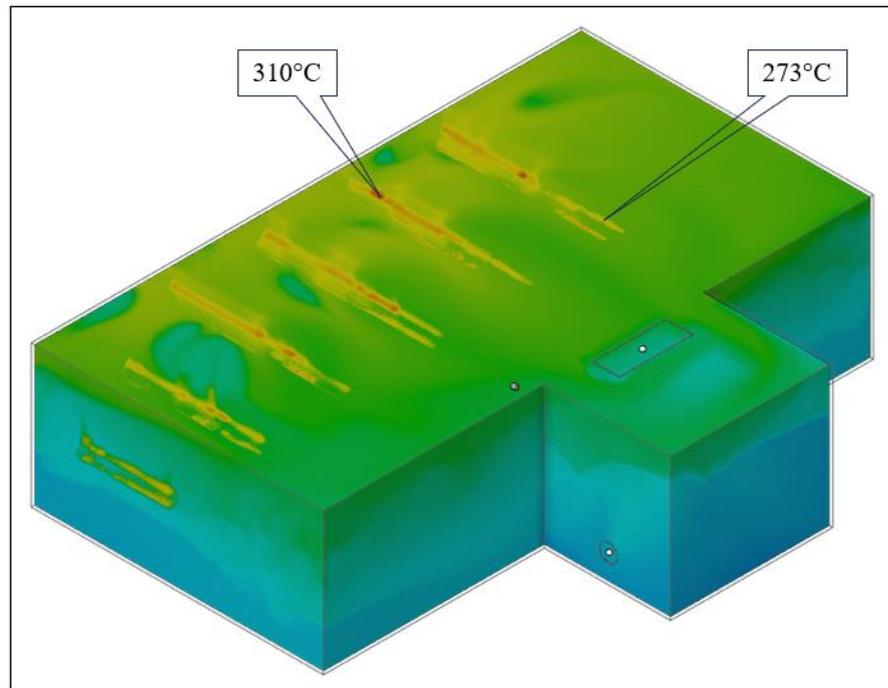
Figura 25: Linhas de fluxo em corte no sistema proposto.



Fonte: Do autor (2023).

Para demonstrar a troca térmica entre as resistências elétricas e o fluido, foi desenvolvida a figura 26 que apresenta a tabela de tonalidades de cores de acordo com a temperatura.

Figura 26: Temperatura demonstrada em diferentes tonalidades no sistema proposto.



Fonte: Do autor (2023).

Assim como no modelo atual de aquecimento, foram realizadas simulações em sequência em regime permanente para avaliar a temperatura de saída do fluido. A temperatura inicial do tanque e de entrada do fluido foi padronizada em 10° C. A potência de aquecimento das resistências adotada foi de 10 kW e a temperatura de trabalho quando em potência máxima de 400° C. O quadro 5 apresenta os valores obtidos através da simulação computadorizada.

Quadro 5: Resultados da segunda simulação com sistema proposto de aquecimento.

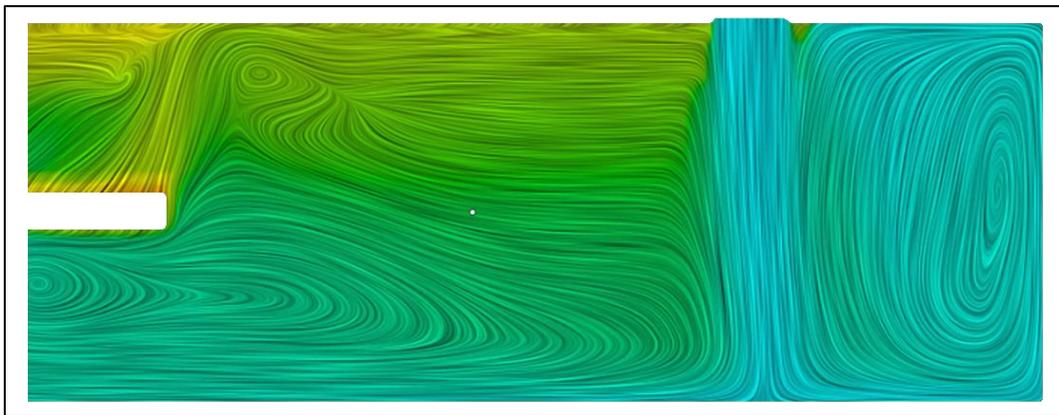
Iteração	Vazão de entrada (l/s)	Vazão de saída (l/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)
1	12,375	12,375	10	19,5
2	12,375	12,375	19,5	29,6
3	12,375	12,375	29,6	39,8
4	12,375	12,375	39,8	50,3
5	12,375	12,375	50,3	60,9
6	12,375	12,375	60,9	72,6
7	12,375	12,375	72,6	83,3

Fonte: Do autor (2023).

É possível verificar que a adoção de 15 resistências elétricas para o aquecimento do fluido atendeu à demanda de temperatura mínima de 50° C solicitada pelo equipamento, sendo que foram necessárias apenas 4 interações até alcançar a temperatura mínima solicitada.

Como complemento da demonstração das linhas de fluxo do fluido, foi realizado um corte transversal na seção, evidenciando o baixo deslocamento do fluido da direita, proveniente da entrada do tanque, com o fluido da esquerda que está em imediato contato com as fontes de aquecimento, conforme figura 27.

Figura 27: Linhas de fluxo em corte transversal da seção.

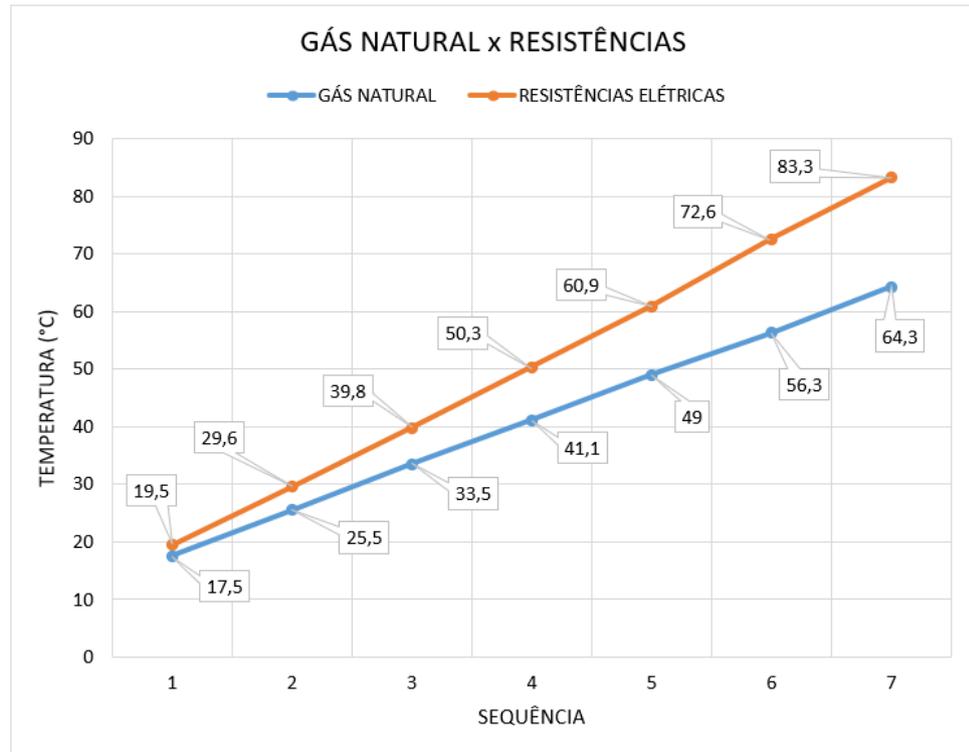


Fonte: Do autor (2023).

5.4 GÁS NATURAL *VERSUS* RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS

É importante analisar e comparar a situação atual com a situação proposta de modo que justifique, ou não, a alteração no equipamento. Dadas as simulações previamente apresentadas, é ilustrado na figura 28 a comparação entre as temperaturas atingidas, juntamente com o número de interações necessárias, dos dois sistemas. Verifica-se que a partir da quarta interação o sistema com resistências elétricas já atinge a temperatura mínima para o fluido, enquanto o sistema com gás natural atinge esta temperatura na sexta interação. Na figura 28, o eixo “Sequência” refere-se ao número de interação do modelo computacional.

Figura 28: Comparativo entre sistemas de aquecimento.



Fonte: Do autor (2023).

5.5 ANÁLISE DE CUSTO

Considerando o custo de R\$3,60 por m³ de gás natural, consumo de 53m³/h em 3 tanques de lavagens de peças e 8,8 horas de operação diária, é possível chegar ao valor de R\$ 1679,04:

$$\text{Custo diário (gás natural)} = 3,6 \cdot 53 \cdot 8,8 = \text{R\$ } 1679,04 \quad 15$$

O custo mensal, do sistema de gás natural, considerando 21 dias de trabalho, resulta em R\$ 35.259,84:

$$\text{Custo mensal (gás natural)} = 1679,04 \cdot 21 = \text{R\$ } 35.259,84 \quad 16$$

Já o custo do sistema de aquecimento com resistências elétricas, considerando R\$ 0,21 o custo do kWh no mercado livre de energia, 15 unidades de resistências em cada tanque (3 tanques no total), 10 kW de potência de cada resistência e 8,8 horas de operação diária, obtêm-se o valor de R\$ 831,60:

$$\text{Custo diário (resistências elétricas)} = 0,21 \cdot 15 \cdot 3 \cdot 10 \cdot 8,8 = \text{R\$ } 831,60 \quad 17$$

O custo mensal, do sistema de aquecimento através de resistências elétricas, considerando 21 dias de trabalho, resulta em R\$ 17.463,60:

$$\text{Custo mensal (gás natural)} = 831,60 \cdot 21 = \text{R\$ } 17.463,60 \quad 18$$

Desta forma, considerando os custos mensais dos sistemas atual e proposto, é possível chegar à uma redução de custo mensal de operação de R\$ 17.796,24:

$$\text{Redução de custo mensal} = 35.259,84 - 17.463,60 = \text{R\$ } 17.796,24 \quad 19$$

Já a redução de custo anual é estimada em R\$ 213.554,88:

$$\text{Redução de custo anual} = 17.796,24 \cdot 12 = \text{R\$ } 213.554,88 \quad 20$$

Considerando o investimento inicial de R\$ 150.000,00 em materiais elétricos e demais adequações, somados ao custo das resistências elétricas de R\$ 27.000,00 abrangendo 3 tanques, é possível chegar a um investimento inicial total de R\$ 177.000,00:

$$\begin{aligned} \text{Investimento inicial (resistências elétricas)} &= 150000 + 27000 = & 21 \\ & \text{R\$ } 177.000,00 \end{aligned}$$

Sabendo que a redução de custo mensal é estimada em R\$ 17.796,24 e o investimento inicial para alterar todo o sistema de aquecimento do fluido de 3 tanques da máquina é de R\$ 177.000,00, calcula-se que o investimento é recuperado a partir de 10 meses do início do funcionamento, desconsiderando correções e demais taxas de investimento do período:

$$\text{Início do retorno do investimento} = \frac{177000}{17796,24} = 10 \text{ meses} \quad 22$$

O quadro 6 apresenta um resumo com a síntese de custos do processo atual e do processo proposto.

Quadro 6: Síntese de custos.

Custo mensal – gás natural	R\$ 35.259,84
Custo mensal – resistências elétricas	R\$ 17.463,60
Redução de custo mensal	R\$ 17.796,24
Redução de custo anual	R\$ 213.554,88
Investimento inicial	R\$ 177.000,00
<i>Payback</i>	10 meses

Fonte: do autor (2023).

6 CONCLUSÃO

Ao avaliar os resultados obtidos através das simulações computadorizadas foi possível observar a proximidade da eficiência de aquecimento dos dois sistemas. Não foi possível realizar a simulação em regime transitório devido à capacidade de processamento da máquina disponível, porém entende-se que as trocas térmicas entre o fluido que entra no tanque e os sistemas de aquecimento foram apresentados adequadamente através das simulações, reproduzindo o que acontece na prática no sistema atual e o que acontecerá no sistema proposto.

Entende-se também que há a necessidade de conhecer os métodos utilizados para descobrir a real potência do queimador de modo a verificar se o mesmo está trabalhando de forma eficaz e, até mesmo, buscar por melhorias no sistema. Infelizmente não foi possível obter acesso aos cálculos devido à fatores externos como a responsabilidade por essa informação não estar atribuída ao setor de engenharia da empresa.

Quanto à implementação do sistema de aquecimento proposto com resistências elétricas, não foi possível realizar a instalação do mesmo devido ao corte nos investimentos para o ano de 2023. Estuda-se a possibilidade de implementação para o ano de 2024, uma vez que o *payback* do investimento se faz em menos de um ano, ou até mesmo uma análise com maior apuração do sistema atual para aumentar a eficiência da troca térmica, como será apresentado no capítulo de sugestões para trabalhos futuros.

Foi possível avaliar os custos de funcionamento tanto do modelo atual quanto do modelo proposto e obter números de redução de custo com *payback* abaixo de 1 ano, além de observar o funcionamento de ambos os modelos durante as simulações computacionais.

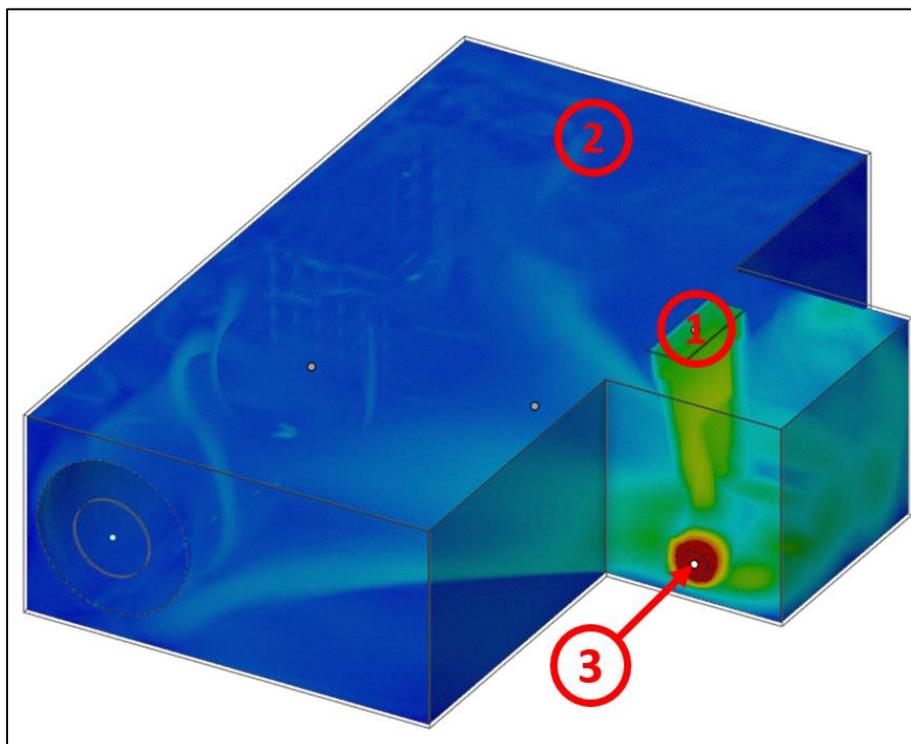
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas sugestões de estudo que objetivam o melhor aproveitamento do atual sistema de aquecimento a fim de evitar o investimento e desenvolvimento de uma nova forma de aquecimento do fluido.

7.1 DESLOCAMENTO DO PONTO DE ENTRADA

Como visto no capítulo 5.1 deste trabalho, onde são demonstradas as linhas de fluxo do fluido de entrada e saída do tanque, sugere-se o estudo da simulação computadorizada com a alteração do ponto de entrada do fluido. A figura 29 demonstra o tanque utilizado na simulação, onde o “ponto 1” refere-se à atual entrada de fluido e o “ponto 2” a entrada de fluido proposta e o “ponto 3” a saída de fluido atual. Além da alteração do ponto de entrada do fluido, sugere-se a inserção de um agitador com pás próximo à entrada do fluido proposta, de forma que aconteça uma maior mistura e troca térmica de todo o volume dentro do tanque com o sistema de aquecimento.

Figura 29: Sugestão de análise 1.

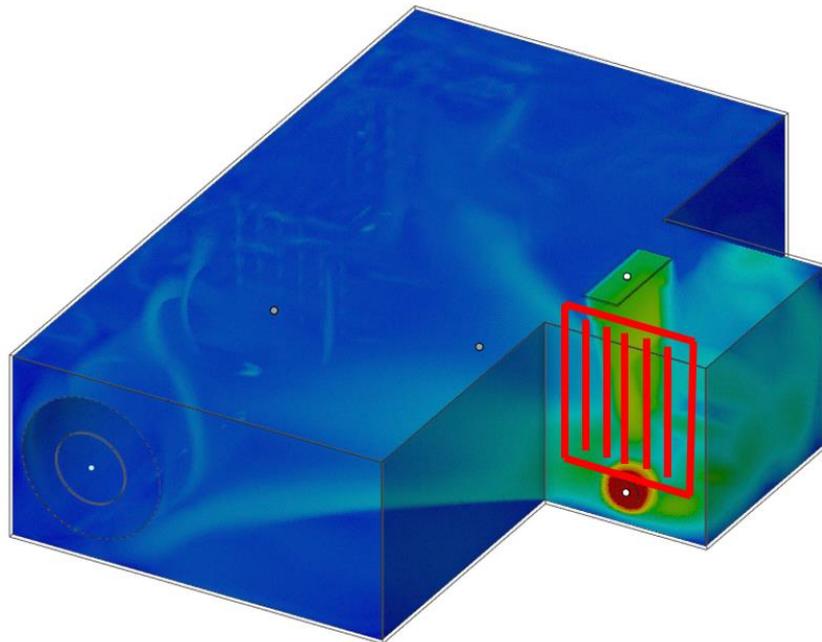


Fonte: do autor (2023).

7.2 PLACA SEPARADORA

Sugere-se o estudo e simulação computadorizada da inserção de uma placa separadora entre o ponto de entrada e saída do fluido, de forma que o fluido que entra no tanque, com menor temperatura, não seja diretamente direcionada à saída e que realize uma maior troca térmica com o sistema de aquecimento, como demonstra a figura 30.

Figura 30: Sugestão de análise 2.



Fonte: do autor (2023).

REFERÊNCIAS

ALVARENGA, Beatriz; MÁXIMO, Antônio. Curso de Física. Vol. 2. São Paulo. Harper & Row do Brasil Ltda. 1980.

ARAÚJO, Gustavo *et al.* Leis de Ohm. Catalão. Faculdade UNA. S.D.

Ansys Discovery: 3D Simulation Software. Disponível em: <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-discovery>. Acesso em nov. 2023.

BERTULANI, Carlos. O processo adiabático. Projeto: Ensino de Física a distância. Departamento de Engenharia e Biosistemas. Disponível em: http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/lce200/Processo_Adiabatico_Lier.pdf. Acesso em: 28 maio 2023.

BIZZO, Waldir A. Geração, Distribuição e Utilização de Vapor. UNICAMP. 2003.

BIZZO, Waldir; SÁNCHEZ, Caio G. Estequiometria das reações de combustão. [s.d.]. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: https://eva.fing.edu.uy/file.php/392/01_estequiometria_Da_Combustao.pdf. Acesso em: 28 maio 2023.

BRASIL, Rafael. “Para leigos: entenda o Método dos Elementos Finitos”. Disponível em: <https://kotengenharia.com.br/para-leigos-entenda-o-metodo-dos-elementos-finitos/#:~:text=O%20que%20C3%A9%20o%20M%C3%A9todo,como%20o%20de%20elementos%20finitos>. Acesso em: 31 nov. 2023.

BUDYNAS, Richard G; NIESBETT, J. Keith. Elementos de máquinas de Shigley. 10.

Carvão Vegetal. Organização Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ). [s.d.]. Disponível em: <https://www.iba.org/carvao-vegetal-2#:~:text=O%20carv%C3%A3o%20vegetal%20C3%A9%20o,sectores%20industriais%2C%20como%20as%20sider%C3%BArgicas>. Acesso em: 18 maio 2023.

Combustíveis Fósseis. Toda Matéria, [s.d.]. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/combustiveis-fosseis/>. Acesso em: 28 maio 2023.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Plano de redução de emissões de fontes estacionárias. São Paulo: Prefeitura de São Paulo, 2015. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2015/12/Guia-MTPD-Fontes-de-Combust%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2023.

Condução Térmica, Convecção Térmica e Irradiação Térmica. Só Física. Virtuosa Tecnologia da Informação, 2008-2023. Disponível em: <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Termologia/Calorimetria/transm2.php>. Acesso em: 18 maio 2023.

CONFOR. 2019. Disponível em: <https://confor.com.br/processos-de-combustao/>. Acesso em: 24 maio 2023.

COSTA, A. *et al.* Determinação do poder calorífico no controle de qualidade de combustíveis para sistemas de geração de energia e aquecimento industrial. In. ENEGEP – Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador. 2009. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_tn_stp_091_615_14073.pdf. Acesso em 28 maio 2023.

DIAS, Diogo Lopes. "O que é variação de entalpia?"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/o-que-e/quimica/o-que-e-variacao-entalpia.htm>. Acesso em: 28 maio 2023.

DIAS, Diogo Lopes. "O que é variação de entalpia?"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/o-que-e/quimica/o-que-e-variacao-entalpia.htm>. Acesso em: 28 maio 2023.

Ficha técnica resistência flangeada. SENSORTEMP. Farroupilha. 2023.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. "Entalpia de Combustão"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/quimica/entalpia-combustao.htm>. Acesso em: 28 maio 2023.

GARCIA, Roberto. Combustíveis e Combustão Industrial. 2ª ed. Rio de Janeiro. Editora Interciência. 2013.

Matriz Energética e Elétrica. [s.d.]. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 28 maio 2023.

MELO, Pâmella Raphaella. Propagação de calor (condução, convecção, irradiação). Mundo Educação. 2023. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/radiacao-conducao-conveccao.htm>. Acesso em: 16 maio 2023.

O que é Combustão. [s.d.]. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira | Inep. Ministério da Educação. Disponível em: <http://www.las.inep.br/~microg/combustao.htm#:~:text=Pode%2Dse%20definir%20a%20combust%C3%A3o,energia%20na%20forma%20de%20calor>. Acesso em: 28 maio 2023.

O que é Petróleo. Faculdade de Engenharia Mecânica. 2018. Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <https://www.fem.unicamp.br/index.php/pt-br/o-que-e-petroleo-dep>. Acesso em: 18 maio 2023.

OSSES, Juan. “O método dos volumes finitos”. ESSS. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/o-metodo-de-volumes-finitos/>. Acesso em: nov. 2023.

PORTAL LABORATÓRIOS VIRTUAIS DE PROCESSOS QUÍMICOS. Faculdade de Ciências e Tecnologia de Coimbra. Disponível em: http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=248&Itemid=422#1. Acesso em: 16 maio 2023.

PUSTELNIK, Marcelo. Combustíveis e Combustão. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Paraná. 2019. Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC037/Prof_Marcelo_Pustelnik/combustiveis_combustao.pdf. Acesso em: 28 maio 2023.

Resistências elétricas industriais. [s.d.]. Império das Resistências. Disponível em: <https://www.imperiodasresistencias.com.br/resistencias-eletricas-industriais>. Acesso em: 18 maio 2023.

SANCHES, Celso B. Energia de Biomassa. 2015. Faculdade de Engenharia. Universidade Estadual Paulista. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/eco2/fontes-de-energia/biomassa/>. Acesso em 18 maio 2023.

SOUSA, Rafaela. "Carvão mineral"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/geografia/carvao-mineral-combustivel.htm>. Acesso em: 28 maio 2023.