

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ROBSON RICARDO ZANELATTO

VIABILIDADE DO PRÉ-AQUECIMENTO DO AR PELOS GASES DE COMBUSTÃO
EM UMA CALDEIRA DE TERMOFLUIDO

PALOTINA

2024

ROBSON RICARDO ZANELATTO

VIABILIDADE DO PRÉ-AQUECIMENTO DO AR PELOS GASES DE COMBUSTÃO
EM UMA CALDEIRA DE TERMOFLUIDO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Energia, Setor de Palotina, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Wilson de Aguiar Beninca

PALOTINA
2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ATA DE REUNIÃO

Aos dois dias do mês de dezembro do ano de 2024, das 18h00min às 19h05min, no Setor Palotina, sala de reuniões da direção localizada no prédio do Seminário do Setor Palotina; compareceram para defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso, requisito obrigatório para a obtenção do título de Engenheiro de Energia o aluno **Robson Ricardo Zanelatto**, tendo como Título do Trabalho de Conclusão de Curso "*Viabilidade do pré-aquecimento do ar pelos gases de combustão em uma caldeira de termofluido*". Constituíram a Banca Examinadora os professores: **Prof. Dr. Wilson de de Aguiar Beninca (Orientador e Presidente da Banca)**, **Prof. Dr. Joel Gustavo Teleken** e o **Engenheiro Ricardo Fernando Zolett**. O orientador e Presidente da Banca concedeu a palavra ao discente, para exposição do seu trabalho. A seguir, foi concedida a palavra em ordem sucessiva aos membros da Banca de Exame, os quais passaram a arguir o discente. Ultimada a defesa, que se desenvolveu nos termos normativos, a Banca de Exame, em sessão secreta, passou aos trabalhos de julgamento, tendo atribuído ao discente as seguintes notas: **Prof. Dr. Joel Gustavo Teleken, nota: 90 (noventa)**, **Engenheiro Ricardo Fernando Zolett, nota: 90 (noventa)**, e o **Prof. Dr. Wilson de de Aguiar Beninca, nota: 90 (noventa e cinco)**. A nota final do discente, após a média aritmética dos três membros da banca de exame, foi **90 (noventa)** considerando o discente **APROVADO**. As considerações e sugestões feitas pela Banca de Exame deverão ser atendidas pelo discente sob acompanhamento de seu orientador. Nada mais havendo a tratar foi lavrada a presente ata, que, lida e aprovada, vai por todos assinada eletronicamente.



Documento assinado eletronicamente por **WILSON DE AGUIAR BENINCA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/12/2024, às 19:20, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **JOEL GUSTAVO TELEKEN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/12/2024, às 07:33, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **7020673** e o código CRC **FACE1738**.

Referência: Processo nº 23075.050875/2024-60

SEI nº 7020673



Documento assinado digitalmente

RICARDO FERNANDO ZOLETT

Data: 03/12/2024 22:04:34-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AGRADECIMENTOS

Aqui expresso minha gratidão a todas as pessoas que me apoiaram durante o período acadêmico.

Aos meus familiares, que sempre me ensinaram a não desistir dos objetivos e a enfrentar fortemente os desafios.

A minha esposa que esteve comigo durante toda a graduação, mantendo-se firme durante as dificuldades.

Aos colegas de graduação, pela troca de experiências e companheirismo ao longo desta etapa.

A todos os docentes do curso de Engenharia de Energia, pelos conhecimentos compartilhados, em especial ao meu professor e orientador Wilson de Aguiar Beninca, onde seu apoio foi fundamental na elaboração deste trabalho.

A empresa, a qual disponibilizou tempo e coleta de dados técnicos, que foram imprescindíveis para a realização desta pesquisa.

Por fim, quero agradecer a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O aproveitamento do calor dos gases de combustão das chaminés, para pré-aquecer o ar de combustão, é relevante em indústrias que utilizam sistemas de aquecimento por combustão, pois promove um aumento na eficiência de queima, e redução no consumo de combustível. O objetivo deste trabalho é avaliar a economia de combustível promovida pela elevação da temperatura do ar de combustão. Para atender esse objetivo, foi realizado um estudo de campo em uma caldeira de termofluido que utiliza óleo de xisto como combustível na geração de energia térmica para o processo unitário de cocção da proteína animal. Com o balanço de massa e energia, foi possível analisar a influência que o aquecimento do ar de combustão tem na economia de combustível. Para possibilitar esse aquecimento, foi proposto a instalação de um trocador de calor gás/gás na saída dos gases da caldeira, reaproveitando parte da energia térmica contida nos gases. A redução de combustível foi de 1% para cada 21.8°C na elevação da temperatura do ar de combustão.

Palavras-chave: Calor; ar de combustão; gases de combustão; economia de combustível.

ABSTRACT

Using the heat from the flue gases in the chimneys to preheat the combustion air is important in industries that use combustion heating systems, as it increases burning efficiency and reduces fuel consumption. The aim of this work is to evaluate the fuel savings achieved by raising the temperature of the combustion air. To meet this objective, a field study was carried out on a thermofluidic boiler that uses shale oil as fuel to generate thermal energy for the unit process of cooking animal protein. Using the mass and energy balance, it was possible to analyze the influence that heating the combustion air has on fuel economy. To make this possible, it was proposed to install a gas/gas heat exchanger at the boiler gas outlet, reusing part of the thermal energy contained in the gases. The fuel reduction was 1% for every 21.8°C increase in combustion air temperature.

Keywords: Heat; combustion air; flue gases; fuel economy.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1– CALDEIRA DE TERMOFLUIDO	14
FIGURA 2 – COMPARAÇÃO ENTRE AS PRESSÕES DE TRABALHO	15
FIGURA 3 – BALANÇO TÉRMICO SEM AQUECIMENTO DO AR.....	18
FIGURA 4 – BALANÇO TÉRMICO COM AQUECIMENTO DO AR	19
FIGURA 5 – IMAGEM DO INTERIOR	22
FIGURA 6 – PARTES DO EQUIPAMENTO.....	24
FIGURA 7 – VISTAS DO EQUIPAMENTO	25
FIGURA 8 – DESENVOLVIMENTO UTILIZADO	25
FIGURA 9 – TELAS DA IHM	26
FIGURA 10 – VOLUME DE CONTROLE	27
FIGURA 11 – VALORES DAS CORRENTES	37
FIGURA 12 – DISPOSIÇÃO ATUAL	39
FIGURA 13 – DISPOSIÇÃO APÓS A IMPLEMENTAÇÃO	40

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – ANÁLISE DA ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL.....	35
---	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – OPERAÇÃO COM UTILIZAÇÃO DO TROCADOR DE CALOR	20
TABELA 2 – CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO ATUAL E COM O TROCADOR	20
TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DO AQUECEDOR.....	23
TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS DO QUEIMADOR.....	23
TABELA 5 – ANÁLISE ELEMENTAR DO COMBUSTÍVEL.....	29
TABELA 6 – ANÁLISE DOS GASES DE COMBUSTÃO	29
TABELA 7 – DADOS DAS CORRENTES	30
TABELA 8 – CONDIÇÕES OPERACIONAIS.....	32
TABELA 9 –VALORES PARA O AR TEÓRICO E REAL	33
TABELA 10 – BALANÇO ENERGÉTICO.....	34
TABELA 11 – COMPARAÇÃO COM OUTROS ESTUDOS.....	35
TABELA 12 – VALORES ATUAIS X PROJETADOS	36
TABELA 13 – CARACTERÍSTICAS DAS CORRENTES	37
TABELA 14 – CUSTOS DO PROJETO	38
TABELA 15 – <i>PAYBACK</i>	38

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

°C	- Graus Célsius
A/C	- Relação Ar Combustível
BTU	- Unidade Térmica Britânica
cm ²	- Centímetro Quadrado
CO	- Monóxido de Carbono
CO ₂	- Dióxido de Carbono
h	- Horas
H ₂ O	- Água
IHM	- Interface Homem Máquina
kcal	- Quilocaloria
kg	- Quilograma
Kgf	- Quilograma Força
kmol	- Quilomol
kW	- Quilowatt
m ²	- Metro Quadrado
máx	- Máximo
min	- Mínimo
mmca	- Milímetros de Coluna de Água
N ₂	- Nitrogênio
Nm ³	- Normal Metro Cúbico
NO	- Monóxido de Nitrogênio
NO ₂	- Dióxido de Nitrogênio
NO _x	- Óxidos de Nitrogênio
O ₂	- Oxigênio
PID	- Proporcional Integral Derivativo
SO ₂	- Dióxido de Enxofre
SO ₃	- Trióxido de Enxofre
SO _x	- Óxidos de Enxofre
t/dia	- Tonelada por Dia
V	- Volts
VC	- Volume de Controle

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 JUSTIFICATIVA	10
2 REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 CALDEIRAS DE TERMOFLUIDO	14
2.1.1 Fluido térmico	15
2.2 COMBUSTÃO	15
2.2.1 Entalpia de Combustão	16
2.2.2 Gases de combustão.....	17
2.3 TROCADOR DE CALOR.....	17
2.4 PRÉ-AQUECIMENTO DO AR DE COMBUSTÃO	18
3 MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1 ANÁLISE DAS CONDIÇÕES INICIAIS	25
3.2 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA	26
3.2.1 Balanço de massa.....	27
3.2.2 Balanço de energia	29
3.3 VIABILIDADE DA INSTALAÇÃO DO TROCADOR DE CALOR.....	30
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	32
4.1 VAZÃO MÁSSICA DE COMBUSTÍVEL	32
4.2 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA	32
4.3 ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL	34
4.4 ANÁLISE DA VIABILIDADE	37
4.4.1 <i>Layout</i> preliminar para instalação do trocador de calor	38
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	41
REFERÊNCIAS.....	42
APÊNDICE A – BALANÇO DE MASSA ESTEQUIOMÉTRICO.....	44
APÊNDICE B – ANÁLISE DE COMBUSTÃO REAL	47
APÊNDICE C – BALANÇO ENERGÉTICO.....	50
APÊNDICE D – ANÁLISE FINANCEIRA	55

1 INTRODUÇÃO

A otimização do uso de energia disponível é um desafio contínuo e crescente, tanto em contextos industriais quanto em nossas atividades diárias. Essa questão se torna cada vez mais necessária, exigindo medidas eficazes para maximizar a eficiência energética.

O mercado obriga as empresas a procurarem cada vez mais a redução dos custos. Uma das maneiras mais inteligentes para alcançar esse objetivo é a economia da energia, pois o uso racional dos recursos energéticos proporciona, além da redução dos custos, grandes vantagens ambientais (Viana *et al.*, 2012).

A produção e distribuição de calor são frequentemente encontrados em ambientes fabris de diversos segmentos. A distribuição do calor é feita através de um fluido térmico como vapor, água quente e termofluido. Esses fluidos são produzidos em geradores próprios como caldeiras de diversos tipos que podem consumir uma variedade de combustíveis como sólidos, líquidos ou gasosos (Oliveira, 2015).

O presente trabalho tem como objetivo reduzir o consumo de combustível utilizado na geração de calor para cocção de proteína animal. Com esse objetivo, será feita uma avaliação prévia da instalação de um trocador de calor, para elevar a temperatura do ar de combustão, utilizando a energia dos gases de combustão em uma caldeira de termofluido utilizada para a cocção de proteína animal.

São objetivos específicos:

- Determinar a relação A/C;
- Quantificar a vazão mássica dos gases de combustão;
- Calcular o calor disponibilizado por kg de combustível;
- Determinar a economia de combustível;
- Analisar a viabilidade técnica e econômica;
- Elaborar o *layout* preliminar de instalação.

1.1 JUSTIFICATIVA

Estamos todos testemunhando uma evolução tecnológica exponencial que resulta no aumento constante do consumo de energia. Centrais eficientes podem ser

projetadas e melhoradas para aproveitar melhor a energia, reduzindo desperdícios e custos operacionais.

O gasto energético com a cocção em indústrias de processamento de proteína animal é elevado. A necessidade de altas temperaturas e processamento de grandes volumes de matéria prima são fatores que elevam o consumo de energia térmica.

O aquecimento do ar primário antes de introduzido na câmara de combustão ajuda a aumentar a temperatura da mistura ar-combustível. Isso resulta em uma combustão mais completa e eficiente, que pode aumentar a eficiência geral da caldeira diminuindo o consumo de combustível e consequentemente a redução das emissões de poluentes. A baixa eficiência significa que mais combustível é necessário para produzir a mesma quantidade de energia térmica.

A motivação para o presente trabalho surgiu da oportunidade de aproveitar a energia térmica dos gases de combustão para aquecer o ar de combustão, através de um trocador de calor, promovendo economia de combustível.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão aborda conceitos relacionados a caldeiras para aquecimento de fluido térmico. Também serão apresentados os principais aspectos da combustão conforme descritos na literatura e a importância do trocador de calor gás/gás em caldeiras.

Posteriormente, serão destacados trabalhos correlatos ao tema, que analisaram e contribuíram para o entendimento da economia de combustível proporcionada pelo aquecimento do ar de combustão utilizando a carga térmica dos gases de exaustão.

2.1 CALDEIRAS DE TERMOFLUIDO

As caldeiras de termofluido tem sua construção semelhantes as caldeiras tubulares. No entanto, não estão sujeitas a pressões elevadas como ocorre na geração de vapor por trabalharem com fluido térmico ao invés da água. Dentro da gama de caldeiras de termofluido, encontram-se principalmente as caldeiras constituídas por serpentinas (Couto, 2009).

O sistema de aquecimento de fluido térmico trata-se de um circuito fechado, onde um fluido específico recebe energia térmica no aquecedor, elevando a temperatura e transportando a energia térmica através de sua circulação em uma tubulação até o ponto de consumo, trocando o calor absorvido nas mais diversas máquinas e aquecendo, com isto, produtos, sistemas ou ambientes (Barros Junior, 2002). A FIGURA 1 representa a construção de uma caldeira de termofluido.

FIGURA 1– CALDEIRA DE TERMOFLUIDO



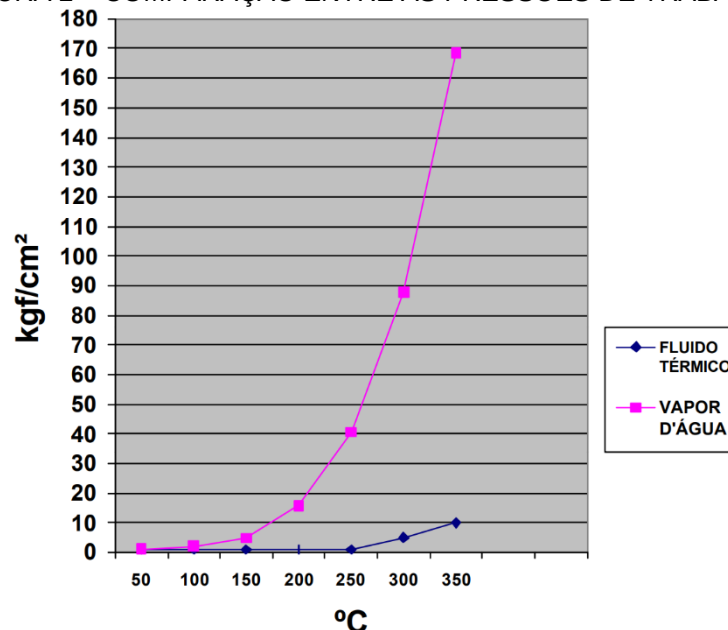
FONTE: Oil or gas Horizontal thermal oil boiler (2024)

2.1.1 Fluido térmico

Pode-se considerar fluido térmico todo fluido que faz o transporte de energia térmica entre dois pontos. O mais comum é a água, no entanto, em processos mais específicos onde são necessárias temperaturas mais elevadas, são utilizados fluidos térmicos específicos, orgânicos ou sintéticos, dependendo da sua aplicação e principalmente da faixa de temperatura de operação (Barros Junior, 2002)

Barros Junior (2002) comparou a pressão de um sistema que utiliza vapor de água saturado como fluido de transporte e um sistema que emprega fluido térmico. A FIGURA 2 apresenta as diferenças de pressões de trabalho em diversas temperaturas.

FIGURA 2 – COMPARAÇÃO ENTRE AS PRESSÕES DE TRABALHO



FONTE: Barros Junior (2002)

Quando comparamos o fluido térmico diretamente com um sistema de geração de vapor d'água saturado, a principal vantagem é operar a altas temperaturas e baixas pressões de trabalho.

2.2 COMBUSTÃO

Uma reação química em que um combustível sofre rápida oxidação, resultando na liberação de energia, é chamada de combustão. O oxidante mais utilizado nos

processos de combustão é o ar, pois é gratuito e abundante. Somente em processos específicos é empregado o uso de oxigênio puro (O_2) (Çengel; Boles, 2013).

A composição molar do ar seco pode ser aproximada para a proporção de 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio. Na combustão, o nitrogênio e a umidade presente no ar se comportam como um gás inerte, no entanto, sua presença influencia o processo de combustão uma vez que entra na câmara de combustão a uma temperatura mais baixa do que a encontrada nos gases de combustão, absorvendo parte da energia química liberada (Çengel; Boles, 2013).

A combustão é dita completa quando todo carbono, hidrogênio, enxofre e outros elementos presente no combustível são oxidados para formar dióxido de carbono, água e dióxido de enxofre. Quando os átomos do combustível não forem totalmente oxidados, a combustão é incompleta (Moran *et al.*, 2013).

A quantidade mínima de ar necessária para combustão completa é definida de ar teórico. O ar-combustível (AC) é uma definição importante utilizada para determinar a relação entre o ar e o combustível. Essa relação é calculada em base mássica ou molar (Wylen; Sonntag; Borgnakke, 1994).

Nos processos de combustão reais, é comum a utilização de mais ar do que a estequiométrica, para aumentar a chance da combustão completa. A quantidade acima da estequiométrica é denominada de excesso de ar e abaixo dela é chamado de deficiência de ar, geralmente são expressas em percentual (Çengel; Boles, 2013).

Na queima de gás natural e óleo combustível, podem ocorrer a formação de NO_x e SO_2 . Em relação ao NO_x , podem ocorrer pela dissociação e oxidação do nitrogênio no ar de combustão em temperaturas acima de $1538^\circ C$. Também podem ser formados pelo nitrogênio presente no combustível, que está ligado a cadeia de hidrocarbonetos. A quantidade de SO_2 formado, depende do teor de enxofre presente no combustível (Babcock e Wilcox, 2005).

2.2.1 Entalpia de Combustão

Durante a combustão, ligações entre os átomos que compõem as moléculas são quebradas e novas ligações se formam. Portanto, a energia química associada as moléculas antes e depois da combustão são diferentes, pois a estrutura química molecular é alterada. Tipicamente a quantidade de moléculas após a combustão é maior do que a presente antes do processo.

A entalpia de combustão representa a quantidade de calor liberado quando 1 kmol de combustível é totalmente queimado a uma temperatura e pressão especificados (Çengel; Boles, 2013).

Mesmo atendendo princípios fundamentais que assegurem a economia na queima de combustível, não é possível garantir o aproveitamento total da energia presente nos combustíveis. Uma parcela significativa é perdida para o meio ambiente pelos gases da chaminé, pelas cinzas, paredes do equipamento e combustão incompleta (Bazzo, 1995).

2.2.2 Gases de combustão

A combustão é uma série de reações químicas complexas e rápidas, e os produtos gerados dependem de vários fatores. Mesmo que em processos reais seja usual trabalhar com excesso de ar, é comum a presença de monóxido de carbono e oxigênio não consumido nos gases de combustão (Moran *et al.*, 2013).

Quando as quantidades de ar e combustível são conhecidas com exatidão, a previsão da composição dos produtos é relativamente fácil aplicando-se o balanço de massa a cada elemento. No entanto, em processos reais, dificilmente são completos, mesmo com ar em excesso. Nesses casos é improvável prever com exatidão a composição dos produtos apenas com o balanço de massa (Çengel; Boles, 2013). Em um processo de combustão real, os produtos só podem ser determinados através de medições com equipamentos específicos (Moran *et al.*, 2013).

Visto que água é formada na queima de combustíveis que contêm hidrogênio, a fração molar do vapor de água nos gases de combustão pode ser significativa. Se os gases de combustão forem resfriados abaixo do ponto de orvalho, vapor de água começa a condensar nos dutos dos gases de combustão e em outras partes metálicas podendo causar corrosão (Moran *et al.*, 2013).

2.3 TROCADOR DE CALOR

Os trocadores de calor são equipamentos que realizam a troca de calor entre dois fluidos que se encontram em diferentes temperaturas, evitando contato direto entre si. A taxa de transferência de calor é o fator mais importante na seleção do trocador de calor. Ele deve ser capaz de transferir calor a uma taxa definida afim de

alcançar a temperatura desejada para uma vazão mássica especificada (Çengel; Ghajar, 2012).

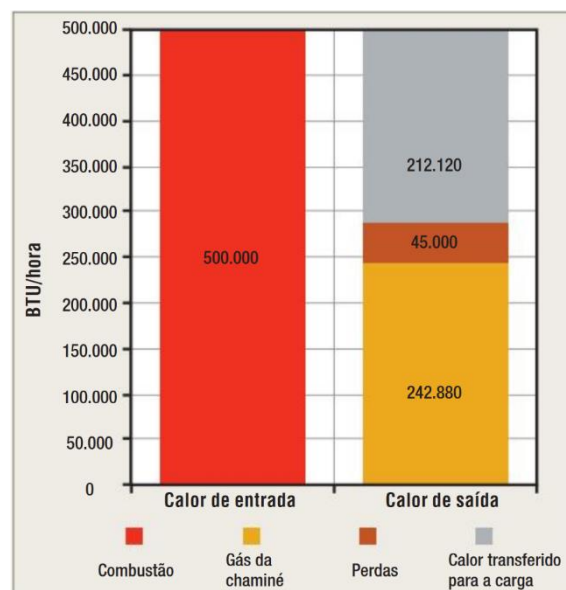
A troca térmica entre dois fluidos em diferentes temperaturas ocorre em inúmeras aplicações da engenharia. Suas aplicações específicas podem ser encontradas em diversos setores industriais. Entre elas, temos o aquecimento e condicionamento de ar, produção de potência, recuperação de calor em processos e processamento químico (Bergman, 2019).

Nos projetos de aquecedores de ar, dentre outros fatores, destacam-se a influência da temperatura e velocidade das correntes, tipo de material e sua disposição, presença de vapores condensáveis e cinzas nas correntes, custos operacionais e de manutenção (Bazzo, 1995).

2.4 PRÉ-AQUECIMENTO DO AR DE COMBUSTÃO

Morris (2015) destaca que o processo de pré-aquecimento do ar através dos gases de combustão tem como principal objetivo a economia de combustível. Desta forma é necessário menos combustível para gerar a mesma quantidade de energia térmica. Ele apresenta as possibilidades de economia de combustível para um forno a 982°C. A FIGURA 3 apresenta os resultados do balanço térmico para utilização do ar sem aquecimento.

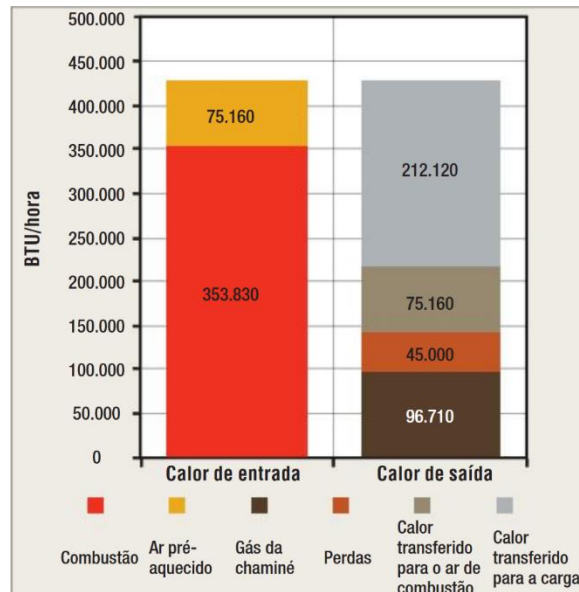
FIGURA 3 – BALANÇO TÉRMICO SEM AQUECIMENTO DO AR



FONTE: Morris (2015).

Sem o ar pré-aquecido, o calor transferido para a carga é de 42% do calor de combustão. A FIGURA 4 apresenta o balanço térmico para o ar de combustão pré-aquecido a 538°C (Morris, 2015).

FIGURA 4 – BALANÇO TÉRMICO COM AQUECIMENTO DO AR



FONTE: Morris (2015).

Com o ar pré-aquecido, são transferidos 75.160 BTU/h dos gases de combustão de volta para o forno na forma de calor no ar de combustão, elevando para 60% a transferência do calor de combustão para a carga. A economia de combustível é 29% (Morris, 2015).

Pizzutti (2021) analisou o comportamento antes e depois da aplicação de um trocador de calor em um processo de combustão de gás natural em fornos industriais, visando aquecer o ar antes da mistura ar-gás para a combustão. Após a instalação do trocador, verificou as mudanças devido a energia recuperada dos gases de combustão. A TABELA 1 apresenta as características das correntes antes e depois do trocador de calor.

TABELA 1 – OPERAÇÃO COM UTILIZAÇÃO DO TROCADOR DE CALOR

Características de funcionamento	Unidade	Equalização
Tipo de combustível	Gás natural	
Vazão Fumaças	Nm ³ /h	3.500
Temperatura Fumaças	°C	1.220
Temperatura Fumaças Entrada do Trocador	°C	920
Vazão do Ar Comburente	Nm ³ /h	3.300
Temperatura do Ar Entrada do Trocador	°C	20
Características de funcionamento	Unidade	Equalização
Vazão do Gás Combustível	Nm ³ /h	297
Variação de Pressão Máxima	mmca	50
Temperatura do Ar de Saída do Trocador	°C	450
Temperatura Fumaças Saída do Trocador	°C	650

FONTE: Adaptado de Pizzutti (2021).

Através do estudo é possível analisar a influência do trocador de calor na temperatura das correntes. Foi acompanhado a produção e o consumo de gás natural antes e depois da instalação do trocador de calor em um período de 6 meses e constatou-se uma diminuição de aproximadamente 25,6% no consumo de combustível (Pizzutti, 2021).

Maia Júnior e Mazza (2002), analisaram o aproveitamento da carga térmica dos gases de combustão em um forno de aquecimento de tarugos de aço para forja, onde os gases de combustão saem a 700°C. Avaliando alternativas para esse aproveitamento, a que melhor apresentou custo-benefício foi um sistema com trocador de calor no corpo do queimador. A TABELA 2 apresenta valores para o percentual na economia de combustível e monetária, considerando o custo do óleo combustível 1A sendo de R\$0,60/kg.

TABELA 2 – CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO ATUAL E COM O TROCADOR

Temperatura dos gases de Exaustão:700°C		
Temperatura do Ar de Combustão (°C)	Economia de combustível (%)	Economia (R\$/ano)
25	0	0
Temperatura dos gases de Exaustão:600°C		
25	6,9	13.413,60
50	8,2	15.940,80
75	9,5	18.468,00
100	10,6	20.606,40
125	11,8	22.939,20

FONTE: Adaptado de Maia Junior e Mazza (2002).

As únicas formas de reduzir significativamente o consumo de combustível são diminuindo a temperatura dos gases de saída ou elevando a temperatura do ar de combustão ou a combinação destas duas alternativas. De acordo com a TABELA 2, é perceptível a tendência da economia de combustível com o aumento da temperatura do ar de combustão (Maia Junior e Mazza, 2002).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado a partir de um estudo de campo e os dados coletados em uma caldeira de termofluido, que opera cerca de 19 h/dia. O calor gerado é utilizado para cocção de aproximadamente 190 t/dia de proteína animal.

O equipamento consiste em uma serpentina de três passes, que na parte externa dos tubos o gás de combustão proveniente da queima de óleo de xisto desloca-se para a chaminé. No interior dos tubos circula fluido térmico que é aquecido e então transportado até os pontos de consumo no processo. Após transferir calor, o fluido retorna para a caldeira para ser aquecido novamente. A FIGURA 5 apresenta a disposição das partes internas.

FIGURA 5 – IMAGEM DO INTERIOR



FONTE: O autor (2024).

A caldeira possui um queimador, que é responsável pela mistura e queima do óleo de xisto com o ar atmosférico. Ele é controlado por um sistema PID que opera para manter o *set point* de temperatura desejado do fluido térmico pelo processo industrial. Também consiste em um sistema de pressurização do óleo combustível, para elevar a pressão antes de entrar na câmara de combustão.

Durante a operação, há períodos em que a combustão é interrompida devido as variáveis do processo.

As características da caldeira e do queimador são apresentadas na TABELA 3 e TABELA 4, bem como as principais partes do equipamento que estão dispostas na FIGURA 6.

TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DO AQUECEDOR

AQUECEDOR DE FLUIDO TÉRMICO	
Tipo	KH 40/25
Ano	2005
Pressão de trabalho máximo	10 kgf/cm ²
Pressão de teste	21 kgf/cm ²
Temp. de trabalho máximo	305 °C
Pressão de projeto	18 kgf/cm ²
Temp. de projeto	350 °C
Capacidade	4.000.000 kcal/h
Fluído térmico	-
Fluxo mínimo	304 m ³ /h
Superfície de aquecimento	177,2 m ²
Conteúdo	3,42 m ³

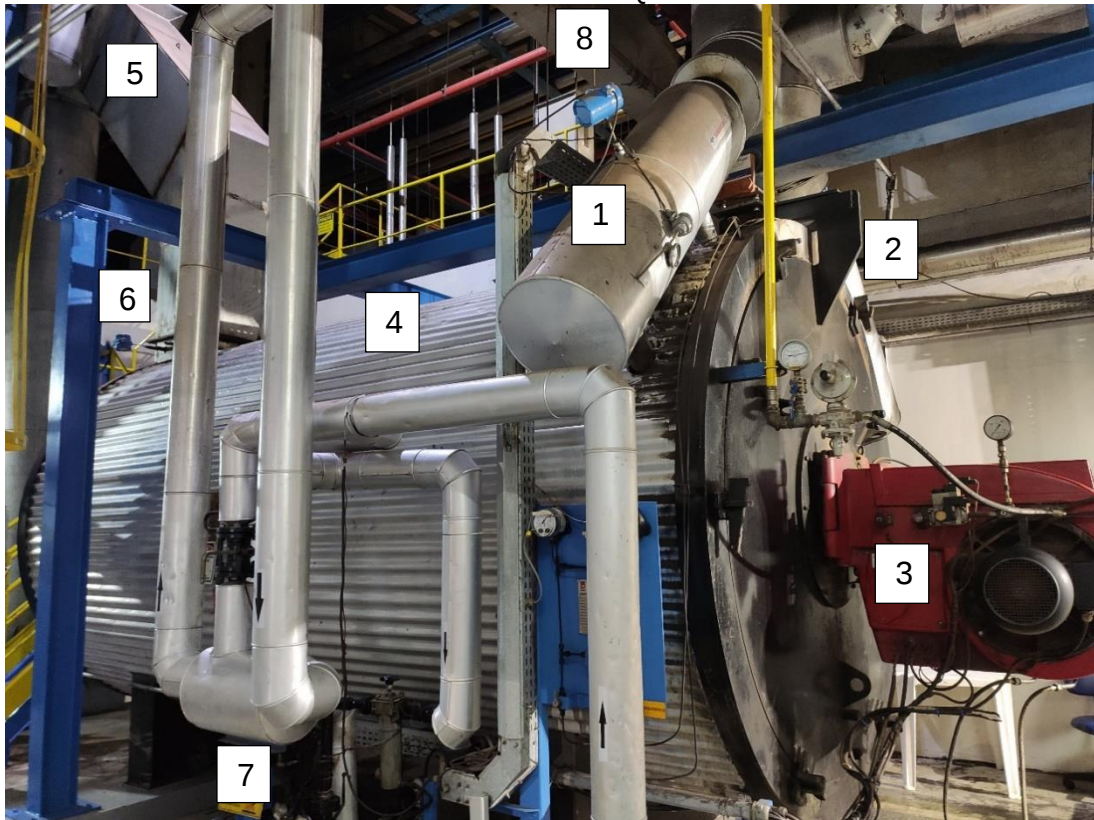
FONTE: O autor (2024).

TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS DO QUEIMADOR

QUEIMADOR	
Ano	2005
Potência (kW)	min. 1800 máx. 7265
Vazão comb. (Kg/h)	min. 160 máx. 646
Tensão da rede (V)	380
Potência elétrica (kW)	18,64

FONTE: O autor (2024).

FIGURA 6 – PARTES DO EQUIPAMENTO

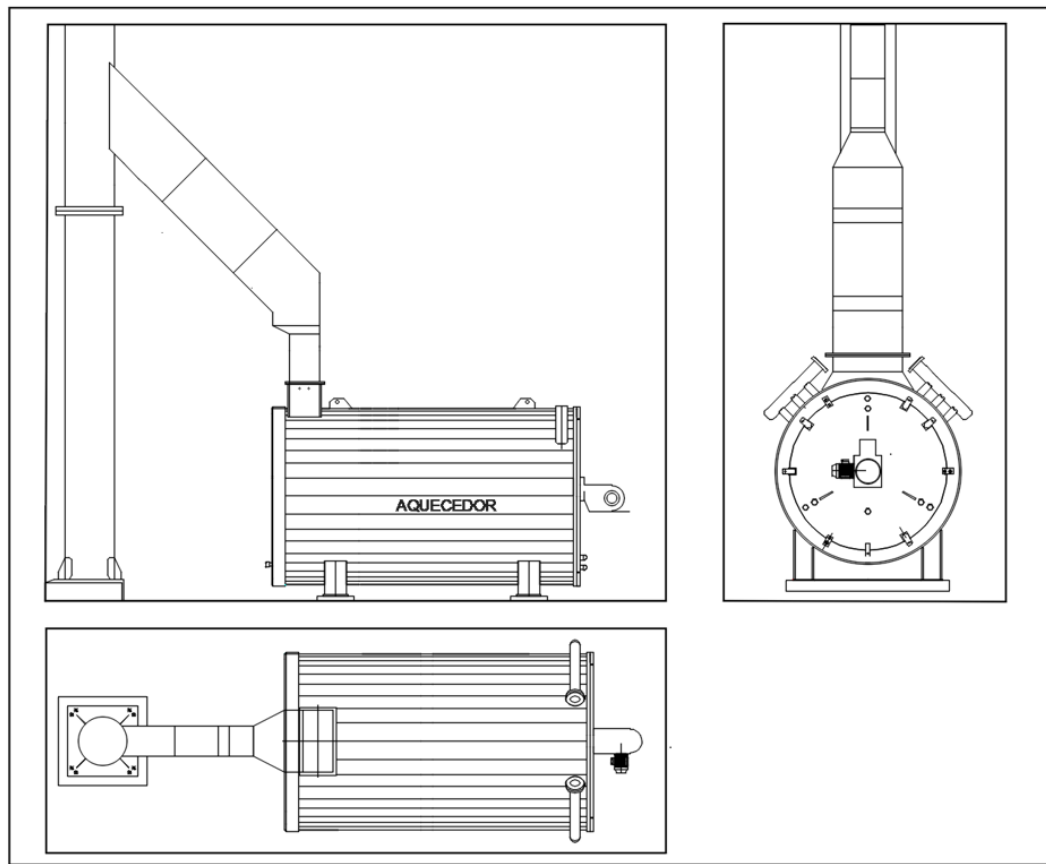


FONTE: O autor (2024).

- 1 – Entrada de fluído térmico.
- 2 – Saída de fluído térmico.
- 3 – Queimador.
- 4 – Câmara de combustão/serpentina.
- 5 – Saída dos gases.
- 6 – Sensor de temperatura.
- 7 – Sistema de pressurização do combustível.
- 8 – Sensor de temperatura.

A FIGURA 7 apresenta as vistas lateral, frontal e superior.

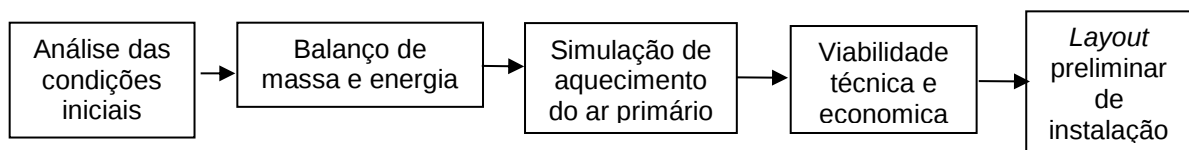
FIGURA 7 – VISTAS DO EQUIPAMENTO



FONTE: O autor (2024).

A FIGURA 8 apresenta a sequência de desenvolvimento utilizada para o estudo.

FIGURA 8 – DESENVOLVIMENTO UTILIZADO



FONTE: O autor (2024).

3.1 ANÁLISE DAS CONDIÇÕES INICIAIS

Nesta etapa, foram coletados os dados referentes a temperatura dos gases de combustão, tempo de operação, consumo de combustível e seu poder calorífico.

Para determinar a temperatura dos gases utilizada nos cálculos, utilizou-se um sensor já instalado no equipamento. A leitura do sensor, identificada como "TT-113", é exibida na IHM. Para definir o tempo em que houve a combustão, coletou-se os

dados durante 30 dias, utilizando o horímetro do equipamento. A FIGURA 9 apresenta as telas no qual os dados foram coletados.

FIGURA 9 – TELAS DA IHM



FONTE: O autor (2024).

Com base no histórico de aquisição de combustível ao longo de 11 meses de 2023, foi calculada a média mensal de consumo. O valor do poder calorífico inferior foi obtido com o fornecedor do combustível.

Para determinar a vazão mássica de combustível utilizou-se a equação (1):

$$\dot{m} = \frac{m_{\text{comb}}}{h_{\text{op}}} \quad (1)$$

Onde:

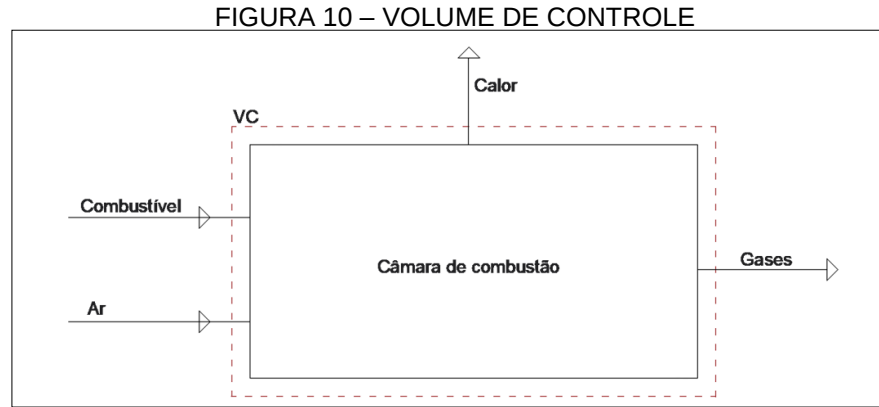
$\dot{m}$ = vazão mássica de combustível (kg/h)

m_{comb} = consumo de combustível (kg/mês)

h_{op} = tempo de operação (h/mês)

3.2 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA

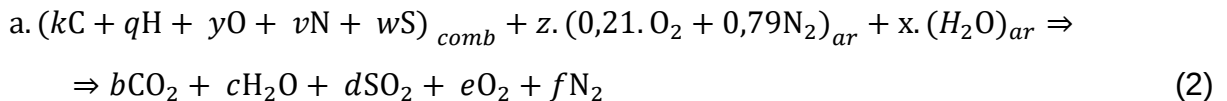
Foi definido o volume de controle para o balanço de massa e energia, representado na FIGURA 10.



FONTE: O autor (2024).

3.2.1 Balanço de massa

As frações molares foram determinadas, levando-se em consideração os seguintes componentes presentes nos gases de combustão: CO_2 , H_2O , SO_2 , O_2 e N_2 . Adotou-se a composição do ar seco, sendo 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio. Com base nesse conjunto de componentes, foi realizado o balanço da reação estequiométrica teórica definindo os coeficientes (k , q , y , v , w , z , x , b , e , d , c , f) de acordo com a equação (2).



A partir da análise do percentual de O_2 em base seca, medido nos gases de combustão, foi determinado o excesso de ar utilizado no equipamento, utilizando a equação (3).

$$E_{ar} = \frac{21}{21 - \% O_2} \quad (3)$$

Onde:

E_{ar} = excesso de ar

$\%O_2$ = percentual de O_2 na base da chaminé

Diante da equação (3), podemos destacar que sua aplicação se restringe a sistemas que operam com excesso de ar, ou seja, não é possível identificar valores abaixo do ar estequiométrico.

Após determinar o excesso de ar empregado, foi calculada a relação A/C real, utilizada no equipamento pela equação (4).

$$(A/C) = \frac{m_{ar}}{m_{comb}} \quad (4)$$

Onde:

$(A/C)_{est}$ = relação ar combustível (kg_{ar}/kg_{comb})

m_{ar} = massa de ar (kg)

m_{comb} = massa de combustível (kg)

A equação (5) foi utilizada para aplicar o balanço de massa ao volume de controle representado na FIGURA 10.

$$m_{comb} + m_{ar} = m_{gases} \quad (5)$$

Onde:

m_{comb} = massa de combustível (kg)

m_{ar} = massa de ar (kg)

m_{gases} = massa dos gases (kg)

As equações que envolvem o balanço de massa com o ar teórico e a análise de combustão real¹ foram resolvidas utilizando-se o *software Engineering Equation Solver* (EES). As equações e modelagem estão descritas no Apêndice A e B respectivamente. Os valores utilizados para o combustível e para os gases de combustão são apresentados na TABELA 5 e TABELA 6.

¹ A partir do percentual de CO₂ presente nos gases de combustão, determinou-se a quantidade de kmol de combustível para 100 kmol de gases.

TABELA 5 – ANÁLISE ELEMENTAR DO COMBUSTÍVEL

Óleo de xisto (% massa)				
C	H	O	N	S
84,3	12	1,96	1,06	0,68

FONTE: Adaptado de Jinsheng (2009)

TABELA 6 – ANÁLISE DOS GASES DE COMBUSTÃO

O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (mg/m ³)	NO(mg/m ³)	NO ₂ (mg/m ³)	NO ₃ (mg/m ³)	SO ₂ (mg/m ³)
4,2	14,34	1	665	536	535	974

FONTE: O autor (2024).

3.2.2 Balanço de energia

Através da equação (6) e o volume de controle representado na FIGURA 10, foi avaliado o balanço energético.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)_{\text{sai}} - \sum \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)_{\text{entra}} \quad (6)$$

Onde:

Q = calor (kJ/s)

W = trabalho (kW)

$\sum \dot{m}$ = somatória de massa (kmol)

h = entalpia (kJ/kmol)

V = velocidade (m/s)

g = gravidade (m/s²)

z = altura (m)

Foram desprezadas as parcelas de energia cinética e potencial gravitacional, pois seus valores são insignificantes em comparação com a energia resultante da entalpia de combustão. Como trata-se de um sistema reacional em regime permanente e sem a realização de trabalho, a equação (6) foi simplificada, e então utilizou-se a equação (7) para o cálculo do calor gerado.

$$Q = \bar{h}_c^\circ + \sum N_p (\bar{h} - \bar{h}^\circ) - \sum N_r (\bar{h} - \bar{h}^\circ) \quad (7)$$

Onde:

Q = calor (kJ/kmol)

$\bar{h}_c^\circ$ = PCI do combustível (kJ/kmol)

$\sum N_p$ = somatoria do n° mols dos produtos

$\sum N_r$ = somatoria do n° mols dos reagentes

$\bar{h}$ = entalpia sensível no estado especificado (kJ/kmol)

$\bar{h}^\circ$ = entalpia sensível no estado de referência padrão (kJ/kmol)

O balanço energético foi calculado a partir do balanço de massa, que teve como base a análise elementar do combustível apresentado na TABELA 5 e o dados obtidos da análise dos gases de combustão apresentado na TABELA 6.

Os desenvolvimentos das equações foram resolvidos utilizando o *Engineering Equation Solver* (EES) e estão descritas no Apêndice C. Os dados de entrada referente as características das correntes estão descritas na TABELA 7:

TABELA 7 – DADOS DAS CORRENTES

Correntes	Temperatura (°C)	Pressão (kPa)	Umidade relativa (%)
Ar de combustão	25	101	50
Gases de combustão	250	101	-
Óleo de xisto	25	-	-

FONTE: O autor (2024).

Como se trata de uma combustão real, onde houve a utilização de dados da literatura para o combustível e valores medidos em campo para os gases de combustão, pequenos desvios podem ocorrer em relação aos balanços. Também vale destacar que o equipamento de medição utilizado para os gases pode apresentar erros de até 5% do valor medido.

3.3 VIABILIDADE DA INSTALAÇÃO DO TROCADOR DE CALOR

Foi avaliada a viabilidade térmica, mecânica e financeira para ponderar a instalação do trocador de calor. Na avaliação térmica, considerou-se o ponto de orvalho dos gases de combustão e o balanço energético. Na parte mecânica, analisou-se o espaço físico para alocação em campo e a “montabilidade” do mesmo.

No balanço de energia, manteve-se fixo o calor gerado, a temperatura dos gases de combustão e a operação em regime permanente. Simulou-se o aquecimento do ar de combustão em várias faixas de temperatura com o uso do *software* utilizado. Para cada faixa, calculou-se a economia de combustível. O desenvolvimento é apresentado no Apêndice C.

Com base nas vazões das correntes de ar e gases de combustão e suas respectivas temperaturas, foi solicitado uma prévia do orçamento do trocador de calor gás/gás que atendesse as premissas estabelecidas, assim como sua instalação.

Diante das dimensões do equipamento, foi feito um estudo em campo para verificar o espaço para instalação e a melhor disposição. Com os valores referentes aos custos de aplicação do projeto, utilizou-se o *payback* simples e descontado para uma análise financeira preliminar, que foram resolvidas com o *software* Microsoft Excel e dispostas no Apêndice D.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A apresentação dos resultados iniciou-se com as condições operacionais e os balanços mássicos estequiométrico e real. Em seguida, são apresentados o balanço energético real, a economia de combustível prevista, custos para implementação do projeto e uma análise financeira preliminar. Por fim, um *layout* prévio da alocação do trocador de calor acoplado no equipamento.

4.1 VAZÃO MÁSSICA DE COMBUSTÍVEL

Os dados referentes ao tempo de operação, consumo de combustível e seu poder calorífico são apresentados na TABELA 8.

TABELA 8 – CONDIÇÕES OPERACIONAIS

Horas de operação (mês)	Consumo combustível mensal (kg)	PCI do combustível (kcal/kg)
224	82.906	9.500

FONTE: O autor (2024).

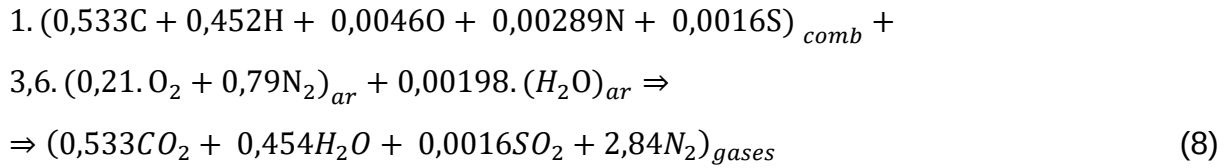
A média da vazão mássica de combustível foi de 370kg/h, valor que está dentro do intervalo de consumo do queimador apresentado na TABELA 4. Da mesma forma, a potência média calculada, que foi de 4125 kW.

Durante o período analisado, o equipamento promoveu a queima de combustível em 45% do tempo total de produção da fábrica, que é de 19 h/dia. Sendo que, durante as 8,5 h em que operou, promoveu a geração de calor na ordem de 57% da sua carga nominal.

Diante dos dados, destaca-se que o queimador operou em 26% da sua capacidade nominal no período analisado.

4.2 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA

Os balanços energético e mássico foram realizados com a implementação do equacionamento e dados de entrada da TABELA 5, TABELA 6 e TABELA 7, descritos na secção 3.2.1 e 3.2.2. O balanço de massa com ar teórico é apresentado na equação (8).



Pelos coeficientes estequiométricos, calculados e apresentados na equação (8), pode-se observar que para cada kmol de combustível, são necessários 3,6 kmols de ar. A ausência de O_2 nos gases, indica o uso mínimo necessário de oxigênio ou a falta dele, para total oxidação do combustível.

O percentual teórico e real de O_2 em base seca nos gases de combustão, assim como a relação A/C e o excesso de ar, são apresentados na TABELA 9.

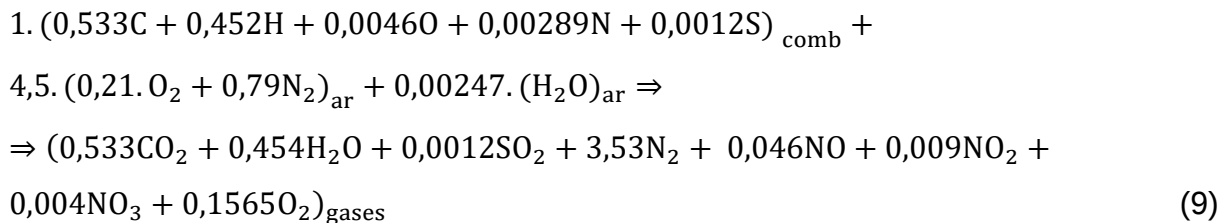
TABELA 9 –VALORES PARA O AR TEÓRICO E REAL

	Teórico	Real
A/C (kg)	13,7	17,1
O_2 (%)	0	4,2
Quantidade AR (%)	100	125

FONTE: O autor (2024).

O percentual de O_2 medido nos gases de combustão foi de 4,2%, indicando um excesso de ar de 25% utilizado no equipamento. Esse valor está condizente ao recomendado por Bazzo (1995), onde sugere que, para caldeiras que utilizam óleo combustível, o excesso de ar geralmente varia entre 10% e 25%.

Os valores referentes ao balanço de massa da combustão real são apresentados na equação (9).



Observa-se que na combustão real, é utilizado 4,5 kmol de ar para um kmol de combustível, evidenciando 25% de excesso de ar.

A análise dos gases de combustão revela que no processo de combustão real, houve a emissão de CO , NO_x e SO_2 . Segundo Babcock e Wilcox (2005), o surgimento dos óxidos de nitrogênio ocorre por dois mecanismos primários, chamados de NO_x

térmico e NO_x do combustível. Um segundo mecanismo chamado de NO_x imediato também pode contribuir. Já o SO_x , é proveniente do enxofre presente no combustível que é convertido em SO_2 e SO_3 .

A comparar o balanço de enxofre, entre as equações estequiométrica e real apresentados na equação (8) e equação (9), respectivamente, observou-se a redução de 25% do elemento químico. Essa diferença pode ser atribuída a variação do teor de enxofre presente no combustível e ao erro associado ao equipamento de medição.

Como o equipamento opera com excesso de ar, o CO presente nos gases não se dá pela insuficiência de oxigênio. Segundo Çengel e Boles (2013), isso pode ser atribuído a mistura insuficiente na câmara de combustão ou a dissociação, que ocorre em altas temperaturas.

Para o balanço energético, considerou-se o calor disponibilizado na câmara de combustão, descontado da parcela de energia contida nos gases que saem pela chaminé. A TABELA 10 apresenta o resultado para o balanço considerando 1kg de combustível.

TABELA 10 – BALANÇO ENERGÉTICO

Óleo de xisto	(MJ)
PCI	40,12
Calor disponibilizado	35,62
Calor nos gases	4,50

FONTE: O autor (2024)

Os resultados obtidos para o balanço de energia revelam que 89% da energia que entra para a câmara de combustão é disponibilizada na forma de calor, onde parte é perdida por radiação, condução e convecção pelas paredes do equipamento e o restante é transferido para a carga. A parcela que sai junto aos gases de combustão representa 11%.

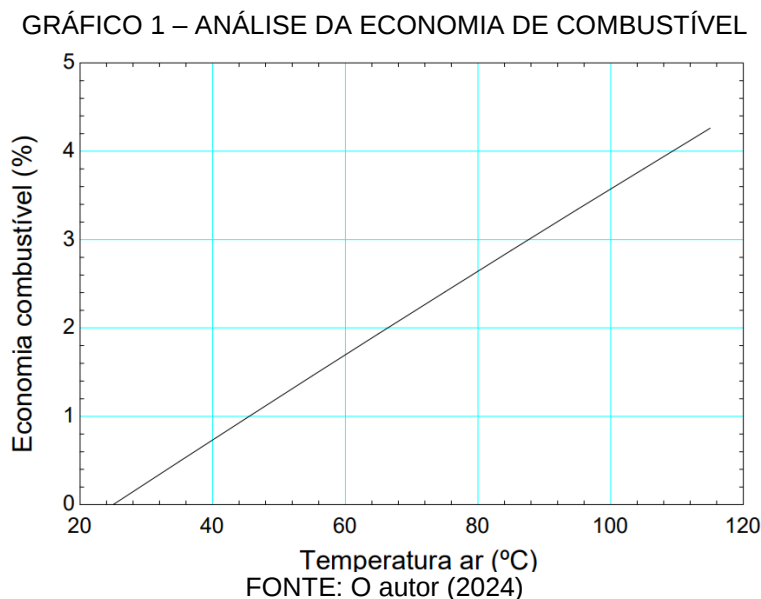
4.3 ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL

Para promover a economia de combustível, considerou-se a instalação de um trocador de calor gás/gás entre a chaminé e a saída dos gases da caldeira.

A concepção original do projeto do queimador, que é acoplada a caldeira no qual o estudo foi feito, não levou em consideração o aquecimento do ar de combustão.

O equipamento não está preparado para trabalhar com temperaturas elevadas. Sendo assim, assumiu-se como *set-point* a temperatura do ar de combustão a 110°C.

Os valores referentes aos percentuais de economia de combustível, em função do aquecimento do ar de combustão, através da carga térmica dos gases, estão expressos do GRÁFICO 1.



Através do GRÁFICO 1, observa-se a economia de combustível promovida pela elevação da temperatura do ar de combustão. Avaliou-se o comportamento e constatou-se que a cada 21,8°C no aumento da temperatura do ar, o consumo de combustível diminui em 1%.

A TABELA 11 apresenta a comparação do resultado obtido com outros estudos sobre o incremento necessário na temperatura do ar de combustão para obter uma redução de 1% no consumo de combustível.

TABELA 11 – COMPARAÇÃO COM OUTROS ESTUDOS

	(Presente Trabalho)	(Morris, 2015)	(Pizzutti, 2021)	(Maia Junior e Mazza, 2002)
Incremento	21,8°C	17,6°C	16,6°C	20,2°C

Fonte: O autor (2024).

Analisando o resultado do presente trabalho, com Morris (2015) e Pizzutti (2021), há uma diferença de 19,6% e 23,8%, respectivamente, em relação ao aquecimento necessário do ar de combustão para economizar 1% de combustível. No

entanto, estes dois trabalhos utilizam gás natural como combustível e a temperatura dos gases de combustão antes do trocador é 982°C em Morris (2015) e 920 °C para Pizzutti (2021). Com Maia Junior e Mazza (2002), onde o combustível utilizado é o BPF A1, que apresenta características semelhantes ao óleo de xisto e a temperatura dos gases é de 700°C, o incremento necessário para redução no consumo de combustível foi semelhante.

Comparando com a literatura, Babcock e Wilcox (2005) afirmam que, para cada 22°C que o gás de combustão é resfriado por um economizador ou aquecedor de ar em uma caldeira convencional, a eficiência da caldeira aumenta em aproximadamente 1%.

A TABELA 12 apresenta dados referente aos valores atuais e projetados, após a instalação do trocador de calor, levando em consideração a média do consumo de combustível apresentado na TABELA 8.

TABELA 12 – VALORES ATUAIS X PROJETADOS

	Atual	Projetado
Potência disponibilizada (MW)	3,6	3,6
Temperatura do ar de combustão (°C)	25	110
Temperatura dos gases na saída da caldeira (°C)	250	250
Temperatura dos gases na entrada do trocador (°C)	-	250
Temperatura dos gases na saída do trocador (°C)	-	175
Vazão de ar (kg/s)	1.76	1,69
Vazão dos gases (kg/s)	1,86	1.79
Vazão de combustível (kg/h)	370,12	355,71
Consumo de combustível (kg/mês)	82.906	79.680

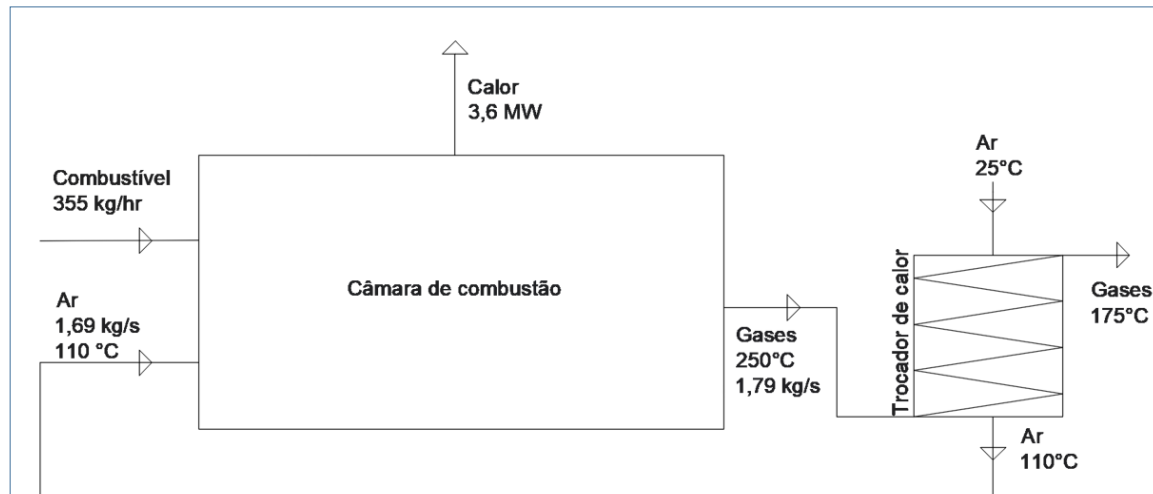
FONTE: O autor (2024).

A potência disponibilizada na câmara de combustão será a mesma antes e depois da instalação do trocador de calor, garantindo assim o suprimento de energia térmica para o processo. Considerou-se a mesma variação da temperatura das correntes após passarem pelo trocador, tendo em vista que a vazão mássica dos gases é aproximadamente 5,5% maior que a do ar.

Em relação ao consumo de combustível, houve a redução de 3233 kg/mês, este valor representa uma economia de 3,9%.

A FIGURA 11 apresenta a disposição das temperaturas e vazões das correntes após a instalação do trocador de calor, tendo como base o consumo médio de combustível.

FIGURA 11 – VALORES DAS CORRENTES



FONTE: O autor (2024).

4.4 ANÁLISE DA VIABILIDADE

A temperatura estimada para os gases após passar pelo trocador de calor é de 175°C. De acordo com Babcock e Wilcox (2005), combustíveis contendo enxofre, condensam em superfícies abaixo do seu ponto de orvalho, que variam entre 121°C a 149°C.

A partir do consumo máximo de combustível, conforme dados de projeto da TABELA 4, foi calculado as vazões máximas do ar e dos gases. O trocador de calor deverá atender as características estabelecidas para as correntes, conforme a TABELA 13.

TABELA 13 – CARACTERÍSTICAS DAS CORRENTES

	ENTRADA (°C)	SAÍDA (°C)	VAZÃO (kg/s)
Ar	25	110	3,06
Gases	250	175	3,24

FONTE: O autor (2024).

Devido a necessidade de efetuar limpezas periodicamente, o trocador selecionado para o projeto foi o tubular, onde na parte interna dos tubos passará os

gases de combustão e na parte externa o ar de combustão. De acordo com Bazzo (1995), dentre outras características, esse tipo de trocador apresenta simplicidade na manutenção.

A estimativa para implementação do projeto, estão dispostos na TABELA 14.

TABELA 14 – CUSTOS DO PROJETO

Custos	Valor
Trocador de Calor	R\$ 250.000,00
Instalação	R\$ 100.000,00
Automação	R\$ 100.000,00
Investimento inicial	R\$ 450.000,00

FONTE: O autor (2024).

Diante da estimativa do investimento inicial, a TABELA 15 apresenta as análises do período necessário para o retorno do investimento.

TABELA 15 – *PAYBACK*

Operações	Valores
Implementação do projeto	R\$ 450.000,00
Economia de combustível (mês)	R\$17.594,00
<i>Payback</i> simples	26 meses
<i>Payback</i> descontado	31 meses

FONTE: O autor (2024).

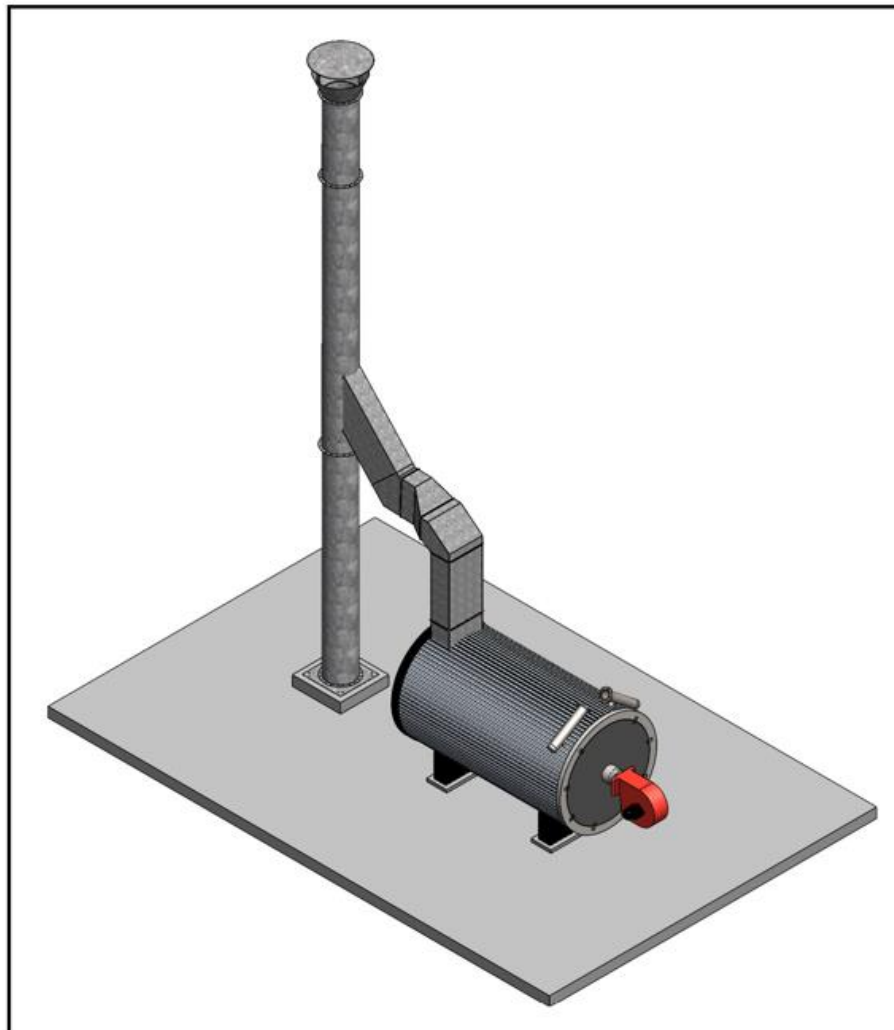
Em ambos os cálculos de *payback* foi considerada uma taxa de Operação e Manutenção (O&M) de 2,5% ao ano. No caso do *payback* descontado, além da taxa de O&M, também foi aplicada uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 12%, para ajustar os fluxos de caixa ao valor presente.

Analisando o tempo de retorno do investimento para a implementação do projeto, observa-se que ele se torna viável. No entanto, cada empresa possui sua própria política de investimentos, sendo necessário avaliar quais projetos oferecem maior rentabilidade e que estejam alinhados com os objetivos estratégicos da empresa.

4.4.1 *Layout* preliminar para instalação do trocador de calor

A FIGURA 12 apresenta a disposição da caldeira no cenário atual, onde os gases de combustão são direcionados diretamente para a chaminé.

FIGURA 12 – DISPOSIÇÃO ATUAL

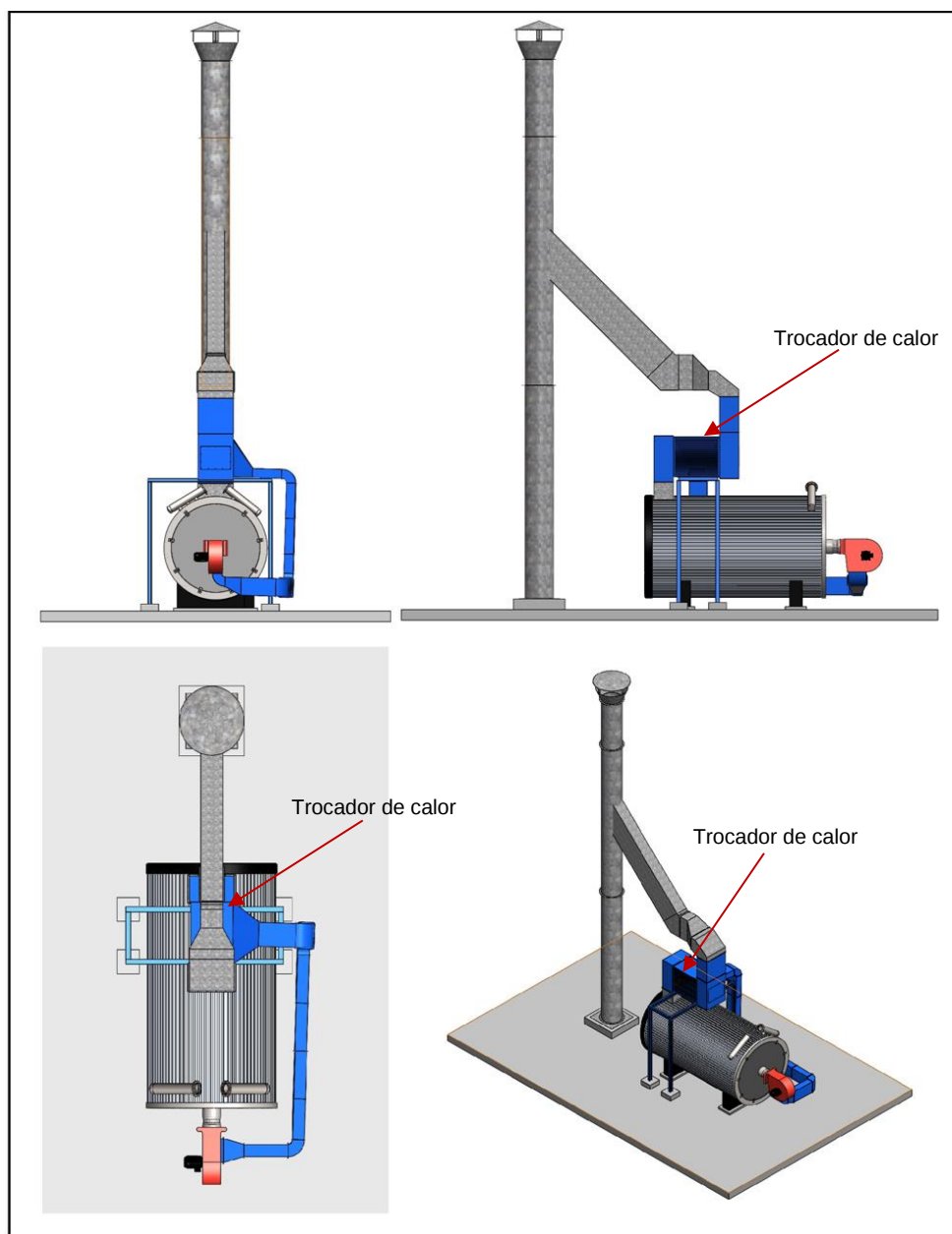


FONTE: O autor (2024).

Neste cenário, a energia térmica contida nos gases é totalmente perdida, tendo em vista que não há mecanismos para recuperação de calor.

A FIGURA13 apresenta a projeção do *layout* da caldeira após a aplicação do projeto, com destaque nas peças e equipamentos que são necessários inserir para sua implementação.

FIGURA 13 – DISPOSIÇÃO APÓS A IMPLEMENTAÇÃO



FONTE: O autor (2024).

Os gases serão direcionados para o trocador de calor e em seguida à chaminé. O ar de combustão passará pelo trocador de calor elevando a temperatura e em seguida direcionado para o queimador através de um duto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade da instalação de um trocador de calor para pré-aquecer o ar antes de sua entrada na câmara de combustão, permitindo a recuperação de parte da energia térmica presente nos gases de exaustão.

No entanto, o estudo não levou em consideração o dimensionamento do trocador de calor, bem como a base para sua sustentação e a perda de carga associado ao equipamento.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se:

- Estudo sobre a melhor configuração do sistema PID do queimador, que é responsável pelo controle da potência de queima de combustível;
- Quantificar as perdas de carga relacionadas ao trocador de calor;
- Determinar a temperatura do ponto de orvalho das substâncias nocivas ao trocador de calor.

REFERÊNCIAS

- BARROS JUNIOR, J. L. **Integração de utilidades, recuperação de calor e cogeração em sistemas de aquecimento de fluido térmico**. 2002. 39 f. Monografia (Especialização em Eficiência Energética) - Centro Federal de Educação Tecnológica, Rio de Janeiro, 2002.
- BAZZO, E. **Geração de vapor**. 2. ed. Florianópolis, Editora da UFSC, 1995.
- BERGMAN, T. L. **Incropera - Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2019. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636656/>. Acesso em: 24 abr. 2024.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. New York: Amgh, 2013.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa**. 4. ed. New York: Amgh, 2012.
- COUTO, B. R. G. **Dimensionamento de uma caldeira a termofluido Potência térmica global de 870 kW**: relatório do projeto final do miem. 2009. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.
- JINSHENG, G. **Coal, oil shale, natural bitumen, heavy oil and peat**. Pequim: Eolss Publishers Co Ltd, 2009.
- MAIA JUNIOR, J.; MAZZA, T. D. M. **Projeto básico de um queimador regenerativo para baixas vazões de combustível**. 2002. 99 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BAILEY, M. B. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 7. ed. New York: Amgh, 2013.
- MORRIS, A. Melhorando a eficiência energética com a tecnologia de captura térmica. **Industrial Heating**, São Paulo, v. 27, n. 1, p. 38-40, abr. 2015.
- Oil or gas Horizontal thermal oil boiler**. Disponível em: <https://rsboilerbd.com/product/oil-or-gas-horizontal-thermal-oil-boiler/>. Acesso em: 23 out. 2024.
- OLIVEIRA, F. **Plano nacional de acção para a eficiência energética**. Lisboa: Adene, 2015.
- PIZZUTTI, M. B. **Estudo da recuperação de calor na combustão de gas natural visando redução de emissão de poluentes**. 2021. 22 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Mackenzie, São Paulo, 2021.

VIANA, A. N. C.; BORTONI, E. da C.; NOGUEIRA, F. J. H.; HADDAD, J.; NOGUEIRA, L. A. H.; VENTURINI, O. J.; YAMACHITA, R. A. **Eficiência energética: fundamentos e aplicações**. Campinas: Contraste Brasil, 2012.

WILCOX, Babcock &. **Steam: its generation and use**. 41. ed. Barberton, Ohio, U.s.A: The Babcock & Wilcox Company, 2005. 1106 p. Editado por John B. Kitto and Steven C. Stultz.. Disponível em: https://www.academia.edu/41737816/Steam_its_generation_and_use_Edition. Acesso em: 5 ago. 2024.

WYLEN, G. V.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. São Paulo: Blucher, 1994.

APÊNDICE A – BALANÇO DE MASSA ESTEQUIOMÉTRICO

"QUEIMADOR" "OLEO DE XISTO"

"DADOS DE ENTRADA"

umi_rel_ar= 0,5 [%] {umidade relativa do ar}

P_ar= 101 [kpa] {pressão atmosférica}

temp_gases=25 [°C] {temperatura gases}

"Corrente 1, combustível. Considerando 1 kg sw combustível"

mf_C[1]=0,843 [kg] {fração mássica de carbono}

mf_H2[1]=0,12 [kg] {fração mássica de hidrogênio}

mf_O2[1]=0,0196 [kg] {fração mássica de oxigênio}

mf_N2[1]=0,0106 [kg] {fração mássica de nitrogênio}

mf_S[1]=0,0068 [kg] {fração mássica de enxofre}

s_mf[1]=mf_C[1]+mf_H2[1]+mf_O2[1]+mf_N2[1]+mf_S[1] {soma da fração mássica}

MM_C=molarmass(C) {massa molar do carbono}

MM_H2=molarmass(H2) {massa molar do hidrogênio}

MM_O2=molarmass(O2) {massa molar do oxigênio}

MM_N2=molarmass(N2) {massa molar do nitrogênio}

MM_S=molarmass(S) {massa molar do enxofre}

MM_CO2=MolarMass (CarbonDioxide) {massa molar do dióxido de carbono}

MM_H2O=MolarMass (H2O){massa molar do da água}

MM_SO2=MolarMass (SulfurDioxide) {massa molar do dióxido de enxofre}

MM_COMB=y_C[1]*MM_C+y_H2[1]*MM_H2+y_O2[1]*MM_O2+y_N2[1]*MM_N2+n_S[1]*MM_S {massa molar do combustível}

"Número de mols" "óleo de xisto"

n_C[1]=mf_C[1]/MM_C {n° de mols de carbono em 1kg de combustível}

n_H2[1]=mf_H2[1]/MM_H2 {n° de mols de hidrogênio em 1kg de combustível}

n_O2[1]=mf_O2[1]/MM_O2 {n° de mols de oxigênio em 1kg de combustível}

n_N2[1]=mf_N2[1]/MM_N2 {n° de mols de nitrogênio em 1kg de combustível}

n_S[1]=mf_S[1]/MM_S {n° de mols de enxofre em 1kg de combustível}

n_total[1]=n_C[1]+n_H2[1]+n_O2[1]+n_N2[1]+n_S[1] { n° total de mols em 1kg de combustível}

"Determinando as frações Molares para 1 kmol de combustível"

y_C[1]=n_C[1]/n_total[1] {n ° de mols de carbono em 1 kmol de combustível}

y_H2[1]=n_H2[1]/n_total[1] {n ° de mols de carbono em 1 kmol de combustível}

y_O2[1]=n_O2[1]/n_total[1] {n ° de mols de oxigênio em 1 kmol de combustível}

y_N2[1]=n_N2[1]/n_total[1] {n ° de mols de nitrogênio em 1 kmol de combustível}

y_S[1]=n_S[1]/n_total[1] {n ° de mols de enxofre em 1 kmol de combustível}

"Corrente 2, oxidante"

$$y_{O2[2]}=0,21$$

$$n_{O2[2]}=y_{O2[2]} \{n^\circ \text{ de mols de oxigênio em 1 kmol de ar}\}$$

$$y_{N2[2]}=0,79$$

$$n_{N2[2]}=y_{N2[2]} \{n^\circ \text{ de mols de hidrogênio em 1 kmol de ar}\}$$

$$n_{H2O[2]}=\omega_{ar}/MM_{H2O}*X_{ar_est} \{n^\circ \text{ de mols de água em 0,47 kmol de ar}\}$$

$$\omega_{ar}=HumRat(AirH2O;T=25;r=umi_rel_ar;P=P_ar) \{\text{umidade absoluta do ar}\}$$

"Balanços de massa por elemento químico para 1 kg de combustível"

"Balanço do carbono"

$$n_{C[1]}*1=n_{CO2[3]}*1$$

"Balanço de Hidrogênio"

$$n_{H2O[2]}*2+n_{H2[1]}*2=n_{H2O[3]}*2$$

"Balanço de Oxigênio"

$$n_{H2O[2]}*1+n_{O2[1]}*2+X_{ar_est}*n_{O2[2]}*2=n_{CO2[3]}*2+n_{H2O[3]}*1+n_{SO2[3]}*2$$

"Balanço de Nitrogênio"

$$n_{N2[1]}*2+X_{ar_est}*n_{N2[2]}*2=n_{N2[3]}*2$$

"Balanço do Enxofre"

$$n_{S[1]}=n_{SO2[3]}$$

"BALANÇO DE MASSA PARA 1 KG DE COMBUSTÍVEL"

$$massa_comb=s_{mf[1]} \{1 \text{ kg de combustível}\}$$

$$massa_{O2}=X_{ar_est}*n_{O2[2]}*MM_{O2} \{\text{massa de oxigênio para oxidar 1 kg de combustível}\}$$

$$massa_{N2}=X_{ar_est}*n_{N2[2]}*MM_{N2} \{\text{massa de nitrogênio para oxidar 1 kg de combustível}\}$$

$$massa_{H2O}=n_{H2O[2]}*MM_{H2O} \{\text{massa de água contida no ar}\}$$

$$massa_entra=massa_comb+massa_{O2}+massa_{N2}+massa_{H2O} \{\text{massa que entra na câmara de combustão}\}$$

$$massa_sai=(n_{CO2[3]}*MM_{CO2})+(n_{H2O[3]}*MM_{H2O})+(n_{SO2[3]}*MM_{SO2})+(n_{N2[3]}*MM_{N2}) \{\text{massa que sai da câmara de combustão}\}$$

$$A_C=massa_{O2}+massa_{N2}/massa_comb \{\text{relação ar / combustível. estequiométrica}\}$$

$$perc_{O2[3]}=0,042 \{\text{percentual de } O_2 \text{ medido nos gases de combustão}\}$$

$$E_{ar}=0,21/(0,21-perc_{O2[3]}) \{\text{excesso de ar}\}$$

"Nº DE MOLS DE CADA ELEMENTO PARA 1 KMOL DE COMBUSTÍVEL"

$$n_{r_C[1]}=y_{C[1]}$$

{nº de mols de carbono}

$$n_{r_H2[1]}=y_{H2[1]}$$

{nº de mols de hidrogênio}

$$n_{r_O2[1]}=y_{O2[1]}$$

{nº de mols de oxigênio}

$$n_{r_N2[1]}=y_{N2[1]}$$

{nº de mols de nitrogênio}

$$n_{r_S2[1]}=y_{S[1]}$$

{nº de mols de enxofre}

$$n_{r_H2O[2]}=n_{H2O[2]}*MM_{comb}$$

{nº de mols de água}

$$n_{r_O2[2]}=n_{O2[2]}*n_{r_X_{ar_est}[2]}$$

{nº de mols de oxigênio}

$n_{r_N2[2]} = n_{N2[2]} * n_{r_X_ar_est[2]}$ {n° de mols de nitrogênio}
 $n_{r_CO2[3]} = n_{CO2[3]} * MM_comb$ {n° de mols de dióxido de carbono}
 $n_{r_H2O[3]} = n_{H2O[3]} * MM_comb$ {n° de mols de água}
 $n_{r_N2[3]} = n_{N2[3]} * MM_comb$ {n° de mols de nitrogênio}
 $n_{r_S[3]} = n_{SO2[3]} * MM_comb$ {n° de mols de enxofre}
 $n_{r_X_ar_est[2]} = X_ar_est * MM_comb$ {n° de mols de ar}

SOLUTION

Unit Settings: SI C kPa kJ molar deg

Ac = 13,68

massaentra = 14,68 [kg]

massaO2 = 3,185 [kmol·kg]

MMCO2 = 44,01 [kg/kmol]

MMH2O = 18,02 [kg/kmol]

MMs = 32,06 [kg/kmol]

Par = 101 [kPa]

Xar,est = 0,474 [kmol]

Ear = 1,25 [m³/kmol]

massaH2O = 0,0047 [kmol]

massasai = 14,68 [kg]

MMCOMB = 7,593 [kg/kmol]

MMN2 = 28,01 [kg/kmol]

MMSO2 = 64,06 [kg/kmol]

tempgases = 25 [°C·]

massacomb = 1 [kg]

massaN2 = 10,49 [kmol·kg]

MMc = 12,01 [kg/kmol]

MMH2 = 2,016 [kg/kmol]

MMO2 = 32 [kg/kmol]

ωar = 0,009914 [kg/kgar]

umirel,ar = 0,5 [%]

Arrays Table: Main

	mf _{C,i} [kg]	mf _{H2,i} [kg]	mf _{N2,i} [kg]	mf _{O2,i} [kg]	mf _{S,i} [kg]	n _{CO2,i}	n _{C,i} [kmol]	n _{H2O,i}	n _{H2,i} [kmol]	n _{N2,i} [kmol]
1	0,843	0,12	0,0106	0,0196	0,0068		0,07019		0,05952	0,0003784
2								0,0002609		0,79
3						0,07019		0,05978		0,3749

Arrays Table: Main

	n _{r,N2,i}	n _{O2,i} [kmol]	s _{mf,i} [kg]	n _{r,O2,i}	n _{SO2,i} [kmol]	n _{S,i} [kmol]	n _{total,i} [kmol]	y _{C,i}	y _{H2,i}
1	0,00289	0,0006125	1	0,004679		0,0002121	0,1309	0,5361	0,4547
2	2,844	0,21		0,7559					
3	2,847				0,0002121				

Arrays Table: Main

	y _{N2,i}	y _{O2,i}	y _{S,i}	perc _{O2,i}	n _{r,CO2,i} [kg/kmol]	n _{r,H2O,i} [kg/kmol]	n _{r,S,i} [kg]	n _{r,C,i}	n _{r,H2,i}
1	0,00289	0,004679	0,00162					0,5361	0,4547
2	0,79	0,21				0,001981			
3				0,042	0,533	0,454	0,00161		

Arrays Table: Main

	n _{r,S2,i}	n _{r,Xar,est,i} [kg]
1	0,00162	
2		3,6
3		

Parametric Table: Valores para 1 kmol de combustível

	n _{r,Xar,est;2} [kg]	n _{r,H2O;2} [kg/kmol]	n _{r,N2;2} [kmol]	n _{r,O2;2} [kmol]	n _{r,CO2;3} [kg/kmol]	n _{r,H2O;3} [kg/kmol]	n _{r,S;3} [kg]	n _{r,N2;3} [kg]
Run 1	3,6	0,001981	2,844	0,7559	0,533	0,454	0,00161	2,847

APÊNDICE B – ANÁLISE DE COMBUSTÃO REAL

"Número de mols de cada elemento na corrente 1 em 1kmol de combustível"

n_C[1]=0,533 "kmol de carbono"
 n_H2[1]=0,452 "kmol de hidrogênio"
 n_O2[1]=0,0046 "kmol de oxigênio"
 n_N2[1]=0,00289 "kmol de nitrogênio"
 "n_S[1]=0,0016 ""kmol de enxofre"

"Nº de kmol para a corrente 2 considerando 100 kmol de gases "

X_ar_real=4,5*n_comb "kmol de ar"
 y_O2[2]=0,21
 n_O2[2]=y_O2[2]*X_ar_real "kmol de oxigênio"
 y_N2[2]=0,79
 n_N2[2]=y_N2[2]*X_ar_real "kmol de nitrogênio"
 omega_ar= HumRat(AirH2O;T=25;r=0,5;P=101)"umidade absoluta do ar"
 n_H2O[2]=omega_ar/MM_H2O*X_ar_real "kmol de agua contida no ar"
 MM_H2O=MolarMass(H2O) "massa molar da água"

"CONSIDERANDO 100 KMOL NOS PRODUTOS"

perc_CO2[3]=14,3[%] "percentual medido nos gases"
 perc_O2[3]= 4,2 [%] "percentual medido nos gases"

"BALANÇO DOS ÓXIDOS"

mg_NO[3]=665 "densidade do NO nos gases [mg/m3]"
 mg_NO2[3]=536/2 "densidade do NO2 nos gases [mg/m3]"
 mg_NO3[3]=535/3 "densidade do NO3 nos gases [mg/m3]"
 mg_SO2[3]=974/2
 soma_mg[3]=mg_NO[3]+mg_NO2[3]+mg_NO3[3]+mg_SO2[3] "soma das densidades"
 mg_kmol[3]=soma_mg[3]/n_oxidos "mg de oxidos / kmol"

n_NO[3]*1=mg_NO[3]/mg_kmol[3] "kmol de NO"
 n_NO2[3]*2=mg_NO2[3]/mg_kmol[3] "kmol de NO2"
 n_NO3[3]*3=mg_NO3[3]/mg_kmol[3] "kmol de NO3"
 n_SO2[3]*2=mg_SO2[3]/mg_kmol[3] "kmol de SO2"

"BALANÇO DE MASSA PARA 100KMOL NOS PRODUTOS"

"Balanços de massa por elemento químico"

"Balanço do carbono"

n_comb*n_C[1]*1=perc_CO2[3]*1

"Balanço de Hidrogênio"

n_H2O[2]*2+n_comb*n_H2[1]*2=n_H2O[3]*2

"Balanço de Oxigênio"

n_H2O[2]*1+n_comb*n_O2[1]*2+n_O2[2]*2=perc_CO2[3]*2+n_H2O[3]*1+perc_O2[3]
 +n_oxidos+(0,03277*2) "kmol de so2 na primeira interação"

"Balanço de Nitrogênio"

$n_{\text{comb}} \cdot n_{\text{N2}[1]} \cdot 2 + n_{\text{N2}[2]} \cdot 2 = n_{\text{N2}[3]} \cdot 2 + n_{\text{NO}[3]} + n_{\text{NO2}[3]} + n_{\text{NO3}[3]}$
 "Balanço do Enxofre"
 $n_{\text{comb}} \cdot n_{\text{S}[1]} = n_{\text{SO2}[3]}$

"AJUSTANDO PARA O BALANÇO PARA 1 KMOL DE COMBUSTÍVEL"

"CORRENTE 1"

$n_{\text{r_C}[1]} = n_{\text{C}[1]}$ "kmol de carbono"
 $n_{\text{r_H2}[1]} = n_{\text{H2}[1]}$ "kmol de hidrogênio"
 $n_{\text{r_O2}[1]} = n_{\text{O2}[1]}$ "kmol de oxigênio"
 $n_{\text{r_N2}[1]} = n_{\text{N2}[1]}$ "kmol de nitrogênio"
 $n_{\text{r_S}[1]} = n_{\text{S}[1]} / n_{\text{comb}}$ "kmol de enxofre"

"CORRENTE 2"

$n_{\text{r_O2}[2]} = n_{\text{O2}[2]} / n_{\text{comb}}$ "kmol de oxigênio"

$n_{\text{r_N2}[2]} = n_{\text{N2}[2]} / n_{\text{comb}}$ "kmol de nitrogênio"
 $n_{\text{r_H2O}[2]} = n_{\text{H2O}[2]} / n_{\text{comb}}$ "kmol de água contida no ar"

"CORRENTE 3"

$n_{\text{r_CO2}[3]} = \text{perc_CO2}[3] / n_{\text{comb}}$ "kmol dióxido de carbono"
 $n_{\text{r_H2O}[3]} = n_{\text{H2O}[3]} / n_{\text{comb}}$ "kmol dióxido de água"
 $n_{\text{r_O2}[3]} = \text{perc_O2}[3] / n_{\text{comb}}$ "kmol dióxido de oxigênio"
 $n_{\text{r_N2}[3]} = n_{\text{N2}[3]} / n_{\text{comb}}$ "kmol dióxido de nitrogênio"
 $n_{\text{r_SO2}[3]} \cdot 2 = n_{\text{S}[1]} / n_{\text{comb}}$ "kmol enxofre"
 $n_{\text{r_NO}[3]} \cdot 2 = (n_{\text{NO}[3]} / n_{\text{comb}})$ "kmol óxido nítrico"
 $n_{\text{r_NO2}[3]} \cdot 2 = (n_{\text{NO2}[3]} / n_{\text{comb}})$ "kmol dióxido de nitrogênio"
 $n_{\text{r_NO3}[3]} \cdot 2 = (n_{\text{NO3}[3]} / n_{\text{comb}})$ "kmol nitrato"

Arrays Table: Main

	$n_{\text{C};i}$	$n_{\text{H2};i}$	$n_{\text{N2};i}$	$n_{\text{O2};i}$	$n_{\text{S};i}$	$\text{perc}_{\text{CO2};i}$ [%]	$\text{perc}_{\text{O2};i}$ [%]	$n_{\text{H2O};i}$	$y_{\text{N2};i}$	$y_{\text{O2};i}$
1	0,533	0,452	0,00289	0,0046	0,03385					
2			95,38	25,35				0,06644	0,79	0,21
3			93,85			14,3	4,2	12,19		

Arrays Table: Main

	$n_{\text{SO2};i}$ [kmol]	$n_{\text{NO};i}$ [kmol]	$n_{\text{NO2};i}$ [kmol]	$n_{\text{NO3};i}$ [kmol]	$\text{mg}_{\text{NO2};i}$	$\text{mg}_{\text{NO3};i}$	$\text{mg}_{\text{NO};i}$	$n_{\text{r_C};i}$	$n_{\text{r_H2};i}$	$n_{\text{r_N2};i}$
1								0,533	0,452	0,00289
2										3,555
3	0,9083	2,48	0,4998	0,2217	268	178,3	665			3,498

Arrays Table: Main

	$n_{\text{r_O2};i}$	$n_{\text{r_S};i}$ [1/kmol]	$n_{\text{r_CO2};i}$ [1/kmol]	$n_{\text{r_H2O};i}$ [1/kmol]	$n_{\text{r_SO2};i}$	$n_{\text{r_NO2};i}$	$n_{\text{r_NO3};i}$	$n_{\text{r_NO};i}$	$\text{mg}_{\text{SO2};i}$
1	0,0046	0,001262							
2	0,945			0,002476					
3	0,1565		0,533	0,4545	0,0006309	0,009315	0,004132	0,04623	487

Arrays Table: Main

	soma _{mg,i}	mg _{kmol,i} [1/kmol]
1		
2		
3	1598	268,1

Parametric Table: Valores para 1kmol de combustível

	$n_{r,C;1}$	$n_{r,H2;1}$	$n_{r,N2;1}$	$n_{r,O2;1}$	$n_{r,S;1}$ [1/kmol]	$n_{r,O2;2}$	$n_{r,H2O;2}$ [1/kmol]	$n_{r,N2;2}$	$n_{r,CO2;3}$ [1/kmol]	$n_{r,H2O;3}$ [1/kmol]
Run 1	0,533	0,452	0,00289	0,0046	0,001262	0,945	0,002476	3,555	0,533	0,4545

Parametric Table: Valores para 1kmol de combustível

	$n_{r,N2;3}$	$n_{r,O2;3}$ [1/kmol]	$n_{r,NO;3}$	$n_{r,NO2;3}$	$n_{r,NO3;3}$	$n_{r,SO2;3}$
Run 1	3,498	0,1565	0,04623	0,009315	0,004132	0,0006309

APÊNDICE C – BALANÇO ENERGÉTICO

"QUEIMADOR" "OLEO DE XISTO"
 "DADOS DE ENTRADA"

consumo_comb_mes=82906 [kg] "consumo de combustível no mês"
 operacao=8,61[hs] "tempo de operação por dia"
 temp_ar_1=25[°C] "temperatura do ar de combustão atual"
 temp_ar_2=110[°C] "temperatura do ar de combustão projetada"
 P_ar= 101 [kpa] "Pressão do ar de combustão"
 temp_gases=250[°C] "temperatura dos gases de combustão"

vazao_comb=consumo_comb_mes/tempo_operacao_mes/3600 "vazão de combustível atual"
 temp_padrao=25 [°C] "temperatura no estado de referência"
 vazao_1_comb_mols=vazao_comb/MM_COMB "vazão do combustível em kmol"
 tempo_operacao_mes=operacao*dias_trab_mes "tempo de operação no mês"
 dias_trab_mes=26 "dias de operação no mês"

"Corrente 1, combustível"

MM_C=molarmass(C) "massa molar do carbono"
 MM_H2=molarmass(H2) "massa molar do hidrogênio"
 MM_O2=molarmass(O2) "massa molar do oxigênio"
 MM_N2=molarmass(N2) "massa molar do nitrogênio"
 MM_S=molarmass(S) "massa molar do enxofre"
 MM_CO2=MolarMass(CarbonDioxide) "massa molar do CO2"
 MM_H2O=MolarMass(H2O) "massa molar da água"
 MM_SO2=MolarMass(SulfurDioxide) "massa molar do SO2"
 MM_AR=MolarMass(Air) "massa molar do ar seco"
 MM_COMB=7,593[kg/kmol] "massa molar do combustível"
 n_comb[1]=1[kmol] "n° de kmol de combustível na corrente 1"
 "N° kmol de cada elemento nas correntes 2 e 3"

"corrente 2 (ar)"

n_O2[2]=0,945[kmol] "kmol de oxigênio"
 n_N2[2]=3,55[kmol] "kmol de nitrogênio"
 n_H2O[2]=0,00247[kmol] "kmol de água no estado de vapor"

"corrente 3 (gases)"

n_CO2[3]=0,533 "kmol de CO2"
 n_H2O[3]=0,454[kmol] "kmol de H2O"
 n_SO2[3]=0,0012[kmol] "kmol de SO2"
 n_N2[3]=3,55[kmol] "kmol de N2"
 n_NO[3]=0,046[kmol] "kmol de NO"
 n_NO2[3]=0,009[kmol] "kmol de NO2"
 n_NO3[3]=0,004 [kmol] "kmol de NO3"
 n_O2[3]=0,1565[kmol] "kmol de O2"

{CÁLCULO DAS ENTALPIAS PARA OS COMPONENTES}

"h°= entalpia no estado padrão"

"h= entalpia no estado especificado"

"H= entalpia resultante"

H_O2_1[2]=Enthalpy(O2;T=temp_ar_1)

H_N2_1[2]=Enthalpy(N2;T=temp_ar_1)

H_O2_2[2]=Enthalpy(O2;T=temp_ar_2)

H_N2_2[2]=Enthalpy(N2;T=temp_ar_2)

h_estado_H2O_1[2]=Enthalpy(H2O;T=Temp_ar_1)

h°_H2O_1[2]=Enthalpy(H2O;T=Temp_padrao)

H_H2O_1[2]=h_estado_H2O_1[2]-h°_H2O_1[2]

h_estado_H2O_2[2]=Enthalpy(H2O;T=Temp_ar_2)

h°_H2O_2[2]=Enthalpy(H2O;T=Temp_padrao)

H_H2O_2[2]=h_estado_H2O_2[2]-h°_H2O_1[2]

h_estado_CO2=Enthalpy(CO2;T=Temp_gases)

h°_CO2=Enthalpy(CO2;T=Temp_padrao)

H_CO2[3]=h_estado_CO2-h°_CO2

h_estado_NO=Enthalpy(NO;T=Temp_gases)

h°_NO=Enthalpy(NO;T=Temp_padrao)

H_NO[3]=h_estado_NO-h°_NO

h_estado_NO2=Enthalpy(NO2;T=Temp_gases)

h°_NO2=Enthalpy(NO2;T=Temp_padrao)

H_NO2[3]=h_estado_NO2-h°_NO2

h_estado_NO3=Enthalpy(NO3;T=Temp_gases)

h°_NO3=Enthalpy(NO3;T=Temp_padrao)

H_NO3[3]=h_estado_NO3-h°_NO3

h_estado_SO2=Enthalpy(SO2;T=Temp_gases)

h°_SO2=Enthalpy(SO2;T=Temp_padrao)

H_SO2[3]=h_estado_SO2-h°_SO2

h_estado_H2O[3]=Enthalpy(H2O;T=Temp_gases)

h°_H2O[3]=Enthalpy(H2O;T=Temp_padrao)

H_H2O[3]=h_estado_H2O[3]-h°_H2O[3]

H_N2[3]=Enthalpy(N2;T=temp_gases)

H_O2[3]=Enthalpy(O2;T=temp_gases)

H_comb[1]= 0

calor_inferior_comb[1]=-40125 "poder calorifico superior = 42351 poder calorifico inferior=40125"

calor_inferior_comb_mols[1]=calor_inferior_comb[1]*MM_COMB "poder calorífico em kmol"

"BALANÇO DE ENERGIA"

$$Q_disp_1 = ((calor_inferior_comb_mols[1] * n_comb[1]) + (n_CO2[3] * H_CO2[3] + n_H2O[3] * H_H2O[3] + n_SO2[3] * H_SO2[3] + n_N2[3] * H_N2[3] + n_NO[3] * H_NO[3] + n_NO2[3] * H_NO2[3] + n_NO3[3] * H_NO3[3] + n_O2[3] * H_O2[3]) - (n_comb[1] * H_comb[1] + n_O2[2] * H_O2_1[2] + n_N2[2] * H_N2_1[2] + n_H2O[2] * H_H2O_1[2])) / MM_COMB$$
 "calor disponível para 1 kg de combustível"

$$Q_disp_2 = ((calor_inferior_comb_mols[1] * n_comb[1]) + (n_CO2[3] * H_CO2[3] + n_H2O[3] * H_H2O[3] + n_SO2[3] * H_SO2[3] + n_N2[3] * H_N2[3] + n_NO[3] * H_NO[3] + n_NO2[3] * H_NO2[3] + n_NO3[3] * H_NO3[3] + n_O2[3] * H_O2[3]) - (n_comb[1] * H_comb[1] + n_O2[2] * H_O2_2[2] + n_N2[2] * H_N2_2[2] + n_H2O[2] * H_H2O_2[2])) / MM_COMB$$
 "calor disponível para 1 kg de combustível"

$P_1 = Q_disp_1 * vazao_comb$ "potência se aquecimento do ar"

$P_2 = P_1$

$P_2 = Q_disp_2 * vazao_comb_2$ "cálculo da vazão de combustível com aquecimento do ar"

$PERC_ECO_COMB / 100 = 1 - (Q_disp_1 / Q_disp_2)$ "percentual de economia de combustível"

$ECONOMIA_KG = PERC_ECO_COMB / 100 * consumo_comb_mes$

Arrays Table: Main

	$calor_{inferior,comb;i}$ [kJ/kg]	$calor_{inferior,comb;mols;i}$ [kJ/kmol]	$H_{CO2;i}$ [kJ/kmol]	$H_{comb;i}$	$H_{H2O;i}$	$H_{H2O;1;i}$	$H_{H2O;2;i}$	$H_{N2;i}$ [kJ]
1	-40125	-304669		0				
2						0	2878	
3			9359		7734			6597

Arrays Table: Main

	$H_{N2;1;i}$	$H_{N2;2;i}$	$H_{O2;i}$	$H_{O2;1;i}$	$H_{O2;2;i}$	$H_{SO2;i}$ [kJ/kmol]	$n_{CO2;i}$	$n_{H2O;i}$ [kmol]	$n_{N2;i}$ [kmol]	$n_{O2;i}$ [kmol]	$n_{SO2;i}$ [kmol]
1											
2	0	2474		0	2519			0,00247	3,55	0,945	
3			6831			9855	0,533	0,454	3,55	0,1565	0,0012

Arrays Table: Main

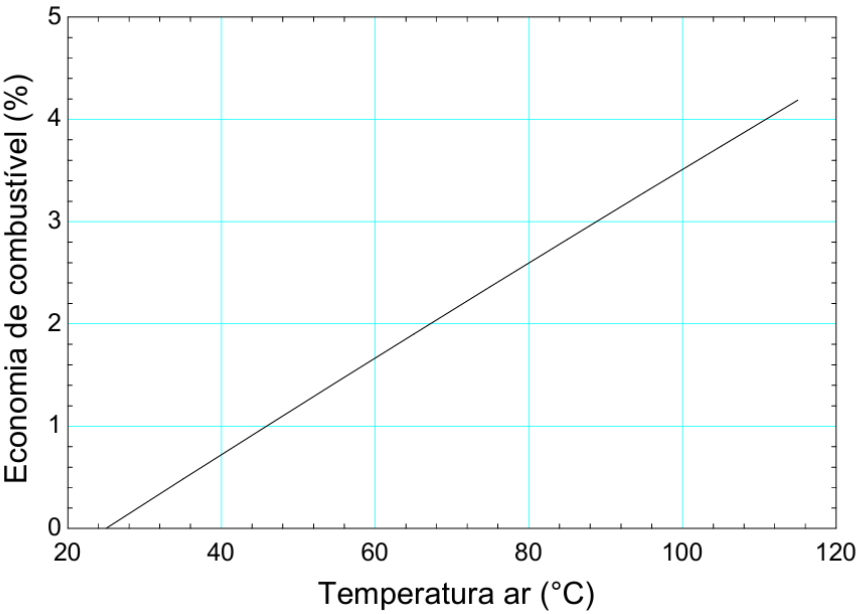
	$n_{\text{estado};\text{H}_2\text{O};1;i}$	$h^{\circ}_{\text{H}_2\text{O};1;i}$	$h_{\text{estado};\text{H}_2\text{O};2;i}$	$h^{\circ}_{\text{H}_2\text{O};2;i}$	$h_{\text{estado};\text{H}_2\text{O};i}$	$h^{\circ}_{\text{H}_2\text{O};i}$	$n_{\text{NO}_2;i}$ [kmol]	$n_{\text{NO};i}$ [kmol]
1								
2	-241811	-241811	-238934	-241811				
3					-234077	-241811	0,009	0,046

Arrays Table: Main

	$n_{\text{comb};i}$ [kmol]	$H_{\text{NO};i}$	$H_{\text{NO}_2;i}$ [kJ/kmol]	$H_{\text{NO}_3;i}$ [kJ/kmol]	$n_{\text{NO}_3;i}$ [kmol]
1	1				
2					
3		6785	9222	12662	0,004

Parametric Table: Table 1

	$\text{temp}_{\text{ar};2}$ [°C]	$\text{PERC}_{\text{ECO;COMB}}$ [%]
Run 1	25	6,019E-36
Run 2	35	0,4812
Run 3	45	0,9582
Run 4	55	1,431
Run 5	65	1,9
Run 6	75	2,365
Run 7	85	2,826
Run 8	95	3,283
Run 9	105	3,736
Run 10	115	4,186



KEY VARIABLES
 $Q_{\text{disp},1} = -35720,1$ [kJ]
 $Q_{\text{disp},2} = -37191,4$ [kJ]
 $P_1 = -3675$ [kJ/s]
 $P_2 = -3675$ [kJ/s]
 $\text{ECONOMIA}_{\text{KG}} = 3280$ [kg/mes]
 $\text{PERC}_{\text{ECO,COMB}} = 3,956$ [%]

SOLUTION

Unit Settings: SI C kPa kJ molar degconsumo_{comb,mes} = 82906 [kg]ECONOMIA_{KG} = 3280 [kg/mes]h_{estado,NO} = 98050 [kJ/kmol]h_{estado,NO3} = 83786 [kJ/kmol]h^o_{CO2} = -393486 [kJ/kmol]h^o_{NO2} = 34191 [kJ/kmol]h^o_{SO2} = -296792 [kJ/kmol]MM_C = 12,01 [kg/kmol]MM_{COMB} = 7,593 [kg/kmol]MM_{H2O} = 18,02 [kg/kmol]MM_{O2} = 32 [kg/kmol]MM_{SO2} = 64,06 [kJ]

PERCECO,COMB = 3,956 [%]

P₂ = -3675 [kJ/s]Q_{disp,1} = -35720,1 [kJ]tempo_{operacao,mes} = 223,9 [h]temp_{ar,2} = 110 [°C]temp_{padrao} = 25 [°C]vazao_{comb} = 0,1029 [kg/s]dias_{trab,mes} = 26 [dias]h_{estado,CO2} = -384127 [kJ/kmol]h_{estado,NO2} = 43413 [kJ/kmol]h_{estado,SO2} = -286936 [kJ/kmol]h^o_{NO} = 91266 [kJ/kmol]h^o_{NO3} = 71124 [kJ/kmol]MM_{AR} = 28,97 [kg/kmol]MM_{CO2} = 44,01 [kg/kmol]MM_{H2} = 2,016 [kg/kmol]MM_{N2} = 28,01 [kg/kmol]MM_S = 32,06 [kg/kmol]

operacao = 8,61 [hs]

P₁ = -3675 [kJ/s]P_{ar} = 101 [kPa]Q_{disp,2} = -37191,4 [kJ]temp_{ar,1} = 25 [°C]temp_{gases} = 250 [°C]vazao_{1,comb,mols} = 0,01355 [kmol/s]vazao_{comb,2} = 0,0988

APÊNDICE D – ANÁLISE FINANCEIRA

$$VPL_{(j)} = \sum_{j=0}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - INV_0 \quad (10)$$

$$0 = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+TIR)^j} - INV_0 \quad (11)$$

$$Payback \text{ Simples} = \frac{INV_0}{RM_i} \quad (12)$$

$$Payback \text{ Descontado} = \frac{INV_0}{LLM_i} \quad (13)$$

VPL = Valor presente líquido (R\$)

FC = Fluxo de caixa (R\$)

i = taxa de desconto (%)

INV₀ = Investimento inicial (R\$)

TIR = Taxa interna de retorno (%)

RM = Receita média (R\$)

LLM = Lucro líquido médio (R\$)