

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM GERADOR DE VAPOR  
AQUATUBULAR À CARVÃO E ÓLEO COMBUSTÍVEL

por

Gabriel Gonçalves de Souza

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2021.

## CIP - Catalogação na Publicação

de Souza, Gabriel Gonçalves  
ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM GERADOR DE  
VAPOR AQUATUBULAR À CARVÃO E ÓLEO COMBUSTÍVEL /  
Gabriel Gonçalves de Souza. -- 2021.  
25 f.  
Orientador: Andrés Armando Mendiburu Zevallos.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Gerador de vapor. 2. Eficiência energética. 3.  
Carvão. 4. Óleo combustível. 5. Método indireto. I.  
Mendiburu Zevallos, Andrés Armando, orient. II.  
Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados  
fornecidos pelo(a) autor(a).

Gabriel Gonçalves de Souza

ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM GERADOR DE VAPOR  
AQUATUBULAR À CARVÃO E ÓLEO COMBUSTÍVEL

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Andrés Armando Mendiburu Zevallos

Comissão de Avaliação:

Prof<sup>a</sup>. Thamy Cristina Hayashi

Prof. Cirilo Seppi Bresolin

Prof. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, novembro de 2021

Souza, Gabriel Gonçalves de. **Análise de eficiência energética em gerador de vapor aquatubular à carvão e óleo combustível**. 2021. 25 pag. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

## **RESUMO**

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um programa para cálculo da eficiência energética de geradores de vapor aquatubulares com queima de carvão, óleo e gás de uma empresa petroquímica utilizando o software Microsoft Excel utilizando o método indireto de cálculo, também conhecido como método das perdas. As perdas de calor avaliadas são referentes à perda de calor sensível dos gases de combustão, à combustão parcial dos combustíveis, à umidade presente no ar atmosférico e nos combustíveis, à perda por radiação da fornalha para o ambiente, às cinzas presentes no carvão mineral e às purgas realizadas. O gerador de vapor apresentou eficiência energética entre 87,65% e 96,06%, com média de 91,96%. O cálculo foi validado através de dados fornecidos, as perdas energéticas foram analisadas para casos específicos e os valores de eficiência energéticas foram relacionados ao excesso de ar para a fornalha.

**PALAVRAS-CHAVE:** Gerador de vapor, eficiência energética, carvão, óleo combustível, método indireto.

Souza, Gabriel Gonçalves de. **Energy efficiency analysis in aquatubular steam generator using coal and fuel oil**. 2021. 25 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

## **ABSTRACT**

The present work presents the development of a program to calculate the energy efficiency of aquatubular steam generators burning coal, oil and gas in a petrochemical company using Microsoft Excel software using the indirect method of calculation, also known as the loss method. The heat losses evaluated refer to sensitive heat loss from combustion gases, partial combustion of fuels, moisture present in atmospheric air and fuels, loss by radiation from the furnace to the environment, ash present in coal and to the purges performed. The steam generator presented energy efficiency between 87.65% and 96.06%, with an average of 91.96%. The calculation was validated using data provided, energy losses were analyzed for specific cases and energy efficiency values were related to excess air for the furnace.

**KEYWORDS:** Steam generator, energy efficiency, coal, fuel oil, indirect method.

## NOMENCLATURA

$C_{p_{cz}}$	Calor específico das cinzas	[kJ/kgK]
$C_{p_{comb}}$	Calor específico do combustível	[kJ/kgK]
R	Constante universal dos gases	[J/molK]
$w$	Conteúdo de umidade	[kg/kg ar seco]
$\eta$	Eficiência energética	[%]
$q_d$	Energia disponível	[kJ/kg]
$q_f$	Energia fornecida	[kJ/kg]
$h_a$	Entalpia da água de alimentação	[kJ/kg]
$h_v$	Entalpia do vapor gerado	[kJ/kg]
$h_{H_2O,v}$	Entalpia da H <sub>2</sub> O vaporizada	[kJ/kg]
$h_{H_2O,ref}$	Entalpia de H <sub>2</sub> O líquida na T <sub>ref</sub>	[kJ/kg]
$\Delta H_f(T_{ref})$	Entalpia de formação na T <sub>ref</sub>	[kJ/kg]
$\Delta H_s(T)$	Varição da entalpia sensível entre T <sub>ref</sub> e T	[kJ/kg]
H(T)	Entalpia padrão na temperatura T	[kJ/kg]
$C_{cz}$	Fração mássica de carbono nas cinzas	
$q_{gc}$	Perda de calor sensível nos gases de combustão	[kJ/kg]
$q_{cinzas}$	Perda de calor sensível pelas cinzas	[kJ/kg]
$q_{purgas}$	Perda pelas purgas	[kJ/kg]
$q_{H_2O,combustão}$	Perda por água formada na combustão	[kJ/kg]
$q_{cp}$	Perda por combustão parcial	[kJ/kg]
$q_{rad}$	Perda por radiação	[kJ/kg]
$q_{H_2O,ar}$	Perda por umidade do ar	[kJ/kg]
$q_{H_2O,comb}$	Perda por umidade no combustível	[kJ/kg]
$q_p$	Perdas totais	[kJ/kg]
PCI	Poder calorífico inferior	[kJ/kg]
PCS	Poder calorífico superior	[kJ/kg]
$n_C$	Quantidade de mols de C no combustível seco	[mol]
$n_H$	Quantidade de mols de H no combustível seco	[mol]
$n_N$	Quantidade de mols de N no combustível seco	[mol]

$n_O$	Quantidade de mols de O no combustível seco	[mol]
$n_S$	Quantidade de mols de S no combustível seco	[mol]
$R_{A/C}$	Relação ar/combustível	
$T$	Temperatura	[K]
$T_{amb}$	Temperatura ambiente	[K]
$T_{cinzas}$	Temperatura das cinzas no fundo da fornalha	[K]
$T_{comb}$	Temperatura de entrada do combustível	[K]
$T_{ref}$	Temperatura de referência	[K]
$\Delta h_{O_2}$	Varição de entalpia sensível do $O_2$	[kJ/kg]
$\Delta h_{CO}$	Varição de entalpia sensível do CO	[kJ/kg]
$\Delta h_{CO_2}$	Varição de entalpia sensível do $CO_2$	[kJ/kg]
$\Delta h_{N_2}$	Varição de entalpia sensível do $N_2$	[kJ/kg]
$\Delta h_{SO_2}$	Varição de entalpia sensível do $SO_2$	[kJ/kg]
$\Delta h_{ar}$	Varição de entalpia sensível do ar	[kJ/kg]
$\Delta h_{comb}$	Varição de entalpia sensível do combustível	[kJ/kg]
$\Delta h_{ar,v}$	Varição de entalpia sensível do vapor de água	[kJ/kg]
$\dot{m}_{ar}$	Vazão mássica de ar	[kg/s]
$\dot{m}_{ar\ seco}$	Vazão mássica de ar seco	[kg/s]
$\dot{m}_{cinzas}$	Vazão mássica de cinzas	[kg/s]
$\dot{m}_{comb}$	Vazão mássica de combustível	[kg/s]
$\dot{m}_{purga}$	Vazão mássica de purga	[kg/s]
$\dot{m}_v$	Vazão mássica de vapor	[kg/s]
$\dot{m}_{CO}$	Vazão mássica de CO	[kg/s]
$\dot{m}_{CO_2}$	Vazão mássica de $CO_2$	[kg/s]
$\dot{m}_{H_2O}$	Vazão mássica de $H_2O$	[kg/s]
$\dot{m}_{N_2}$	Vazão mássica de $N_2$	[kg/s]
$\dot{m}_{O_2}$	Vazão mássica de $O_2$	[kg/s]
$\dot{m}_{SO_2}$	Vazão mássica de $SO_2$	[kg/s]

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>2</b>
2.1. GERADORES DE VAPOR .....	2
2.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	4
2.3 ENERGIA DISPONÍVEL.....	4
2.4 ENTALPIA DAS ESPÉCIES QUÍMICAS .....	4
2.5 PERDA DE CALOR SENSÍVEL NOS GASES DE COMBUSTÃO.....	5
2.6 PERDA POR COMBUSTÃO PARCIAL.....	5
2.7 PERDAS DEVIDO A UMIDADE .....	5
2.8 PERDAS DE CALOR POR RADIAÇÃO E CONVECÇÃO.....	6
2.9 PERDA DE CALOR PELAS PURGAS .....	6
2.10 PERDA DE CALOR SENSÍVEL PELAS CINZAS.....	6
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>7</b>
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>10</b>
4.1 VALIDAÇÃO DO CÁLCULO.....	10
4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	11
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>15</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>16</b>



## 1. INTRODUÇÃO

A realização de análise energética de geradores de vapor é fundamental para garantir que o processo está sob controle e que a energia liberada pela combustão está sendo aproveitada da melhor maneira. Para avaliação de toda a energia envolvida deve-se considerar todo o calor contido no interior da fornalha, a entalpia referente à fluxos de massa, combustão incompleta de combustíveis e o calor perdido para o meio ambiente. Mesmo que seja importante avaliar todas as perdas energéticas, Aguiar (2014), verificou que as perdas pela chaminé são as mais relevantes e merecem ser avaliadas com maior detalhe.

Para uma empresa ser competitiva é necessário que ela seja economicamente lucrativa. Em empresas de grande porte, o custo com consumo de energia, seja elétrica, térmica ou química, é um fator determinante para se ter um negócio viável ou não. Marques *et al* (2006) ressaltam que na indústria busca-se constantemente minimizar as perdas pois maiores perdas significam maiores custos. Assim, equipamentos de grande porte, como são os geradores de vapor, devem operar no nível mais alto de eficiência.

Para obtenção de informações relevantes sobre oportunidades de aumento de eficiência energética de geradores de vapor, Centrais Elétricas Brasileiras (2005) indica utilizar uma abordagem sistêmica para realizar um estudo sobre como fatores como vazão de vapor, vazão de combustível, entalpia da água na entrada e do vapor na saída e o poder calorífico inferior dos combustíveis queimados estão relacionados com as condições operacionais do gerador de vapor.

É possível encontrar na literatura trabalhos em que foram realizados cálculos de eficiência energética de geradores de vapor, porém foram utilizadas formas diferentes para a realização do cálculo e cada gerador de vapor tem suas particularidades. Aguiar (2014) realizou o cálculo de eficiência, aplicando o método indireto, para um gerador de vapor aquatubular com capacidade de produção de 20 ton/h de vapor e pressão de trabalho de 1,04MPa alimentado com cavaco de madeira. Aguiar obteve um resultado de 86,86% para a eficiência, no qual as perdas energéticas consideradas foram por gases secos na chaminé, radiação e convecção, purgas e temperatura das cinzas.

Um programa em Fortran para a realização do cálculo de eficiência térmica foi elaborado por Justi (2019). O autor o validou comparando os resultados com o trabalho desenvolvido por Krishnanunni *et al* (2012). Ambos utilizaram o método indireto para um gerador flamotubular alimentado com óleo combustível composto de 83% de carbono, 12% de hidrogênio, 1,4% de oxigênio, 0,5% de nitrogênio, 2,94% de enxofre e 0,15% de umidade. O período de medição utilizado foi de 9 meses com as medições separadas em um intervalo de um mês. Os valores de eficiência energética obtidos foram de 81,53% e 79,57% para Justi (2019) e Krishnanunni, *et al* (2012), respectivamente, considerando as perdas por gases secos, umidade do ar, umidade do combustível, água formada na combustão, radiação, purgas e combustão incompleta.

Uma metodologia simplificada de cálculo de eficiência térmica foi desenvolvida e aplicada por Vergnhanini Filho (2018), segundo o autor a aplicação do método em geradores de vapor que possuem economizador ou pré-aquecedor de ar instalado apresentam valores de eficiência térmica entre 91% e 95% considerando como base o PCI dos combustíveis. As maiores eficiências foram obtidos em equipamentos que operam com excesso de ar reduzido, apresentando concentrações de O<sub>2</sub> nos gases de combustão de aproximadamente 1,5% em volume. Para outros geradores de vapor os resultados obtidos ficaram na faixa entre 84% e 91%.

Martins (2015) desenvolveu um trabalho de análise e otimização de dois geradores de vapor com queima de óleo combustível e gás natural. No estudo realizado foi calculada a

eficiência energética para diferentes vazões de alimentação de óleo combustível. Os valores utilizados foram 300, 500, 800, 1000, 1200, 1400 e 1600 kg/h para o equipamento denominado como “caldeira 1” e 300, 500, 700, 900, 1000, 1200, 1400, 1500 e 1800 kg/h para o outro equipamento chamado de “caldeira 3”. Os rendimentos obtidos foram entre 88,3% e 91,2% e 85,2% e 88% para as caldeiras 1 e 3, respectivamente. A otimização concentrou-se na relação ar/combustível. Foi observado que a eficiência energética crescia com o aumento da carga até o patamar de 1000kg/h de óleo combustível e após se mantinha estável para os dois equipamentos, o que está associado à diminuição do excesso de ar a partir deste patamar.

Os geradores de vapor, geralmente, operam por campanha devido a questões legais e ao desgaste natural do equipamento. Usualmente, o tempo de campanha de um gerador de vapor é o prazo máximo para realização de inspeções internas e externas definido pela NR13, que varia de acordo com a classificação da caldeira e os sistemas de controle implementados pela empresa. Portanto, é importante analisar a eficiência energética dos geradores de vapor ao longo da campanha produtiva e estudar oportunidades para o aumento da eficiência do gerador de vapor.

O objetivo deste trabalho é desenvolver o cálculo de eficiência energética dos geradores de vapor à carvão de uma empresa petroquímica afim de comparar os resultados com o cálculo de eficiência utilizado pela empresa, analisando cada perda energética e a influência dos combustíveis no processo.

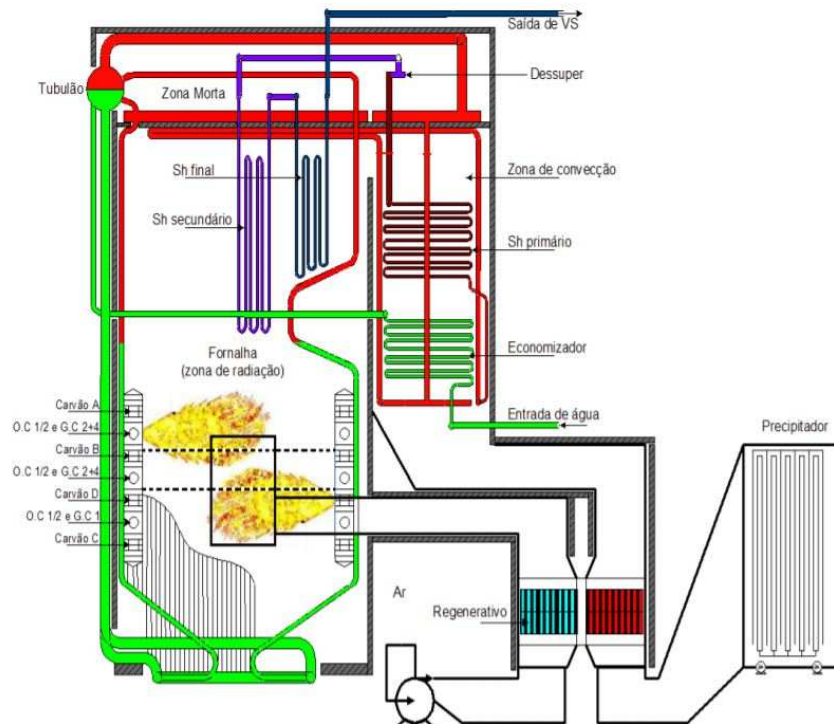
## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. Geradores de vapor**

Nas plantas petroquímicas uma das áreas de maior importância, mesmo não fazendo parte da cadeia produtiva, é Utilidades. As plantas de utilidades são responsáveis pela geração e controle de vapor, geração de energia elétrica e tratamento de águas. Os principais consumidores de vapor são turbogeradores de energia elétrica e turbinas de acionamento de compressores e bombas. Usualmente para esta aplicação, é necessário que o vapor seja superaquecido, ou seja seco, e que dependendo do tamanho das turbinas altas pressões são necessárias. Além disso, o processo de crackeamento de petróleo ou outros derivados, necessita de uma elevada quantidade de calor, assim o vapor é muito utilizado em trocadores de calor, aquecimento de linhas e equipamentos e condicionamento de equipamentos em partidas ou paradas de planta.

Nas plantas petroquímicas e de geração de energia elétrica usualmente são utilizados geradores de vapor aquatubulares, visto que esse tipo de caldeira consegue gerar vapor superaquecido de alta ou super alta pressão, altas temperaturas e em grandes vazões. Neste tipo de gerador, a água e o vapor passam pelo interior dos tubos e os gases de combustão pela parte externa. A queima ocorre na região chamada de fornalha e os combustíveis utilizados podem ser líquidos, gasosos ou sólidos pulverizados, como por exemplo óleo, gás natural e carvão mineral. As fornalhas são projetadas de acordo com os combustíveis utilizados, a pressão no seu interior (negativa ou positiva) e o tipo de paredes (refratárias ou de água). A Figura 1 apresenta um desenho esquemático de um gerador de vapor aquatubular e seus principais componentes que são o economizador, tubulão, superaquecedores, dessuperaquecedor, fornalha, pré-aquecedor de ar regenerativo e precipitador eletrostático.

Figura 1 – Desenho esquemático de um gerador de vapor aquatubular e seus principais componentes.



Fonte: Silva (2013).

O escoamento de ar e gases pelo gerador de vapor se dá pelo insuflamento de ar através de um ou mais ventiladores, no caso mostrado na imagem, o ar realiza troca térmica com os gases da exaustão através de um pré-aquecedor de ar regenerativo, seguindo para a fornalha onde se mistura com os combustíveis e ocorre a combustão, a partir desse ponto têm-se gases de combustão que seguem para região de convecção, nessa região a tubulação não sofre incidência da radiação da chama. Na saída dos gases, antes da exaustão pela chaminé, há fluxo pelo lado dos gases do pré-aquecedor de ar regenerativo e pelo precipitador eletrostático.

O pré-aquecedor regenerativo tem como função recuperar energia dos gases de combustão em alta temperatura, aumentando a temperatura do ar que está entrando no processo de combustão. O precipitador eletrostático é utilizado para coleta das cinzas resultantes da queima de carvão, assim diminuindo as emissões atmosféricas. O equipamento gera descargas elétricas através de eletrodos que conferem cargas negativas para as cinzas que estão passando pelo mesmo, a coleta dessas cinzas ocorre em placas de coleta que contêm carga positiva.

Seguindo o fluxo de água e vapor no desenho esquemático tem-se a entrada de água através do economizador. Localizado na zona de convecção, antes da saída dos gases, este tem como função pré-aquecer a água antes da chegada no tubulão e aproveitar o calor dos gases de saída. O tubulão é responsável pela separação de água e vapor, ele recebe água do economizador e a mistura de água e vapor proveniente da parede de água e tem saída de vapor para os superaquecedores. No tubulão também ocorrem as purgas de água para controle de sólidos que podem ser gerados no processo.

Os superaquecedores são responsáveis por elevar a temperatura do vapor, afastando o vapor do estado de saturação e levando ele para a região de superaquecimento. No caso estudado são utilizados três superaquecedores, um na zona de convecção e dois na zona de

transição entre a radiação e a convecção. Entre o primeiro e o segundo superaquecedor ou “SH” há um dessuperaquecedor que injeta água para controle de temperatura do vapor.

## 2.2 Eficiência energética

A eficiência energética representa o percentual da energia aproveitada em relação à energia disponível na fornalha. A energia útil de geradores de vapor está relacionada com a entalpia disponível para utilização através de vapor.

Segundo Bizzo (2003), considerando como volume de controle a fornalha e as superfícies de transferência de calor, o rendimento térmico pode ser escrito conforme a Equação (1).

$$\eta = \frac{\dot{m}_v(h_v - h_a)}{\dot{m}_{comb}PCS} \quad (1)$$

Bizzo (2003) também apresenta o método de avaliação das perdas, que também é conhecido como método indireto. Com este método é possível calcular a eficiência energética utilizando a Equação (2), considerando um sistema operando em regime permanente, onde o rendimento térmico é considerado como 100% subtraído das perdas calculadas. O método indireto é o mais adequado quando se busca analisar quais perdas energéticas são mais significativas.

$$\eta = 100 * \left(1 - \frac{q_p}{q_d}\right) \quad (2)$$

## 2.3 Energia disponível

De acordo com Bazzo (1995), podemos diferenciar a energia total fornecida para a fornalha da energia realmente disponível na mesma. Ambas se devem à energia liberada na queima dos combustíveis, pela umidade presente no combustível e pela energia do ar de combustão. A energia fornecida pode ser calculada utilizando o poder calorífico superior dos combustíveis segundo a Equação (3) e a energia disponível pode ser calculada através da Equação (4), utilizando o poder calorífico inferior.

$$q_f = PCS + \Delta h_{comb} + \frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{m}_{comb}}(\Delta h_{ar} + w\Delta h_{ar,v}) \quad (3)$$

$$q_d = PCI + \Delta h_{comb} + \frac{\dot{m}_{ar}(\Delta h_{ar} + w\Delta h_{ar,v})}{\dot{m}_{comb}} \quad (4)$$

## 2.4 Entalpia das espécies químicas

McBride *et al* (2002) um modelo baseado em dados empíricos para reproduzir condições termodinâmicas de diferentes espécies químicas de forma que esses dados sejam facilmente processados por programas de computador. Segundo o trabalho desenvolvido pelos autores, a entalpia  $H$  para gases ideais em uma temperatura  $T$  pode ser calculada utilizando a Equação (5).

$$\frac{H(T)}{RT} = -a_1 T^{-2} + \frac{a_2 \ln(T)}{T} + a_3 + \frac{a_4 T}{2} + \frac{a_5 T^2}{3} + \frac{a_6 T^3}{4} + \frac{a_7 T^4}{5} + \frac{b_1}{T} \quad (5)$$

Sendo que  $a_i$  são coeficientes,  $b_1$  é uma constante de integração e  $R$  é a constante universal dos gases. Os valores de  $a_i$  e  $b_1$  são tabelados e definidos de acordo com a espécie química e faixa de temperatura dos gases. Considerando a entalpia em uma determinada temperatura  $H(T)$  e a entalpia de formação  $\Delta H_f(T_{ref})$  na temperatura de referência de 298,15K, pode-se calcular a variação de entalpia sensível  $\Delta H_s(T)$  conforme Equação (6).

$$\Delta H_s(T) = H(T) - \Delta H_f(T_{ref}) \quad (6)$$

## 2.5 Perda de calor sensível nos gases de combustão

Segundo Aguiar (2014) e Bazzo (1995) a perda de calor sensível nos gases de combustão é o principal meio de perda energética em geradores de vapor. No caso estudado neste trabalho os gases exaustos pela chaminé contêm  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  e  $\text{SO}_2$ , de modo que possa ser utilizada a Equação (7) para determinar a energia associada a estas espécies químicas.

$$q_{gc} = \frac{\dot{m}_{\text{CO}_2} \Delta h_{\text{CO}_2} + \dot{m}_{\text{SO}_2} \Delta h_{\text{SO}_2} + \dot{m}_{\text{N}_2} \Delta h_{\text{N}_2} + \dot{m}_{\text{O}_2} \Delta h_{\text{O}_2} + \dot{m}_{\text{CO}} \Delta h_{\text{CO}}}{\dot{m}_{\text{comb}}} \quad (7)$$

A metodologia utilizada foi associar a variação de entalpia sensível dos gases secos produzidos em relação à temperatura de referência com a sua vazão mássica. Essa perda de energia está associada com altas temperaturas na saída da chaminé, conseqüentemente, se houver diminuição da temperatura a eficiência aumentará.

## 2.6 Perda por combustão parcial

Segundo Bizzo (2003), a perda por combustão parcial dos combustíveis deve-se ao  $\text{CO}$  na chaminé e ao carbono contido nas cinzas depositadas no fundo da fornalha e pode ser calculada pela Equação (8).

$$q_{cp} = \frac{10800 \dot{m}_{\text{CO}}}{\dot{m}_{\text{comb}}} + \frac{33880 \dot{m}_{\text{cinzas}} C_{CZ}}{\dot{m}_{\text{comb}}} \quad (8)$$

Na Equação (8), os valores de 10800 e 33880 correspondem, respectivamente, ao poder calorífico do monóxido de carbono e do carbono livre contido nas cinzas em  $\text{kJ/kgK}$ . Segundo Bazzo (1995) não é comum haver perda de calor por combustão parcial, mas é importante realizar a avaliação da presença de  $\text{CO}$  na chaminé e de carbono nas cinzas extraídas pelo cinzeiro da fornalha, principalmente em geradores de vapor alimentados com combustíveis sólidos.

## 2.7 Perdas devido a umidade

As perdas devido à água formada na combustão são inevitáveis, ao contrário da água contida nos combustíveis, principalmente nos sólidos, pois é possível utilizar processos de secagem, naturais ou forçados, para controle desse parâmetro. A umidade presente no ar atmosférico representa, normalmente, uma pequena parcela das perdas e pode ser

desconsiderado nos cálculos. As perdas por umidade formada na combustão e presente nos combustíveis e no ar atmosférico foram calculadas utilizando as Equações (9), (10) e (11), respectivamente.

$$q_{H2O,combust\tilde{a}o} = \frac{\dot{m}_{H2O}(h_{H2O,v} - h_{H2O,ref})}{\dot{m}_{comb}} \quad (9)$$

$$q_{H2O,comb} = \frac{\dot{m}_{H2O,combust\tilde{v}el}(h_{H2O,v} - h_{H2O,ref})}{\dot{m}_{comb}} \quad (10)$$

$$q_{H2O,ar} = \frac{\dot{m}_{H2O,ar}h_{H2O,v}}{\dot{m}_{comb}} \quad (11)$$

## 2.8 Perdas de calor por radiação e convecção

Segundo Bazzo (1995) as perdas de calor para o ambiente por radiação e convecção são desenvolvidas para cada caso em particular utilizando modelos matemáticos complexos. Em geradores de vapor de grande porte, com paredes d'água e isoladas com refratários, adota-se aproximadamente uma perda entre 0,5% e 1% da carga disponível. Bizzo (2003) cita a utilização das Equações (12) e (13) como um meio de se estimar teoricamente as perdas por radiação e convecção de um gerador de vapor.

$$Q_r = \sigma\varepsilon(T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (12)$$

$$Q_c = h_c A(T_s - T_{amb}) \quad (13)$$

## 2.9 Perda de calor pelas purgas

As purgas de água realizadas nos tubulões, e/ou nas tubulações dos geradores de vapor, são essenciais para evitar acumulação de sólidos em pontos inferiores que podem comprometer a troca térmica e causar danos às tubulações. A quantificação da perda de calor pelas purgas é dada pela Equação (14).

$$q_{purgas} = \frac{\dot{m}_{purga}(h_{\acute{a}gua,processo} - h_{H2O,ref})}{\dot{m}_{comb}} \quad (14)$$

## 2.10 Perda de calor sensível pelas cinzas

A perda por calor sensível das cinzas ocorre quando há queima de carvão mineral e tem representação significativa na avaliação da eficiência energética. Essa perda é estimada através da Equação (15) e refere-se as cinzas que se desprendem do carvão ficando acumuladas no cinzeiro sem realizar o fluxo pela fornalha.

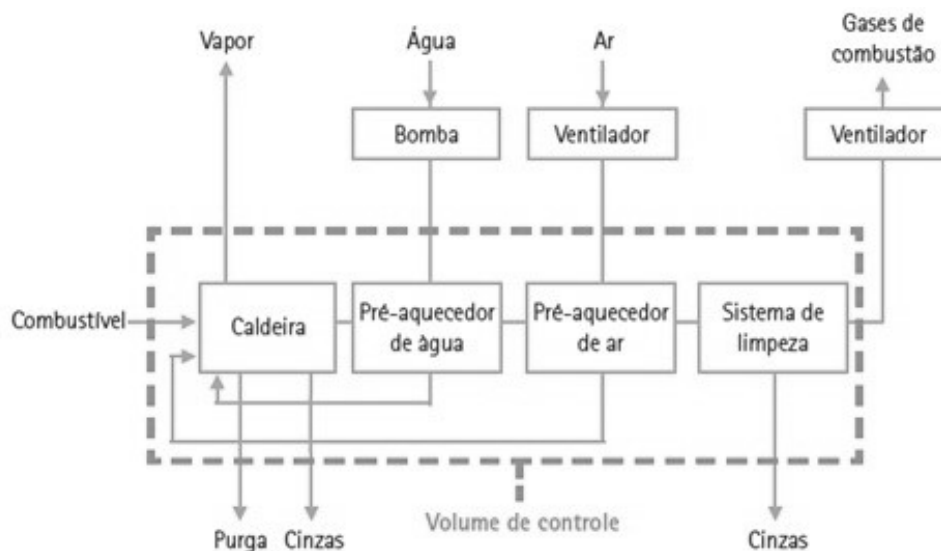
$$q_{cinzas} = \frac{\dot{m}_{cinzas}Cp_{cz}(T_{cinzas} - T_{amb})}{\dot{m}_{comb}} \quad (15)$$

### 3. METODOLOGIA

Um programa foi elaborado, através de uma planilha em Microsoft Excel, para realizar o cálculo de eficiência energética de geradores de vapor aquatubulares com queima de carvão, óleo e gás combustível, de uma empresa petroquímica através do método indireto de cálculo ou método das perdas. Este programa tem interface com o *software* Aspen Process Explorer que é utilizado pela empresa para consulta e manipulação dos dados do processo que são obtidos através de instrumentos “online”. As especificações do gerador de vapor e dos combustíveis foram fornecidas pela empresa e já estão pré-carregadas no programa.

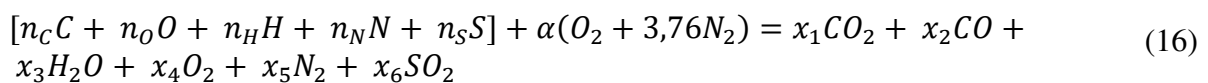
Foi analisado e definido um volume de controle para avaliação das entradas e saídas de combustível, ar, gases de combustão, água e vapor no processo. A Figura 2 representa o desenho esquemático do volume de controle do gerador de vapor utilizado para o estudo, além disso são representados alguns equipamentos auxiliares e os fluxos do processo.

Figura 2 – Volume de controle do gerador de vapor.



Como o gerador de vapor opera a maior parte do tempo com pressão e temperatura praticamente constantes devido à atuação de malhas de controle, é considerado o processo em regime permanente e assim a utilização do método das perdas é válido conforme indica Bizzo (2003).

Para a resolução da reação química são considerados como reagentes as espécies químicas que compõem os combustíveis e o ar atmosférico, que são o carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e enxofre. Os produtos são dióxido de carbono, monóxido de carbono, água, oxigênio, nitrogênio e o dióxido de enxofre. Foi utilizado um combustível equivalente em base seca em que é considerado a proporção de cada elemento na sua composição química. A Equação (16) apresenta a reação química adotada.



Os coeficientes  $n_C$ ,  $n_O$ ,  $n_H$ ,  $n_N$  e  $n_S$  são o número de mols de cada espécie química e são calculados a partir da análise elementar do combustível, como a razão entre o percentual mássico em base seca e sua massa atômica em g/mol. A relação ar/combustível e o percentual

volumétrico de O<sub>2</sub> e CO na exaustão são obtidos através dos analisadores instalados em linha no processo. Com a relação ar/combustível calcula-se o coeficiente  $\alpha$  através da Equação (17). Este coeficiente representa a quantidade de O<sub>2</sub> na combustão. Os coeficientes  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  e  $x_6$  são calculados através do sistema linear apresentado nas Equações (18) a (23).

$$\alpha = \frac{R_{A/C}(n_C + n_O + n_H + n_N + n_S)}{(4,76 * 28,85)} \quad (17)$$

$$x_5 = n_N + 3,76\alpha \quad (18)$$

$$x_6 = n_S \quad (19)$$

$$2x_3 = n_H \quad (20)$$

$$x_4 = \frac{O_2(n_C + x_3 + x_5 + x_6)}{(1 - O_2)} \quad (21)$$

$$n_C = x_1 + x_2 \quad (22)$$

$$x_2 = CO(n_C + x_4 + x_5 + x_6) \quad (23)$$

Para o cálculo da energia disponível na fornalha, das perdas de calor e da energia útil do gerador de vapor foram utilizadas as vazões mássicas dos produtos e as entalpias absolutas das espécies químicas. As perdas de calor avaliadas são referentes à perda de calor sensível dos gases de combustão, à combustão parcial dos combustíveis, à umidade presente no ar atmosférico e nos combustíveis, à perda por radiação da fornalha para o ambiente, às cinzas presentes no carvão mineral e às purgas realizadas.

Os valores de vazão mássica dos produtos foram obtidos utilizando a Equação (24), expressa em notação indicial, considerando o combustível em base seca, onde  $u_i$  é a massa molar da espécie química,  $N=6$  e  $\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_3, \dot{m}_4, \dot{m}_5$  e  $\dot{m}_6$  correspondem, respectivamente, às vazões mássicas de CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>.

$$\dot{m}_i = \frac{x_i u_i}{\sum_i^N x_i u_i} (\dot{m}_{ar\ seco} + \dot{m}_{comb}) \quad (24)$$

As entalpias absolutas para cada espécie química foram calculadas através da Equação (5) e dos valores tabelados dos coeficientes  $a_i$  e  $b_i$  que constam nas Tabelas A.1, A.2 e A.3 dos Anexos. Os valores de entalpia para a temperatura de referência de 298,15K também são tabelados vide Tabela A.3 dos anexos. Assim, foi possível obter a variação de entalpia para cada espécie utilizando a Equação (6).

Após o cálculo das vazões mássicas e da variação de entalpia sensível para cada espécie química foi obtida a perda por calor sensível dos gases de combustão através da Equação (7). As perdas por umidade foram calculadas através das Equações (9), (10) e (11), apesar de representar uma parcela pequena, a perda por umidade contida no ar também foi considerada.

Consultando o manual do fabricante do gerador de vapor foi obtida a relação da perda de calor por radiação em função da carga do gerador de vapor. Somada à dificuldade em se determinar precisamente as perdas por radiação e convecção através das Equações (12) e (13), foram consideradas somente as perdas por radiação através da Equação (25), que representa o polinômio obtido a partir dos valores que constam na Tabela 1. Comparando os valores da



Tabela 1 e o gráfico gerado através da Equação (25) com gráficos de perda por radiação apresentados por Bizzo (2003), é possível assumir essa perda por radiação.

Tabela 1 – Relação carga x perda por radiação

Carga (%)	50	70	85	100	110
Perda por Radiação (%)	0,52	0,37	0,31	0,26	0,24

$$q_{rad} = 6^{-05}x^2 - 0,0143x + 1,0799 \quad (25)$$

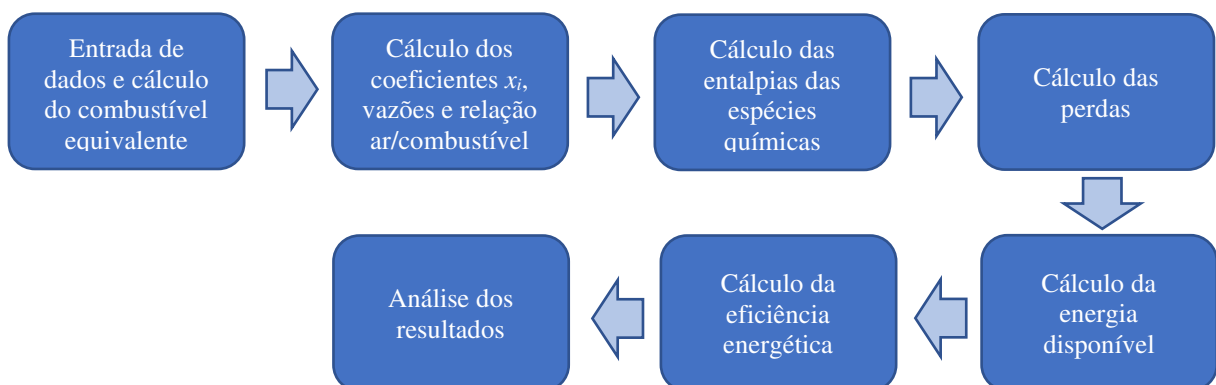
É possível desconsiderar, para o gerador de vapor analisado, a perda de calor pelas purgas realizadas visto que essa é controlada e está na ordem de 0,5% do vapor produzido. Essa simplificação é possível pois há um tratamento rigoroso da água de alimentação para garantir a qualidade do vapor superaquecido produzido para alimentação de turbinas.

A combustão parcial, que é típica de geradores de vapor que queimam combustíveis sólidos, foi calculada utilizando a Equação (8). De acordo com os dados fornecidos pelo manual de operação do gerador de vapor, para a fração mássica da vazão de cinzas que fica contida no fundo da fornalha foi considerado o valor de 0,074 e a fração mássica de carbono contido nessas cinzas é 0,05. Ainda em relação às cinzas, também foi avaliada a perda por calor sensível no fundo de fornalha, para isso foi utilizada a Equação (15). A temperatura das cinzas extraídas é de aproximadamente 1473,15K e o calor específico é 1,25kJ/kgK.

A energia disponível foi calculada através da Equação (26), que se baseia na Equação (4) mas utiliza o calor específico dos combustíveis para estimar a variação de entalpia. Os valores de poder calorífico inferior e do calor específico dos combustíveis são tabelados e foram fornecidos pela empresa. O conteúdo de umidade do ar foi obtido através da carta psicométrica do ar atmosférico considerando as condições de pressão atmosférica de 101kPa, temperatura ambiente de 300,15K e 75% de umidade relativa. A temperatura média do combustível na entrada é 353K. A eficiência energética é obtida através da Equação (2), onde  $q_d$  é a energia disponível e  $q_p$  é a soma de todas as perdas energéticas. A Figura 3 representa a sequência de realização da metodologia deste trabalho.

$$q_d = PCI + Cp_{comb}(T_{comb} - T_{ref}) + \frac{\dot{m}_{ar}(\Delta h_{ar} + w\Delta h_{vapor})}{\dot{m}_{comb}} \quad (26)$$

Figura 3 – Sequência de cálculo.



## 4. RESULTADOS

Foram extraídos do processo os dados de vazão de vapor produzido, vazão de ar para fornalha, vazão de alimentação de carvão, vazão de óleo, vazão de gás combustível, concentração de O<sub>2</sub>, ppm de CO nos gases de combustão, temperatura de entrada de ar e temperatura de saída dos gases de combustão. Assim também, foram extraídos os valores de eficiência térmica determinados pela procedimento atual na empresa. Foi extraída uma série de 262 valores para cada variável, esses valores representam a média em 1 hora. Os resultados obtidos foram analisados e validados.

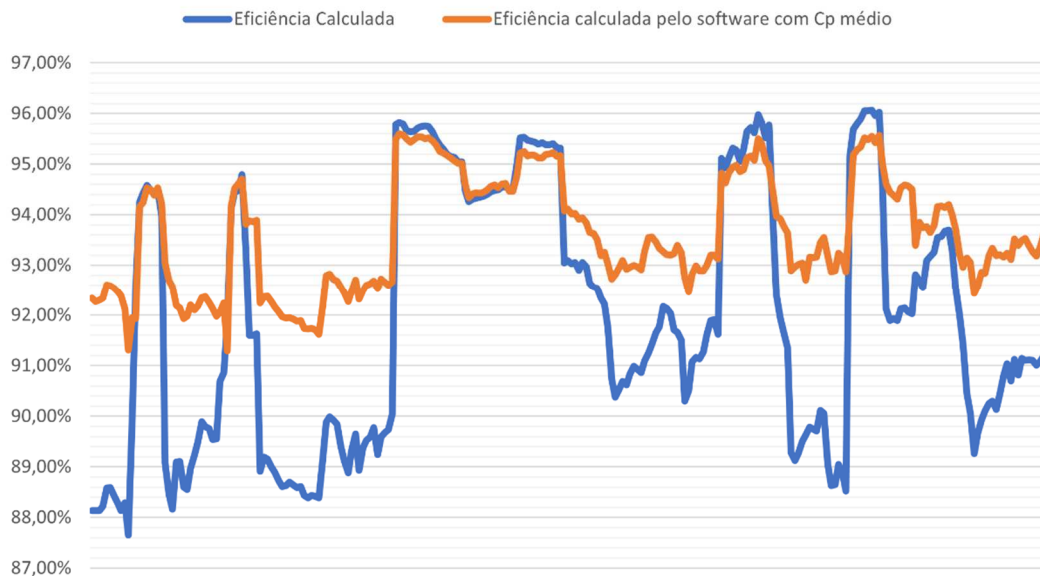
### 4.1 Validação do cálculo

Os resultados obtidos para eficiência energética do gerador de vapor estão dentro da faixa esperada. Apesar da faixa de variação ser grande, a eficiência energética média obtida foi 91,96% sendo que o menor valor de eficiência obtido foi 87,65% e o maior foi 96,06%. O cálculo de eficiência energética foi validado através da comparação dos resultados obtidos com os valores fornecidos pela empresa.

O manual de operação apresenta o rendimento térmico em função da carga do gerador de vapor para quatro casos distintos de proporção de óleo combustível e carvão mineral para queima conforme Tabela A.4 dos Anexos, assim considera-se que o gás combustível é desprezível. Não é possível validar o cálculo desenvolvido nesse trabalho com estes dados pois há uma grande diferença entre os valores fornecidos e calculados.

É possível comparar e validar os valores de eficiência energética obtidos através do modelo desenvolvido neste trabalho com os dados obtidos através do modelo utilizado atual aplicado ao gerador de vapor. Como é possível observar na Figura 4, os dois gráficos têm um comportamento semelhante ao longo do tempo, essa relação foi quantificada através da aplicação de uma função de correlação nas duas séries de valores de eficiência que resultou em um coeficiente de 0,93, o que indica uma correlação muito forte entre as duas séries de dados.

Figura 3 – Comparação da eficiência energética calculada neste trabalho com a eficiência calculada pelo modelo utilizando calor específico médio.

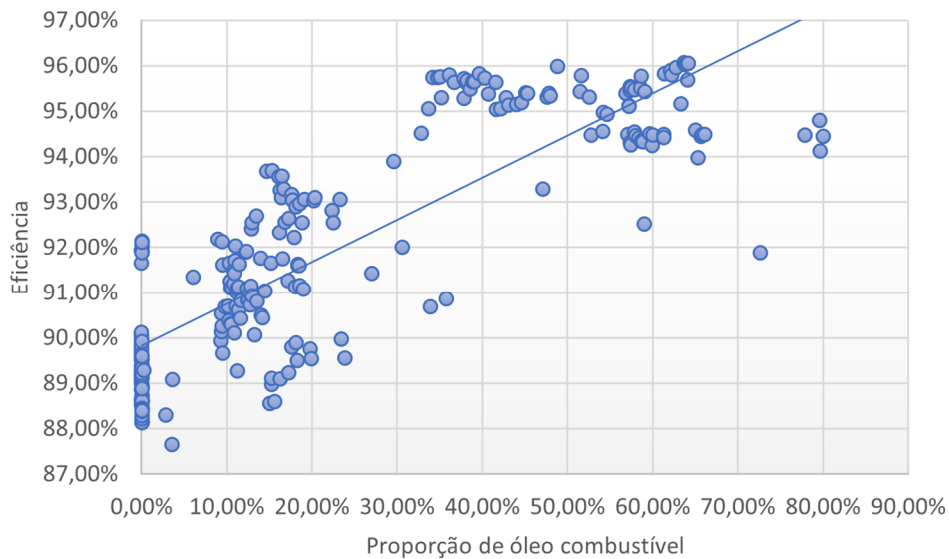


Observou-se uma discrepância entre os valores de eficiência energética. Analisando o cálculo de eficiência programado atualmente pela empresa, foi observado no cálculo da perda sensível por gases secos que o mesmo é realizado utilizando um calor específico médio para os gases. Não é citado como este valor foi obtido, mas podemos considerar como uma aproximação pois é uma média e esta propriedade varia de acordo com alguns fatores como a composição e a massa dos gases de combustão. Em contrapartida, neste trabalho foram utilizadas as entalpias e as vazões mássicas de cada espécie química para a realização deste cálculo.

#### 4.2 Análise dos resultados

Como já mencionado na seção 4.1, os resultados obtidos para eficiência energética do gerador de vapor apresentam uma grande faixa de variação. Uma hipótese que justificasse isso, seria a relação dessa variação com a proporção de cada combustível queimado, assim foram analisadas a eficiência e a proporção em massa de óleo combustível queimado em relação a todos os combustíveis, como mostrado na Figura 3. Observou-se que quanto maior a quantidade de óleo em relação aos outros combustíveis, maior a eficiência energética da caldeira.

Figura 3 – Eficiência energética calculada pela proporção de óleo combustível queimado.

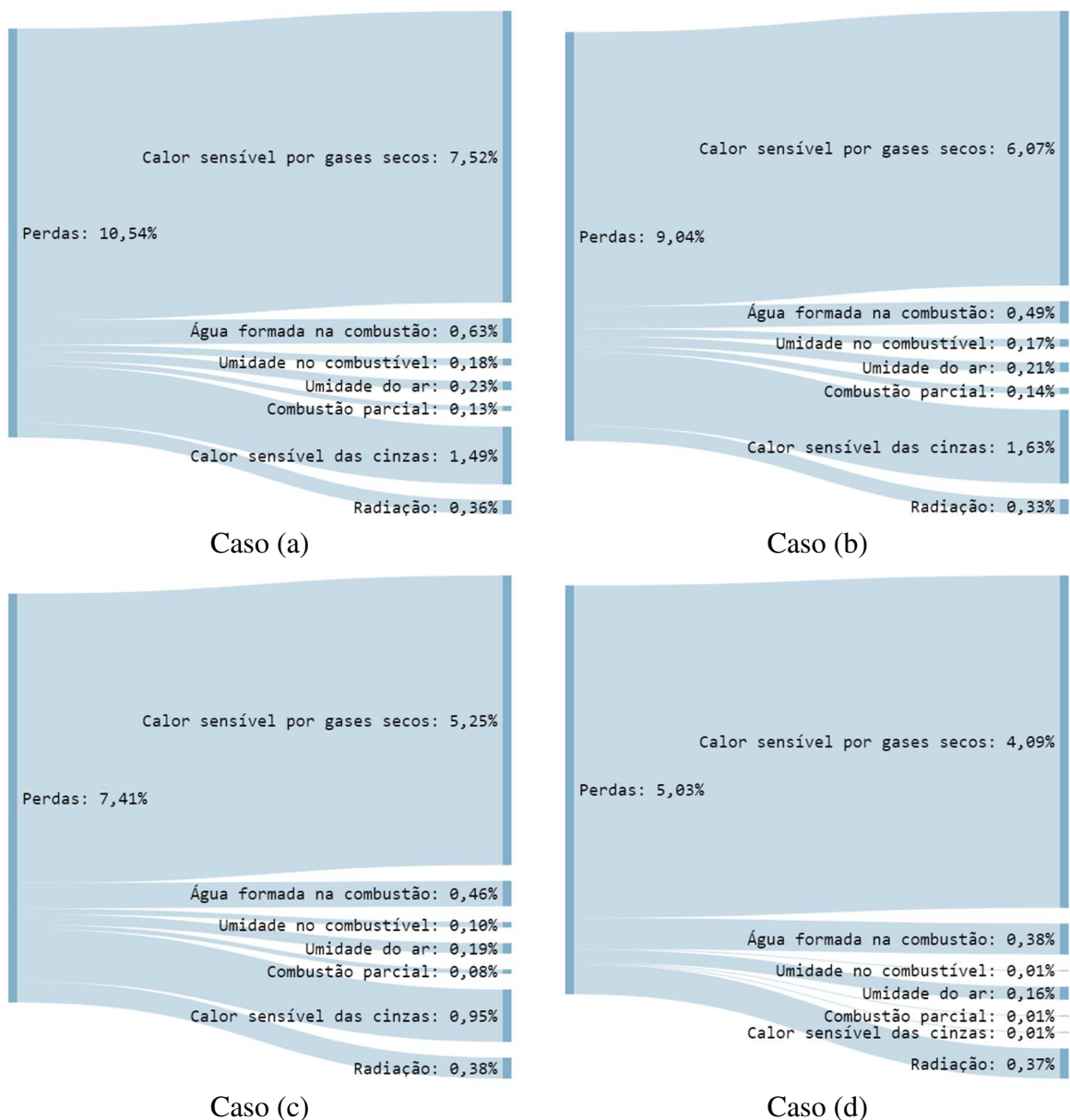


Expandindo a análise sobre a tendência de a eficiência energética aumentar com o aumento da proporção de óleo combustível, foram analisados os valores médios de cada perda energética para quatro casos de proporção de óleo combustível queimado em relação aos outros combustíveis, as faixas utilizadas para os casos (a), (b), (c) e (d), respectivamente, são percentual de óleo menor que 1%, entre 1% e 15%, entre 15% e 40% e acima de 40%. É importante salientar que, para os dados obtidos, a maior proporção de óleo em relação aos outros combustíveis é 80%.

As eficiências energéticas médias obtidas para cada caso são (a) 89,46%, (b) 90,96%, (c) 95,59% e (d) 94,97%, e como já era esperado a perda energética mais relevante é devido ao calor sensível pelos gases secos na chaminé. Na Figura 4 se apresentam os valores das perdas energéticas para as faixas já citadas.

Analisando os diagramas é possível verificar que a menor eficiência energética quando há queima de carvão deve-se, principalmente, à perda de calor sensível nas cinzas, que é dependente da vazão de carvão. As perdas relacionadas com a umidade são levemente maiores e possuem relação com o combustível utilizado. A perda por calor sensível dos gases está relacionada com a diminuição da eficiência energética devido a temperatura de chama ser maior quando há queima de carvão, assim, conseqüentemente, a temperatura dos gases de combustão na exaustão do gerador de vapor também é maior. O aumento da temperatura dos gases, que é para cada caso, respectivamente, 416,68K, 401,48K, 397,33K, 389,41K, resulta no aumento da entalpia das espécies químicas, que por sua vez resulta em uma maior perda por calor sensível dos gases conforme as Equações (5) e (7).

Figura 4 – Perdas energéticas médias (%) para cada caso.

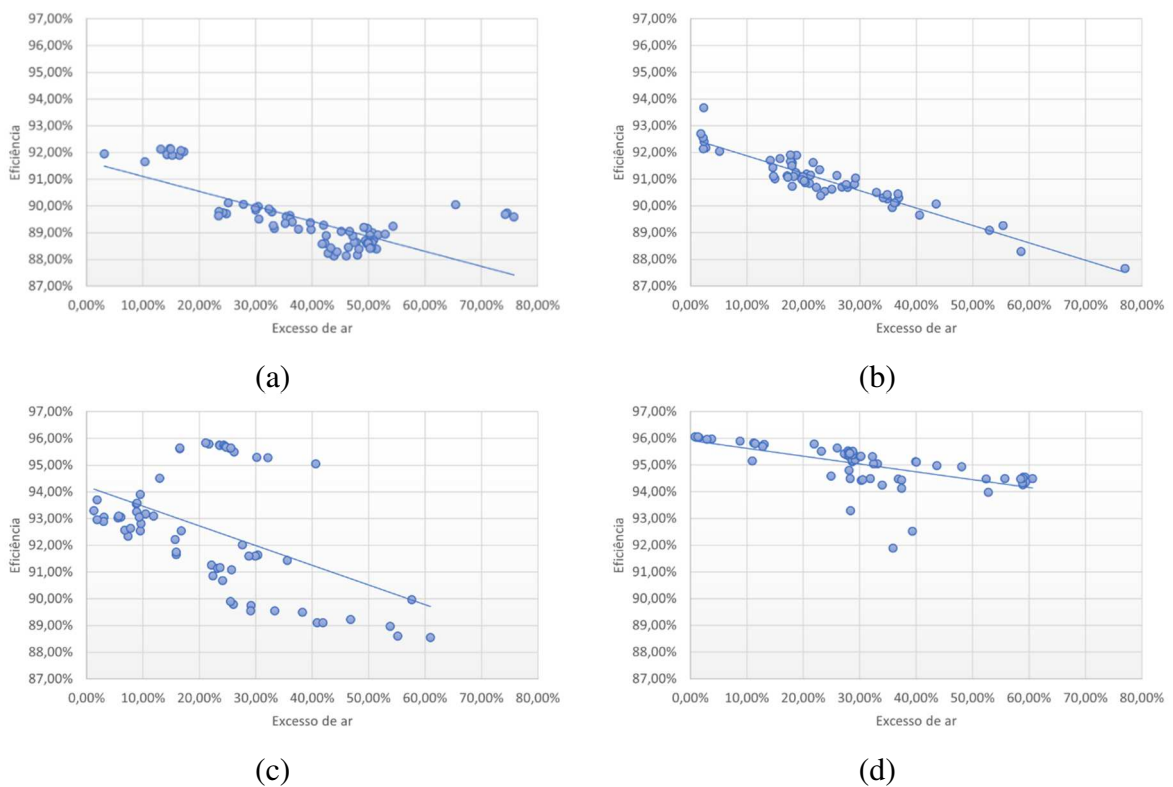


Uma variável de processo que é monitorada e controlada em um gerador de vapor, e que está relacionada com a qualidade da queima e a eficiência energética, é o excesso de ar para combustão. O excesso de ar é a quantidade de ar acima da quantidade necessária para a

combustão estequiométrica. Para obter esse valor foi dividida a relação ar/combustível calculada a partir dos dados reais de processo pela relação ar/combustível estequiométrica. Na Figura 5 estão plotados os gráficos dos valores de eficiência energética em função do excesso de ar para as faixas de percentual de óleo combustível queimado já estipuladas. Foi adicionado uma linha de tendência para melhor visualização da influência de uma variável em relação à outra.

Independente da proporção de óleo combustível queimado, a diminuição do excesso de ar resulta em uma maior eficiência energética do gerador de vapor. Apesar desse resultado, não é indicado operar com pouco excesso de ar devido à ocorrência de combustão incompleta e apagamento de chama, este último pode ocasionar uma explosão do gerador de vapor.

Figura 5 – Relação do excesso de ar (%) e eficiência energética calculada (%) para cada caso.



Fonte: Autoria própria.

## 5. CONCLUSÃO

O método de cálculo de eficiência energética desenvolvido neste trabalho foi implementado e validado através da forte correlação com os valores de eficiência fornecidas pela empresa, apesar da diferença de valores quando o principal combustível é o carvão mineral, e dos valores obtidos serem aproximados aos divulgados em outros trabalhos.

Como já era esperado, a perda de calor sensível por gases secos é a perda energética mais relevante para o gerador de vapor estudado, independentemente do combustível utilizado. Obteve-se na média uma maior eficiência energética com a queima majoritária de óleo. Essa análise em relação ao percentual de óleo combustível queimado e a divisão das posteriores avaliações em casos específicos foi fundamental para a obtenção de resultados mais claros e com influência de menos variáveis.

A menor eficiência obtida quando há queima de carvão não é trivial, mas é plausível em função das perdas energéticas devido às cinzas e o significativo aumento da perda por calor sensível dos gases secos. As cinzas acumuladas absorvem calor sensível que seria entregue para a geração de vapor e a maior temperatura de chama resultante da queima de carvão ocasiona o aumento da temperatura de saída dos gases de combustão.

A relação do excesso de ar com a eficiência energética é conhecida, mas mensurar o quanto o aumento dessa variável pode reduzir o rendimento do gerador de vapor é importante para mitigar oportunidades de melhorias no controle do equipamento. Essa análise abre precedente para buscar, em trabalhos futuros, uma otimização para esse parâmetro através da associação da eficiência energética com vazão de vapor gerado, por exemplo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, Wagner. **Eficiência energética de um gerador de vapor através do método indireto**. Acta Iguazu, Cascavel, v.3, n.4, p. 124-144, 2014.

BAZZO, E. **Geração de vapor**. 2 ed. Florianópolis: UFSC, 1995.

BIZZO, W.A. Apostila Geração, Distribuição e Utilização de vapor. Unicamp, 2003.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFFICIENTIA. **Eficiência Energética no Uso de Vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

JUSTI, Rodrigo Savi. **FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DE RENDIMENTO TÉRMICO DE GERADORES DE VAPOR**. 2019. 25 f. Monografia de conclusão de curso (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

KRISHNANUNNI, S. et al. **Evaluation of Heat Losses in Fire Tube Boiler**. 2012.

MARQUES, M. C. S.; HADDAD, J.; MARTINS, A. R. S. **Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações**.3. Ed. Itajubá, MG: FUPAI, 2006.

MARTINS, Daniela Filipa Ferreira. **Otimização do Funcionamento de Caldeiras Aquatubulares em Indústria de Processo Químico**. 2015. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2015.

MCBRIDE, Bonnie J.; ZEHE, Michael J.; GORDON, Sanford. **NASA Glenn coefficients for calculating thermodynamic properties of individual species**. 2002.

SILVA, Murilo Prates da. **INSPEÇÃO DAS ZONAS DE PRESSÃO DE UMA CALDEIRA AQUATUBULAR**. 2013. 31 f. Monografia de conclusão de curso (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

Vergnhanini Filho, R. **Metodologia simplificada de cálculo do rendimento térmico de caldeiras**. Revista IPT | Tecnologia e Inovação v.2, n.7, abr., 2018

## ANEXOS

Tabela A.1 – Coeficientes  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  para cálculo da entalpia das espécies químicas envolvidas, na faixa de temperatura de 200K a 1000K.

Espécie Química	$a_1$	$a_2$	$a_3$
CO <sub>2</sub>	4,943650540E+04	-6,264116010E+02	5,301725240E+00
CO	1,489045326E+04	-2,922285939E+02	5,724527170E+00
H <sub>2</sub> O liq	1,326371304E+09	-2,448295388E+07	1,879428776E+05
H <sub>2</sub> O vap	-3,947960830E+04	5,755731020E+02	9,317826530E-01
O <sub>2</sub>	-3,425563420E+04	4,847000970E+02	1,119010961E+00
N <sub>2</sub>	2,210371497E+04	-3,818461820E+02	6,082738360E+00
SO <sub>2</sub>	-5,310842140E+04	9,090311670E+02	-2,356891244E+00
Ar atmosférico	1,009950160E+04	-1,968275610E+02	5,009155110E+00

Tabela A.2 – Coeficientes  $a_4$ ,  $a_5$  e  $a_6$  para cálculo da entalpia das espécies químicas envolvidas, na faixa de temperatura de 200K a 1000K.

Espécie Química	$a_4$	$a_5$	$a_6$
CO <sub>2</sub>	2,503813816E-03	-2,127308728E-07	-7,689988780E-10
CO	-8,176235030E-03	1,456903469E-05	-1,087746302E-08
H <sub>2</sub> O liq	-7,678995050E+02	1,761556813E+00	-2,151167128E-03
H <sub>2</sub> O vap	7,222712860E-03	-7,342557370E-06	4,955043490E-09
O <sub>2</sub>	4,293889240E-03	-6,836300520E-07	-2,023372700E-09
N <sub>2</sub>	-8,530914410E-03	1,384646189E-05	-9,625793620E-09
SO <sub>2</sub>	2,204449885E-02	-2,510781471E-05	1,446300484E-08
Ar atmosférico	-5,761013730E-03	1,066859930E-05	-7,940297970E-09

Tabela A.3 – Coeficientes  $a_7$  e  $b_1$  para cálculo da entalpia das espécies químicas envolvidas na faixa de temperatura de 200K a 1000K e entalpia de formação das espécies químicas na temperatura de referência de 298,15K.

Espécie Química	$a_7$	$b_5$	$\Delta H_f(T_{ref})$
CO <sub>2</sub>	2,849677801E-13	-4,528198460E+04	-393,51
CO	3,027941827E-12	-1,303131878E+04	-110,535
H <sub>2</sub> O liq	1,092570813E-06	1,101760476E+08	-285,83
H <sub>2</sub> O vap	-1,336933246E-12	-3,303974310E+04	-241,826
O <sub>2</sub>	1,039040018E-12	-3,391454870E+03	0
N <sub>2</sub>	2,519705809E-12	7,108460860E+02	0
SO <sub>2</sub>	-3,369070940E-12	-4,113752080E+04	-296,81
Ar atmosférico	2,185231910E-12	-1,767967310E+02	-0,126



Tabela A.4 – Relação da eficiência em função da carga e da relação de carvão e óleo fornecida pelo manual de operação do gerador de vapor.

Carga (%)	Carvão (%) / Óleo (%)			
	100/0	90/10	50/50	0/100
50	86,1	87,71	87,14	86,98
70	86,21	86,65	87,32	87,22
85	86,32	86,73	87,45	87,42
100	85,36	85,76	86,9	87,28
110	85,28	85,57	86,77	87,17