

**MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA**  
RAMO OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA QUÍMICA

# **Otimização do Funcionamento de Caldeiras Aquatubulares em Indústria de Processo Químico**

**Porto, Novembro 2015**

**DANIELA FILIPA FERREIRA MARTINS**

**Orientador da Empresa:** Eng.º Luís Braga



**Orientador:** Doutor Eng.º Christopher de Sá



## Agradecimentos

Ao longo deste estágio, foram várias as pessoas que me acompanharam e que gostaria de agradecer, pois sem elas não seria possível a concretização do mesmo.

Em primeiro lugar à Empresa RAR Açúcar, pela oportunidade única de realizar este estágio, bastante enriquecedor, que me permitiu um maior contacto com a indústria de modo a aumentar os meus conhecimentos.

Ao orientador da Empresa, Eng.º Luís Braga, por toda a compreensão, auxílio, disponibilidade, e informação disponibilizada,

Ao Eng.º José Chorão, por toda a disponibilidade e ajuda,

Aos Fogueiros pela paciência, pela ajuda, auxílio, simpatia,

A todas as pessoas da RAR Açúcar por toda a simpatia demonstrada, que contribuíram de uma forma ou de outra para a minha integração na Empresa,

Ao Orientador do ISEP, Eng.º Christopher de Sá pela ajuda e orientação,

À minha família pelo apoio incondicional, compreensão e conforto,

Ao meu namorado por todo o apoio, dedicação, preocupação e carinho demonstrado durante todos estes anos.

Aos meus amigos, por me apoiarem e motivarem a desenvolver um bom trabalho

A Todos Muito Obrigada.



## Resumo

O presente trabalho centrou-se na otimização do rendimento térmico de duas caldeiras aquatubulares da empresa RAR- Refinaria de Açúcar Reunidas, com a finalidade de identificar onde ocorrem perdas de energia e, desta forma, propor soluções para a sua minimização. Para tal, realizaram-se ensaios em duas caldeiras da empresa providas de queimadores mistos, ou seja podem operar com fuelóleo e gás natural, tanto individualmente, como simultaneamente, sendo que para a realização dos ensaios apenas se utilizou o fuelóleo devido ao seu menor custo.

Na caldeira designada por 1 realizaram-se ensaios para os caudais de 300, 500, 800, 1000, 1200, 1400 e 1600 kg/h de fuelóleo. A gama de rendimentos térmicos obtida foi entre 88,3 e 91,2%. Na caldeira designada por 3, efetuaram-se ensaios para os caudais de fuelóleo de 300, 500, 700, 900, 1000, 1200, 1400, 1500 e 1800 kg/h e os rendimentos térmicos obtidos foram entre 85,2 e 88,0%. Em ambas as caldeiras e para caudais baixos verificou-se que a quantidade de ar introduzida no processo de combustão era superior à necessária, conduzindo a uma diminuição dos valores de rendimento térmico. Para 500 kg/h de fuelóleo, por exemplo, a quantidade de ar utilizada foi cerca de duas vezes superiores ao valor estequiométrico.

Tendo em conta estes factos, foi proposto ao gestor de energia a implementação de uma nova relação de ar/combustível vs caudal de combustível no sistema de controlo das referidas caldeiras. Após alguns testes (excluindo 300 kg/h de fuelóleo devido a questões de operação), considerou-se como caudal mínimo de operação os 500 Kg/h de fuelóleo nas respetivas caldeiras 1 e 3. Verificou-se que os rendimentos térmicos aumentaram, no caso da caldeira 1, para valores entre os 90,1 e 91,3% e, na caldeira 3, para valores entre 89,0 e 90,9%.

Por fim, efetuou-se uma breve análise económica com o intuito de se avaliar e quantificar o que a empresa pode poupar com esta medida. O lucro anual pode oscilar entre 14.400 e 62.640€ ou 104.400 e 136.800€, para as caldeiras 1 e 3, respetivamente.

**Palavras- chave:** Rendimento Térmico, Caldeiras Aquatubulares, Indústria do Processo Químico, Fuelóleo, Potência Térmica.

## Abstract

This master thesis goal was the characterization and thermal efficiency optimization of two steam boilers in RAR- Refinaria de Açúcar Reunidas, SA in order to identify energy losses and propose solutions to minimize them. The boilers have mixed burners and can operate with fuel oil and natural gas, individually or simultaneously. For the trial it was only used fuel oil.

In aquatubular boiler number one, some assays were performed for the flow rates of 300, 500, 800, 1000, 1200, 1400 and 1600 kg/h using fuel oil as fuel. The range of thermal efficiencies obtained was between 88.3 and 91.2%. The aquatubular boiler three was tested for fuel oil mass flowrates of 300, 500, 700, 900, 1000, 1200, 1400, 1500 and 1800 kg/h. Regarding the range of thermal efficiencies this boiler had values between 85.2 and 88.0%, it was verified that

The amount of air introduced in the combustion chamber for both boilers with low fuel flow rates was much higher than what it was theoretically indicated, leading to a decrease in thermal efficiencies. For example, 500 kg/h of fuel oil leads to two times more the amount of stoichiometric air.

Then it was proposed to the energy manager to implement a new relation between air/fuel vs fuel oil mass flow into the boilers control system. After some tests it was concluded that thermal efficiencies increased to a range of 90.1 to 91,3% and 89.5 to 90.9% in case of boiler one or three, respectively.

Finally it was made an economic analysis in order to assess and quantify how much the company could profit with this correction. The values were 14,400 to 62,640€ and 104,400 and 136,800 € for the boiler one and three, respectively.

**Key-words:** Thermal Efficiency, Water Tubes Boilers, Chemical Process Industry  
Thermal Power, Fuel Oil.



# Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Apresentação da Empresa .....	1
1.2. Unidade RAR – Cogeração .....	2
1.3. Objetivos.....	4
1.4. Estrutura .....	4
2. Fundamentos Teóricos.....	7
2.1. Enquadramento .....	7
2.2. Produção de Vapor .....	8
2.3. Caldeiras.....	9
2.3.1. Caldeiras de tubos de fumo.....	9
2.3.2. Caldeiras Aquatubulares.....	10
2.4. Queimadores mistos.....	11
2.5. Combustíveis.....	12
2.5.1. Fuelóleo .....	12
2.5.2. Gás Natural .....	14
2.6. Combustão.....	14
2.6.1. Combustão completa e incompleta .....	15
2.6.2. Perdas de gases de Exaustão.....	16
2.6.3. Excesso de Ar .....	16
2.7. Emissões.....	17
Monóxido de carbono .....	17
2.8. Rendimento Térmico .....	17

3. Estudo e Caracterização das Caldeiras.....	19
3.1. Levantamento de dados .....	19
3.2. Caracterização das Caldeiras .....	21
4. Otimização do Rendimento das Caldeiras 1 e 3.....	29
4.1. Alteração da relação Ar/Combustível na caldeira 1 .....	29
4.2. Alteração da relação Ar/combustível na Caldeira 3 .....	33
5. Breve Análise de Custos .....	37
Bibliografia.....	41
Anexo A - Dados para cálculos .....	43
Anexo B – Método Indireto .....	47
Anexo C - Cálculo do rendimento.....	51
Anexo D – Cálculo da quantidade de ar estequiométrica e percentagem de excesso de ar (%)......	55

## Índice de Figuras

Figura 1 - Refinarias de Açúcar Reunidas .....	1
Figura 2 - Esquema representativo da Unidade RAR – Cogeração .....	3
Figura 3 - Tipos de Combustível utilizados na Caldeiras de Vapor (adaptada figura) .....	7
Figura 4 - Tipos de Combustível utilizados nas Caldeiras Termofluido (adaptada figura) [2] .....	8
Figura 5 - Esquema representativo de uma caldeira tubos de fumos [8] .....	10
Figura 6 - Esquema representativo da caldeira Aquatubular [10] .....	10
Figura 7 - Esquema Representativo de Queimadores Mistos [11] .....	12
Figura 8 - Relação entre a eficiência da combustão e o excesso de Ar (Figura adaptada) [7] .....	17
Figura 9 - Monitor da caldeira 1 .....	19
Figura 10 - Monitor das propriedades da Água/Vapor .....	20
Figura 11 - Analisador de gases de combustão (Testo 350 flue gas) .....	20
Figura 12 - Orifício da Purga .....	21
Figura 13 - Curva que relaciona o Rendimento Térmico com o Caudal de Combustível na caldeira 1. ....	22
Figura 14 - Volume de ar real e estequiométrico para os diferentes caudais de fuelóleo na caldeira 1 .....	23
Figura 15 - Percentagem de excesso de ar para os diferentes caudais de fuelóleo na caldeira 1. ....	24
Figura 16 - Curva que relaciona o Rendimento Térmico com os diferentes caudais de fuelóleo na caldeira 3. ....	25
Figura 17 - Volume de ar real e estequiométrico para diferentes caudais de fuelóleo na caldeira 3 .....	26
Figura 18 - Percentagem de Excesso de ar para diferentes caudais de fuelóleo na caldeira 3 .....	27
Figura 19 - Percentagem de abertura do ventilador vs caudal de fuelóleo na caldeira 1 .....	29

Figura 20 - Relação entre a percentagem de abertura de válvula do ventilador e o caudal de fuelóleo na caldeira 1 após correção da curva.....	30
Figura 21 - Excesso de ar vs. Caudal e fuelóleo na caldeira 1 após correção da relação Ar/Combustível.....	31
Figura 22 - Rendimento térmico vs caudal de fuelóleo na caldeira 1 após correção ....	31
Figura 23 - Fumos negros na chaminé antes e após otimização.....	32
Figura 24 - Relação entre a percentagem de abertura de válvula do ventilador com o caudal de fuelóleo na caldeira 3.....	33
Figura 25 - Relação entre a percentagem de abertura de válvula do ventilador e caudal de fuelóleo para caldeira 3 após a correção. ....	34
Figura 26 - Excesso de ar para os diferentes caudais de fuelóleo na caldeira 3 após correção.....	35
Figura 27 - Rendimento térmico vs caudal de fuelóleo na caldeira 3 após correção. ....	35

## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens das caldeiras aquatubulares	11
Tabela 2- Composição mássica (%) do fuelóleo nº 4 BTE	13
Tabela 3 - Valores de monóxido de carbono antes e após otimização da caldeira 1	33
Tabela 4 - Valores de monóxido de carbono ante e após otimização da caldeira 3	37
Tabela 5- Dados fornecidos pela Empresa	39
Tabela 6 - Análise de custos da caldeira 1 e 3	39
Tabela A.1 - Propriedades dos gases de combustão	45
Tabela A.2 - Propriedades da água da caldeira	45
Tabela A.3 - Propriedades do vapor da caldeira	46
Tabela A.4- Propriedades do fuelóleo	46
Tabela A.5 - Fatores de conversão para a condutividade	46
Tabela A.6 - Massa molar dos compostos	47
Tabela B.1 - Valores de K para diferentes combustíveis	50
Tabela B.2 -Valores de $K_1$ para diferentes combustíveis	50
Tabela B.3 - Perdas à capacidade Nominal	51
Tabela C.1 – Propriedades do Combustível para exemplo de cálculo	54
Tabela C.2 - Percentagem do peso de hidrogénio e de água para os combustíveis para exemplo de cálculo	54
Tabela C.3 - Valores de $K_1$ para diferentes combustíveis para exemplo de cálculo	55
Tabela C.4 - Perdas à capacidade Nominal para exemplo de cálculo	55



## Lista de Abreviaturas

### Siglas

BTE	Baixo Teor de Enxofre
C	Carbono
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
<i>IFS</i>	<i>Internacional Food Standard</i>
<i>ISSO</i>	<i>International Organisation for Standardisation</i>
RAR	Refinaria de Açúcar Reunidas
S	Enxofre
VLE	Valores Limite de Emissões

### Símbolos

Variável	Descrição	Unidades
A	Fração em peso de inertes no combustível	%
C <sub>cc</sub>	Fração em peso de combustível nas cinzas volantes	%
E <sub>p</sub>	Somatório das perdas calculadas pelo método das perdas	%
F <sub>ci</sub>	Fração em peso das cinzas volantes em relação ao total de inertes do combustível	%
H	Percentagem em peso de hidrogénio no combustível em condições de queima	%
$h_l$	Entalpia do Líquido	kJ/kg
$h_v$	Entalpia do Vapor	kJ/kg
H <sub>2</sub> O	Percentagem em peso de humidade no combustível em condições de queima	%
K	Constante do fuelóleo	-
K <sub>1</sub>	Constante do fuelóleo para o cálculo das perdas associadas a inqueimados nos gases de combustão	-

P	Percentagem de purgas em relação ao total de água de alimentação à caldeira	%
PCI	Poder calorífico Inferior	kJ/kg
P <sub>co</sub>	Perdas associadas a inqueimados nos gases de combustão	%
P <sub>cv</sub>	Perdas associadas ao combustível nas cinzas volantes	%
P <sub>cf</sub>	Perdas associadas ao combustível nas cinzas de fundo	%
P <sub>gc</sub>	Perdas associadas ao calor sensível nos gases de combustão	%
P <sub>p</sub>	Calor cedido pelas purgas	%
P <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Perdas associadas à entalpia do vapor de água nos gases de combustão	%
Q <sub>p</sub>	Perdas por radiação e convecção	%
T <sub>a</sub>	Temperatura do ar de combustão à entrada da caldeira	°C
T <sub>ag</sub>	Temperatura da água de alimentação à caldeira	°C
T <sub>g</sub>	Temperatura dos gases de combustão à saída da caldeira	°C
T <sub>p</sub>	Temperatura das purgas após recuperação de calor existente	°C
TSD	Teor de Sólidos Dissolvidos	μs/cm

### Letras Gregas

Variável	Descrição	Unidades
η	Rendimento Térmico	%

# 1. Introdução

## 1.1. Apresentação da Empresa

A indústria de Refinação de Açúcar, na zona Norte de Portugal, até a década de 1960 era constituída por nove refinarias, contudo não tinham capacidade, nem equipamentos capazes de dar resposta à procura do produto. Atendendo à necessidade de produzir mais e com melhor qualidade, surge uma nova refinaria com intuito de substituir as já existentes.

Surge então, em 1962, a RAR – Refinarias de Açúcar Reunidas (Figura 1), sendo que inicialmente a empresa passa a comercializar a produção já existente dessas pequenas refinarias. A construção das instalações inicia-se no ano seguinte, contudo entra em laboração em 1967 com capacidade de produção de 25.000 t/ano, permitindo à empresa atingir volume de vendas de 22.000 t/ano, valor esse que corresponde a 11,8% das vendas a nível nacional. <sup>[1]</sup>



**Figura 1-** Refinarias de Açúcar Reunidas <sup>[1]</sup>

No ano seguinte, a empresa passou a ter uma nova composição acionista possibilitando um novo dinamismo, que conduziu a um crescimento exponencial da empresa. Na sequência desta mudança de acionistas verificou-se um aumento do capital social da sociedade, consequentemente foi necessário aumentar a capacidade de produção da

Refinaria, de forma a dar resposta ao crescente número de vendas, simultaneamente um crescimento da quota de mercado da RAR.

Em 1973, fruto do crescimento acelerado da empresa, a RAR adquiriu a Refinaria Angola, sediada em Matosinhos, e o seu volume de vendas passa a representar cerca de 45% do mercado nacional.

Durante as décadas de 1970 e 1980, apesar da situação económica atravessada pelo país nessa época, a RAR consegue a expansão da sua atividade e a diversificação para outras áreas, com a criação de numerosas empresas, que formam hoje o Grupo RAR.

Em 1991, encerra-se a Refinaria de Matosinhos, sendo que a atividade produtiva da RAR ficou localizada na Refinaria do Porto. Atualmente tem uma capacidade produtiva superior a 240.000 t/ano, pretendendo ser uma referência no mercado ibérico, com produtos e serviços inovadores, tendo sempre em conta uma marca de qualidade, apostando assim num aumento contínuo de eficiência.

A RAR como empresa de referência, aposta na política de qualidade nos seus produtos alimentares. Como resultado dessa aposta na qualidade obteve a certificação da qualidade pela norma NP EN ISO 9001:2000 em 1998. Mais tarde, em 2006 a certificação Ambiental pela norma ISO 14001:2004. Recentemente (2009 e 2010) a certificação NP EN ISO 22000:2005 e certificação IFS (*Internacional Food Standard*) ambas Normas de Segurança Alimentar.

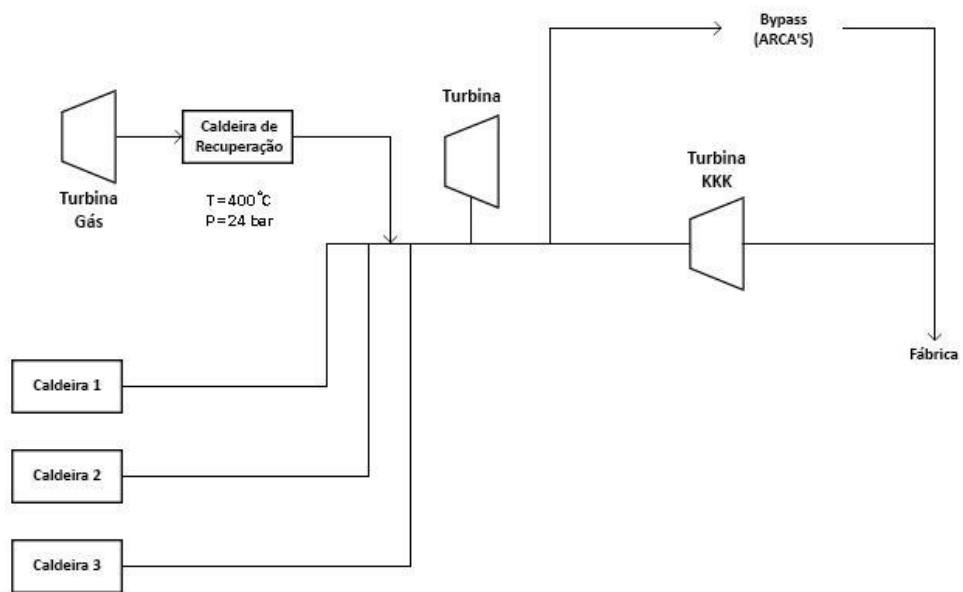
A RAR – Refinaria de Açúcar Reunidas valoriza as diferenças de necessidade, sensibilidades e expectativas dos seus consumidores, detendo um portefólio de produtos diferenciados, com certificação. <sup>[1]</sup>

## **1.2. Unidade RAR – Cogeração**

A empresa RAR Açúcar é constituída por duas Empresas: RAR Cogeração e RAR Refinaria. A RAR Cogeração é composta por duas centrais, a Central de Cogeração a gás natural e a Central de Cogeração a fuelóleo, ambas responsáveis pela produção de energia

térmica para laboração da Refinaria. A central de Cogeração a fuelóleo é composta por três caldeiras aquatubulares. Neste tipo de caldeiras a água circula no interior dos tubos onde é aquecida pelos gases de combustão que circulam no exterior dos mesmos, produzindo vapor de alta pressão (24 bar). O vapor produzido nas caldeiras antes de ser conduzido para consumidores da refinaria atravessa uma turbina de contrapressão onde sofre uma forte expansão, aumentando deste modo a sua velocidade e reduzindo a sua pressão e a sua temperatura (temperatura de 125 °C e pressão de 1 bar).

O vapor produzido na caldeira de recuperação é enviado para um coletor geral onde é misturado com vapor turbinado, sendo posteriormente enviado para a Refinaria. Na Figura 2 encontra-se representado o esquema simplificado da Empresa RAR Cogeração.



**Figura 2** - Esquema representativo da Unidade RAR – Cogeração

### **1.3. Objetivos**

A presente dissertação teve como objetivo o estudo da otimização do rendimento térmico de duas caldeiras aquatubulares da empresa Refinaria de Açúcar Reunidas. Para ambas as caldeiras procedeu-se ao levantamento de um conjunto de informações tais como: caudal de ar, caudal de fuelóleo, caudal de vapor, temperatura de gases de combustão, percentagem de oxigénio, pressão de vapor. A partir da informação recolhida, foi então possível determinar o rendimento térmico e identificar as possíveis causas para as perdas de energia. Por fim, foi proposto uma nova relação ar/combustível vs. Caudal de fuelóleo.

### **1.4. Estrutura**

Esta dissertação é constituída por 5 capítulos.

No Capítulo 1, Introdução, é feita breve descrição da Empresa e da Unidade RAR – Cogeração. Foca-se o objetivo do trabalho.

No Capítulo 2, Fundamentos Teóricos, descrevem-se os conceitos relacionados com a combustão, eficiência térmica bem como os tipos de caldeiras mais utilizados. Neste capítulo tem a legislação em vigor relativamente aos combustíveis e às emissões de monóxido de carbono.

No Capítulo 3, Estudo e Caracterização das Caldeiras, procedeu-se ao levantamento da informação das caldeiras, bem como das metodologias e equipamentos necessários para a realização dos ensaios experimentais. Apresentam-se os resultados de rendimento térmico e excesso de ar em função do caudal de fuelóleo utilizado nas caldeiras.

No Capítulo 4, Otimização do Rendimento Térmico, descreve-se a alteração das relações Ar/ Combustível vs. Caudal de combustível e apresentam-se os resultados dos rendimentos térmicos obtidos em ambas as caldeiras.

Por fim, no Capítulo 5, fez-se uma breve análise de custos a fim de avaliar e quantificar o que a empresa pode lucrar com alteração da relação Ar/Combustível vs. Caudal de Combustível no sistema de controlo das caldeiras 1 e 3.

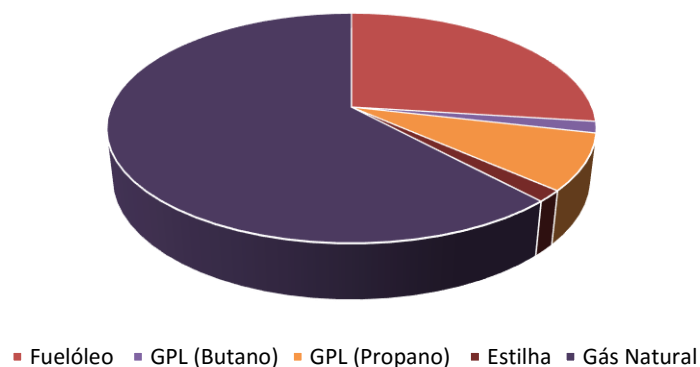


## 2. Fundamentos Teóricos

### 2.1. Enquadramento

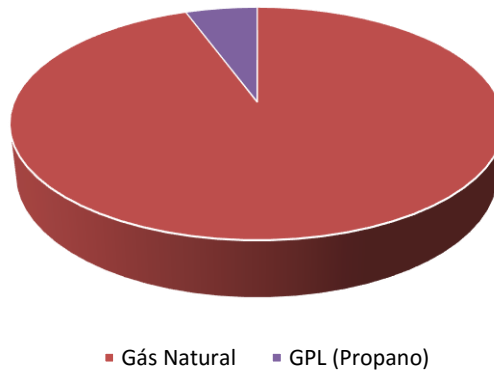
O interesse crescente das indústrias no que respeita a atividade energética tem vindo a ser relevante. Desta forma, torna-se fundamental a identificação dos principais consumidores, as soluções, e opções disponíveis com intuito de melhorar a eficiência energética nas empresas. [2]

As caldeiras de vapor são consumidoras intensivas de energia em vários setores industriais, ou seja, nem sempre operam nas condições mais eficientes. [3] Na Figura 3 observa-se o tipo de combustível mais utilizado pelas caldeiras de vapor e termofluido. Verifica-se que o gás natural apresenta uma percentagem elevada de 61,9 % seguido do fuelóleo com 27%, propano com 7,9% e por último butano com 1,6%. [2]



**Figura 3** - Tipos de Combustível utilizados na Caldeiras de Vapor (adaptada figura) [2]

Nas caldeiras de termofluido (Figura 4), o gás natural é o combustível maioritário com 94,4% seguidamente do propano com uma percentagem pouco significativa de 5,6%. [2]



**Figura 4** - Tipos de Combustível utilizados nas Caldeiras Termofluido (adaptada figura) <sup>[2]</sup>

## 2.2. Produção de Vapor

Atualmente, muitas indústrias necessitam nos seus processos de fabrico meios de aquecimento. Para tal, utiliza-se o vapor como fluido de térmico podendo este ser produzido em duas situações. Pode ser utilizado na forma de vapor saturado em casos de aquecimento industrial e central em que o vapor cede o seu calor de condensação a temperatura constante. Na produção de energia elétrica é essencialmente utilizado na forma de vapor sobreaquecido, no sentido de evitar danos de corrosão no equipamento.

[5]

A fim de atender a esta necessidade sempre em crescente, a produção de vapor pode ser realizada nas caldeiras ou pelo aproveitamento do calor residual proveniente de alguns tipos de processos industriais.

A preferência pelo vapor como fluido de trabalho deve-se principalmente ao seu alto poder calorífico, juntamente com o facto da ampla disponibilidade de água na indústria.

[4]

## 2.3. Caldeiras

As caldeiras utilizadas na produção de vapor ou no aquecimento de fluidos térmicos podem apresentar desperdícios e elevadas perdas de energia se não forem convenientemente dimensionadas. [6]

Estes equipamentos têm como finalidade converter a energia química em energia térmica através da queima do combustível. De uma forma geral, as caldeiras são constituídas por uma câmara de combustão onde o combustível é misturado com uma quantidade de oxigénio para permitir a combustão. Os gases provenientes dessa combustão aquecem o fluido através das paredes metálicas da caldeira, contudo este processo varia consoante o tipo de caldeira e combustível a queimar. [7]

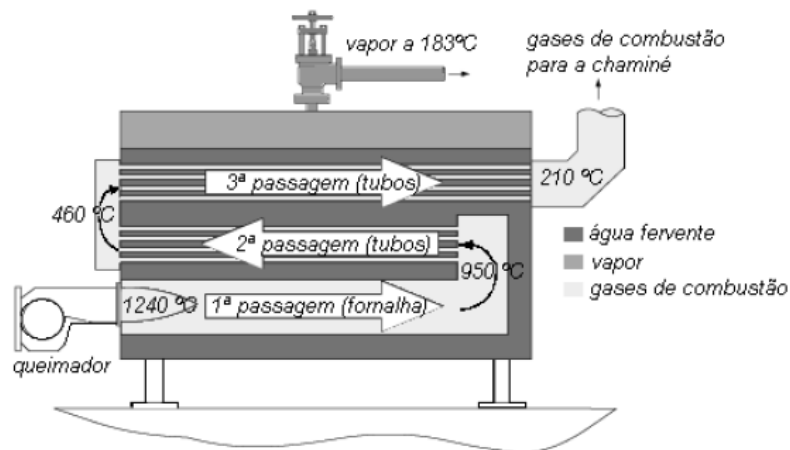
Em termos de caldeiras pode-se classificar em dois grandes grupos: caldeiras de tubos de fumo e aquatubulares. Relativamente aos combustíveis mais utilizados são o fuelóleo e o gás natural como será focado mais adiante.

### 2.3.1. Caldeiras de tubos de fumo

Nas caldeiras de tubos de fumo (Figura 5) a água circula pelo exterior dos diversos tubos da caldeira, na forma de um único feixe tubular. Os gases de combustão circulam no interior dos tubos, em duas ou mais passagens, na direção da chaminé onde são lançados para o ar ambiente. [8]

A primeira passagem ocorre na própria fornalha, onde ocorre em grande parte a troca de calor por radiação, no que respeita às trocas de calor por convecção ocorrem mais na segunda passagem. Há fornalhas externas e internas, apresentando as últimas maior produção de vapor por unidade de superfície de aquecimento.

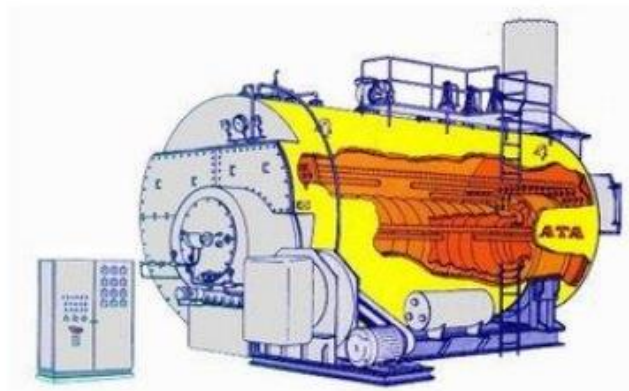
Este tipo de caldeira apresenta baixa eficiência, na ordem dos 84%, apresenta algumas limitações no que se refere à pressão de utilização e produção de vapor. Deste modo, é recomendável um valor máximo de 15 bar e 15.000 kg/h de pressão e produção de vapor, respetivamente. [9]



**Figura 5** - Esquema representativo de uma caldeira tubos de fumaça [8]

### 2.3.2. Caldeiras Aquatubulares

Nas caldeiras aquatubulares (Figura 6), a produção do vapor ocorre dentro dos tubos. Contrariamente ao que acontece nas caldeiras de tubos de fumo, os gases de combustão circulam no exterior dos tubos que por sua vez aquecem a água. [8] Apresentam uma maior capacidade de produção de vapor por unidade de área.



**Figura 6** - Esquema representativo da caldeira Aquatubular [10]

Devido às características que possui são muitas vezes utilizadas na indústria, uma vez que produzem grandes quantidades de vapor a elevadas temperaturas. A produção de vapor neste tipo de caldeiras atinge 750 t/h.

Na tabela seguinte, encontram-se enunciadas algumas vantagens e desvantagens das caldeiras aquatubulares. <sup>[10]</sup>

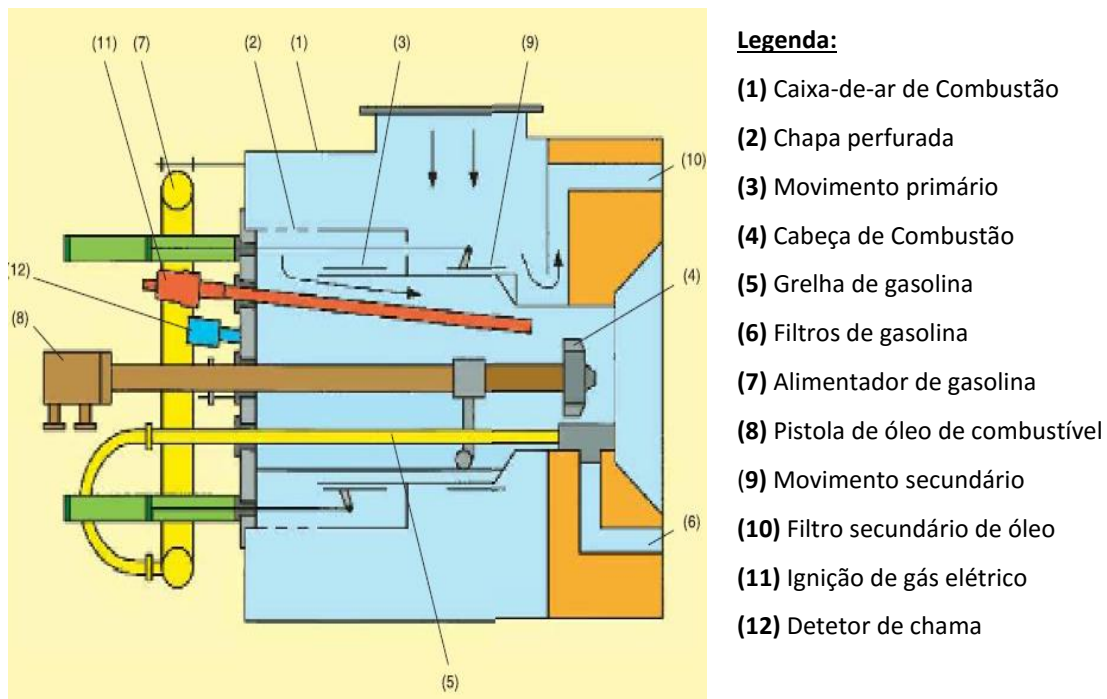
**Tabela 1** – Vantagens e desvantagens das caldeiras Aquatubulares <sup>[10]</sup>

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Temperaturas e pressões de utilização de 450°C e 6 atm respetivamente	Exige tratamento de água muito cuidadoso.
Vida útil pode chegar a 30 anos	Construção mais complexa
Limpeza é mais fácil quando comparada com as de tubo de fumo	Elevado custo comparativamente com as tubo de fumo.

## **2.4. Queimadores mistos**

Os queimadores têm como função misturar o combustível e o comburente (que geralmente é o ar) de modo ocorrer a combustão e obter o máximo proveito do poder calorífico do combustível. A manutenção e a sua limpeza são fatores decisivos na obtenção de uma mistura completa do combustível com o comburente e nesse sentido conduzir a otimização da combustão.

Estes queimadores (Figura 7), como o nome indica, podem operar com dois combustíveis em simultâneo. Torna este modelo bastante atrativo para as empresas, não só pelo facto de reduzir as emissões nos gases de combustão, mas também pelo fator económico. Assim sendo, estes queimadores podem reduzir as emissões cerca de 50 %. <sup>[11]</sup>



**Figura 7** - Esquema Representativo de Queimadores Mistos <sup>[11]</sup>

## 2.5. Combustíveis

### 2.5.1. Fuelóleo

Os combustíveis líquidos normalmente utilizados na produção de vapor são derivados do petróleo. A gasolina, nafta, querosene, óleo combustível ou fuelóleo são frações destiladas obtidas do petróleo, porém, apenas o óleo combustível é utilizado nas caldeiras. O fuelóleo tipo BTE (Baixo teor de enxofre) amplamente usado na indústria é comercializado atendendo a normas que permitem regulamentar alguns parâmetros relevantes para a sua utilização tais como teor de enxofre, viscosidade, temperatura de inflamação e densidade. A característica principal deste tipo de óleo reside no seu teor de enxofre que deve ser igual ou inferior a 1%. <sup>[9]</sup>

A composição química do fuelóleo nº 4 BTE encontra-se na Tabela 2.

**Tabela 2-** Composição mássica (%) do fuelóleo nº 4 BTE

<b>Constituintes</b>	<b>Composição m/m (%)</b>
Carbono (C)	85
Enxofre (S)	1
Hidrogénio (H <sub>2</sub> )	13,3
Azoto (N <sub>2</sub> )	0,5
Água (H <sub>2</sub> O)	0,2

➤ **Decreto de Lei 281/2000**

As emissões de dióxido de enxofre é um problema que afetam não só os ecossistemas mas também a saúde humana. Nesse sentido, é fundamental a redução e controlo das emissões poluentes para atmosfera, com particular atenção para as emissões de dióxido de enxofre com objetivo de melhorar a qualidade do ar.

Os processos de combustão associados à utilização de combustíveis líquidos derivados do petróleo como o caso do fuelóleo assumem um peso significativo, pelo que a regulamentação dos teores máximos permitidos de enxofre destes combustíveis devem ser cumpridos pelas empresas.

O presente decreto-lei enuncia que não poderão ser utilizados em território nacional fuelóleos cujo teor de enxofre exceda 1% em massa. Em algumas situações esta percentagem pode ser superior embora não possa ultrapassar os 3%, caso a empresa cumpra com as normas de qualidade do ar para o dióxido de enxofre. <sup>[12]</sup>

## 2.5.2. Gás Natural

### Situação em Portugal

Cada vez mais existe a necessidade crescente de novas fontes de energia, considerando o gás natural como uma das principais alternativas devido às suas características. [5]

A decisão de introduzir gás natural em Portugal visava dar ao país o acaso a uma nova fonte de energia competitiva, cómoda e limpa. Neste sentido a competitividade na indústria aumentou conduzindo a uma maior intensidade energética, facilitar o bem-estar das populações e melhorar a segurança do abastecimento energético. [13]

### Propriedades do Gás Natural

O gás natural é constituído por uma mistura de gases, tendo como percentagem maioritária o metano ( $\text{CH}_4$ ) na ordem dos 90 %, os restantes 10 % concerne aos compostos butano etano e propano. O motivo pelo qual tem sido um combustível de eleição, deve-se algumas características que possui tais como:

- Fornecimento direto no local do consumo, sem transtorno para o utilizador
- Ausência de necessidade de armazenamento
- Fácil uso
- Pouco poluente

Por questões de segurança, o gás natural é obrigatoriamente odorizado quando entregue à rede distribuição ou aos clientes finais ligados diretamente à rede de transporte. [13]

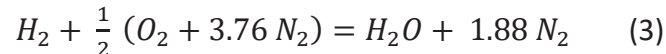
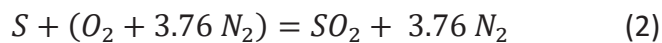
## 2.6. Combustão

O fenómeno da combustão consiste na transformação da energia química do combustível em energia térmica através da libertação de calor durante o processo.

Desta forma, a combustão deve atender aos parâmetros fundamentais que assegurem a eficiência na queima do combustível. Contudo, mesmo em condições normais de operação, os processos de combustão não garantem o aproveitamento total da energia, pelo que uma parte dela perde-se para o ambiente sob a forma de gases de combustão, cinzas, perdas de calor através da tubagem do equipamento ou por outro, a existência de uma combustão incompleta. [6]

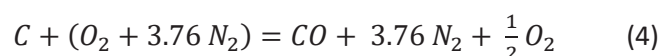
### 2.6.1. Combustão completa e incompleta

A combustão completa ocorre quando todos os compostos presentes no combustível reagem com o oxigénio, obtendo desta forma no final da combustão produtos quimicamente estáveis como elucidam as Equações (1), (2) e (3).



Conhecendo a composição do combustível e com base na estequiometria da reação, é possível calcular a quantidade de ar necessária para a que ocorra a queima do combustível de forma segura e eficiente. A quantidade de ar que o oxigénio fornece para a queima completa é também designado como ar teórico/estequiométrico. Introduzindo um excesso de ar evita situações de combustão incompleta, que segundo dados bibliográficos deverá estar compreendido entre 10 e 20 % m/m. [14]

Quando ocorre a queima incompleta, há formação de um composto designado por monóxido de carbono (CO), indesejável uma vez que é nocivo para a saúde e o ambiente. As reações de queima incompleta encontram-se evidenciadas nas equações (2), (3), (4).



### 2.6.2. Perdas de gases de Exaustão

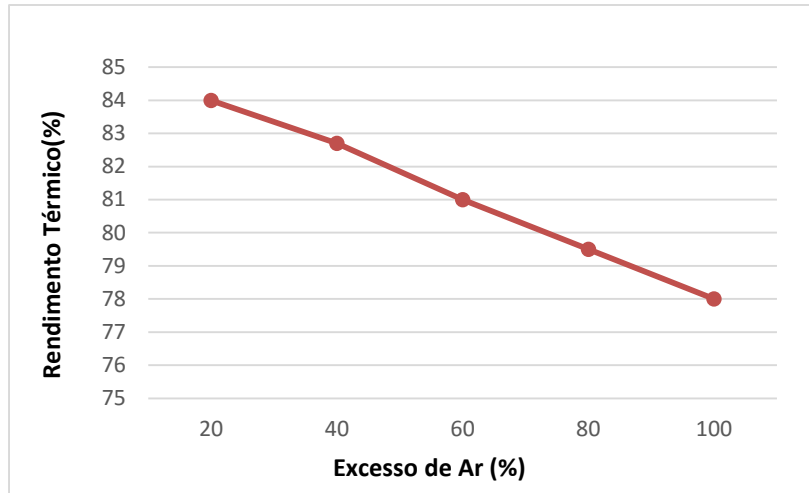
Em grande parte das instalações industriais a utilização das caldeiras não é a mais eficiente resultando em rendimentos térmicos mais baixos, tendo como consequência maiores consumos de energia e um incremento na emissão de gases poluentes. Por tudo isto, é fundamental a regulação da combustão com intuito de minimizar as perdas de energia nos gases de combustão, o que leva a uma redução da temperatura e excesso de ar, sem aparecimento de monóxido de carbono e inqueimados em grandes quantidades. Deste modo, para se conseguir um rendimento elevado, e por outro lado minimizar os custos do combustível, a quantidade de ar admitido para a combustão deve ser apenas a necessária de forma assegurar a combustão completa. <sup>[15]</sup>

### 2.6.3. Excesso de Ar

O excesso de ar é o fator relevante no que respeita ao rendimento térmico das caldeiras. Um grande excesso de ar conduz a um maior arrefecimento da camara da combustão, perdendo-se calor no aquecimento de um volume de ar desnecessário para a queima conduzindo a uma redução de rendimento térmico como evidencia a Figura 8. <sup>[16]</sup>

Quando o excesso de ar é pequeno, o combustível não é completamente queimado, o que resulta no aparecimento nos gases de combustão de carbono, hidrogénio, hidrocarbonetos, ou o caso do monóxido de carbono. Esta situação leva a uma perda de rendimento térmico uma vez que estes elementos não tendo sido queimados no interior da camara de combustão não libertaram a sua energia.

De notar que do carbono por queimar só uma parte sai nos gases de combustão, depositando-se o restante nas paredes da camara de combustão dando origem a formação de uma camada isolante que por sua vez dificulta a transmissão de calor entre os gases quentes e o fluido a aquecer. <sup>[16]</sup>



**Figura 8** - Relação entre a eficiência da combustão e o excesso de Ar (Figura adaptada) <sup>[7]</sup>

## 2.7. Emissões

### Monóxido de carbono

O monóxido de carbono é um gás incolor, inodoro e extremamente tóxico. Para que a combustão ocorra dentro da normalidade os valores de concentração de CO devem estar compreendidos na gama de 20 a 25 ppm. <sup>[17]</sup>

Em termos de rendimento térmico da caldeira um aumento de emissões de monóxido de carbono resulta em perdas de energia. Em todo o caso, quando o valor da concentração é superior a 1000 ppm, há fumos negros nos gases de combustão.

Os combustíveis líquidos e gasosos, comparativamente aos sólidos, apresentam valores de emissões de monóxido de carbono mais baixos. <sup>[16]</sup>

## 2.8. Rendimento Térmico

O rendimento térmico pode ser calculado através do método direto ou indireto. Ambos os métodos permitem determinar o rendimento da caldeira, apresentando algumas vantagens e desvantagens associadas a elas. No caso do método indireto, pode-se

verificar onde ocorrem as perdas mais significativas e nesse sentido minimizar essas perdas. O método direto (Equação 7) dá-nos informação global das perdas todavia não é possível observar onde ocorrem as perdas. Tendo em conta estes factos utilizou-se o método indireto para o cálculo do rendimento térmico que se encontra descrito no Anexo B. [8]

$$\eta = \frac{m_{vapor} \times (h_v - h_l)}{PCI \times m_{combustível}} \quad (7)$$

### 3. Estudo e Caracterização das Caldeiras

Neste capítulo será caracterizado detalhadamente as caldeiras 1 e 3 que são providas de queimadores mistos, que permitem utilizarem dois combustíveis simultaneamente, ou apenas um deles, de acordo com o estabelecido pela empresa. No período de ensaios, utilizou-se apenas o fuelóleo por ser o combustível economicamente mais atrativo para a empresa.

#### 3.1. Levantamento de dados

Na fase inicial, procedeu-se a recolha de dados da caldeira. Para tal, fixou-se um caudal de combustível (fuelóleo), esperou-se algum tempo até estabilizar e posteriormente anotou-se os diferentes parâmetros através do monitor da caldeira 1 (Figura 9):

- Volume de Ar ( $m^3$ )
- Caudal de Fuelóleo (kg/h)
- Caudal de Vapor (t/h)
- Pressão de Vapor (bar)
- Percentagem de Oxigénio (%)
- Temperatura dos Gases de Combustão à saída ( $^{\circ}C$ )

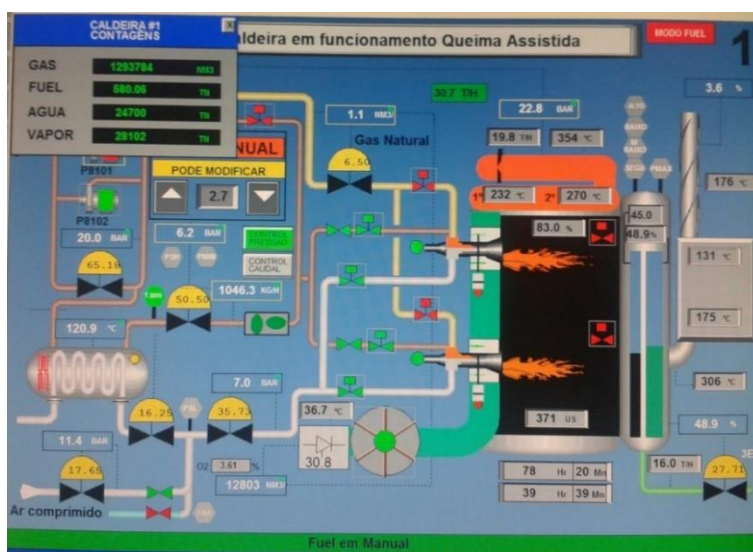


Figura 9 - Monitor da caldeira 1

Relativamente à temperatura dos desgasificador, esta foi retirada através do monitor (Figura 10).

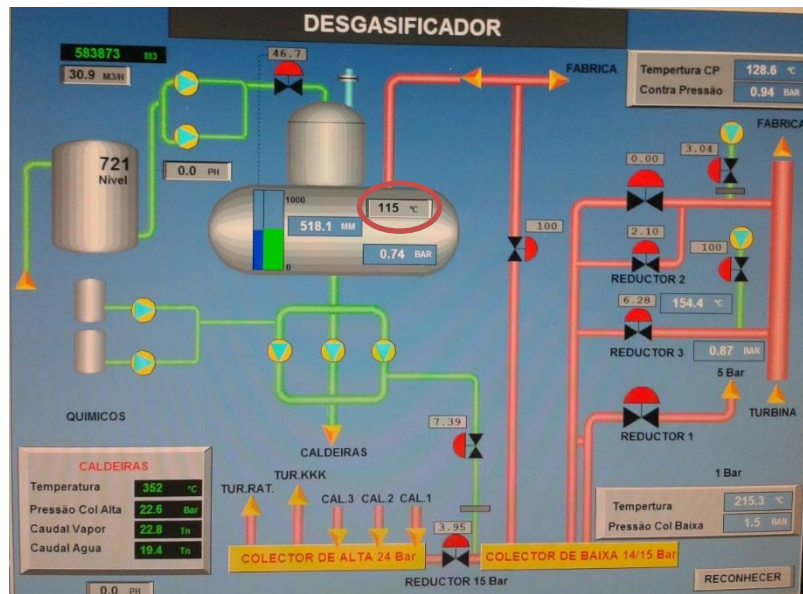


Figura 10 - Monitor das propriedades da Água/Vapor

No que refere aos gases de combustão foram medidos através analisador disponível na empresa (Figura 11). O termopar colocado na sonda de aspiração mede a temperatura dos gases de combustão.

Este equipamento foi colocado no orifício da caldeira, mais precisamente na chaminé e procedeu-se à leitura das medições:

- Dióxido de carbono (%volume)
- Monóxido de carbono (ppm)
- Oxigénio (% volume)



Figura 11 - Analisador de gases de combustão (Testo 350 flue gas)

Relativamente às purgas, estas foram efetuadas de modo semelhante à da água de alimentação retirando uma amostra do desgasificador para um recipiente. Para a purga

da água da caldeira, recolheu-se a amostra através do orifício evidenciado na Figura 12. Para ambas as situações foi necessário arrefecer as amostras, com intuito de evitar danificar o sensor de leitura do equipamento, isto é, o medidor de condutividade.



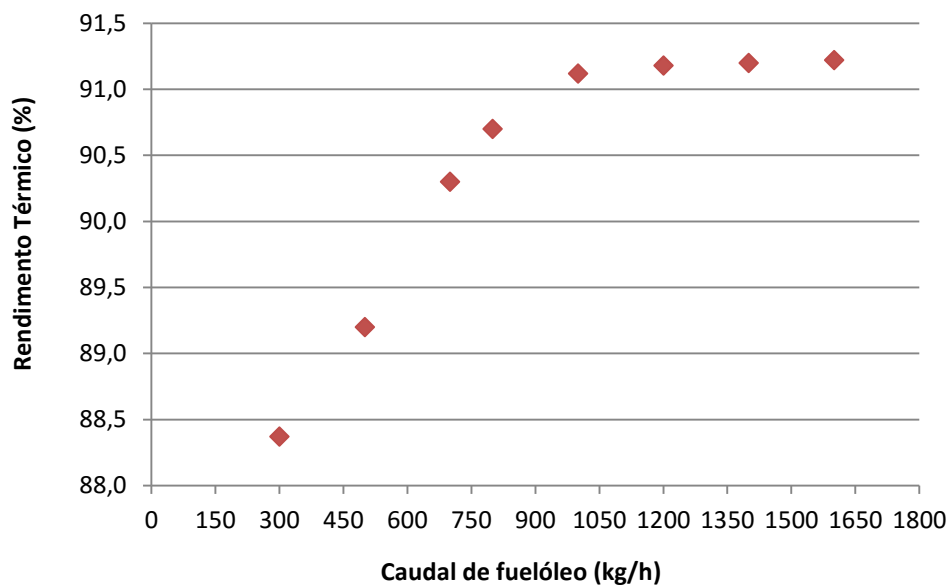
**Figura 12** - Orifício da Purga

### 3.2. Caracterização das Caldeiras

Neste subcapítulo pretende-se caracterizar as diferentes caldeiras tendo em conta vários parâmetros. Nesse sentido, é de interesse conhecer as curvas que relacionam a eficiência térmica com o caudal de combustível (fuelóleo) das duas caldeiras. Para tal, estudou-se os parâmetros (caudal de admissão de ar, excesso de ar) que mais contribuíam para a eficiência térmica.

#### ➤ Caldeira 1

Para a caldeira 1 realizou-se ensaios para os caudais 300, 500, 800, 1000, 1200, 1400 e 1600 kg/h de fuelóleo. A Figura 13 evidencia a curva que relaciona a rendimento térmico com os caudais de combustível.



**Figura 13** - Curva que relaciona o Rendimento Térmico com o Caudal de Combustível na caldeira 1.

Pela análise da figura verifica-se que à medida que o caudal de combustível aumenta a eficiência da caldeira também aumenta, tal facto pode ser explicado porque um caudal de fuelóleo mais elevado introduz uma maior energia térmica transferida. O valor médio do rendimento para esta gama de caudais de fuelóleo foi de 90,4%.

Na figura seguinte mostra-se a relação entre o volume medido de ar real (admitido pelo ventilador na câmara de combustão) e o volume de ar estequiométrico com o caudal de combustível. O ar estequiométrico calculou-se tendo em conta a queima completa e com base na estequiometria das reações (Anexo D).

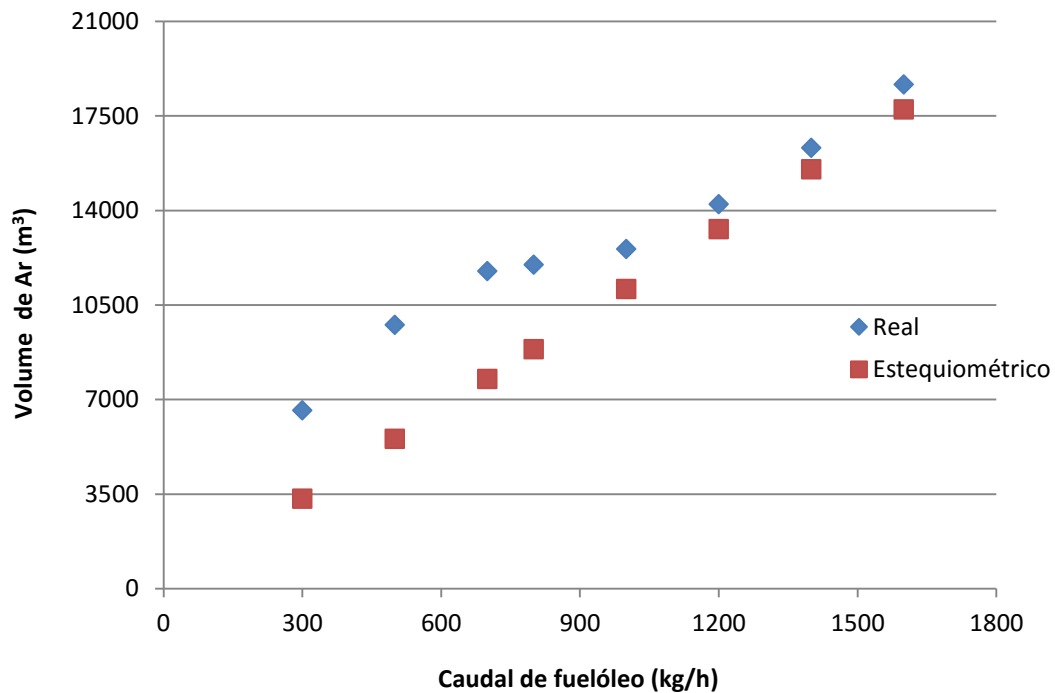
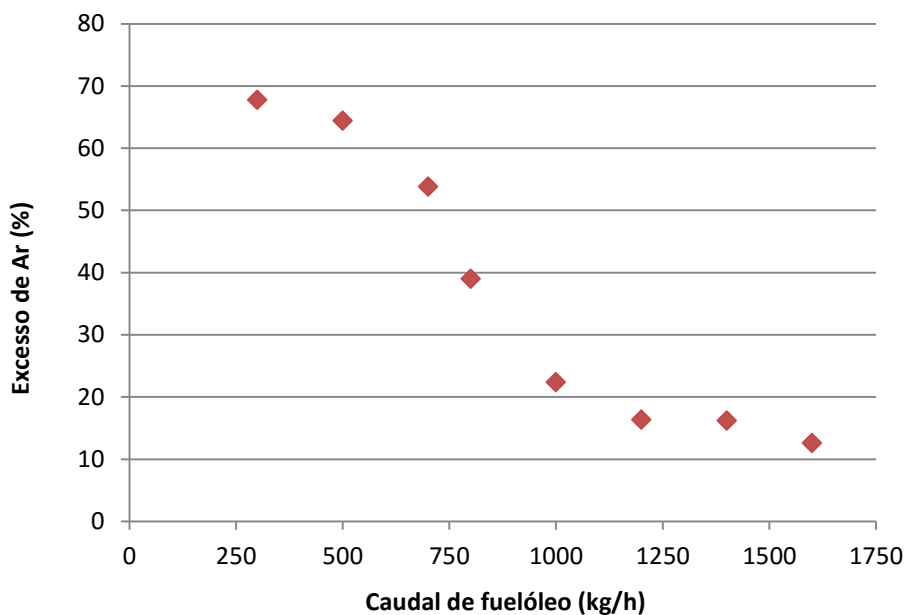


Figura 14 - Volume de ar real e estequiométrico para os diferentes caudais de fuelóleo na caldeira 1

Verifica-se que para uma gama de caudais baixos (300 a 800 kg/h de fuelóleo) a quantidade de ar introduzida é muito superior à quantidade de ar estequiometricamente necessária. O motivo prende-se com o evitar a queima incompleta e situações de fumo negro na chaminé.

A figura 15 evidencia a relação entre a percentagem de excesso de ar para o respetivo caudal de fuelóleo. O cálculo relativo ao excesso de ar (%) para cada cada caudal encontra-se descrito no Anexo D.

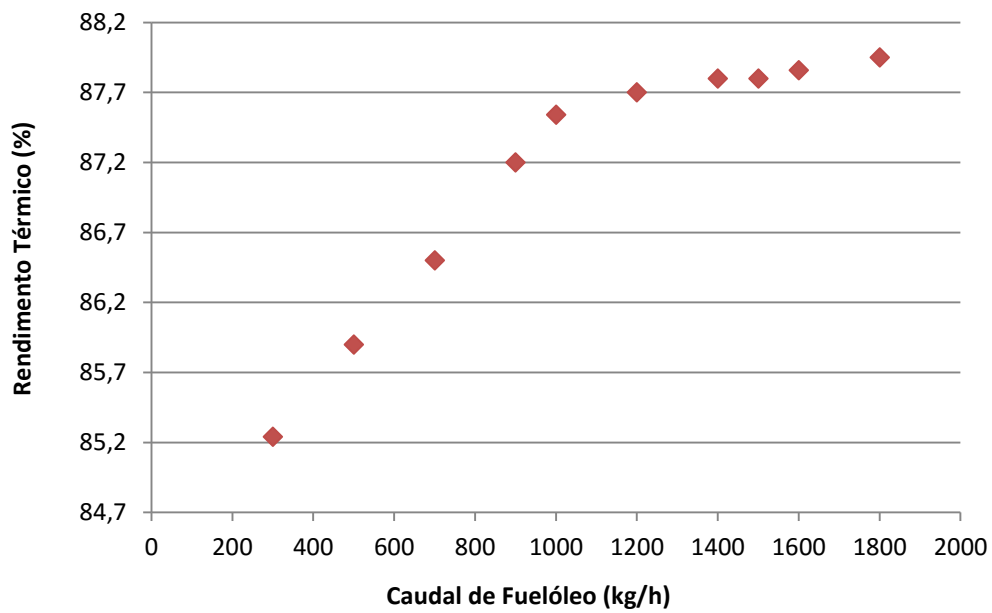


**Figura 15** - Percentagem de excesso de ar para os diferentes caudais de combustível na caldeira 1.

Constata-se pela análise da figura 15 que para caudais mais baixos (300 a 800 kg/h de combustível), verifica-se um excesso de ar bastante elevado no intervalo compreendido entre 39 a 69 %. Segundo a bibliografia os valores recomendáveis encontram-se numa gama compreendida entre 10 e 20 %. Conclui-se ainda que para caudais elevados (1200 a 1600 kg/h) os valores de excesso de ar estão dentro da gama prevista.

### ➤ Caldeira 3

Os ensaios efetuados para a caldeira 3 foram os seguintes: 300, 500, 700, 900, 1000, 1200, 1400, 1600 e 1800 kg/h de combustível. A Figura 15 mostra o comportamento da curva eficiência térmica versus caudal de combustível.

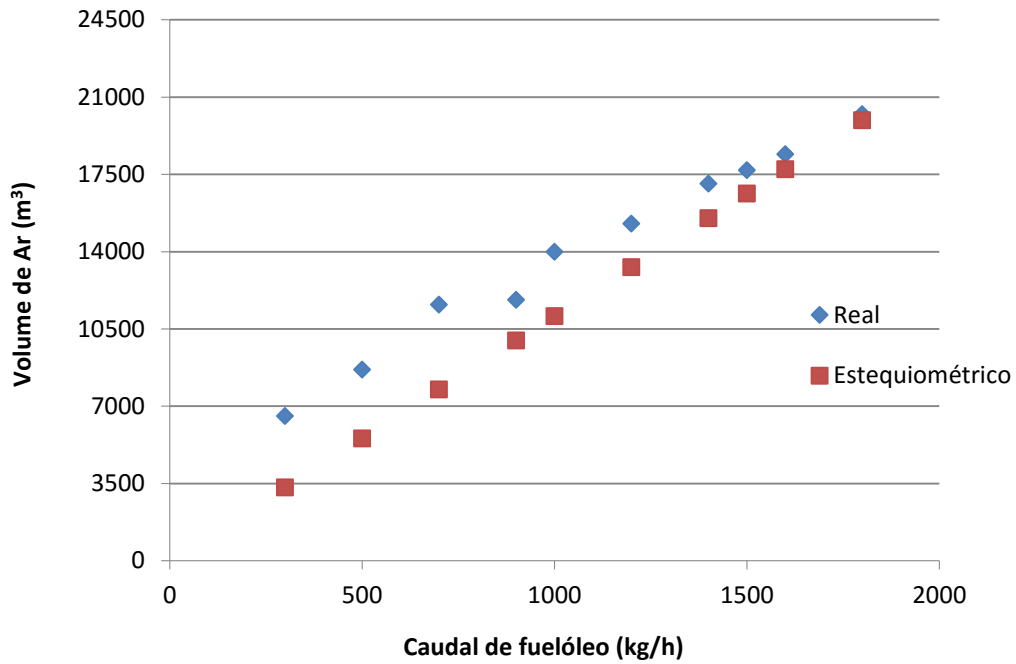


**Figura 16** - Curva que relaciona o Rendimento Térmico com os diferentes caudais de fuelóleo na caldeira 3.

Pela análise da figura verifica-se um comportamento semelhante ao da curva da caldeira 1 (Figura 16). O valor médio do rendimento para esta gama de caudais de fuelóleo foi inferior e igual a 87,2%.

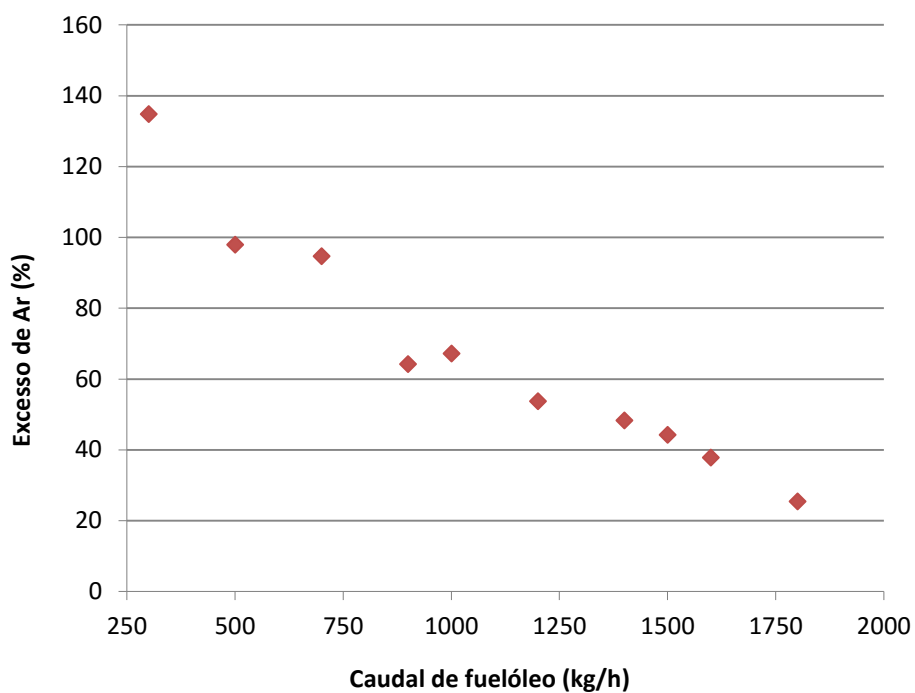
Para a gama de caudais de 300 a 700 kg/h de fuelóleo os rendimentos são inferiores em 3,2 a 3,8 % aos valores apresentados para a caldeira 1. Estes rendimentos são ainda inferiores de 0,6 a 1,9% ao valor médio de rendimento.

A figura seguinte mostra a relação entre o volume de ar real e estequiométrico (ver Anexo D) versus caudal de fuelóleo.



**Figura 17** - Volume de ar real e estequiométrico para diferentes caudais de fuelóleo na caldeira 3

Observa-se pela análise da Figura 17 que para uma gama de caudais baixos (300 a 700 kg/h de fuelóleo) a quantidade de ar introduzida é bastante superior à quantidade de ar estequiometricamente necessária. A Figura 18 evidencia a relação do excesso de ar com o caudal de fuelóleo para a caldeira 3.



**Figura 18** - Percentagem de Excesso de ar para diferentes caudais de fuelóleo na caldeira 3

Constata-se pela análise da figura que para a maioria dos caudais (300 a 1500 kg/h de fuelóleo) há um excesso de ar bastante elevado (de 135 a 44 %, respetivamente). Tal como acontece na caldeira 1 a gama de caudais baixos apresenta valores de excesso de ar muito altos, o que se reflete numa diminuição do rendimento térmico.

Conclui-se, então, que para melhorar a eficiência térmica das duas caldeiras será necessário minimizar esta quantidade de ar introduzida em caudais mais baixos.



## 4. Otimização do Rendimento das Caldeiras 1 e 3

Como já foi mencionado no capítulo anterior o excesso de ar é um dos fatores relevantes que afeta a eficiência térmica. Desta forma torna-se fundamental diminuir esta quantidade de ar sobretudo para as gamas de caudais mais baixos. Para tal alterar-se-á as relações Ar/combustível versus Caudal de fuelóleo das duas caldeiras no programa instalado do sistema de controlo da abertura da válvula do ventilador para a caldeira 1 e 3.

### 4.1. Alteração da relação Ar/Combustível na caldeira 1

A curva existente da abertura da válvula do ventilador versus caudal de combustível antes da correção era a seguinte apresentada na Figura 19.

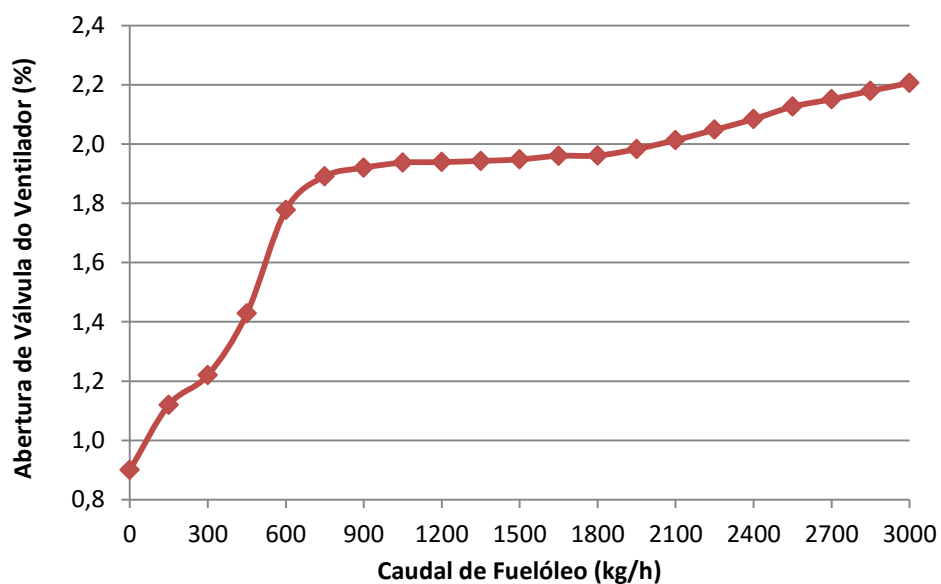


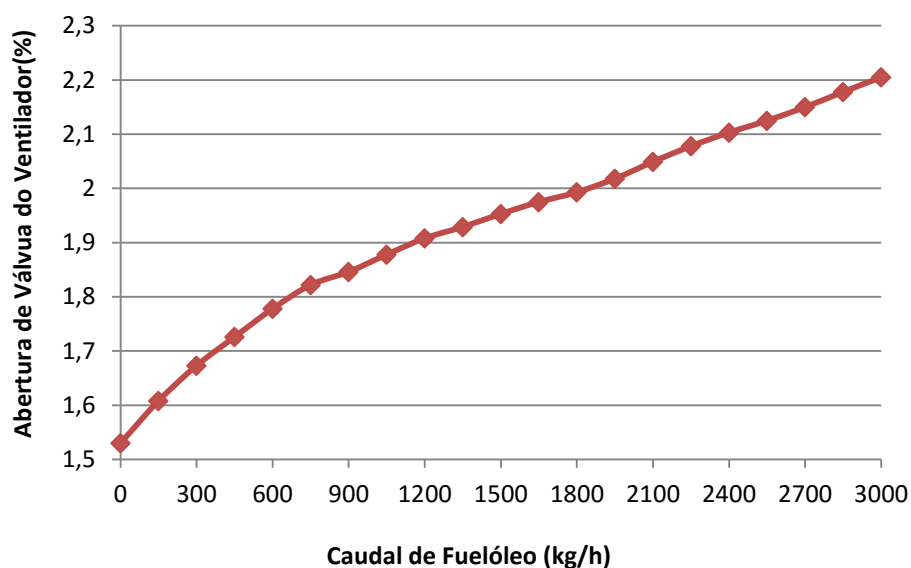
Figura 19 - Percentagem de abertura do ventilador vs caudal de fuelóleo na caldeira 1

A alteração desta curva foi da seguinte forma:

- Para a gama dos caudais mais baixos, diminui-se a abertura da válvula do ventilador.

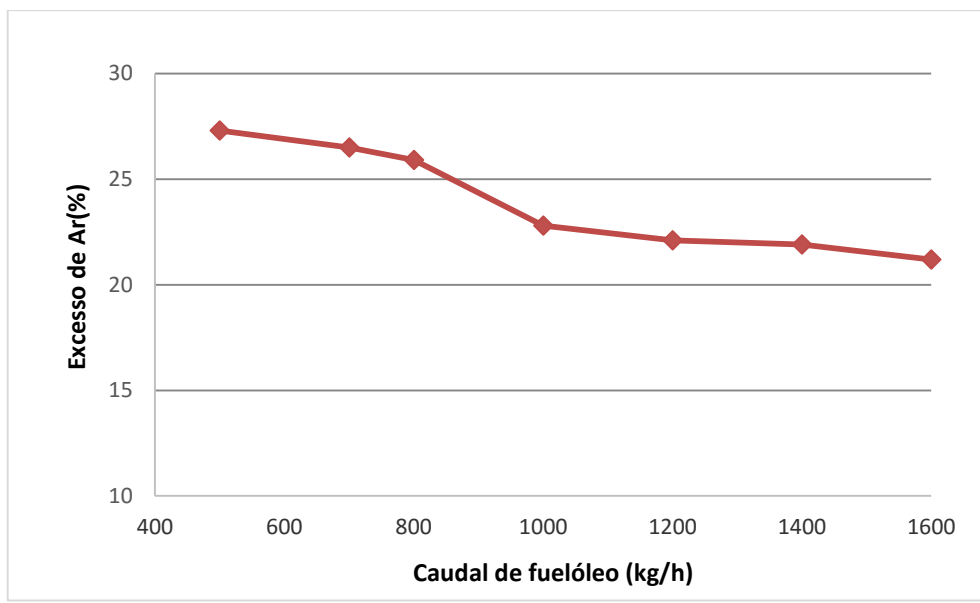
- Para a gama de caudais mais elevados aumentou-se ligeiramente a abertura da válvula do ventilador.

O resultado obtido foi a Figura 20 onde se pode observar uma relação mais próxima de um ajuste linear entre a percentagem de abertura de válvula do ventilador e o caudal de fuelóleo.



**Figura 20** - Relação entre a percentagem de abertura de válvula do ventilador e o caudal de fuelóleo na caldeira 1 após correção da curva

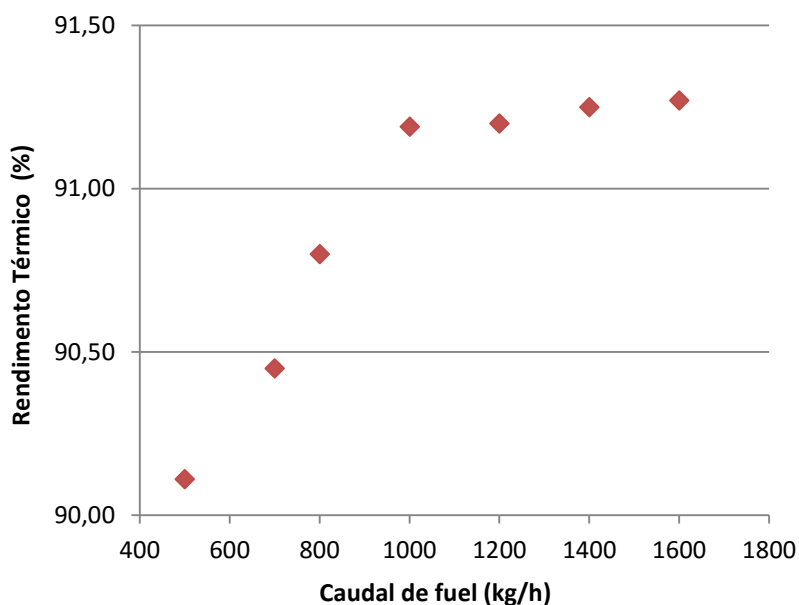
Com esta nova relação que se implementou em ensaios para os caudais de fuelóleo de 500, 700, 800, 1000, 1200 e 1400 kg/h verificou-se que o excesso de ar (figura 21) passou para um valor médio de 24% [27,3 – 21,2 %], inferior ao valor médio de 36,6%.



**Figura 21** - Excesso de ar vs. Caudal e fuelóleo na caldeira 1 após correção da relação Ar/Combustível.

Esta correção na relação Ar/Fuelóleo vs. Caudal de fuelóleo fez também aumentar o rendimento térmico médio para 90,9% (0,5% mais elevado) para a gama de caudais utilizada na caldeira 1 (ver figura 22).

Para os caudais de fuelóleo mais baixos de 500 e 700 kg/h os rendimentos passaram a ser de 90,11 e 90,45%, o que representa um aumento de 0,91 e 0,15%, respetivamente.



**Figura 22** - Rendimento térmico vs caudal de fuelóleo na caldeira 1 após correção

É de salientar que houve uma situação para o caudal de 1600 kg/h na caldeira 1, em que houve formação de fumos negros na chaminé como evidencia a Figura 23. Tal facto pode ser explicado devido a quantidade de ar introduzida não ser a suficiente, ou seja, para caudais de fuelóleo elevados provavelmente será necessário uma razão ar combustível ligeiramente superior.



**Figura 23** - Fumos negros na chaminé antes e após otimização.

Na Tabela 3 consta os valores de monóxido de carbono antes e após otimização para dos diferentes caudais de fuelóleo relativos à caldeira 1.

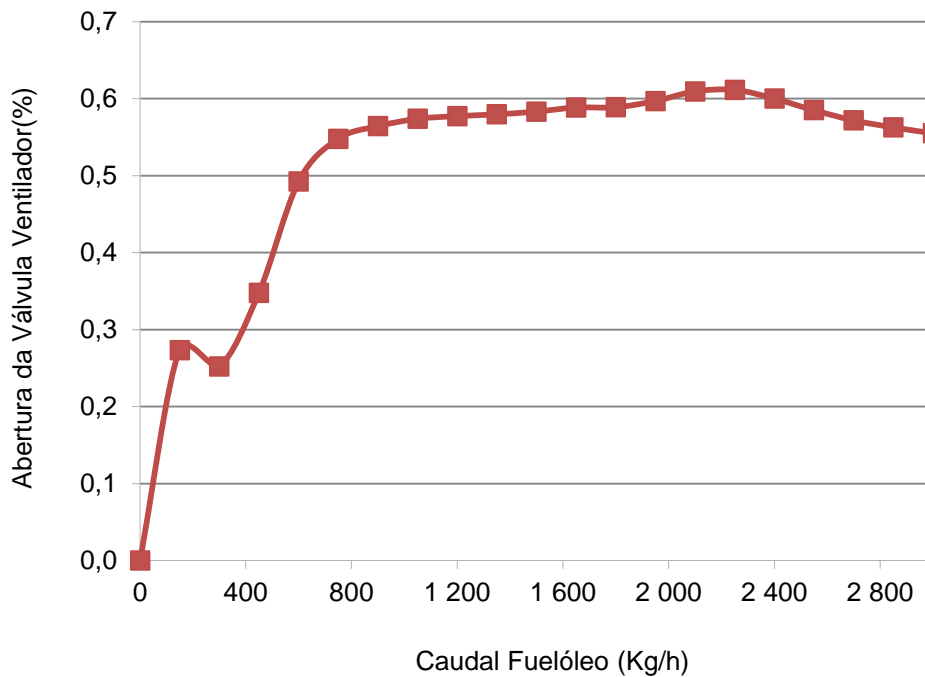
**Tabela 3** – Valores de monóxido de carbono antes e após otimização.

<b>Caudal (kg/h)</b>	<b>CO (ppm) Antes da otimização</b>	<b>CO (ppm) Após otimização</b>
500	15	13
800	17	14
1000	19	15
1200	20	17
1400	21	18
1600	22	19

Tendo em conta os resultados da Tabela 3 verifica-se que houve um decréscimo dos valores de monóxido de carbono (CO) para todos os caudais efetuados.

#### 4.2. Alteração da relação Ar/combustível na Caldeira 3

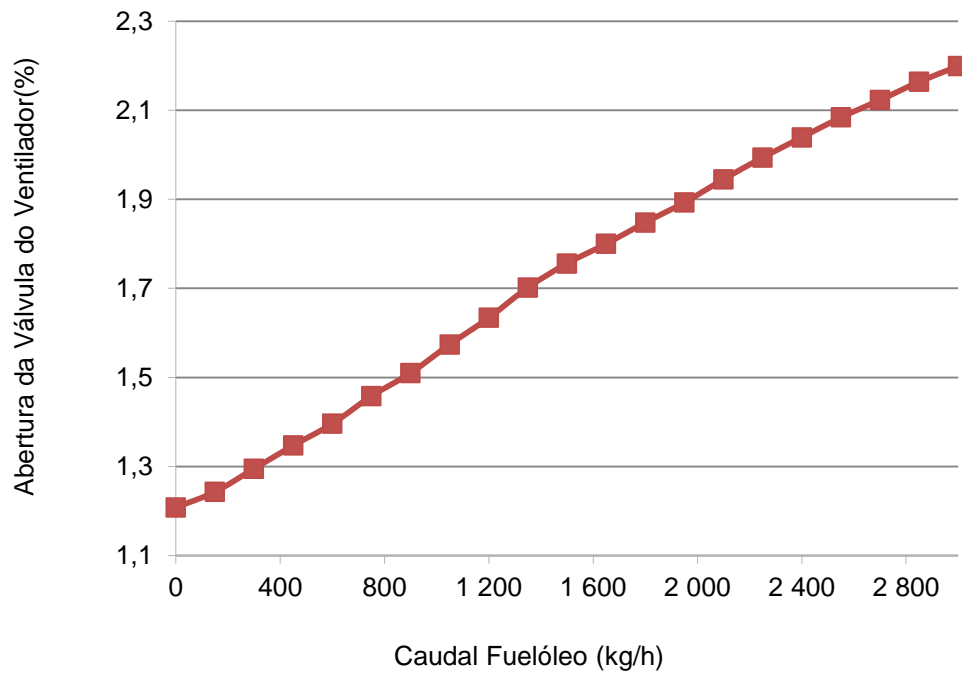
Para caldeira 3, o procedimento para alteração da relação Ar/Fuelóleo foi o mesmo. A Figura 24 mostra os valores de abertura da válvula versus caudal de fuelóleo antes da correção.



**Figura 24** - Relação entre a percentagem de abertura de válvula do ventilador com o caudal de fuelóleo na caldeira 3.

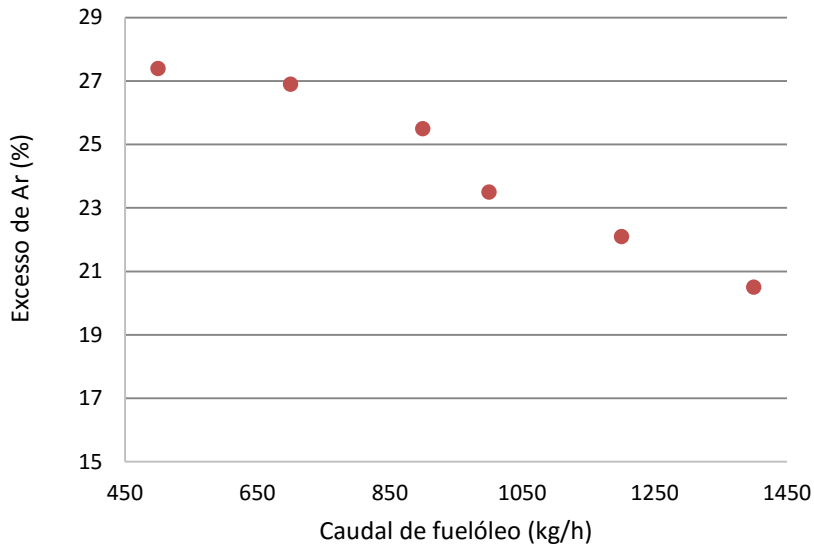
Na tentativa de aumentar o rendimento nas gamas mais baixas de caudal de fuelóleo, reduziu-se a percentagem de abertura de válvula do ventilador e, para o caudal mais

elevado abriu-se ligeiramente essa válvula. A Figura 25 mostra os resultados obtidos após essa alteração.



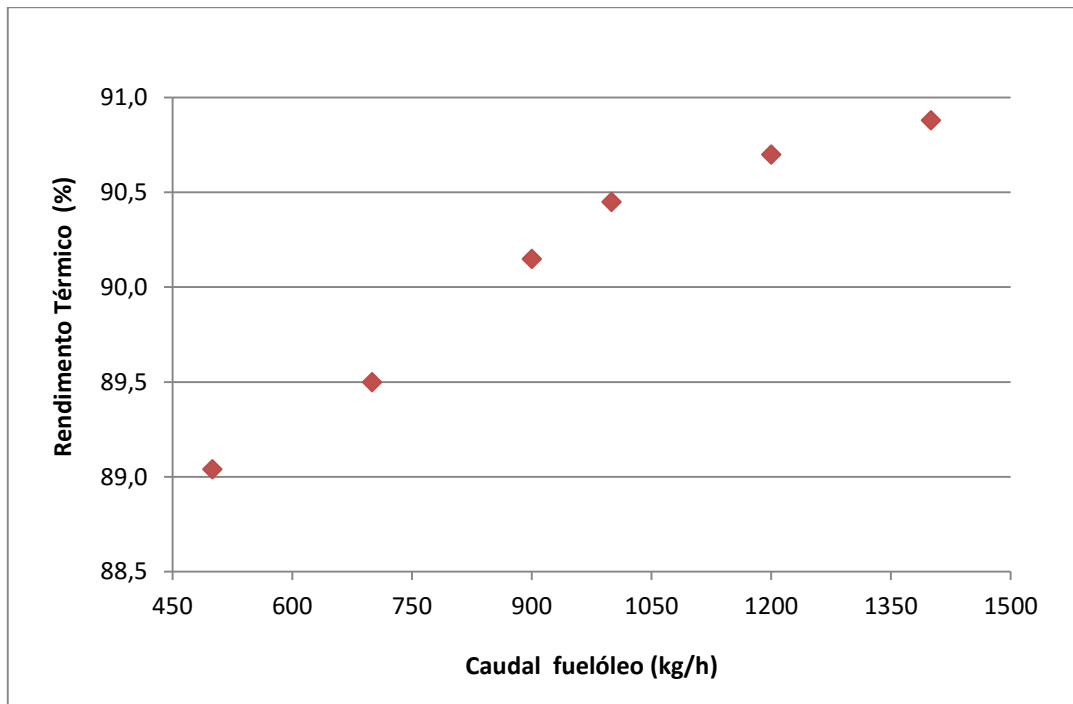
**Figura 25** - Relação entre a percentagem de abertura de válvula do ventilador e caudal de fuelóleo para caldeira 3 após a correção.

Após implementação desta nova relação realizaram-se ensaios para os caudais de fuelóleo de 500, 700, 800, 1000, 1200 e 1400 kg/h. A Figura 26 mostra os valores de excesso de ar obtidos para os diferentes caudais de fuelóleo na caldeira 3.



**Figura 26** - Excesso de ar para os diferentes caudais de fuelóleo na caldeira 3 após correção.

Atendendo a figura verifica-se que houve um decréscimo significativo de valores de excesso de ar, uma vez que inicialmente os mesmos encontravam-se num intervalo [134,8 – 25,5 %] e após esta alteração passaram para valores entre 28 e 19,3%. A figura 27 evidencia o resultado desse decréscimo excesso de ar, conduzindo a rendimentos superiores aos obtidos inicialmente.



**Figura 27** - Rendimento térmico vs caudal de fuelóleo na caldeira 3 após correção.

Pela análise da figura verificou-se que os valores do rendimento térmico aumentaram 3,8, 4, 3,5 e 3,4 % para os caudais de 500, 700, 800 e 1000 kg/h, respetivamente.

Na tabela 4 encontra-se os valores de monóxido de carbono antes e após otimização. Analogamente ao que acontece na caldeira 3 os valores de monóxido de carbono diminuem, tal facto justifica-se pelo aumento da quantidade de ar para caudais mais elevados.

**Tabela 4** - Valores de monóxido de carbono antes e após otimização

<b>Caudal (Kg/h)</b>	<b>CO (ppm) Antes da otimização</b>	<b>CO (ppm) Após otimização</b>
500	11	8
700	13	9
900	15	10
1000	17	13
1200	18	15
1400	20	16
1500	21	17
1800	22	19

Em suma, com as novas relações Ar/combustível versus caudal de fuelóleo foi possível melhorar o processo de combustão e o rendimento térmico. Diminuindo as perdas de energia e melhorando o desempenho das caldeiras, reduz-se assim o consumo de combustível e as emissões de CO.

## 5. Breve Análise de Custos

No trabalho em questão não será possível fazer uma análise económica completa ou uma análise de viabilidade económica do mesmo. Contudo pode ser feita uma análise de custos, que permite quantificar o que a empresa pode lucrar, atendendo à estratégia implementada. Como tal, fez-se o levantamento de alguns dados nomeadamente no que refere à quantidade e ao custo de fuelóleo. Na Tabela 6 encontram-se os dados fornecidos pela empresa.

**Tabela 3** - Dados fornecidos pela Empresa.

<b>Fuelóleo</b>	<b>Quantidade (t/ano)</b>	<b>Preço (€/t)</b>	<b>Preço (€/ano)</b>
	12 000	300	3600000

Uma vez que as melhorias do rendimento térmico para as duas caldeiras apresentam algumas diferenças, faz todo o sentido analisar estes custos para a caldeira 1 e 3 individualmente. Na Tabela 7 encontra-se esta análise de custos efetuada para as duas caldeiras.

**Tabela 4** - Análise de Custos para as caldeiras 1 e 3

<b>Caldeira</b>	<b>Rendimento Térmico após correção da relação Ar/Combustível (%)</b>	<b>Quantia (€)</b>
1	0,4 -1,74	14400 - 62640
3	2,9 - 3,8	104400 – 136800

Pela análise da tabela acima, constata-se que para a caldeira 3 o lucro que a empresa poderá lucrar é superior ao da caldeira 1, e que no limite máximo corresponde a 3,8%, ou seja, 456 ton/ano de fuelóleo.



## Conclusões

Na análise das caldeiras aquatubulares 1 e 3 da empresa Refinaria de Açúcar Reunidas verificou-se que a gama de rendimentos térmicos existente era de 88,4 a 91,2 % e 85,2 a 88,0%, respetivamente.

A caldeira 1 apresentava um rendimento térmico médio de 90,4% para a gama de caudais em funcionamento. No entanto e para caudais mais baixos, nomeadamente 500, 700 e 800 kg/h, detetou-se uma quantidade de excesso de ar elevada, para cima de 39% até 67,8% em relação à estequiométrica.

Na caldeira 3 o rendimento térmico médio era de 87,2% e no que respeita aos caudais mais baixos (500, 700 e 800 kg/h) a situação era similar, ou seja havia uma quantidade de excesso de ar superior ao que habitualmente é referido na bibliografia. Foi ainda possível nesta caldeira visualizar situações de fumos negros na chaminé para o caudal de 1600 kg/h de fuelóleo.

Perante tal situação, sugeriu-se efetuar alterações na relação Ar/combustível versus Caudal de fuelóleo no programa de controlo das caldeiras e após alguns ensaios obtiveram-se os seguintes rendimentos térmicos de [90,1 – 91,3 %] e [89,0 % - 90,9 %] para caldeira 1 e 3, respetivamente.

Por fim, efetuou-se uma breve análise económica atendendo às melhorias conseguidas nos rendimentos térmicos e determinou-se que em função do caudal de fuelóleo os lucros anuais podem oscilar entre 14400 e 62640 € ou 104400 e 136800 € para a caldeira 1 e 3, respetivamente



## Bibliografia

1. Açúcar, RAR. *Grupo RAR* . [Online] [Citação: 25 de Fevereiro de 2015.] <http://www.docerar.pt/index.php?id=120>.
2. ADENE - Agência para a Energia . [Online] Maio de 2010. [Citação: 4 de Março de 2015.] <http://www2.adene.pt/pt>
- 3 SOLUCIONA – Sistemas Integrados de Gestão, Lda. (5 de Setembro de 2015). Obtido de Manual de Boas Práticas para a Eficiência Energética: [http://www.aiminho.pt/imgAll/file/Sustentar/manual\\_boas\\_praticas\\_energia\\_sustentar\\_web.pdf](http://www.aiminho.pt/imgAll/file/Sustentar/manual_boas_praticas_energia_sustentar_web.pdf)
4. *Geração , Distribuição e Utilização de Vapor* . (22 de Setembro de 2015). Obtido de <http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP4.pdf>
5. Adene - Agência para Energia . (5 de Setembro de 2015). Obtido de Relatório de Diagnóstico Energético relativo à Central de Produção de Vapor e/ou Termofluido: [http://www2.adene.pt/ptpt/PNAEE/Documents/Relatorio\\_final\\_Geradores\\_anexo2.pdf](http://www2.adene.pt/ptpt/PNAEE/Documents/Relatorio_final_Geradores_anexo2.pdf)
6. *Heat Transfer*. (22 de Junho de 2015). Obtido de Improve Combustion System Efficiency : <http://research.che.tamu.edu/groups/Seminario/numerical-topics/Combustion%20System%20Efficiency.pdf>
7. CleaverBrooks. (13 de Julho de 2015). *Boiler Efficiency Guide* . Obtido de Facts About Firetube Boilers And Boiler Efficiency .
8. M.Lereno . Apontamentos Fontes e Conversão de Energia, ISEP. [Online] [Citação: 5 de Março de 2015.]
9. Bazzo, E. (1992 ). *Geração de Vapor* . DAUFSC.
10. *Eficiência Energética* . (22 de Junho de 2015). Obtido de [http://inovenergy.inovcluster.pt/media/28452/Estado\\_da\\_arte\\_do\\_setor\\_do\\_frio\\_por\\_fileira.pdf](http://inovenergy.inovcluster.pt/media/28452/Estado_da_arte_do_setor_do_frio_por_fileira.pdf)

- 11.** PILLARD - Combustion Equipment & Control Systems . (14 de Maio de 2015). Obtido de GRC LONoxFLAM BURNERS , OIL & GAS FIRED: <http://www.pillard.com/en/product/9707G.swf>
- 12.** Decreto – Lei nº 281/2000 de 10 de Novembro. Diário da República-Série – A.
- 13.** *Caracterização do Setor de Gás Natural em Portugal* . (14 de Setembro de 2015). Obtido de [http://www.erse.pt/pt/consultaspublicas/historico/Documents/CP\\_06/06\\_1/Caracterizacao\\_g%C3%A1s\\_natural\\_290104.pdf](http://www.erse.pt/pt/consultaspublicas/historico/Documents/CP_06/06_1/Caracterizacao_g%C3%A1s_natural_290104.pdf)
- 14.** *The Engineering Toolbox*. (22 de Outubro de 2015). Obtido de [http://www.engineeringtoolbox.com/boiler-combustion-efficiency-d\\_271.html](http://www.engineeringtoolbox.com/boiler-combustion-efficiency-d_271.html)
- 15.** Sá, André Fernandes Ribeiro de. *Guia de aplicações de gestão de energia e eficiência energética*. Porto: Pubindústria, Edições Técnicas, 2010.
- 16.** Carpenter, K., & Chris Schmidt, E. &. (18 de Junho de 2015). Obtido de Common Boiler Excess Air Trends And Strategies to Optimize Efficiency : [http://aceee.org/files/proceedings/2008/data/papers/3\\_349.pdf](http://aceee.org/files/proceedings/2008/data/papers/3_349.pdf)
- 17.** *Gestão de Energia e Energias Renováveis* . (8 de Setembro de 2015). Obtido de [http://www.ren.pt/pt-PT/sustentabilidade/ambiente/gestao\\_da\\_energia\\_e\\_energias\\_renovaveis](http://www.ren.pt/pt-PT/sustentabilidade/ambiente/gestao_da_energia_e_energias_renovaveis)

## Anexos

### Anexo A - Dados para cálculos

Neste anexo consta todos os dados fornecidos pela Empresa e necessários para os cálculos efetuados no anexo C e D.

A composição dos gases foi obtida através de medições efetuadas aos gases de combustão à saída da caldeira. Na Tabela A.1 encontram-se as medições efetuadas aos gases de combustão da Caldeira 3 para um caudal de fuelóleo de 500 kg/h.

**Tabela A.1** - Propriedades dos gases de combustão

<b>Propriedades dos gases de Combustão</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>CO (ppm)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Temperatura dos gases de combustão (°C)</b>
Caldeira 3	7,12	11	10,5	168

Na Tabela A.2 encontra-se o valor da condutividade da água da alimentação e dos TSD da purga da caldeira 3. Estes valores foram lidos através do equipamento de medição da condutividade.

**Tabela A.2** - Propriedades da água da caldeira

<b>Parâmetros água</b>	<b>Condutividade (µs/cm)</b>
Água de alimentação	16,09
TSD da purga da caldeira	295

Na Tabela A.3 constam as propriedades relativas ao vapor. A pressão e o caudal de vapor dizem respeito ao ensaio efetuado, sendo que a temperatura de saturação bem como as entalpias de líquido e vapor foram consultadas em tabelas de termodinâmica da água.

**Tabela A.3** - Propriedades do vapor da caldeira 3

<b>Propriedades do vapor</b>	
Pressão de Vapor (bar)	21,7
Temperatura de Saturação (°C)	216,4
Entalpia do líquido (kJ/kg)	926,7
Entalpia do vapor (kJ/kg)	2798,7
Caudal de Vapor (ton/h)	6,3

Na Tabela A.4 encontram-se as propriedades do fuelóleo. Os dados indicados constam na folha de registo das características do combustível da Empresa.

**Tabela A.4**- Propriedades do fuelóleo

Poder Calorífico Inferior (kJ/kg)	40920
Massa volúmica (Kg/m <sup>3</sup> )	986,1
Viscosidade N·s/m <sup>2</sup>	37,75
Ponto de Inflamação (°C)	69
Teor em Enxofre (%)	1

A Tabela A.5 apresenta os diferentes intervalos de condutividade e o respetivo fator de conversão. Estes valores foram fornecidos pela Empresa.

**Tabela A.5** - Fatores de conversão para a condutividade

<b>Condutividade (µs/cm)</b>	<b>Fator</b>
<50 µs/cm	1,365079
> 49 µs/cm <166	0,947658
> 332 µs/cm <833	0,715920
> 832 <100 00	0,758544
> 100 00 µs/cm	0,850432

Na tabela A.6 encontra-se a massa molar para os diferentes compostos.

**Tabela A.6** - Massa molar dos compostos

Composto	Massa Molar (g/mol)
<b>Carbono</b>	12,01
<b>Enxofre</b>	32,07
<b>Hidrogénio</b>	2,02



## Anexo B – Método Indireto <sup>[8]</sup>

- Perdas associadas ao combustível nas cinzas volantes ( $P_{cv}$ )

$$P_{cv} = \frac{A + F_{ci} + C_{cc} * 33820 * 100}{(1 - C_{cc}) * PCI}$$

- Perdas associadas ao combustível nas cinzas de fundo. Cálculo semelhante ao anterior apenas alterar fator de cinzas volantes para cinzas de fundo.

Estas perdas são consideradas quando se trata de um combustível sólido. No caso do combustível líquido (fuelóleo), estas perdas não são consideradas. Para efeito de cálculo considera-se que as perdas são iguais 0 %.

- Perdas associadas ao calor sensível nos gases de combustão ( $P_{gc}$ )

$$P_{gc} = \frac{K * (T_g - T_a) * (1 - \frac{P_{cf} + P_{cv}}{100})}{CO_2}$$

Em que:

$K$  – Constante que depende do combustível utilizado

$T_g$  - Temperatura dos gases de combustão à saída da caldeira (°C)

$T_a$  – Temperatura do ar à entrada da caldeira (°C)

$P_{cv} + P_{cf}$  – Cinzas de fundo e volantes

$CO_2$  – Percentagem em volume (%) de dióxido de carbono presente nos gases de combustão.

Na Tabela B.1 encontra-se o valor de  $k$  para diferentes combustíveis.

**Tabela B.1-** Valores de K para diferentes combustíveis

Combustível	Valor de K
Carvão betuminoso	0,66
Gasóleo	0,51
Thick, thin, burner, óleos	0,54
Propano	0,45
Gás Natural	0,35

- Perdas associadas à entalpia de vapor de água nos gases de combustão ( $PH_2O$ )

$$PH_2O = \frac{(mH_2O + 9H) * (210 - 4,2 * Ta + 2,1 * Tg)}{PCI}$$

Em que:

$H_2O$  - Percentagem em peso de humidade no combustível em condições de queima.

$H$  - Percentagem em peso de hidrogénio no combustível em condições de queima.

- Perdas associadas à inqueimados nos gases de combustão ( $P_{co}$ )

$$P_{co} = \frac{K_1 * CO * (1 - 0,1 * (P_{cv} + P_{cf}))}{CO + CO_2}$$

$K_1$  - Constante que depende do combustível

$CO$  - % volume de monóxido de carbono presente nos gases de combustão

$CO_2$  - % volume de dióxido de carbono presente dos gases de combustão

**Tabela B.2** -Valores de  $K_1$  para diferentes combustíveis

Combustível	Valor de $K_1$
Carvão Betuminoso	63
Gasóleo	53
Óleos (thick, thin, burner)	54
Propano	48

No que refere as perdas por radiação e convecção podem ser calculadas de acordo com a Tabela B.3. Trata-se de uma caldeira aquatubular com uma capacidade superior a 5 MW.

- Perdas por radiação e convecção

**Tabela B.3** - Perdas à capacidade Nominal

<b>Tipo de Caldeira</b>	<b>Perdas à capacidade Nominal <math>Q_p</math> (%)</b>
Caldeira Aquatubular ou tubos de fumo com capacidade $\geq 5$ MW	1,4
Caldeira Aquatubular ou de tubos de fumo com capacidade entre 2 e 5 MW	1,6
Caldeira de tubos de água e de tubos de fumo com capacidade menor que 2 MW	2,0
Caldeiras de refratário, caldeira de tubos de fumo com topo seco e caldeiras de soleira em refratário	3,0
Caldeiras de água quente em ferro fundido	4,5

As perdas são referidas à capacidade máxima da caldeira. Nos casos em que a caldeira se encontra a regimes inferiores pode considerar-se que as perdas variam na proporção da razão inversa entre o consumo atual de combustível e o que se verifica à capacidade máxima.

- Calor cedido nas purgas  $P_p$

$$P_p = \frac{(T_p - T_{ag}) * (p) * (100 - E_p)}{(T_p - T_{ag}) * (p) * (100 - (p)) * (660 - T_{ag})}$$

Em que:

$T_p$  - Temperatura das purgas (°C)

$T_{ag}$  - Temperatura da água da alimentação à caldeira (°C)

$P$  - % Purgas em relação ao total de água de alimentação à caldeira.

$E_p$  – Somatório de todas as perdas das equações anteriores.

## Anexo C - Cálculo do rendimento

Este Anexo contém os cálculos efetuados para a determinação do rendimento térmico. Para o efeito de cálculo utilizou-se o caudal um de 500 kg/h na caldeira 3. Deste modo, o somatório das perdas calculou-se da seguinte forma:

- Perdas associadas ao combustível nas cinzas volantes ( $P_{cv}$ )

$$P_{cv} = \frac{A + F_{ci} + C_{cc} * 33820 * 100}{(1 - C_{cc}) * PCI} = 0 \%$$

- Perdas associadas ao combustível nas cinzas de fundo.

Estas perdas são consideradas apenas quando se trata de um combustível sólido. Como neste caso se trata de um combustível líquido estas perdas não são consideradas. Para efeito de cálculo considera-se que as perdas são iguais 0%.

- Perdas associadas ao calor sensível nos gases de combustão ( $P_{gc}$ )

$$P_{gc} = \frac{K * (T_g - T_a) * (1 - \frac{P_{cf} + P_{cv}}{100})}{CO_2}$$

A constante K foi retirada da tabela B.1 com o valor de 0,54 para o fuelóleo. A temperatura do ar ( $T_a$ ) considerou-se 25 °C. A parcela as cinzas volantes e cinzas de fundo são nulas. A percentagem de  $CO_2$  encontra-se na tabela A.1 do Anexo A.

$$P_{gc} = \frac{0,54 * (168 - 25) * (1 - 0)}{7,12} = 10,85 \%$$

**Tabela C.1 – Propriedades do Combustível**

Combustível	Valor de K
Carvão betuminoso	0,66
Gasóleo	0,51
Thick, thin, burner, óleos	0,54
Propano	0,45
Gás Natural	0,35

- Perdas associadas à entalpia de vapor de água nos gases de combustão ( $PH_2O$ )

$$PH_2O = \frac{(mH_2O + 9H) * (210 - 4,2 * Ta + 2,1 * Tg)}{PCI}$$

A temperatura dos gases de combustão  $T_G$  foi retirada da tabela A.1 do anexo A. O peso do hidrogénio encontra-se na tabela B.2 com um valor de 11,5. O valor do PCI foi retirado da tabela A.4 do anexo A.

$$PH_2O = \frac{(0 + 9 * 11,5) * (210 - 4,2 * 25 + 2,1 * 168)}{40920} = 1,16\%$$

**Tabela C.2 - Percentagem do peso de hidrogénio e de água para os combustíveis**

Combustível	% peso de Hidrogénio	% peso de água
Coque	2,0	2,0
Antracite	3,0	1,0
Carvão Betuminoso	4,0	7,0
Gasóleo	13	-
<b>Thick, thin, burner e Óleos</b>	11,5	-
Propano	18,2	-
Trufa	6,4	20
Madeira	6,8	15

- Perdas associadas à inqueimados nos gases de combustão ( $P_{co}$ )

$$P_{co} = \frac{K_1 * CO * (1 - 0,1 * (P_{cv} + P_{cf}))}{CO + CO_2}$$

O valor de  $K_1$  de 54 foi retirado da tabela B.3. A parcela que refere as cinzas volantes e de fundo são nulas. Os valores de CO e  $CO_2$  encontram-se na tabela A.1 do anexo A.

$$P_{co} = \frac{54 * 0,011 * (1 - 0,1 * (0))}{0,011 + 7,12} = 0,08\%$$

**Tabela C.3** - Valores de  $K_1$  para diferentes combustíveis

Combustível	Valor de $K_1$
Carvão Betuminoso	63
Gasóleo	53
Óleos (thick, thin, burner)	54
Propano	48

- As perdas por radiação e convecção encontram-se na tabela B.4

**Tabela C.4** - Perdas à capacidade Nominal

Tipo de Caldeira	$Q_p$ (%)
Caldeira Aquatubular ou tubos de fumo com capacidade $\geq 5$ MW	1,4
Caldeira Aquatubular ou de tubos de fumo com capacidade entre 2 e 5 MW	1,6
Caldeira de tubos de água e de tubos de fumo com capacidade menor que 2 MW	2,0
Caldeiras de refratário, de tubos de fumo com topo seco e de soleira em refratário	3,0
Caldeiras de água quente em ferro fundido	4,5

As perdas são referidas à capacidade máxima da caldeira. Nos casos em que a caldeira se encontra a regimes inferiores pode considerar-se que as perdas variam na proporção da razão inversa entre o consumo atual de combustível e o que se verifica à capacidade máxima. A capacidade máxima da caldeira é de 2000 kg/h. Assim para um caudal de 505,3 kg/h temos:

$$\frac{505,3}{2000} \times 1,4 = 0,354\%$$

➤ Calor cedido nas purgas  $P_p$

$$P_p = \frac{(T_p - T_{ag}) * (p) * (100 - E_p)}{(T_p - T_{ag}) * (p) + (100 - (p)) * (660 - T_{ag})}$$

A temperatura de saturação  $T_p$  encontra-se na tabela das propriedades do vapor, tabela A.3. A temperatura da água da alimentação à caldeira é 119 °C e  $E_p$  é o somatório de todas as perdas calculadas anteriormente. O  $p$  corresponde ao quociente entre a da água da alimentação à caldeira com purga da caldeira como evidencia a equação abaixo:

$$(p) = \frac{21,96}{227} * 100 \leftrightarrow (p) = 9,67 \%$$

Assim, o calor cedido pelas purgas calcula-se:

$$P_p = \frac{(216,4 - 119) * (9,67) * (100 - 12,44)}{(216,4 - 119) * (9,67) + (100 - (9,67)) * (660 - 119)} = 1,66\%$$

Após todas as perdas calculas é possível determinar o rendimento térmico como se encontra abaixo.

$$\eta = 100 - 10,85 - 1,16 - 0,08 - 0,354 - 1,66 = 85,9\%$$

## Anexo D – Cálculo da quantidade de ar estequiométrica e percentagem de excesso de ar (%).

### Anexo D.1 – Quantidade de ar estequiométrica.

A quantidade de ar estequiométrica é calculada com base na queima completa como evidenciam as equações (1) (2) (3). Considerou-se um caudal de fuelóleo de 500 kg/h.

É necessário conhecer a massa molar de cada composto e a sua composição no combustível. Sabendo que a percentagem mássica de carbono é de 85 % e que a sua massa molar é 12,01 g/mol calcula-se a o caudal molar.

$$\text{Carbono (C)} = \frac{500 \cdot 0,85 \cdot 1000}{12,01} = 35387 \text{ mol/h}$$

$$\text{Enxofre (S)} = \frac{500 \cdot 0,01 \cdot 1000}{32,07} = 156 \text{ mol/h}$$

$$\text{Hidrogénio (H}_2\text{)} = \frac{500 \cdot 0,133 \cdot 1000}{2,02} = 32921 \text{ mol/h}$$

Considerando a equação (1), temos:

$$1 \text{ mol de carbono} - 4,76 \text{ mol de Ar}$$

$$\text{Moles de Ar necessárias} = 35387 \cdot 4,76 = 168442 \text{ mol/h}$$

Para a equação do enxofre (S), temos:

$$1 \text{ mol de enxofre} - 4,76 \text{ mol de Ar}$$

$$\text{Moles de Ar necessárias} = 156 \cdot 4,76 = 743 \text{ mol/h}$$

Para a equação do hidrogénio, temos:

$$1 \text{ mol hidrogénio} - 2,38 \text{ mol de Ar}$$

$$\text{Moles de Ar necessárias} = 32921 \cdot 2,38 = 78352 \text{ mol/h}$$

*Total de Moles Ar necessárias*

$$= \text{Moles ( Carbono )} + \text{Moles ( enxofre )} + \text{Moles ( hidrogénio )}$$

$\leftrightarrow$  *Total de Moles Ar necessárias*

$$= 168443 \text{ mol/h} + 742 \text{ mol/h} + 78352 \text{ mol/h} = 247537 \text{ mol/h}$$

Sabendo que volume molar corresponde a 22,4 dm<sup>3</sup>/mol temos:

$$1 \text{ mol de Ar} - 22,4 \text{ dm}^3$$

$$\text{Volume total (dm}^3\text{)} = 247537 * 22,4 = 5544829 \text{ dm}^3$$

Uma vez que que as unidades do caudal de Ar é m<sup>3</sup>, fez-se a respetiva conversão.

$$\text{Volume (m}^3\text{)} = 5545 \text{ m}^3$$

Para os restantes caudais de fuelóleo das caldeiras 1 e 3, o cálculo do volume estequiométrico procede-se de forma semelhante.

#### **Anexo D.2 - Cálculo da percentagem de excesso de ar (%)**

$$\text{Excesso de Ar(\%)} = \frac{O_2}{(21 - O_2)}$$

$$\text{Excesso de Ar(\%)} = \frac{10,5}{(21 - 10,5)} = 100 \%$$

O cálculo de excesso de ar refere-se ao caudal de 500 Kg/h para a caldeira 3. Para os restantes caudais da caldeira 1 e 3 procede-se da mesma forma.