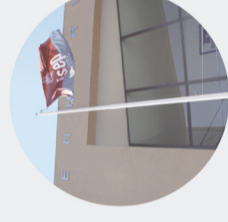




# ESTUDO DA APLICAÇÃO DE UM NOVO COMBUSTÍVEL A UMA CALDEIRA AQUATUBULAR

**JOAO PEDRO ALMEIDA CALIXTO SILVA**

novembro de 2018



## ESTUDO DA APLICAÇÃO DE UM NOVO COMBUSTÍVEL A UMA CALDEIRA AQUATUBULAR

ESTUDO DA APLICAÇÃO DE UM NOVO COMBUSTÍVEL A UMA CALDEIRA  
AQUATUBULAR

JOAO PEDRO ALMEIDA CALIXTO SILVA  
Outubro de 2018

JOAO PEDRO ALMEIDA CALIXTO SILVA  
Outubro de 2018



# ESTUDO DA APLICAÇÃO DE UM NOVO COMBUSTÍVEL A UMA CALDEIRA AQUATUBULAR



João Pedro Almeida Calixto Silva

outubro 2018

## Orientação:

Doutor Eng. Christopher Sá (ISEP)

Mestre Eng. Luís Braga (RAR)



## Agradecimentos

A realização deste trabalho só foi possível com o apoio e colaboração de várias pessoas e, por isso, a todos os que participaram, direta ou indiretamente, deixo o meu agradecimento.

Ao Eng.º Luís Braga, pela orientação fornecida, por me ter dado a oportunidade de estagiar numa empresa tão conceituada como a *RAR – Refinarias de Açúcar Reunidas* e ainda por todo o tempo e ajuda que disponibilizou.

Ao Eng.º Christopher Sá, meu orientador do ISEP, por todo o apoio e orientação que prestou.

Ao Eng.º Crispim, antigo diretor de mestrado, ao Eng.º Gilberto, atual diretor de mestrado, e a todos os engenheiros que me acompanharam no ISEP, pelo apoio e todos os conhecimentos passados durante estes 5 anos.

Aos Fogueiros, pessoas que estiveram mais próximas do meu trabalho prático e diário, por todos os conhecimentos que me passaram, por me terem passado o gosto pelo tema, e acima de tudo pela capacidade de acolhimento.

A todo o pessoal do laboratório da *RAR*, por me acolher tão bem e por toda a disponibilidade que sempre apresentaram.

À Engenheira Filipa Brandão, por toda a cooperação, boa disposição e disponibilidade cedida.

Aos estagiários Elanice Lima, Hugo Costa, Marisa Gregório, Milena Sales e Catarina Alves, por sempre me motivarem a desenvolver um bom trabalho e por não deixarem que o ânimo faltasse nestes meses de trabalho.

A todas as empresas exteriores e pessoal qualificado das mesmas, que cooperaram com o meu trabalho, e me ajudaram a evoluir.

A todos os meus amigos, por toda a força e apoio ao longo destes 5 anos.

E, finalmente, às pessoas mais importantes, a minha mãe, irmã e namorada, por todo o apoio e compreensão demonstrados.



## Resumo

O presente trabalho teve como objetivo o estudo da aplicação de um novo combustível a uma das caldeiras aquatubulares da empresa *Refinarias de Açúcar Reunidas* (RAR). A empresa dispõe de três caldeiras deste tipo, sendo que este trabalho foi focado na caldeira nº 2.

Para este estudo foi importante fazer uma comparação da eficiência da caldeira, através da análise dos gases de combustão e resíduos, tanto do combustível atual (nafta) como do alternativo, proveniente da lavagem dos tanques de armazenamento do fuelóleo transportado em barco.

Hoje em dia é habitual usarem-se dois métodos para o cálculo da eficiência da caldeira, o direto e o indireto, sendo que ao longo deste documento se utilizou o método indireto baseado na norma ASME PTC 4-2013, por se admitir ser mais rigoroso. Mesmo assim, far-se-á a comparação com o método direto e com o método indireto sugerido pela ADENE (Agência para a Energia) que, embora não englobe todas as perdas mencionadas na norma referida, é o mais utilizado atualmente nas auditorias energéticas.

Foram realizados alguns ensaios experimentais com caudal de nafta entre 220 e 550 kg/h, aproximadamente, para os quais se obtiveram rendimentos entre 68,8 e 82,2%, utilizando a norma ASME PTC 4-2013. Para os mesmos ensaios, os rendimentos calculados pelo método da ADENE são acompanhados de uma variação percentual de 5,0 e 6,9%. Analisando o rendimento a partir da variação do excesso de ar concluiu-se que a melhor gama de rendimentos foi obtida com a percentagem de excesso de ar a rondar os 36%. Quando estes valores subiram para 215%, o rendimento diminuiu cerca de 13%. Convém ainda referir que nestes ensaios os valores de CO, NOx e SO<sub>2</sub>, apesar de elevados, estiveram sempre abaixo do VLE (Valor Limite de Emissão).

No teste de operação da caldeira com o novo combustível concluiu-se que os rendimentos se aproximam muito dos obtidos com a nafta, depois de alterada a relação ar-combustível. Verificou-se ainda que as percentagens obtidas dos poluentes NOx e SO<sub>2</sub> nos gases de combustão foram inferiores, ou seja, para um caudal a rondar os 490 kg/h de combustível, estes valores foram de 394 e 452 ppm para a nafta, e 137 e 261 ppm para o novo combustível (fuelóleo nº3), respetivamente. Acrescente-se que a caldeira não apresentou alterações nem anomalias de funcionamento durante ou após o teste.

Por fim, foi realizada uma simples análise económica que permitiu concluir que a substituição do combustível tem um *payback* de 5 meses e 19 dias, ou seja, sugere-se a sua implementação.

**Palavras-chave:** Caldeira Aquatubular, Eficiência, Fuelóleo, ADENE, ASME PTC 4-2013

## Abstract

The present work had the purpose of studying the application of a new fuel in one of the water-tube boilers of the sugar refinery company. The company has three boilers of this type and this work was focused on boiler nº2.

For this study it was important to make a comparison of the boiler efficiency through the analysis of the flue gases and residues from the current (naphtha) and the alternative (fuel oil nº3) fuel, which comes from the washing of the storage tanks from the carriage boat.

Nowadays, it is usual to use two methods to calculate the efficiency of a boiler, the direct and the indirect. Throughout this document it was used the indirect method based on the ASME PTC 4-2013 standard because it is admitted being a stricter one. Even so, a comparison will be made with the direct method and the indirect method suggested by ADENE which, although not encompasses all the losses mentioned in the referred standard, is the most used in Portuguese energy audits.

Some experiments were carried out with a naphtha flow between 220 and 550 kg/h, for which yields were obtained between 68.8 and 82.2% using the ASME PTC 4-2013 standard. For the same flows, the income calculated using the ADENE method were accompanied of a difference between 5.0 and 6.9%. By analyzing the yield from the excess air variation, it was concluded that the best range of yields were obtained with the percentage of the excess air surrounding 36%. When these values went up to 215%, the yields went down by 13%. It should also be noted that in these tests the values of CO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> for the flue gases, although high, were below the VLE (Emission Limit Values).

In the boiler operation test with the new fuel it was concluded that the incomes are very close to those obtained with the naphtha, after changing the air-fuel ratio. It was also found that the NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emissions decreased, which means that with a fuel flow rate of around 490 kg/h, these values were 394 and 452 ppm with naphtha, and 137 and 261 ppm with fuel oil nº3, respectively. At the end It should be noted that the boiler has not changed or malfunctioned during or after the test.

Finally, a simple economic analysis was carried out, which allowed the conclusion that the fuel substitution has a payback of 5 months and 19 days, which means, its implementation can be done.

**Key words:** Water-Tube Boiler, Efficiency, Fuels, ADENE, ASME PTC 4-2013



## Índice

1.	Introdução .....	1
1.1.	Enquadramento.....	1
1.2.	Objetivos .....	3
1.3.	A Empresa .....	4
1.4.	Estrutura da dissertação .....	5
2.	Estado da Tecnologia em estudo .....	7
2.1.	Caldeiras/Geradores de vapor .....	7
2.1.1.	Caldeiras aquatubulares .....	7
2.2.	Componentes de uma caldeira.....	8
2.3.	Combustíveis .....	9
2.3.1.	Nafta – Combustível.....	9
2.3.2.	Combustível alternativo.....	10
2.4.	Rendimento de geradores de vapor .....	13
2.4.1.	Escolha do método de cálculo do rendimento de uma caldeira .....	13
2.4.2.	Método indireto segundo a norma ASME PTC 4-2013 <sup>[31]</sup> .....	14
2.4.3.	Método indireto, proposto pela ADENE <sup>[1]</sup> .....	31
2.4.4.	Método direto .....	34
2.5.	Excesso de ar .....	35
2.6.	Queimadores.....	36
2.7.	Válvulas .....	37
2.8.	Emissões/Impactos ambientais .....	39
2.9.	Tratamento da água das caldeiras .....	40
3.	Materiais e Métodos .....	43
3.1	Sistema de monitorização .....	46
3.2	Limpeza das Caldeiras.....	51
3.3	Alterações necessárias na caldeira nº 2.....	54
4.	Resultados e Discussão .....	61

4.1.	Comparação de rendimentos entre os métodos direto e indireto.....	61
4.2.	Influência do excesso de ar.....	64
4.3.	Influência da pressão da caldeira.....	65
4.4.	Variação do rendimento.....	65
4.5.	Comparação entre combustíveis.....	66
5.	Análise de Custos e Sugestões de Melhorias.....	71
6.	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	75
	Referências Bibliográficas.....	77
	Anexos.....	81

## Índice de Figuras

Figura 1.1. Divisão da energia primária e energia final consumidas em 2016 <sup>[4]</sup> .....	2
Figura 1.2 Evolução do balanço energético: importações, produção doméstica e consumos de energia primária e energia final entre os anos 2005 e 2016 <sup>[5]</sup> .....	2
Figura 1.3 Dependência energética de Portugal face ao exterior entre os anos de 2005 e 2016 <sup>[5]</sup> .....	3
Figura 1.4 Edifício da RAR <sup>[8]</sup> .....	4
Figura 1.5 Certificações ISO 9001, ISO 14001 E ISO 22000 .....	5
Figura 2.1 Esquema de uma caldeira aquatubular <sup>[15]</sup> .....	7
Figura 2.2 Resíduos petrolíferos gerados anualmente a partir dos navios <sup>(adaptado de [28])</sup> .....	11
Figura 2.3 Processo de recolha e produção do combustível marítimo utilizado <sup>[28]</sup> .....	12
Figura 2.4 Refinação otimizada dos slops para produzir combustíveis marítimos <sup>[28]</sup> ..	12
Figura 2.5 Efeito do excesso de ar sobre as perdas em sistemas de combustão <sup>[14]</sup> ...	35
Figura 2.6 Queimador misto (fotografia tirada ao queimador da caldeira nº 1) .....	37
Figura 2.7 Esquema representativo de um queimador de pulverização mecânica <sup>[19]</sup> .	37
Figura 2.11 Chaminés correspondentes às caldeiras da RAR Cogeração .....	40
Figura 3.1 Sobreaquecedor da caldeira nº 2 da RAR Cogeração .....	43
Figura 3.2 Economizador da Caldeira nº2 da RAR Cogeração .....	44
Figura 3.3 Atomizador do queimador da caldeira nº 2.....	44
Figura 3.4 Pastilha do queimador da caldeira nº 2 .....	44
Figura 3.5 Emulsor do queimador da caldeira nº 2.....	44
Figura 3.6 Separador do queimador da caldeira nº 2 .....	45
Figura 3.7 Multibús do queimador da caldeira nº 2 .....	45
Figura 3.8. Coletor de alta pressão da RAR Cogeração.....	45
Figura 3.9 Coletor de baixa pressão da RAR Cogeração.....	46
Figura 3.10 Sistema de monitorização da RAR Cogeração .....	46
Figura 3.11 Sistema de monitorização do desgasificador e coletores .....	47
Figura 3.12 Sistema de monitorização do tratamento da água das caldeiras.....	48
Figura 3.13 Medidor de gases marca Testo modelo 350 XL .....	49
Figura 3.14 Mufla marca Nabertherm modelo L5 .....	50
Figura 3.15 Analisador TOC marca Shimadzu modelo E200V .....	50
Figura 3.16 Analisador de fluorescência de raios X marca ThermoScientific modelo XLET 900.....	50
Figura 3.17 Condutivímetro (marca Metrohm modelo 712) .....	51

Figura 3.18 Amostra de resíduo da caldeira nº 2 .....	52
Figura 3.19 Abertura da caldeira nº 2 antes da limpeza .....	52
Figura 3.20 Porta da caldeira nº 2 antes da limpeza .....	52
Figura 3.21 Abertura da caldeira nº 2 depois da limpeza .....	52
Figura 3.22 Porta da caldeira nº 2 depois da limpeza .....	52
Figura 3.23 Interior da caldeira nº 2 antes da limpeza .....	53
Figura 3.24 Interior da caldeira nº 2 depois da limpeza (dificuldade devido ao pó e pouca luz).....	53
Figura 3.25 Economizador da caldeira nº 2 antes da limpeza.....	53
Figura 3.26 Economizador da caldeira nº 2 depois da limpeza .....	53
Figura 3.27 Chaminé das caldeiras 2 e 3 antes da limpeza (1).....	53
Figura 3.28 Chaminé das caldeiras 2 e 3 antes da limpeza (2).....	53
Figura 3.29 Chaminé das caldeiras 2 e 3 depois da limpeza (1) .....	54
Figura 3.30 Chaminé das caldeiras 2 e 3 depois da limpeza (2) .....	54
Figura 3.31 Reservatório para o combustível alternativo.....	55
Figura 3.32 Bomba e Válvula globo utilizadas para o percurso de passagem do fuelóleo nº 3 .....	56
Figura 3.33 Tubagem (antes da ligação à caldeira) com válvula globo instalada .....	56
Figura 3.34 Tubagem modificada (antes da ligação à caldeira) com válvulas de globo (1) e (2) .....	56
Figura 3.35 Tubagem antes da intervenção e da nova válvula de globo para o retorno do fuelóleo nº3 ao depósito.....	57
Figura 3.36 Tubagem com válvula globo para o retorno do fuelóleo nº 3 ao reservatório .....	57
Figura 3.37 Válvula de retorno instalada na alimentação do reservatório .....	58
Figura 3.38 Bacia de retenção do reservatório novo .....	58
Figura 3.39 Ligação à Terra (depósito do combustível novo) .....	59
Figura 4. 1 Rendimento da caldeira nº2 (%) em função do caudal de nafta (kg/h), para o método indireto da norma ASME e para o método indireto proposto pela ADENE num dos ensaios realizados .....	62
Figura 4. 2 Rendimento da caldeira nº2 em função do caudal de nafta (kg/h), para o método direto.....	62
Figura 4. 3. Variação do rendimento da caldeira nº2 em função do excesso de ar utilizado num dos ensaios realizados.....	64
Figura 4. 4 Rendimentos da caldeira em função do caudal de nafta (kg/h), para pressões maiores e menores que 21 barg .....	65

Figura 4.5 Rendimentos da caldeira nº2, em função do caudal de nafta (kg/h), para diferentes semanas de trabalho .....	66
Figura 4.6 Comparação entre o rendimento da nafta e do combustível de teste em função dos caudais de combustível (kg/h) .....	66
Figura 4.7 Valores de % de O <sub>2</sub> em relação ao caudal de combustível, em kg/h, para cada ensaio .....	67
Figura 4.8 Resultados do rendimento da caldeira com nafta, fuelóleo nº3 e fuelóleo nº3 depois de corrigida a % de ar, em função do caudal de combustível (kg/h) .....	67
Figura 4.9 Painel de controlo da caldeira com adição de comando para utilização dos dois combustíveis .....	68
Figura 4.10 Resultados de caudal de vapor produzido, em ton/h, por kg/h de combustível utilizado .....	69
<i>Figura 4.11 Variação do NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> em ppm, em função do caudal de cada combustível (kg/h) .....</i>	<i>69</i>
Figura 4.12 Resultados relativos à % de abertura da válvula de fuel, em função do caudal de fuel (kg/h).....	70
Figura 4.13 Resultados relativos à % de abertura da válvula de atomização, em relação à pressão de atomização (barg).....	70



## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 Descrição dos componentes de uma caldeira .....	8
Tabela 2.2 Composição da nafta usada nos estudos efetuados <sup>[26]</sup> .....	10
Tabela 2.3 Composição do combustível alternativo <sup>[29]</sup> .....	13
Tabela 2.4 Perdas numa caldeira, segunda a norma ASME PTC 4-2013 .....	14
Tabela 2.5 Créditos numa caldeira, segundo a norma ASME PTC 4-2013 .....	15
Tabela 2.6 Perdas segundo o método indireto, proposto pela ADENE .....	31
Tabela 2.7 Valores de k2 em função do combustível utilizado .....	32
Tabela 2.8 Valores de k3 dependendo do combustível .....	33
Tabela 2.9 Perdas à capacidade nominal dependendo do tipo de caldeira utilizado ...	34
Tabela 2.10 Correspondência dos diâmetros nominais, em polegadas e mm de acordo com as Normas DIN 2440, ISO 65 e BS 1387 <sup>[39]</sup> .....	38
Tabela 3.1 Comportamento do caudal de nafta e da pressão de vapor de atomização em função da pressão de combustível.....	48
Tabela 3.2 Fatores de conversão para a condutividade .....	51
Tabela 3.3 Características do depósito instalado para receber o novo combustível .....	55
Tabela 4.1 Resultados dos testes feitos a alguns parâmetros necessários para o cálculo do rendimento da caldeira.....	61
Tabela 4. 2 Comparação entre o método direto e os métodos indiretos, tanto da norma como o proposto pela ADENE, para um caudal de 522kg/h de nafta. ....	63



## Nomenclatura

<b>Sigla norma</b>	<b>Sigla Usada</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidades norma</b>	<b>Unidades usadas</b>
Af	A	Área superficial do gerador de vapor	$ft^2$	$m^2$
DnA	$\rho$ (ar)	Densidade do ar húmido	$\frac{lbm}{ft^3}$	$\frac{kg}{m^3}$
DnFg	$\rho$ (gases)	Densidade dos gases de combustão	$\frac{lbm}{ft^3}$	$\frac{kg}{m^3}$
DVpCO	%COgc	CO nos gases de combustão	% volume	
DVpCO <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub> gc	CO <sub>2</sub> nos gases de combustão	% volume	
DVpHc	%Hcgc	Hidrocarbonetos nos gases de combustão	% volume	
DVpH <sub>2</sub> O	%H <sub>2</sub> Ogc	H <sub>2</sub> O nos gases de combustão	% volume	
DVpN <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub> gc	N <sub>2</sub> nos gases de combustão	% volume	
DVpO <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub> gc	O <sub>2</sub> nos gases de combustão	% volume	
DVpSO <sub>2</sub>	%SO <sub>2</sub> gc	SO <sub>2</sub> nos gases de combustão	% volume	
EF	EF	Eficiência da caldeira	%	
Ep	Ep	Todas as perdas exceto a das purgas	%	
Hca	Hconv	Coeficiente de transferência de calor por convecção	$\frac{Btu}{h^\circ F ft^2}$	$\frac{J}{m^2 s^\circ C}$
HDAEn	H(ar)e	Entalpia do ar seco à temperatura de entrada no sistema	$\frac{Btu}{lbm}$	$\frac{J}{kg}$
HDFgLvCr	H(gc)s	Entalpia dos gases de combustão à temperatura de saída do economizador	$\frac{Btu}{lbm}$	$\frac{J}{kg}$
Hfo	Hf	Entalpia do combustível	$\frac{Btu}{lbm}$	$\frac{J}{kg}$
HHVCO	PCS(CO)	Poder calorífico superior do CO	$\frac{Btu}{lbm}$	$\frac{J}{kg}$
HHVCRs	PCS(C)r	Poder calorífico superior do Carbono no resíduo	$\frac{Btu}{lbm}$	$\frac{J}{kg}$
HHVF	PCS	Poder Calorifico Superior	$\frac{Btu}{lbm}$	$\frac{J}{kg}$
Hra	Hrad	Coeficiente de transferência de calor por radiação	$\frac{Btu}{h^\circ F ft^2}$	$\frac{J}{m^2 s^\circ C}$
HStLvCr	H(vap)s	Entalpia do vapor (baseado em tabelas ASME) à T de saída do economizador	$\frac{Btu}{lbm}$	$\frac{J}{kg}$
HWRe	H(água)ref	Entalpia da água à Temperatura de referência	$\frac{Btu}{lbm}$	$\frac{J}{kg}$

<i>HWvEn</i>	H(vap)e	Entalpia do vapor à temperatura de entrada do ar	$\frac{Btu}{lbm}$	$\frac{J}{kg}$
<i>HWvLvCr</i>	H(vap)c	Entalpia de vapor corrigida, à temperatura de saída dos gases do economizador	$\frac{Btu}{lbm}$	$\frac{J}{kg}$
<i>LHVC</i>	PCI	Poder Calorífico Inferior	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{J}{kg}$
<i>MFrAsF</i>	Fmc	Fração mássica de cinzas no combustível	<i>massa / massa fuel</i>	
<i>MFrAz</i>	FmA	Fração mássica de ar em relação ao ar total	<i>massa / massa</i>	
<i>MFrCO<sub>2</sub>Sb</i>	Fm(CO <sub>2</sub> )s	Fração mássica de gás CO <sub>2</sub> no "sorbent"	$\frac{massa}{massa\ sorbent}$	
<i>MFrFg</i>	Fmgs	Fração mássica de gás seco	<i>massa / massa fuel</i>	
<i>MFrRs</i>	Fmr	Massa de resíduo por massa de combustível	<i>massa / massa fuel</i>	
<i>MFrSb</i>	Fmsorb	Massa de "sorbent" por massa de combustível	<i>massa / massa fuel</i>	
<i>MFrSc</i>	FmS	Fração mássica de captação de enxofre (S)	<i>massa / massa fuel</i>	
<i>MFrThACr</i>	Fm(ar)t	Massa de ar teórico por massa de combustível	<i>massa / massa fuel</i>	
<i>MFrWA</i>	Fm(H <sub>2</sub> O)ar	Fração mássica de humidade no ar, por massa de ar seco	$\frac{massa}{massa\ ar\ seco}$	
<i>MFrWAd</i>	Fm(H <sub>2</sub> O)ad	Fração mássica de água adicional	<i>massa / massa fuel</i>	
<i>MFrWDA</i>	Fm(hum)ar s	Fração mássica de humidade no ar seco	$\frac{massa}{massa\ ar\ seco}$	
<i>MFrWF</i>	Fmag	Fração mássica de água no combustível	<i>massa / massa fuel</i>	
<i>MFrWSb</i>	Fm(H <sub>2</sub> O)s	Fração mássica de água no "sorbent"	<i>massa / massa fuel</i>	
<i>MoDFg</i>	MOarseco	Moles de ar seco por massa de combustível	<i>massa / massa fuel</i>	
<i>MoDPc</i>	MOpr	Moles de produtos (CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> e SO <sub>2</sub> ) no combustível	<i>moles / massa fuel</i>	
<i>MoFg</i>	MOgs	Moles de gás seco por massa de combustível	<i>moles / massa fuel</i>	
<i>MoSO<sub>2</sub></i>	MOSO <sub>2</sub>	Moles de gás SO <sub>2</sub> por massa de combustível	<i>moles / massa fuel</i>	
<i>MoThACr</i>	MOar	Moles de ar teórico requerido	<i>moles / massa fuel</i>	
<i>MoWA</i>	MOhum	Moles de humidade no ar	<i>moles / massa fuel</i>	
<i>MpAsF</i>	%cinzasf	Cinzas no combustível	% mássica	
<i>MpCb</i>	%Cq	Carbono queimado	% mássica	
<i>MpCF</i>	%Cf	Carbono no combustível	% mássica	
<i>MpCRs</i>	%C <sub>inq,r</sub>	Carbono inqueimado no resíduo	% mássica	
<i>MpH<sub>2</sub>F</i>	%H <sub>2</sub> f	Hidrogénio no combustível	% mássica	
<i>MpH<sub>2</sub>OF</i>	%H <sub>2</sub> Of	Água no combustível	% mássica	
<i>MpN<sub>2</sub>F</i>	%N <sub>2</sub> f	Azoto no combustível	% mássica	
<i>MpO<sub>2</sub>F</i>	%O <sub>2</sub> f	Oxigénio no combustível	% mássica	

<i>MpSf</i>	%Sf	Percentagem de Enxofre no combustível	% mássica	
<i>MpToCRs</i>	%Ctr	Total de Carbono contido no resíduo	% mássica	
<i>MpUbC</i>	%Cinq.	Carbono inqueimado	% mássica	
<i>MpUbH<sub>2</sub></i>	%H <sub>2</sub> inq.	Hidrogénio inqueimado	% mássica	
<i>MqCO<sub>2</sub>Sb</i>	M(CO <sub>2</sub> )s	Fração mássica de CO <sub>2</sub> no "sorbent" a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
<i>MqDA</i>	Marseco	Fração mássica de ar seco a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
<i>MqDFg</i>	Mgs	Fração mássica de gás seco que sai do gerador de vapor a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
<i>MqFg</i>	Mgc	Fração mássica dos gases de combustão a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
<i>MqFgF</i>	Mgh	Fração mássica de Gás húmido no combustível a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
<i>MqRs</i>	Mres	Fração mássica de resíduo a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
<i>MqThACr</i>	M(ar)f	Fração mássica de ar no combustível a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
<i>MqWA</i>	Mhum(ar)	Fração mássica de água relativa à humidade do ar a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
<i>MqWAd</i>	M(H <sub>2</sub> O)ad	Fração mássica de água adicional a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
<i>MqWF</i>	Mhum(f)	Fração mássica de humidade no combustível a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
<i>MqWFg</i>	Mhum(gc)	Fração mássica de humidade nos gases de combustão a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
<i>MqWH<sub>2</sub>F</i>	Mhum(H <sub>2</sub> )	Fração mássica de água na combustão de hidrogénio do fuel a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
<i>MqWSb</i>	M(H <sub>2</sub> O)s	Fração mássica de H <sub>2</sub> O no "sorbent" a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
<i>MqWvF</i>	M(H <sub>2</sub> O)v f	Fração mássica de água num combustível gasoso a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
<i>MrF</i>	Mrf	Caudal mássico de combustível	<i>lbm/h</i>	<i>kg/s</i>
<i>MrH<sub>2</sub>O</i>	MrH <sub>2</sub> O	Caudal mássico de água à entrada da caldeira	<i>ton/h</i>	<i>kg/s</i>
<i>MrP</i>	MrP	Caudal mássico de purgas	<i>ton/h</i>	<i>kg/s</i>
<i>MwCO</i>	MMCO	Peso molecular do monóxido de carbono	<i>massa / moles</i>	
<i>MwCO<sub>2</sub></i>	MMCO <sub>2</sub>	Peso molecular do dióxido de carbono	<i>massa / moles</i>	

$MwDFg$	MMgcs	Peso molecular dos gases de combustão (secos)	<i>massa / moles</i>	
$MwFg$	MMgch	Peso molecular dos gases de combustão (húmidos)	<i>massa / moles</i>	
$MwHc$	MMHc	Peso molecular dos hidrocarbonetos	<i>massa / moles</i>	
$Pa$	Pa	Pressão barométrica	<i>psia</i>	<i>Pa</i>
$PpWvA$	$Pp(H_2O)ar$	Pressão parcial do vapor de água no ar	<i>psia</i>	<i>Pa</i>
$PsWvT$	$Ps(H_2O)$	Pressão de saturação do vapor de água à temperatura T	<i>psia</i>	<i>Pa</i>
$QpBDA$	$C_{arseco}$	Créditos devido à entrada de energia relativa ao ar seco	%	
$QpBSIF$	$C_{sulf}$	Créditos devido à sulfonação	%	
$QpBWA$	$C_{hum.ar}$	Créditos devido à humidade do ar à entrada da caldeira	%	
$QpLALg$	$P_{inf.ar}$	Perdas devido a infiltração de ar	%	
$QpLAG$	$P_{eq.ar}$	Perdas associado a equipamentos de controlo de ar quente	%	
$QpLCO$	$P_{co}$	Perdas associado ao monóxido de carbono presente nos gases de combustão	%	
$QpLDFg$	$P_{gs}$	Perdas associadas aos gases secos	%	
$QpLH_2F$	$P_{H_2}$	Perdas associadas à combustão do $H_2$ no combustível	%	
$QpLH_2Rs$	$P_{(H_2inq)r}$	Perdas associadas ao hidrogénio inqueimado no resíduo	%	
$QpLNOx$	$P_{NOx}$	Perdas associadas à formação de $NOx$	%	
$QpLPr$	$P_{Pr}$	Perdas associadas ao pulverizador	%	
$QpLRs$	$P_{res}$	Perdas associadas ao calor sensível do resíduo	%	
$QpLSmUb$	$\Sigma P_{inq}$	Somatório das perdas relativas aos inqueimados	%	
$QpLUbc$	$P_{(C)r}$	Perdas associadas ao carbono inqueimado no resíduo	%	
$QpLWA$	$P_{hum.ar}$	Perdas associadas à humidade no ar	%	
$QpLWF$	$P_{(H_2O)f}$	Perdas associadas à água no combustível	%	
$QpP$	$P_p$	Perdas associadas à purga	%	
$QrBF$	$C_{qf}$	Créditos associados ao calor sensível no combustível	%	
$QrBSb$	$C_{qs}$	Créditos associados ao calor sensível no "sorbent"	%	
$QrBWAd$	$C_{hum.ad}$	Créditos associados a humidades adicionais	%	
$QrBX$	$C_{eq.aux}$	Créditos associados a equipamentos auxiliares	%	
$QrF$	$Q_f$	Energia associada ao combustível	$\frac{Btu}{h}$	$W$
$QrLAc$	$P_{pré-aq}$	Perdas associadas ao pré-aquecedor	%	
$QrLCIh$	$P_{calc.s}$	Perdas associadas à calcinação e desidratação do "sorbent"	%	
$QrLCw$	$P_{ag.fria}$	Perdas associadas à água fria	%	
$QrLRy$	$P_{c.rec}$	Perdas associadas a correntes recicladas	%	
$QrLsrc$	$P_{rad}$	Perdas por convecção e radiação	%	

<i>QrLWAd</i>	$P_{\text{hum.ad}}$	Perdas associadas à humidade adicional	%	
<i>QrLWSb</i>	$P_{\text{ag.s}}$	Perdas associadas à água no "sorbet"	%	
<i>Rhm</i>	$H_{\text{rel}}$	Humidade relativa	<i>massa / massa</i>	
<i>Sg</i>	$g_{\text{esp}}$	Gravidade específica a 16°C	<i>massa / massa</i>	
<i>TAEn</i>	$T(\text{ar})e$	Temperatura do ar à entrada do sistema	°C	
<i>Tae</i>	$Tae$	Temperatura da água à entrada do sistema	°F	°C
<i>Tdi</i>	$T_{\text{dif}}$	Diferença de temperaturas	°F	°C
<i>TFg</i>	$T_{\text{gc}}$	Temperatura dos gases de combustão	°F	°C
<i>TFgEn</i>	$T_{\text{gce}}$	Temperatura dos gases de combustão à entrada do sistema	°F	°C
<i>TFgLvCr</i>	$T_{\text{gcs}}$	Temperatura dos gases à saída do economizador	°F	°C
<i>TMnFgLvCr</i>				°C
<i>TMnA</i>	$T_{\text{ar}}$	Temperatura média do ar ambiente	°F	°C
<i>TMnAf</i>	$T_{\text{sup}}$	Temperatura média da superfície	°F	°C
<i>Tp</i>	$T_{\text{p}}$	Temperatura das purgas	°C	
<i>Tre</i>	$T_{\text{ref}}$	Temperatura de referência	°F	°C
<i>Va</i>	$V_{\text{ar}}$	Velocidade do ar	$\frac{ft}{seg}$	$\frac{m}{s}$
<i>VpCO</i>	$\%CO_{\text{gc}}$	CO nos gases de combustão	% volume	
<i>VpCO<sub>2</sub></i>	$\%CO_{2\text{gc}}$	CO <sub>2</sub> nos gases de combustão	% volume	
<i>VpH<sub>2</sub>O</i>	$\%H_{2}O_{\text{gc}}$	H <sub>2</sub> O nos gases de combustão	% volume	
<i>VpO<sub>2</sub></i>	$\%O_{2\text{gc}}$	O <sub>2</sub> nos gases de combustão	% volume	
<i>VpSO<sub>2</sub></i>	$\%SO_{2\text{gc}}$	SO <sub>2</sub> nos gases de combustão	% volume	
<i>XpA</i>	$X_{\text{pA}}$	Excesso de ar	% massa	

## ***Abreviaturas e Siglas***

**ADENE** – Agência Para a Energia;

**ASME** - American Society of Mechanical Engineers;

**ASTM** - American Society for Testing and Materials;

**DGEG** - Direção Geral de Energia e Geologia;

**DIN** - Instituto Alemão de Normatização;

**DN** – Diâmetro Nominal;

**ISO** – Organização Internacional de Normas;

**PN** – Pressão Nominal;

**PNAEE** – Plano Nacional de Eficiência Energética;

**RAR** – Refinaria de Açúcar Reunidas;

**RCOG** – RAR Cogeração.

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

A competitividade do mercado atual leva a que cada vez mais as empresas procurem melhorias no processo de produção e, acima de tudo, uma redução de custos. Sendo assim, um dos bons motivos de preocupação é a eficiência energética.

O Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) de 2016 engloba um conjunto de programas e medidas de melhoria de eficiência energética, consideradas fundamentais para que Portugal possa alcançar e superar os objetivos de poupança de energia. Das várias medidas contempladas estão previstas diversas ações de apoio a empresas do sector industrial, para que estas mais facilmente alcancem ganhos de eficiência energética e consequentemente reduzam a sua fatura energética [1].

Nesta vertente, os sistemas de combustão, como os geradores de vapor, assumem particular relevância devido essencialmente aos grandes consumos de energia, mas também devido à sua otimização. Estes consumos de energia em excesso, a que correspondem emissões de poluentes podem ter implicações diretas e indiretas na saúde e bem-estar do ser humano [1][2]. Por esta razão, torna-se importante implementar um procedimento de avaliação periódica destes equipamentos e atuar com exemplos como o isolamento térmico e limpeza de tubagens, que vão fazer a diferença no rendimento final [3].

Quanto à energia, de um modo geral o consumo primário mundial tem caído devido essencialmente à redução da utilização do carvão. No entanto, o consumo de produtos derivados do petróleo segue a tendência contrária, subindo nos últimos anos. Na Figura 1.1 é possível observar as várias energias primárias utilizadas em Portugal, assim como a sua percentagem de utilização e os valores de energia final em 2016 [4].

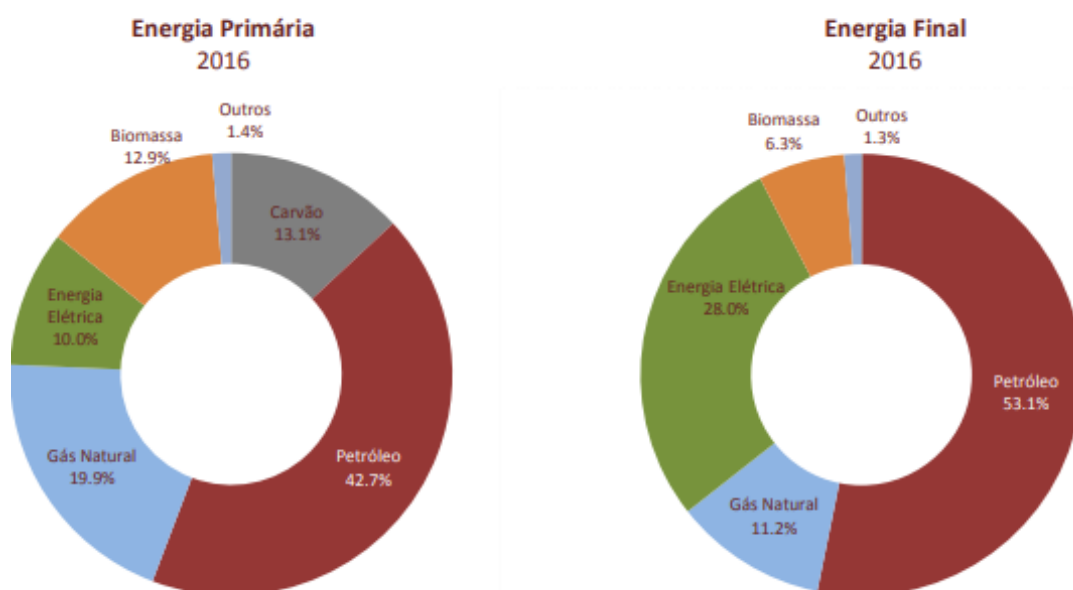


Figura 1.1. Divisão da energia primária e energia final consumidas em 2016 [4]

Como é possível observar na Figura 1.1 o petróleo foi o mais utilizado em 2016 seguido do gás natural e, o consumo destas energias em comparação com as importações e a produção nacional é representado na figura 1.2 [5].

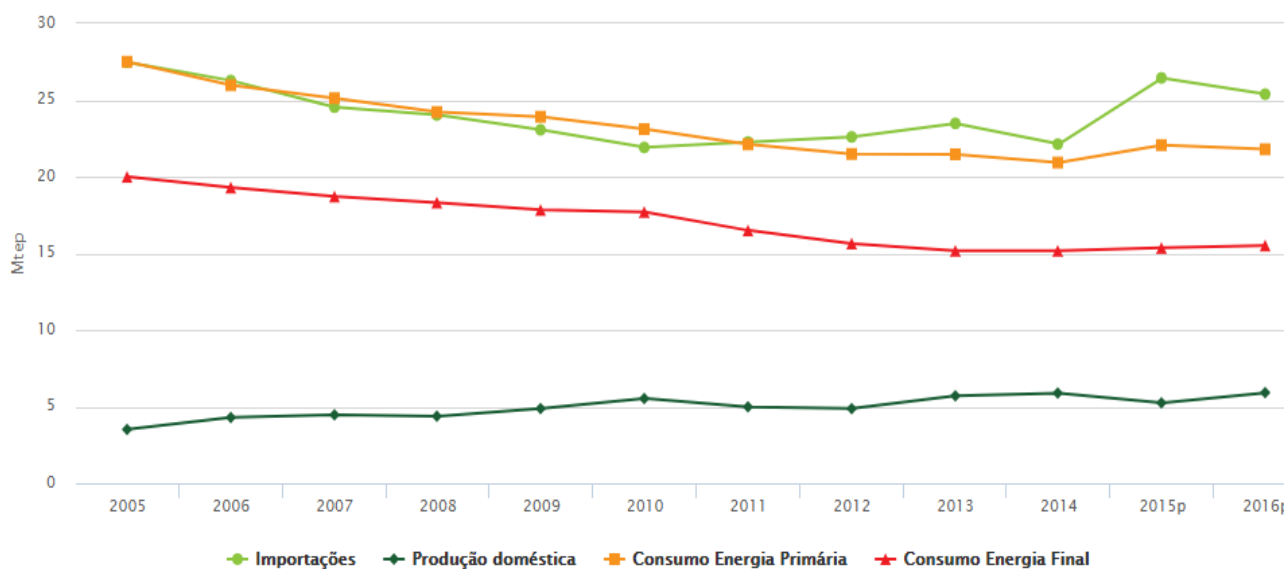


Figura 1.2 Evolução do balanço energético: importações, produção doméstica e consumos de energia primária e energia final entre os anos 2005 e 2016 [5]

Pela observação da Figura 1.2 é possível concluir que o consumo de energia, de forma geral, diminuiu ligeiramente nos últimos anos. No entanto, a produção doméstica no país continua a ser bastante inferior ao necessário. Por esta razão, é necessário

importar valores elevados de energia, sendo que em 2016 foram importados 25 Mtep (toneladas equivalentes de petróleo x  $10^6$ ) o que corresponde a  $1,05 \times 10^{15}$  kJ.

Na Figura 1.3 é possível perceber a dependência energética de Portugal (%) face ao exterior, ao longo dos últimos anos <sup>[5]</sup>.

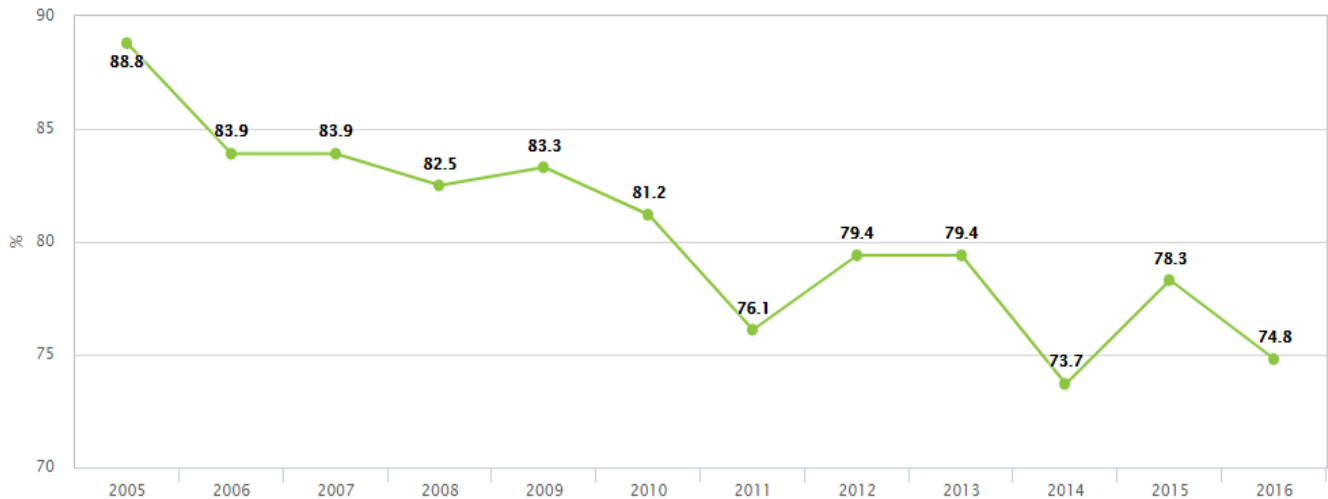


Figura 1.3 Dependência energética de Portugal face ao exterior entre os anos de 2005 e 2016 <sup>[5]</sup>

Da análise à Figura anterior pode-se concluir que a dependência, apesar de ter diminuído minimamente nos últimos 10 anos, continua a rondar valores bastante elevados, 74,8% em 2016.

## 1.2. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo principal determinar a eficiência energética da caldeira nº 2 da RAR Cogeração, primeiramente com o combustível habitualmente utilizado (nafta) e em seguida com um combustível alternativo, proveniente da lavagem dos depósitos de transporte marítimo do fuelóleo.

Inicialmente, interessa saber os parâmetros e as perdas energéticas que podem estar associados ao funcionamento de uma caldeira (gerador de vapor). Para tal, foi necessário consultar todas as normas atualmente em vigor e tentar aplicá-las de modo a obter um valor rigoroso de eficiência. Em síntese, será importante comparar alguns dos métodos disponíveis (direto, indiretos pela norma ASME PTC 4-2013 e pela ADENE) para o cálculo do rendimento de uma caldeira.

### 1.3. A Empresa

A RAR (Refinarias de Açúcar Reunidas) é uma empresa fundada em 1962 no Porto, a partir da concentração de nove pequenas unidades de refinação de açúcar da região norte [6].

Em 1967, a refinaria entra em atividade produzindo inicialmente 25000 toneladas por ano. Consegue nesse ano vender cerca de 22000 toneladas, correspondendo a 11,8% das vendas registadas em Portugal para este setor [7].

Nos anos seguintes a RAR aumenta a capacidade de produção da Refinaria, como forma de resposta ao crescente aumento das vendas e à progressão da quota de mercado da empresa. Em 1973 adquire a Refinaria Angola, situada em Matosinhos, e o seu volume de vendas passa a representar cerca de 45% do mercado nacional [7].

Atualmente, a RAR Açúcar detém uma capacidade produtiva anual a rondar as 160000 toneladas, sendo assim uma empresa de referência no mercado com vários produtos e serviços inovadores [6].

Na figura 1.4 é apresentada uma fotografia do edifício da RAR Açúcar atualmente [8].



Figura 1.4 Edifício da RAR [8]

A aposta na qualidade dos seus produtos garantiu à RAR, a certificação de qualidade pela norma NP EN ISO 9001, a certificação Ambiental pela norma ISO 14001 e a certificação em Segurança Alimentar pela norma NP EN ISO 22000, representados na Figura 1.5 [9].



Figura 1.5 Certificações ISO 9001, ISO 14001 E ISO 22000

Dentro do grupo RAR, existem várias empresas incluídas, como é o caso da RAR Cogeração que é constituída por duas centrais produtoras de energia térmica e elétrica, sendo que uma trabalha com gás natural e outra com fuelóleo, podendo também trabalhar com gás natural. Na primeira central, existe uma turbina *Centrax* e uma caldeira de recuperação, enquanto que na segunda estão incluídas as três caldeiras aquatubulares, estudadas neste trabalho, que produzem vapor sobreaquecido para a refinaria. Para além das caldeiras, nesta central existe ainda uma turbina (*KKK*) para expansão do vapor e posterior conversão em energia elétrica e térmica. No entanto, durante a realização deste estágio esta turbina esteve parada, encontrando-se apenas as suas caldeiras em funcionamento.

#### 1.4. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos, sendo que no primeiro capítulo é abordado o tema da energia nos dias de hoje, um enquadramento do tema, os objetivos e ainda um pouco da história da empresa onde se realizou experimentalmente o trabalho.

No segundo capítulo são abordados todos os conceitos teóricos necessários, como é o caso dos geradores de vapor e os seus componentes, combustíveis, rendimento, queimadores, emissões e impactos ambientais ou ainda do tratamento das águas de alimentação à caldeira.

O capítulo seguinte é focado nas condições operatórias das caldeiras, em especial da que foi estudada, a caldeira nº2 da RAR Cogeração.

No quarto capítulo apresentam-se os resultados mais revelantes deste estudo e a respetiva discussão. Neste capítulo encontra-se também a comparação dos resultados obtidos para o rendimento da caldeira utilizando os três métodos diferentes, para os dois tipos de combustível.

No capítulo cinco encontram-se sugestões de melhorias, de modo a obter um

reaproveitamento energético e não haver tantas perdas de calor no processo de produção de vapor, e ainda um estudo económico do projeto.

Por fim, no sexto capítulo são apresentadas todas as conclusões desta dissertação.

## 2. Estado da Tecnologia em estudo

Neste capítulo, serão abordados todos os conceitos necessários sobre a tecnologia utilizada no processo em estudo.

### 2.1. Caldeiras/Geradores de vapor

As caldeiras, também conhecidas como geradores de vapor, são construídas mediante projeto previamente aprovado pela DGEG (Direção Geral de Energia e Geologia) e de acordo com normas internacionais, como é o caso da ASME VIII e da NR-13 <sup>[10]</sup><sup>[11]</sup>.

Um gerador de vapor é um equipamento, sobre pressão, que tem como finalidade produzir vapor a partir da queima de um combustível. Neste equipamento, a corrente fria é a água, enquanto o fluido quente são os gases resultantes da combustão <sup>[12]</sup>.

#### 2.1.1. Caldeiras aquatubulares

As caldeiras aquatubulares, foco deste estudo, são caldeiras de maior porte em relação a outros tipos e são normalmente usadas em instalações industriais de maiores dimensões. Estas permitem a produção de vapor a pressões e temperaturas elevadas <sup>[13]</sup><sup>[14]</sup>. Na Figura 2.2 encontra-se representado um exemplo de um esquema de uma caldeira aquatubular.

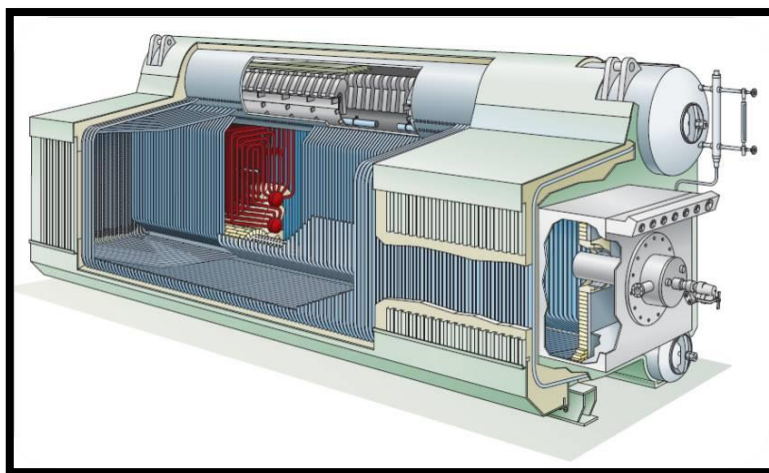


Figura 2.1 Esquema de uma caldeira aquatubular <sup>[15]</sup>

Em geral, o ar atmosférico passa por um pré-aquecedor antes de chegar à fornalha, onde se mistura com o combustível para se dar a combustão. Os gases quentes, produtos da combustão, circulam por todo o gerador até serem lançados na atmosfera.

Neste percurso cedem calor à água em diferentes fases, no aquecimento da água no economizador, na vaporização desta na caldeira e ainda na transformação do vapor saturado em vapor sobreaquecido no sobreaquecedor <sup>[14]</sup> <sup>[16]</sup>.

A flexibilidade permitida pelo arranjo dos tubos nestas caldeiras possibilita uma vasta variedade de tipos construtivos, como é o caso dos tubos retos e dos tubos curvos <sup>[14]</sup>. Estas caldeiras funcionam também com os mais diversos tipos de combustível, inclusive com biomassas de baixo poder calorífico <sup>[14]</sup> <sup>[17]</sup>.

Em relação à durabilidade, algumas podem chegar a funcionar durante 30 anos dependendo da limpeza e manutenção. Esta limpeza e substituição dos tubos não é difícil porque há espaço suficiente <sup>[18]</sup>.

No entanto, estes equipamentos são dispendiosos no investimento inicial e requerem uma atenção em relação ao nível da água, uma vez que têm grande vaporização <sup>[19]</sup>.

## 2.2. Componentes de uma caldeira

Nos componentes da caldeira destacam-se a fornalha, a câmara de combustão, o queimador, o sobreaquecedor, o economizador, o pré-aquecedor e a chaminé <sup>[14]</sup>.

A descrição de cada um destes componentes está presente na Tabela 2.1.

*Tabela 2.1 Descrição dos componentes de uma caldeira*

Componente	Descrição
<b>Fornalha</b>	Local onde se inicia o processo de queima do combustível (líquido, gasoso ou sólido) <sup>[14]</sup>
<b>Câmara de combustão</b>	Volume onde se deve consumir todo o combustível antes de os produtos de combustão atingirem e penetrarem no feixe de tubos <sup>[14]</sup>
<b>Queimador</b>	Peça destinada a promover, de forma adequada e eficiente, a queima dos combustíveis em suspensão <sup>[20]</sup>
<b>Sobreaquecedor</b>	Responsável pela elevação da temperatura do vapor saturado gerado na caldeira <sup>[14]</sup>
<b>Economizador</b>	Tem a finalidade de aquecer a água de alimentação da caldeira <sup>[21]</sup>
<b>Pré-aquecedor</b>	Tem a finalidade de aquecer o ar de alimentação. Neste caso, a caldeira usada não tem um pré-aquecedor de ar <sup>[14]</sup>
<b>Chaminé</b>	É o componente que garante a expulsão dos gases de combustão para o meio ambiente <sup>[14]</sup>

## 2.3. Combustíveis

Existem vários combustíveis com as características necessárias para ser usados numa caldeira e estes podem ser sólidos, líquidos ou gasosos. Neste caso vai se dar mais importância aos combustíveis líquidos uma vez que são os utilizados para esta dissertação.

Os combustíveis líquidos podem ser minerais ou não minerais. Os não minerais são os álcoois e os óleos vegetais e entre os álcoois existe o metílico e o etílico, enquanto que os óleos vegetais são formados por H, C, O e N. Quanto aos minerais são obtidos pela refinação do petróleo ou pela hidrogenação de carvão. Estes combustíveis são essencialmente formados por hidrocarbonetos, ou seja, compostos químicos constituídos por átomos de C e H unidos tetraedricamente [21].

A nafta usada faz parte deste grupo de combustíveis líquidos e apresenta algumas características que devem ser levadas em consideração, como é o exemplo do poder calorífico e da sua volatilidade [21]. O poder calorífico divide-se normalmente em poder calorífico superior (PCS ou HHVF) e poder calorífico inferior (PCI ou LVHF) e pode ser definido como uma via para expressar a energia interna. Esta energia do combustível corresponde ao potencial de aquecimento, expresso em energia por unidade de massa [22] [23].

### 2.3.1. Nafta – Combustível

O combustível, a operar habitualmente na caldeira em estudo, é um fuelóleo nº4, também conhecido como nafta, proveniente da GALP. Este é derivado do petróleo, obtido essencialmente através de métodos como a destilação direta, craqueamento catalítico ou pelo hidrocrackeamento do gasóleo de vácuo. Este combustível tem um ponto de ebulição no intervalo 30-200°C e tem na sua composição maioritariamente hidrocarbonetos na faixa de C<sub>5</sub>-C<sub>12</sub> e pequenas quantidades de enxofre e azoto [24] [25].

O estudo da composição exata do combustível torna-se importante quando se está a trabalhar numa caldeira e se tenciona saber o seu rendimento. A caracterização elementar do combustível utilizado na caldeira nº 2 da RAR Cogeração foi fornecida pela Galp em Maio de 2018 e é apresentada na Tabela 2.2. A análise dos componentes C e H, presentes em maior quantidade, foi feita segundo a norma ASTM D5291-16, a determinação das cinzas foi realizada segundo a norma ASTM D5347-01 e a humidade foi calculada pela diferença de todos os restantes parâmetros.

Tabela 2.2 Composição da nafta usada nos estudos efetuados [26]

Constituintes	%
C	87,49
H <sub>2</sub>	10,64
S	1,00
N <sub>2</sub>	0,60
Cinzas	0,15
H <sub>2</sub> O	0,12

O poder calorífico inferior deste combustível foi de 40200 kJ/kg, como é demonstrado no anexo A1 [27].

### 2.3.2. Combustível alternativo

O combustível alternativo em estudo vem de uma empresa denominada *Ecoslops*, que produz combustível através de resíduos provenientes da lavagem dos tanques de armazenamento do fuelóleo em barco. Este combustível é um fuelóleo nº3 e o objetivo principal será realizar o projeto de inclusão deste na caldeira nº2 da RAR. Este novo combustível estava já referenciado pela RAR desde 2015, e com a realização desta dissertação foram reatadas as conversações com a empresa do mesmo.

Os navios petrolíferos, de uma maneira geral produzem resíduos a que se dá o nome de *slops*. Estes são misturas heterogéneas de combustível não queimado, água e sedimentos, que vão ser uma grande fonte de poluição marinha. Estima-se que um navio movido por um motor de 50000 cavalos consuma cerca de 180 toneladas de fuelóleo diariamente, e gere 1,6 toneladas de sedimentos [28]. Na Figura 2.2 apresenta-se uma estimativa dos resíduos gerados anualmente através destes navios.

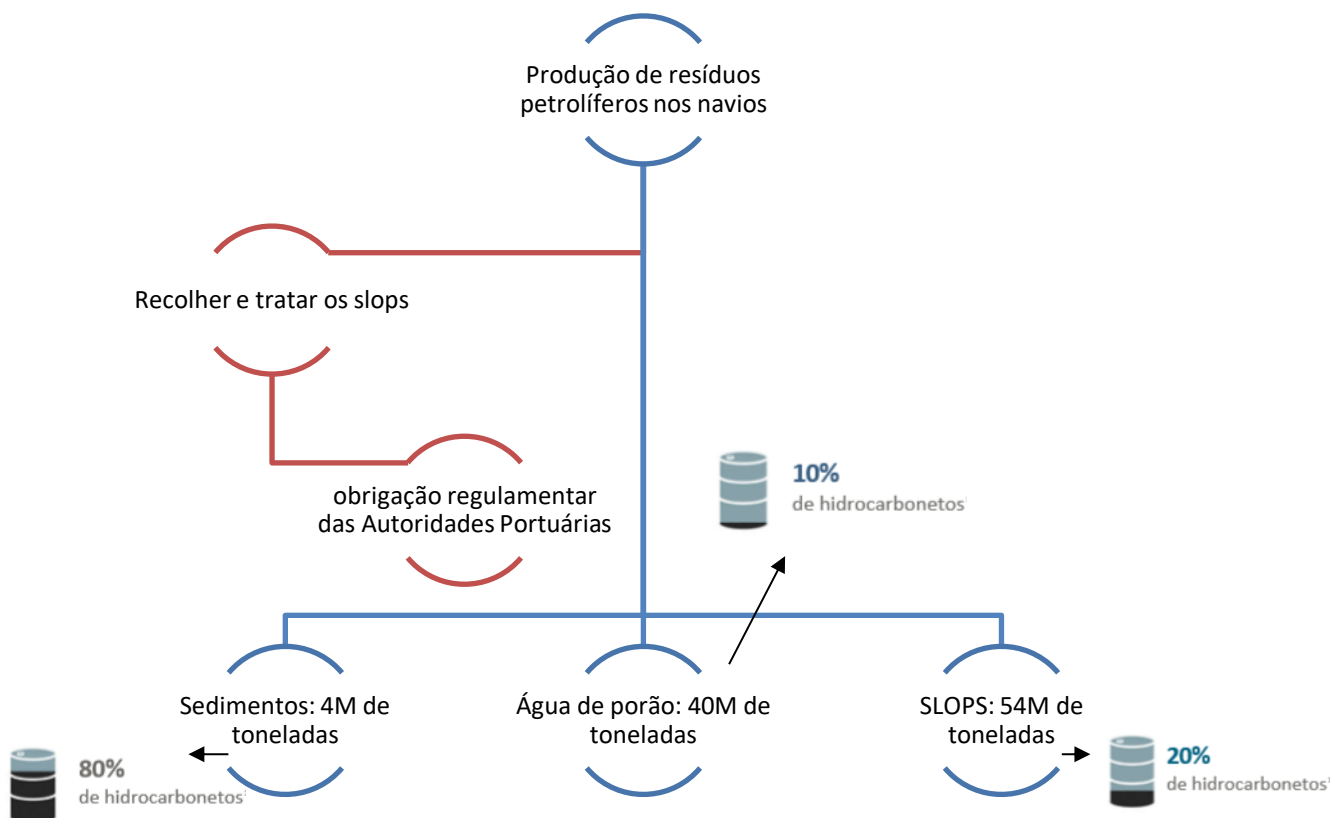


Figura 2.2 Resíduos petrolíferos gerados anualmente a partir dos navios (adaptado de [28])

Inicialmente a recolha destes resíduos com hidrocarbonetos é feita, e depois é realizada uma separação dos sedimentos, água e hidrocarbonetos a partir de processos de desidratação, filtração, decantação e centrifugação. A água poluída vai para uma estação de tratamento de águas, enquanto que os hidrocarbonetos vão diretamente para uma unidade de destilação. Nesta unidade são produzidos os combustíveis marítimos e o betume. Para este estudo vai interessar um dos combustíveis marítimos (ver Figura 2.3) [28].



Figura 2.3 Processo de coleta e produção do combustível marítimo utilizado [28]

Os hidrocarbonetos recolhidos na unidade de destilação são levados a um forno, que atinge os 400°C. Em seguida, estes passam pela coluna de destilação dando origem aos combustíveis apresentados na Figura 2.4. A tecnologia da *Ecoslops* permite extrair cerca de 80% de combustíveis marítimos conforme a norma ISO 8217 [28].

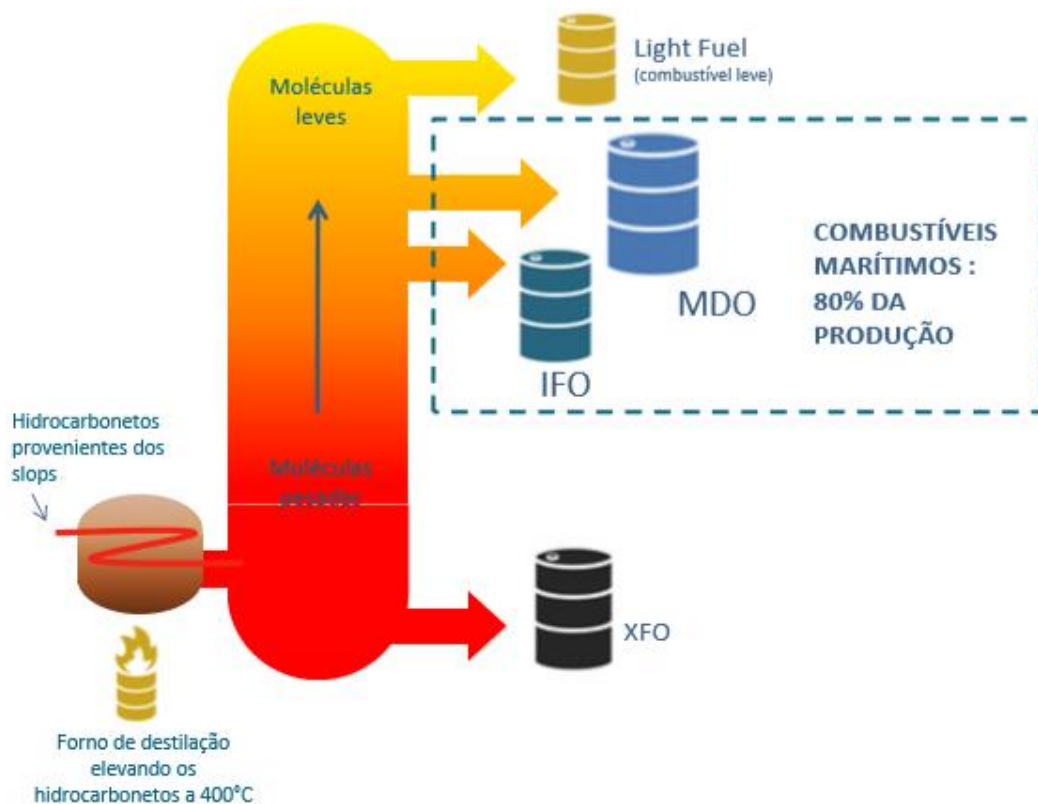


Figura 2.4 Refinação otimizada dos slops para produzir combustíveis marítimos [28]

A composição do combustível marítimo utilizado é representada na Tabela 2.3.

*Tabela 2.3 Composição do combustível alternativo [29]*

Constituintes	%
C	85,95
H <sub>2</sub>	13,00
S	0,80
N <sub>2</sub>	0,10
Cinzas	0,05
H <sub>2</sub> O	0,10

O poder calorífico inferior deste combustível é de 42340 kJ/kg, como é demonstrado no anexo A2.

## 2.4. Rendimento de geradores de vapor

O rendimento energético de uma caldeira indica o quanto esta se aproxima de um comportamento ideal. A presença de perdas vai sempre significar uma maior despesa para a empresa, procurando-se por isso novas formas de as minimizar [14].

Neste tópico serão analisados os métodos para o cálculo do rendimento de caldeiras, apresentando todas as fórmulas envolvidas. Os dois métodos mais frequentes para calcular a eficiência são o método direto e o indireto [30].

### 2.4.1. Escolha do método de cálculo do rendimento de uma caldeira

Para este estudo procedeu-se à pesquisa de normas que apresentassem os dois métodos de cálculo referidos tendo-se concluído que as mais acreditadas são as normas ASME e as normas DIN. Embora cada uma destas normas utilize parâmetros diferentes, a literatura diz que é possível obter uma diferença próxima dos 10% em determinações na mesma caldeira utilizando os métodos indiretos da norma ASME PTC 4-2013 e da norma alemã DIN 1994-02 [14].

O cálculo usado atualmente em Portugal é proposto pela ADENE (Agência Para a Energia) e baseia-se no método indireto, apesar de não englobar todas as perdas presentes da norma ASME. Mesmo assim, optou-se por incluir este cálculo para análise comparativa.

O método direto não costuma ser tão utilizado, embora mais simples não fornece informações sobre as principais perdas energéticas existente no sistema em estudo. Para além disto, é também necessário saber rigorosamente os parâmetros incluídos na fórmula de cálculo (ver subcapítulo 2.4.4), o que nem sempre é possível. Por estas razões, o método escolhido para determinar o rendimento de uma caldeira foi o indireto.

## 2.4.2. Método indireto segundo a norma ASME PTC 4-2013 <sup>[31]</sup>

O rendimento de uma caldeira, de acordo com esta norma, é calculado a partir da equação 1, que depois de simplificada, resulta na equação 2.

$$EF = \frac{Qf - (Perdas - Créditos) * Qf}{Qf} * 100 \quad (1)$$

Em que:

$Qf$ – Calor associado ao combustível (J/s);

$EF$ – Rendimento da caldeira (%).

$$EF = 100 - (Perdas - Créditos) \quad (2)$$

As perdas e créditos referidos na norma são apresentados nas Tabelas 2.4 e 2.5, respetivamente.

*Tabela 2.4 Perdas numa caldeira, segunda a norma ASME PTC 4-2013*

Parâmetro	Perda associada
$P_{gs}$	Gases secos
$P_{H_2}$	Água formada a partir da queima de $H_2$ do combustível
$P_{H_2O_f}$	Água no combustível líquido
$P_{(hum)ar}$	Humidade do ar
$\Sigma P_{inq}$	Somatório das perdas nos inqueimados
$P_{rad}$	Radiação e convecção
$P_P$	Purgas
$P_{Hc}$	Hidrocarbonetos nos gases de combustão
$P_{res}$	Calor sensível do resíduo
$P_{Pr}$	Pulverizador
$P_{eq.ar}$	Equipamento de controlo do ar
$P_{inf.ar}$	Infiltração de ar
$P_{NO_x}$	Formação de $NO_x$
$P_{hum.ad}$	Humidade adicional
$P_{calc.s}$	Calcinação e desidratação do <i>sorbent</i> *
$P_{ag.s}$	Água no <i>sorbent</i> *
$P_{c.rec}$	Correntes recicladas
$P_{ag.fria}$	Equipamentos de água fria exteriores à caldeira, e que retirem energia desta
$P_{pré-aq}$	Pré-aquecedor

Tabela 2.5 Créditos numa caldeira, segundo a norma ASME PTC 4-2013

Parâmetro	Crédito devido
$C_{ar.seco}$	Entrada de energia relativa ao ar seco
$C_{hum.ar}$	Humidade do ar à entrada da caldeira
$C_{qf}$	Calor sensível no combustível
$C_{sulf}$	Sulfonação
$C_{eq.aux}$	Equipamentos auxiliares a interferir nos balanços
$C_{qs}$	Calor sensível no <i>sorbent</i> *
$C_{hum.ad}$	Humidade adicional

O termo “*sorbent*”, muitas vezes referido na norma, corresponde a um composto químico que é adicionado para reagir com alguns poluentes, capturando-os. Neste trabalho não é usado nenhum produto com este objetivo, portanto todos os valores relacionados com este termo serão nulos.

- Perdas

Em seguida, apresentam-se todas as equações relativas às perdas num gerador de vapor. Foi usada a letra **M** para representar fração mássica a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (em kg/J) e **Fm** para representar fração mássica.

- ✓ Perdas associadas aos gases secos ( $P_{gs}$ )

As perdas associadas aos gases secos são calculadas a partir da equação 3, que depende das equações 4 a 19.

$$P_{gs} = 100 * M_{gs} * H(gases)_s \quad (3)$$

Em que:

$P_{gs}$  – Perdas associadas aos gases secos (%);

$M_{gs}$  – Fração mássica de gases secos que saem do gerador de vapor a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

$H(gases)_s$  – Entalpia de gases de combustão à T de saída da caldeira (J/kg);

- Cálculo do **M** de gases secos

Para o cálculo usou-se a equação 4.

$$M_{gs} = M_{gc} - M_{hum}(gc) \quad (4)$$

Em que:

$M_{gc}$  – Fração mássica dos gases húmidos do combustível a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

$M_{hum}(gc)$  – Fração mássica de humidade total nos gases de combustão a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

❖ Cálculo do **M** de gases de combustão

Para o cálculo usou-se a equação 5, que tem por base a soma das equações 6, 8 e 12.

$$\begin{aligned} M_{gc} &= M_{Arseco} + M_{hum}(ar) + M_{gh} + M(CO_2)s + M(H_2O)s \\ &\quad + M(H_2O)ad \\ &= M_{Arseco} + M_{hum}(ar) + M_{gh} \quad (5) \end{aligned}$$

Em que:

$M_{Arseco}$  – Fração mássica de ar seco correspondente ao excesso de ar usado a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

$M_{hum}(ar)$  – Fração mássica de água relativa à humidade do ar a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

$M_{gh}$  – Fração mássica de gás húmido a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

$M(CO_2)s$  – Fluxo mássico de CO<sub>2</sub> no “*sorbent*” \*;

$M(H_2O)s$  – Fluxo mássico de água no “*sorbent*” \*;

$M(H_2O)ad$  – Fluxo mássico de humidade adicional nos gases de combustão \*\*.

\*Como não existe “*sorbent*” neste caso, estes valores serão iguais a 0.

\*\* Também não foi considerada nenhuma humidade adicional, logo este valor é igual a 0.

O cálculo do **M** de ar seco é realizado com base na equação 6.

$$M_{Arseco} = M(ar)f * \left(1 + \frac{XpA}{100}\right) \quad (6)$$

Em que:

$M(ar)f$  – Fração mássica de ar teórico a dividir pelo poder calorífico superior do

combustível (kg/J);

$X_{pA}$  – Excesso de ar (%).

O  $M$  de ar teórico é calculado a partir da equação 7.

$$M(ar)f = \frac{Fm(ar)t}{PCS} \quad (7)$$

Em que:

$Fm(ar)t$  – Fração mássica de ar teórico (kg/kg);

$PCS$  – Poder Calorífico Superior do combustível (J/kg).

O  $M$  de água relativo à humidade do ar é calculado a partir da equação 8.

$$Mhum(ar) = Fm(hum)ar_s * MArseco \quad (8)$$

Em que:

$Fm(hum)ar_s$  – Fração mássica de humidade no ar seco (kg/kg de ar seco).

A fração mássica de humidade no ar seco é calculada a partir da equação seguinte, equação 9.

$$Fm(hum)ar_s = 0,622 * \left( \frac{Pp(H_2O)ar}{Pa - Pp(H_2O)ar} \right) \quad (9)$$

Em que:

$Pp(H_2O)ar$  – Pressão parcial do vapor de água no ar (psia);

$Pa$  - Pressão barométrica do ar (psia).

A pressão parcial do vapor de água no ar é calculada a partir da equação 10.

$$Pp(H_2O)ar = 0,01 * Hrel * Ps(H_2O) \quad (10)$$

Em que:

$Ps(H_2O)$  – Pressão de saturação de vapor de água (psia)\*;

$Hrel$  – Humidade relativa no ar (%).

**Conversão:** \*1bar= 14,50 psia

A pressão de saturação de vapor de água é calculada a partir da equação 11.

$$P_s(H_2O) = 0,019257 + 1,289 * 10^{-3} * T + 1,21122 * 10^{-5} * T^2 + 4,534 * 10^{-7} * T^3 + 6,84188 * 10^{-11} * T^4 + 2,197092 * 10^{-11} T^5 \quad (11)$$

**Conversão:** T, em °F  $\longrightarrow$  1°C \* 1,8 + 32 = 33,8°F

O **M** de gás húmido no combustível é calculado a partir da equação 12.

$$M_{gh} = \frac{100 - \%cinzasf - \%Cinq. - FmS * \%Sf}{100 * PCS} \quad (12)$$

Em que:

**%cinzasf** – Percentagem de cinzas no combustível (%);

**%Cinq.** – Percentagem de carbono não queimado (%);

**FmS** – Fração em massa de captação de Enxofre (S) (kg/kg);

**%Sf** - Percentagem de Enxofre no combustível (%).

#### ❖ Cálculo do **M** de humidade nos gases de combustão

O **M** de humidade nos gases de combustão, é calculado a partir da equação 13.

$$\begin{aligned} M_{hum}(gc) &= M_{hum}(f) + M(H_2Ov)f + M_{hum}(H_2) + M(H_2O)s + M_{hum}(ar) \\ &\quad + M(H_2O)ad \\ &= M_{hum}(f) + M_{hum}(H_2) + M_{hum}(ar) \quad (13) \end{aligned}$$

Em que:

**M<sub>hum</sub>(f)** – Fração mássica de água a dividir pelo poder calorífico do combustível (kg/J);

**M(H<sub>2</sub>Ov)f** – Fração mássica de água no combustível gasoso a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (igual a 0 porque o combustível não é gasoso);

**M<sub>hum</sub>(H<sub>2</sub>)** – Fração de massa de água usado na combustão de H<sub>2</sub> do combustível a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

**M(H<sub>2</sub>O)s** – igual a 0 porque não existe “sorbent” \*;

**M<sub>hum</sub>(ar)** – Fração de massa de água proveniente da humidade no ar a dividir pelo poder calorífico do combustível (kg/J);

**M(H<sub>2</sub>O)ad** – igual a 0 porque não é considerada nenhuma humidade adicional \*\*.

O **M** de massa de água no combustível é calculado a partir da equação 14.

$$Mhum(f) = \frac{\%H_2Of}{100 * PCS} \quad (14)$$

Em que:

**%H<sub>2</sub>Of** – Percentagem de água no combustível (%).

O **M** de massa de água usado na combustão de hidrogénio do combustível é calculado a partir da equação 15.

$$Mhum(H_2) = 8,937 * \frac{\%H_2F}{100 * PCS} \quad (15)$$

Em que:

**%H<sub>2</sub>f** – percentagem mássica de H<sub>2</sub> no combustível (%).

➤ Cálculo da entalpia de gases de combustão

A entalpia dos gases de combustão é calculada a partir da equação 16.

$$H(gases)s = (C0 + C1T + C2T^2 + C3T^3 + C4T^4 + C5T^5) * 2326 \quad (16)$$

Em que:

**C0 a C5** – Constantes que dependem da temperatura;

**H(gases)s** – Entalpia de gases à temperatura de saída do economizador (J/kg).

**Conversão:** T, em °F → °C \* 1,8 + 32 = °F

✓ Perdas associadas à queima de H<sub>2</sub> do combustível (**P<sub>H2</sub>**)

As perdas associadas à queima de H<sub>2</sub> do combustível são calculadas a partir da equação 17, que depende das equações 18 e 19.

$$P_{H_2} = 100 * Mhum(H_2) * (H(vap)s - H(água)ref) \quad (17)$$

Em que:

$P_{H_2}$  – Perdas associadas à água formada a partir da queima de  $H_2$  do combustível (%);

$H(vap)s$  – Entalpia de vapor, à temperatura de saída dos gases do economizador (J/kg);

$H(água)ref$  – Entalpia da água à temperatura de referência, 25°C (J/kg);

$Mhum(H_2)$  – Fração mássica de água usada na combustão de  $H_2$  do combustível a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J).

➤ Cálculo do **M** de água usado na combustão de  $H_2$  do combustível

O cálculo do **M** de água na combustão de  $H_2$  do combustível é calculado a partir da equação 18.

$$Mhum(H_2) = 8,937 * \frac{\%H_2f}{100 * PCS} \quad (18)$$

Em que:

$\%H_2f$  – percentagem mássica de  $H_2$  no combustível (%).

➤ Cálculo da entalpia de vapor, à saída do economizador

O cálculo da entalpia de vapor à saída do economizador é calculado a partir da equação 19.

$$H(vap)s = (0,4329 * T + (3,958 * 10^{-5}) * T^2 + 1062,2) * 2326 \quad (19)$$

**Conversão:** T, em °F → °C \* 1,8 + 32 = °F

✓ Perdas associadas à água de um combustível líquido ( $P_{H_2O_f}$ )

As perdas associadas à água de um combustível líquido são calculadas a partir da equação 20.

$$P_{H_2O_f} = 100 * Mhum(f) * (H(vap)s - H(água)ref) \quad (20)$$

Em que:

$P_{H_2O_f}$  – Perdas associadas à água no combustível líquido (%);

$Mhum(f)$  – Fração mássica de água no combustível a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

$H(vap)s$  – Entalpia de vapor à temperatura de saída dos gases do economizador (J/kg);

$H(água)ref$  – Entalpia da água à temperatura de referência (J/kg).

✓ Perdas associadas à humidade do ar ( $P_{(hum)ar}$ )

As perdas associadas à humidade do ar são calculadas a partir da equação 21, que depende das equações 22 e 23.

$$P_{(hum)ar} = 100 * Fm(H_2O)ar * MArseco * H(vap)c \quad (21)$$

Em que:

$P_{(hum)ar}$  – Perdas associadas à humidade do ar (%);

$Fm(H_2O)ar$  – Fração mássica de humidade no ar, por massa de ar seco (massa/massa ar seco);

$MArseco$  – Fração mássica de ar seco correspondente ao excesso de ar usado a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

$H(vap)c$  – Entalpia de vapor à temperatura de saída dos gases do economizador corrigido (J/kg).

➤ Cálculo da fração mássica de humidade no ar

O cálculo da fração mássica de humidade no ar é feito a partir da equação 22.

$$Fm(H_2O)ar = \frac{Fm(hum)ars}{1 + Fm(hum)ars} \quad (22)$$

Em que:

$Fm(hum)ars$  – Fração mássica de humidade no ar seco (massa /massa de ar seco).

➤ Cálculo da entalpia de vapor, à saída do economizador corrigida

O cálculo da entalpia de vapor, à saída do economizador corrigida é baseado na equação 23.

$$H(vap)c = (0,4408 * T + (2,381 * 10^{-5}) * (T^2) + (9,638 * 10^{-9}) * (T^3) - 34,1) * 2326 \quad (23)$$

✓ Perdas nos inqueimados ( $\Sigma P_{inq}$ )

As perdas associadas às perdas nos inqueimados são calculadas a partir da equação 24, que depende das equações 25 a 33.

$$\Sigma P_{inq} = P_{CO} + P(C_{inq})r + P(H_2_{inq})r \quad (24)$$

➤ Cálculo das perdas associadas ao CO dos gases de combustão

O cálculo das perdas associadas ao CO nos gases de combustão é feito a partir da equação 25.

$$P_{CO} = \%CO_{gc} * MO_{arseco} * MMCO * \left( \frac{PCS(C)r}{PCS} \right) \quad (25)$$

Em que:

$P_{CO}$  – Perdas associadas ao CO nos gases de combustão (%);

$\%CO_{gc}$  – Percentagem do CO nos gases de combustão (%);

$MO_{arseco}$  – Moles de ar seco por massa de combustível;

$MMCO$  – Peso molecular do CO (28,09 kg/mol);

$PCS(C)r$  – Poder Calorífico Superior do Carbono (33700 kJ/kg);

❖ Cálculo de moles de ar seco

O cálculo de moles de ar seco por massa de combustível é feito a partir da equação 26.

$$MO_{arseco} = MOPr + MOar * (0,7905 + \left( \frac{XpA}{100} \right)) \quad (26)$$

Em que:

$MOPr$  – Moles de produtos secos no combustível (moles/massa combustível);

$MOar$  – Moles de ar teórico por massa de combustível (moles/massa combustível);

$XpA$  – Excesso de ar (%).

O cálculo de moles de produtos secos no combustível é realizado a partir da equação 27.

$$\begin{aligned}
 MOPr &= \left( \frac{\%Cq}{1201,1} \right) + (1 - FmS) * \left( \frac{\%Sf}{3206,5} \right) + \left( \frac{\%N_2f}{2801,34} \right) + MO(CO_2)_s \\
 &= \left( \frac{\%Cq}{1201,1} \right) + (1 - FmS) * \left( \frac{\%Sf}{3206,5} \right) + \left( \frac{\%N_2f}{2801,34} \right) \quad (27)
 \end{aligned}$$

Em que:

**%Cq** – Percentagem mássica de Carbono queimado;

**FmS** – Fração em massa de captação de Enxofre (S) (massa/massa fuel);

**%Sf** – Percentagem mássica de Enxofre no combustível;

**%N<sub>2</sub>f** – Percentagem mássica de azoto no combustível.

A fração em massa de captação de enxofre é calculada a partir da equação 28.

$$FmS = \frac{1 - \frac{\%SO_2gc * (MOPrt + MOar(SO_2) * (0,7905 + MOhum))}{100 * \left[ 1 - (1 + MOhum) * \frac{\%O_2gc}{20,95} \right] * MO(SO_2)f}}{1 + K \left( \frac{\frac{\%SO_2gc}{100}}{1 - (1 + MOhum) * \frac{\%O_2gc}{20,95}} \right)} \quad (28)$$

Em que:

**%SO<sub>2</sub>gc, %O<sub>2</sub>gc** - % volume do composto nos gases de combustão;

**MOPrt** – Moles de produtos produzidos (MOPr) mais moles de água no combustível, mistura adicional e “sorbent” (moles/kg combustível);

**MOar(SO<sub>2</sub>)** – Moles de ar teórico necessários para os produtos gaseificados do combustível se convertam em SO<sub>2</sub> (moles/kg combustível);

**MOhum** – Moles de humidade por moles de ar seco (moles/kg combustível);

**MO(SO<sub>2</sub>)f** – Teor máximo de SO<sub>2</sub> por massa de combustível (moles/kg combustível)

**K** – Constante que depende do MOhum.

O cálculo de moles de ar teórico necessários para que os produtos gaseificados do combustível, se convertam em SO<sub>2</sub>, baseia-se na equação 29.

$$\begin{aligned}
 MOar(SO_2) &= \left( \frac{1}{0,2095} \right) * \left( \left( \frac{\%Cq}{1201,1} \right) + \left( \frac{\%H_2f}{403,2} \right) + \left( \frac{\%Sf}{3206,5} \right) + \left( \frac{\%O_2f}{3199,9} \right) \right) \\
 &= \left( \frac{1}{0,2095} \right) * \left( \left( \frac{\%Cq}{1201,1} \right) + \left( \frac{\%H_2f}{403,2} \right) + \left( \frac{\%Sf}{3206,5} \right) \right) \quad (29)
 \end{aligned}$$

O cálculo de moles de humidade por moles de ar seco é realizado a partir da equação 33.

$$MO_{hum} = Fm(H_2O)_{ar} * 1,608 \quad (30)$$

Em que:

$Fm(H_2O)_{ar}$  – Fração mássica de humidade no ar por massa de ar seco (massa/massa ar seco);

A constante K, é calculada a partir da equação 31.

$$K = 2,387 * (0,7905 + MO_{hum}) - 1 \quad (31)$$

O cálculo do teor máximo de SO<sub>2</sub> por massa de combustível é feito a partir da equação 32.

$$MO(SO_2)_f = \frac{\%S_f}{3206,5} \quad (32)$$

O cálculo de moles de ar teórico por massa de combustível é feito a partir da equação 33.

$$MO_{ar} = \frac{Fm(ar)_t}{28,9625} \quad (33)$$

Em que:

$MO_{ar}$  – Moles de ar teórico por massa de combustível (moles/kg combustível).

$Fm(ar)_t$  – Fração mássico de ar teórico (kg/J);

O cálculo das perdas associadas ao C inqueimado no resíduo é feito a partir da equação 34.

$$P(Cinq)_r = \%Cinq * \frac{PCS(C)_r}{PCS} \quad (34)$$

Em que:

$P(Cinq)_r$  – Perdas associadas ao carbono inqueimado no resíduo (%);

$\%Cinq$  – Percentagem de carbono inqueimado (%);

$PCS(C)_r$  – Poder calorífico superior do carbono no resíduo (33700 kJ/kg).

O cálculo da percentagem de carbono inqueimado no resíduo é feito a partir da equação 35.

$$\%C_{inq} = \%C(inq)_r * F_{mr} \quad (35)$$

Em que:

***F<sub>mr</sub>*** – Fração mássica de resíduo (kg/kg).

O cálculo da fração mássica de resíduo é feito a partir da equação 36.

$$F_{mr} = \frac{\%cinzas_f + 100 * F_{msorb}}{100 - \%C(inq)_r} \quad (36)$$

Em que:

***%cinzas<sub>f</sub>*** – Percentagem de cinzas no combustível (%);

***F<sub>msorb</sub>*** – Fração mássica de sorbent (kg/kg).

Quanto à ***P(H<sub>2</sub>inq)<sub>r</sub>*** considerou-se igual a 0 por ser muito reduzida e devido ao facto de não ter sido possível medir o hidrogénio presente no resíduo.

✓ Perdas associadas à radiação e convecção (***P<sub>rad</sub>***)

As perdas associadas à radiação e convecção são calculadas a partir da equação 37, que depende das equações 38 e 39.

$$P_{rad} = C1 * (H_{conv} + H_{rad}) * A * (T_{sup} - T_{ar}) \quad (37)$$

Em que:

***P<sub>rad</sub>*** – Perdas associadas à radiação e convecção (%);

***C1*** – Constante = 0,293 W;

***H<sub>conv</sub>*** – Coeficiente de transferência de calor por convecção (Btu/ft<sup>2</sup>·h·F);

***H<sub>rad</sub>*** – Coeficiente de transferência de calor por radiação (Btu/ft<sup>2</sup>·h·F);

***A*** – Área do gerador de vapor (ft<sup>2</sup>);

***T<sub>sup</sub>*** - Temperatura média da superfície (F);

***T<sub>ar</sub>*** - Temperatura média do ar ambiente (F).

Esta fórmula necessita de ter ***H<sub>conv</sub>***, ***H<sub>rad</sub>*** e as temperaturas nas unidades da

norma, em vez de unidades SI. No entanto, como **C1** está em [W], **P<sub>rad</sub>** vai ficar em [W].

**Conversão:** **T**, em °F → °C \* 1,8 + 32 = °F

**A**, em ft<sup>2</sup> → m<sup>2</sup> \* 10,764 = ft<sup>2</sup>

➤ Cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção

O cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção é realizado a partir da equação 38.

$$H_{conv} = 0,2 * (T_{sup} - T_{ar})^{0,33} \quad (38)$$

➤ Cálculo do coeficiente de transferência de calor por radiação

O cálculo do coeficiente de transferência de calor por radiação é realizado a partir da equação 39.

$$H_{rad} = 0,847 + (2,367 * 10^{-3})T_{dif} + (2,94 * 10^{-6}) * (T_{dif}^2) + (1,37 * 10^{-9}) * (T_{dif}^3) \quad (39)$$

Em que:

**T<sub>dif</sub>** – Diferença entre T<sub>sup</sub> e T<sub>ar</sub>.

✓ Perdas associadas às purgas (**P<sub>p</sub>**)

As perdas associadas às purgas são calculadas a partir da equação 40, que depende das equações 41 a 44.

$$P_p = \frac{(T_p - T_{ae}) * p * (100 - E_p)}{(T_p - T_{ae}) * p + (100 - p) * (660 - T_{ae})} \quad (40)$$

Em que:

**P<sub>p</sub>** – Perdas associadas às purgas;

**T<sub>p</sub>** – Temperatura das purgas (°C);

**T<sub>ae</sub>** – Temperatura da água à entrada do economizador (°C);

**p** - % das purgas em relação ao total de água de alimentação da caldeira;

**E<sub>p</sub>** - Todas as perdas anteriores.

➤ Cálculo da temperatura das purgas

O cálculo da temperatura das purgas é baseado na equação 41.

$$T_p = \frac{(P_v + 1) * \left(\frac{101,3}{1000}\right) + 7,4408}{0,0444} \quad (41)$$

Em que:

**$P_v$**  – Pressão de vapor da caldeira (à T de saturação).

A expressão anterior baseou-se na equação 42 obtida através das tabelas termodinâmicas:

$$P = 0,0444 * T - 7,4408 \quad (42)$$

➤ Cálculo do p (%purgas)

O cálculo da percentagem de purgas é realizado a partir da equação 43.

$$p = \frac{Mr_p}{Mr_{H_2O}} * 100 \quad (43)$$

Em que:

**$Mr_p$**  – Caudal mássico de purgas (ton/h);

**$Mr_{H_2O}$**  – Caudal mássico de água (ton/h).

❖ Cálculo do caudal mássico de purgas

O cálculo do caudal mássico de purgas é realizado a partir da equação 44.

$$Mr_p = \frac{(Mr_{H_2O} * TDS_f)}{TDS_c} \quad (44)$$

Em que:

**$TDS_f$**  – Total de sólidos dissolvidos na alimentação (mg/L);

**$TDS_c$**  – Total de sólidos dissolvidos na caldeira (mg/L).

✓ Perdas associadas aos hidrocarbonetos ( $P_{Hc}$ )

As perdas associadas aos hidrocarbonetos são calculadas a partir da equação 45.

$$P_{Hc} = \%Hcgc * MOarseco * MMHc * \left( \frac{PCSHc}{PCS} \right) \quad (45)$$

Em que:

$P_{Hc}$  – Perdas associadas aos hidrocarbonetos nos gases de combustão (%);

$\%Hcgc$  – Quantidade de hidrocarbonetos nos gases de combustão medidos em base seca (% volume);

$MOarseco$  – Moles de gás seco por kg de combustível (moles/kg combustível);

$MMHc$  – Peso molecular dos hidrocarbonetos (massa/moles);

$PCSHc$  – Poder Calorífico Superior dos hidrocarbonetos (J/kg);

$PCS$  – Poder Calorífico Superior (J/kg).

✓ Perdas associadas ao calor sensível do resíduo ( $P_{res}$ )

O cálculo das perdas associadas ao calor sensível do resíduo é baseado na equação seguinte, equação 46.

$$P_{res} = Mres * HRs * 100 \quad (46)$$

Em que:

$P_{res}$  – Perdas associadas ao calor sensível do resíduo (%);

$Mres$  – Fração mássica de resíduo a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

$HRs$  – Entalpia do resíduo (J/kg).

Esta perda foi aproximada a 0, uma vez que para além de ser difícil contabilizar a fração mássica de resíduo gerado na caldeira, a percentagem de cinzas também é muito baixa. Sendo assim, e visto que não há “sorbent”, esta perda terá um valor muito próximo de 0.

Em seguida são apresentadas as razões, para as restantes perdas serem iguais a 0.

$P_{pr} = 0$ , uma vez que não existe pulverizador;

- $P_{eq.ar} = 0$ , uma vez que não existe equipamento de controlo do ar;
- $P_{inf.ar} = 0$ , uma vez que é muito difícil de medir;
- $P_{NOx} = 0$ , uma vez que não existe formação de NOx;
- $P_{hum.ad} = 0$ , uma vez que não existe humidade adicional;
- $P_{calc.s} = 0$ , uma vez que não existe “sorbent”;
- $P_{ag.s} = 0$ , uma vez que não existe “sorbent”;
- $P_{c.rec} = 0$ , uma vez que não existem correntes recicladas;
- $P_{ag.fria} = 0$ , porque não vai existir nenhum equipamento que utilize água fria, exterior à caldeira e retire energia da mesma;
- $P_{pré-aq} = 0$ , porque não existe um pré-aquecedor de ar.

- Créditos

- ✓ Créditos associadas ao ar seco ( $C_{arseco}$ )

Os créditos associados ao ar seco são calculados a partir da equação 47.

$$C_{arseco} = 100 * Marseco * H(ar)e \quad (47)$$

Em que:

**$C_{arseco}$**  – Crédito devido à entrada de energia relativa ao ar seco (%);

**$Marseco$**  – Fração mássica de ar seco correspondente ao excesso de ar usado a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

**$H(ar)e$**  – Entalpia do ar seco à temperatura ambiente (J/kg).

- ✓ Créditos associados à humidade do ar ( $C_{hum.ar}$ )

Os créditos associados à humidade do ar são calculados a partir da equação 48.

$$C_{hum.ar} = 100 * Fm(H2O)ar * Marseco * H(vap)e \quad (48)$$

Em que:

**$C_{hum.ar}$**  – Crédito devido à humidade do ar à entrada da caldeira (%);

**$Fm(H2O)ar$**  – Massa de humidade no ar por massa de ar seco (massa/massa ar seco);

**$H(vap)e$**  – Entalpia do vapor à temperatura de entrada do ar na caldeira (J/kg).

- ✓ Créditos devido ao calor sensível no combustível ( $C_{qf}$ )

Os créditos associados ao calor sensível no combustível são calculados a partir da equação 49.

$$C_{qf} = 100 * \frac{Hf}{PCS} \quad (49)$$

Em que:

**$C_{qf}$** – Crédito devido ao calor sensível no combustível (%);

**$Hf$** – Entalpia do combustível (J/kg).

Em seguida são apresentadas as razões para os restantes créditos serem iguais a 0.

$C_{sulf} = 0$ , uma vez que não existe sulfonação;

$C_{eq.aux} = 0$ , pois não existem equipamentos auxiliares a interferir no balanço;

$C_{qs} = 0$ , uma vez que não existe "sorbent";

$C_{hum.ad} = 0$ , uma vez que não existe humidade adicional.

- Energia associada ao combustível

A energia associada ao combustível é calculada a partir da equação 50.

$$Qf = Mrf * PCS \quad (50)$$

Em que:

**$Qf$** – Energia associada ao combustível (J/s);

**$Mrf$** – Caudal mássico de combustível (kg/s);

**$PCS$** – Poder Calorífico Superior (J/kg).

- Entalpias

➤ Entalpia do combustível:

A entalpia do combustível é calculada a partir da equação 51, que depende das equações 52 e 53.

$$H_f = 2326 * (C1 + C2 * API + C3 * T + C4 * API * T + (C5 + C6 * API) * T^2) \quad (51)$$

Sendo que:

$$API = (141.5 - 131.5g_{esp})/g_{esp} \quad (52)$$

$$g_{esp} = \frac{\rho}{62,4} \quad (53)$$

Em que:

$g_{esp}$  – Gravidade específica (kg/kg)

A entalpia do ar e a entalpia do vapor de água vão ser ambas calculadas à temperatura de entrada do ar no sistema, segundo a fórmula 54, e segundo as figuras 5-19.1 e 5-19.2 da norma.

$$H = cp * (T - 77) \quad (54)$$

Em que:

$cp$  - Calor específico ( $\frac{Btu}{lbm.F}$ ) – consultar figuras da norma

### 2.4.3. Método indireto, proposto pela ADENE <sup>[1]</sup>

Segundo a ADENE, o rendimento é calculado apenas pela subtração das perdas, sendo que não são consideradas tantas perdas como na norma. As perdas consideradas estão representadas na tabela 2.6.

*Tabela 2.6 Perdas segundo o método indireto, proposto pela ADENE*

<b>Parâmetro</b>	<b>Perdas associadas</b>
<b>P<sub>cv</sub></b>	combustível nas cinzas volantes
<b>P<sub>cf</sub></b>	combustível nas cinzas de fundo
<b>P<sub>gc</sub></b>	calor sensível nos gases secos de combustão
<b>P<sub>H2O</sub></b>	entalpia do vapor de água nos gases de combustão
<b>P<sub>co</sub></b>	inqueimados nos gases de combustão
<b>Prad</b>	radiação e convecção
<b>Pp</b>	purgas

O rendimento neste caso não envolve os créditos e será igual a:

$$EF = 100 - \text{perdas} \quad (55)$$

Tanto a perda  $P_{cv}$  como a perda  $P_{cf}$  são apenas aplicadas a combustíveis sólidos. Uma vez que neste caso o combustível é líquido, estas perdas são desprezadas.

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

O cálculo das perdas associadas ao calor sensível nos gases secos de combustão é baseado na equação 56.

$$P_{gc} = \frac{k2 * (T_{gcs} - T(ar)e)}{\%CO_{2gc}} \quad (56)$$

Em que:

$k2$  – Constante que depende do combustível;

$T_{gcs}$  – Temperatura dos gases à saída da caldeira (°C);

$T(ar)e$  – Temperatura do ar à entrada da caldeira (°C);

$\%CO_{2gc}$  - % de CO<sub>2</sub> nos gases de combustão.

A escolha do  $k2$  é feita a partir da tabela 2.7, em que os valores são baseados nos Poderes Caloríficos Inferiores:

*Tabela 2.7 Valores de  $k2$  em função do combustível utilizado*

Combustível	$k2$
Carvão betuminoso	0,66
Gasóleo	0,51
Thick, thin, burner, óleos	0,54
Propano	0,45
Gás natural	0,35

Os valores de  $k2$  podem ainda ser calculados através da equação 57, para qualquer combustível:

$$k2 = \frac{255 * \%Cf}{PCI} \quad (57)$$

Em que:

$\%Cf$  – % C no combustível;

$PCI$  – Poder Calorífico Inferior do combustível (kJ/kg).

- ✓ Perdas associadas à entalpia do vapor de água nos gases de combustão ( $P_{H_2O}$ )

O cálculo das perdas associadas à entalpia do vapor de água nos gases de combustão é baseado na equação 58.

$$P_{H_2O} = \frac{(\%H_2Of + 9\%H_2f) * (210 - 4,2 * T(ar)e + 2,1 * Tgcs)}{PCI} \quad (58)$$

Em que:

$\%H_2Of$  – % humidade no combustível;

$\%H_2f$  – % H<sub>2</sub> no combustível;

$Tgcs$  – Temperatura dos gases à saída da caldeira (°C);

$T(ar)e$  – Temperatura do ar à entrada da caldeira (°C).

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

O cálculo das perdas associadas aos inqueimados nos gases de combustão é baseado na equação 59.

$$P_{co} = \frac{k3 * \%COgc}{\%COgc + \%CO_2gc} \quad (59)$$

Em que:

$k3$  – Constante que depende do combustível;

$\%COgc$  – % de CO nos gases de combustão;

$\%CO_2gc$  – % de CO<sub>2</sub> nos gases de combustão.

A escolha do  $k3$  é feita a partir da tabela 2.8.

Tabela 2.8 Valores de  $k3$  dependendo do combustível

Combustível	k3
Carvão betuminoso	63
Gasóleo	53
Óleos (thick, thin, burner)	54
Propano	48

- ✓ Perdas por radiação e convecção;

Estas perdas são referidas à capacidade máxima da caldeira. Para estudar estas perdas é necessário saber as perdas à capacidade nominal, através da tabela 2.9, e em seguida converter esse valor, que depende do caudal máximo de fuelóleo que a caldeira permite utilizar e o caudal utilizado no ensaio.

*Tabela 2.9 Perdas à capacidade nominal dependendo do tipo de caldeira utilizado*

<b>Tipo de caldeira</b>	<b>Perdas à capacidade nominal (%)</b>
<b>Caldeira aquatubular ou tubos de fumo com capacidade ≥ 5 MW</b>	1,4
<b>Caldeira aquatubular ou tubos de fumo com capacidade entre 2 e 5 MW</b>	1,6
<b>Caldeira de tubos de água e de tubos de fumo com capacidade menor do que 2MW</b>	2,0
<b>Caldeira de refratário, caldeiras de tubos de fumo com topo seco e caldeiras com soleira em refratário</b>	3,0
<b>Caldeiras de água quente em ferro fundido</b>	4,5

- ✓ Perdas associadas às purgas;

Neste caso, o valor será igual ao utilizado anteriormente para a norma ASME PTC 4-2013, visto que as fórmulas são as mesmas.

#### **2.4.4. Método direto**

O método direto é baseado nas entradas e saídas de energia, em que a energia ganha pelo fluido de trabalho é comparada com a cedida pelo combustível. Este método baseia-se na equação 60, para calcular o rendimento de uma caldeira.

$$EF = \frac{\text{caudal de vapor} * (h_v - h_l)}{\text{caudal de combustível} * PCI} \quad (60)$$

Em que:

$h_v$  – Entalpia de vapor (kJ/kg);

$h_l$  – Entalpia da água de alimentação (kJ/kg).

No entanto este método não é tão utilizado, precisamente por não dar uma eficiência com um rigor tão grande como o método das perdas (método indireto).

## 2.5. Excesso de ar

Para que ocorra uma combustão é necessária uma quantidade de ar estequiométrica, normalmente designada de “ar teórico”. A percentagem de excesso de ar é a quantidade de ar acima do requerido estequiometricamente para que ocorra a combustão completa [32] [33].

Numa combustão torna-se muito importante controlar este excesso de ar, uma vez que é necessário ar suficiente para que a combustão seja completa. Por outro lado, um grande excesso de ar implica um maior arrefecimento da câmara de combustão, perdendo-se assim calor. Por estas razões é importante não ter um excesso de ar, nem muito baixo nem muito alto, de forma a não ter emissões nem gastos desnecessários. Se a proporção entre o ar e o combustível não for a correta haverá perda de eficiência no processo. Na Figura 2.5 é possível perceber o efeito do excesso de ar sobre as perdas no sistema de combustão [14] [21].



Figura 2.5 Efeito do excesso de ar sobre as perdas em sistemas de combustão [14]

O excesso de ar vai depender de fatores como por exemplo o sistema de combustão e o combustível usado. Em caldeiras a operar com fuelóleo, o excesso de ar recomendado encontra-se no intervalo 15-20%, enquanto que para caldeiras a gás natural o excesso de ar tem de ser um pouco mais baixo, sendo o intervalo recomendado 5-15%, segundo a literatura [1].

Para o calcular existem diferentes métodos, sendo que um exemplo é a equação 61 onde é necessário saber a composição elementar do combustível e a composição máxima do dióxido de carbono, obtida nas condições de queima estequiométrica [14].

$$XpA = \left( \frac{\%CO_{2m\acute{a}x}}{\%CO_{2real}} - 1 \right) * 100 \quad (61)$$

Onde:

**XpA** - Excesso de ar;

**CO<sub>2max</sub>** – Percentagem máxima de dióxido de carbono nos gases de combustão, para a queima ideal (%);

**CO<sub>2real</sub>** – Percentagem de dióxido de carbono obtida nas condições reais de combustão (com excesso de ar) (%).

Outra forma de calcular o excesso de ar é a equação 62, onde não é preciso saber a composição elementar do combustível. Para este trabalho vai ser usada esta equação que, posteriormente, determinará o rendimento do gerador de vapor <sup>[19]</sup>.

$$XpA = \frac{\%O_2}{21 - \%O_2} * 100 \quad (62)$$

Onde:

**%O<sub>2</sub>** – percentagem de O<sub>2</sub> nos gases de combustão.

Para além destes dois métodos pode-se ainda usar o triângulo de *Ostwald* <sup>[10]</sup>.

## 2.6. Queimadores

Como já foi mencionado antes, os queimadores são componentes de um gerador de vapor que têm como função misturar o combustível e o comburente, de modo a ocorrer uma combustão eficiente e tirar o máximo proveito do poder calorífico do combustível <sup>[34]</sup>.

Existem diversos tipos de queimadores, como é o caso dos mistos, pulverização mecânica, copo rotativo, entre outros <sup>[19] [35]</sup>. Os mistos, tal como o nome indica, podem operar com dois combustíveis em simultâneo e reduzir as emissões de NOx <sup>[36]</sup>. Na Figura 2.6 está representado um queimador deste tipo.



Figura 2.6 Queimador misto (fotografia tirada ao queimador da caldeira nº 1)

Os queimadores de pulverização mecânica permitem a formação de gotículas, devido à passagem do combustível por um orifício de pequenas dimensões. Estas gotículas serão de menor tamanho, quanto maior a velocidade relativa entre líquido e ar. A maior desvantagem destes queimadores é que é necessária uma boa filtração para um tamanho inferior das gotículas. Um exemplo do esquema representativo deste queimador está na Figura 2.7, idêntico ao utilizado na caldeira nº 2.

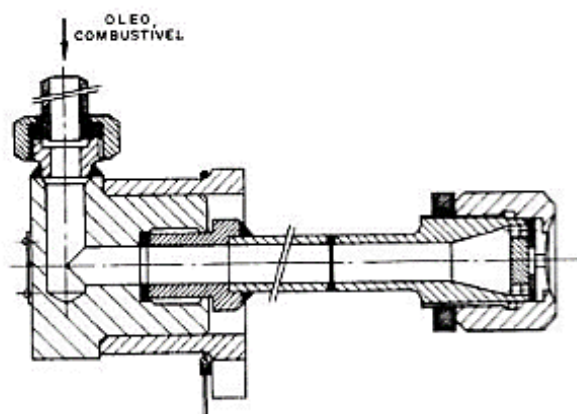


Figura 2.7 Esquema representativo de um queimador de pulverização mecânica <sup>[19]</sup>

## 2.7. Válvulas

As válvulas podem ser projetadas tanto para aplicações líquidas como de gás e, por definição, são dispositivos mecânicos com a finalidade de direcionar, parar, misturar ou regular o fluxo, temperatura ou pressão de um fluido <sup>[37]</sup>.

Uma escolha errada de uma válvula é um problema e, por esta razão, é muito

importante ter sempre em atenção o material de construção, os diâmetros, a pressão e a temperatura de operação <sup>[38]</sup>.

Nessa escolha do tipo de válvula interessa saber os diâmetros das tubagens e a quantos milímetros corresponde cada tipo de DN (diâmetro nominal), como pode ser observado na Tabela 2.10.

*Tabela 2.10 Correspondência dos diâmetros nominais, em polegadas e mm de acordo com as Normas DIN 2440, ISO 65 e BS 1387 <sup>[39]</sup>.*

Diâmetro		
Nominal DN	Polegadas	Mm
DN 10	3/8"	17,2
DN 15	1/2"	21,3
DN 20	3/4"	26,9
DN 25	1"	33,7
DN 32	1.1/4"	42,4
DN 40	1.1/2"	48,3
DN 50	2"	60,3
DN 65	2.1/2"	76,1
DN 80	3"	88,9
DN 100	4"	114,3

Existem vários tipos de válvulas industriais, sendo a seguir apresentados os principais tipos e as suas aplicações.

As válvulas de retenção são válvulas onde o fluxo é permitido em um único sentido permitindo uma proteção adequada aos equipamentos instalados na tubulação de entrada, como as bombas e os motores elétricos que as acionam. Um exemplo de uma válvula de retenção está representado na figura 2.8 <sup>[37]</sup>.

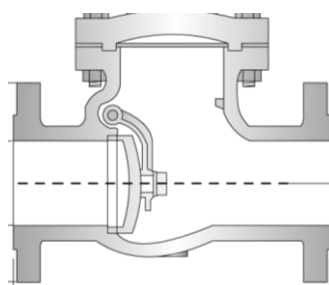


Figura 2.8 Esboço de válvula de retenção

As válvulas globo são válvulas apropriadas quando é necessário controlar a vazão ou pressão de um determinado tipo de fluido. Estas válvulas são manuais e são

normalmente utilizadas quando são necessárias alterações frequentes de abertura e fechamento. Estas oferecem elevada perda de carga devido à mudança brusca de direção imposta ao fluido <sup>[37]</sup> <sup>[40]</sup>.

Na figura 2.9 está representada um exemplo de uma válvula deste tipo, usada para este projeto.



Figura 2.9 Válvula globo DN 40 PN 16 utilizada na instalação

Para além das válvulas faladas anteriormente, existem ainda válvulas gaveta, válvulas guilhotina, válvulas esfera, válvulas borboleta e válvulas macho, no entanto não foram utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

## 2.8. Emissões/Impactos ambientais

Os impactos ambientais gerados pela queima de combustíveis derivam habitualmente da deposição e dispersão de poluentes atmosféricos. Os produtos resultantes do processo de combustão são essencialmente gases que contêm na sua composição teores variados de dióxido de carbono, dióxido de enxofre, azoto, oxigénio e vapor de água, podendo apresentar por vezes monóxido de carbono, óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>), entre outros. O dióxido de enxofre por exemplo, resulta da reação do enxofre de alguns combustíveis, com o oxigénio do ar <sup>[14]</sup>.

As chaminés das caldeiras da RAR, estão representadas na Figura 2.10, sendo que a chaminé da esquerda é referente à caldeira nº 1 e a chaminé da direita referente às caldeiras nº 2 e 3.



Figura 2.10 Chaminés correspondentes às caldeiras da RAR Cogeração

É de grande interesse ambiental a determinação qualitativa e quantitativa destes produtos de combustão. Por esta razão existe um plano com um conjunto de técnicas e medidas para a obtenção de parâmetros operacionais da caldeira. Este plano inclui medidas, como por exemplo identificar a fonte produtora das emissões poluentes, constatar se os produtos emitidos pela chaminé ultrapassam o limite máximo permitido pelos órgãos responsáveis pela fiscalização e controle ambiental, ou ainda determinar, qualitativa e quantitativamente, os valores extremos emitidos num determinado intervalo de tempo <sup>[14]</sup>. Um exemplo de um relatório destes testes, feito pela *Sondar.i Laboratório de Efluentes Gasosos*, está apresentado no anexo C.

## 2.9. Tratamento da água das caldeiras

A qualidade da água utilizada é outro aspeto muito importante no que diz respeito ao consumo energético e à manutenção da caldeira. Sendo assim torna-se muito importante tratar a água que vai entrar nas caldeiras e, para isso, deve-se obedecer à norma NP 4079 <sup>[19]</sup>.

As águas de alimentação das caldeiras podem conter vários resíduos, que podem mais tarde provocar incrustações e, conseqüentemente, criar uma resistência que vai diminuir a taxa de transferência de calor entre os gases de combustão e a água. Estas incrustações podem ainda provocar uma diminuição da produção de vapor e um sobreaquecimento das paredes metálicas, que podem acarretar custos de reparação <sup>[14]</sup> <sup>[19]</sup>. Outro objetivo do tratamento da água é eliminar os gases corrosivos dissolvidos nessa água e eliminar os sólidos que podem inibir a transferência de calor e permitir a fragilização do metal.

A seleção dos parâmetros da água a analisar depende da sua origem e das suas

características químicas. Normalmente é importante realizar análises à dureza, pH, alcalinidade, sólidos totais dissolvidos e quantidade de cloretos e fosfatos. A redução dos sólidos totais dissolvidos permite também reduzir a necessidade de purga e, por isso, aumentar o rendimento da caldeira <sup>[14]</sup><sup>[19]</sup>.



### 3. Materiais e Métodos

A RAR Cogeração é constituída por 3 caldeiras, sendo que a caldeira em estudo é a caldeira nº 2. Este equipamento trabalha apenas com um combustível (nafta), enquanto que as caldeiras nº 1 e 3 podem trabalhar com os dois combustíveis (gás e nafta) ao mesmo tempo.

As caldeiras da RAR Cogeração encontram-se equipadas com um sobreaquecedor, economizador e pré-aquecedor de combustível, no entanto não apresentam nenhum pré-aquecedor de ar, que poderia ser importante para aumentar o rendimento da caldeira.

No sobreaquecedor, os gases de combustão vão ajudar a aquecer o vapor até temperaturas a rondar os 300°C e na Figura 3.1 encontra-se o sobreaquecedor da caldeira nº 2 da RCOG, isolado.



*Figura 3.1 Sobreaquecedor da caldeira nº 2 da RAR Cogeração*

No economizador a água é também aquecida através dos gases de combustão, de modo a aumentar o rendimento da caldeira. Na Figura 3.2 está representado o economizador da caldeira nº 2, também isolado termicamente.



*Figura 3.2 Economizador da Caldeira nº2 da RAR Cogeração*

A caldeira nº 2 apresenta ainda um queimador de pulverização, constituído por 5 peças distintas, sendo estas: atomizador, pastilha, emulsor, separador e multibús. As fotografias destas peças são apresentadas nas figuras a seguir, Figuras 3.3 a 3.7.



*Figura 3.3 Atomizador do queimador da caldeira nº 2*



*Figura 3.4 Pastilha do queimador da caldeira nº 2*



*Figura 3.5 Emulsor do queimador da caldeira nº 2*



Figura 3.6 Separador do queimador da caldeira nº 2



Figura 3.7 Multibús do queimador da caldeira nº 2

A caldeira em estudo é de 1967 e apresenta um timbre (pressão máxima de funcionamento) de aproximadamente 28,5 bar, sendo que a pressão média se aproxima dos 80% deste valor, por razões de segurança.

Depois da caldeira e, antes de chegar a toda a empresa, o vapor tem de passar por dois coletores, um primeiro de alta e o seguinte de baixa pressão. Nestes faz-se uma bifurcação do vapor para toda a empresa. Nas Figuras 3.8 e 3.9 estão representados os coletores que fazem parte da RCOG.



Figura 3.8. Coletor de alta pressão da RAR Cogeração



Figura 3.9 Coletor de baixa pressão da RAR Cogeração

### 3.1 Sistema de monitorização

Na sala das caldeiras existe um sistema de monitorização implementado, que permite obter a maior parte dos parâmetros necessários para o cálculo do rendimento de uma caldeira. Este sistema de monitorização encontra-se apresentado na Figura 3.10, com respetiva legenda.

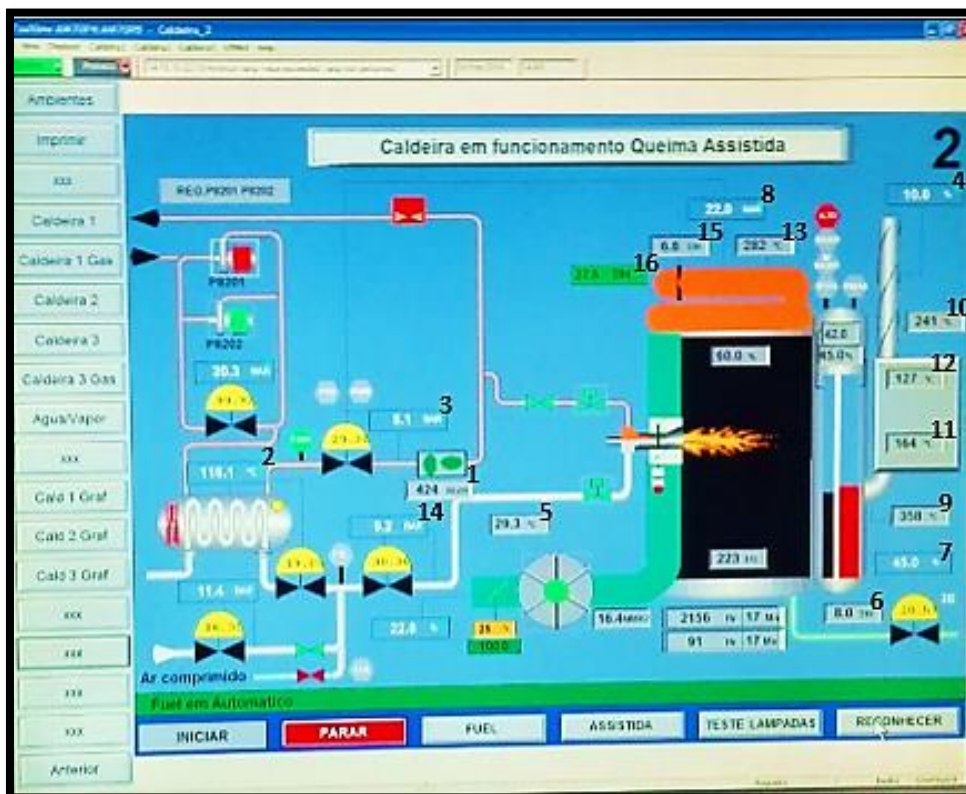


Figura 3.10 Sistema de monitorização da RAR Cogeração

**Legenda:**

- 1 - Caudal de fuelóleo;
- 2 - Temperatura do fuelóleo;
- 3 - Pressão do fuelóleo;
- 4 - Percentagem de O<sub>2</sub> nos gases de combustão (inoperável);
- 5 - Temperatura do ar ventilado;
- 6 - Caudal de água alimentado à caldeira;
- 7 - Percentagem do nível de água na caldeira;
- 8 - Pressão de vapor
- 9 - Temperatura dos gases de combustão à entrada do economizador;
- 10 - Temperatura dos gases de combustão à saída do economizador;
- 11 - Temperatura da água de alimentação à saída do economizador;
- 12 - Temperatura da água de alimentação à entrada do economizador;
- 13 - Temperatura do vapor depois da passagem no sobreaquecedor;
- 14 - Pressão de vapor de atomização;
- 15 - Caudal de vapor produzido na caldeira 2;
- 16 - Caudal total de vapor produzido pelas 3 caldeiras;

Uma vez que o controlador de teor de O<sub>2</sub> da caldeira se encontra inoperável recorreu-se a um equipamento móvel denominado medidor de gases, para descobrir tanto a percentagem de O<sub>2</sub> como de CO nos gases de combustão.

Para além deste sistema existem ainda mais 2, sendo que um controla o desgasificador e coletores e o outro o tratamento prévio que a água sofre. Estes dois sistemas de monitorização encontram-se representados nas Figuras 3.11 e 3.12.

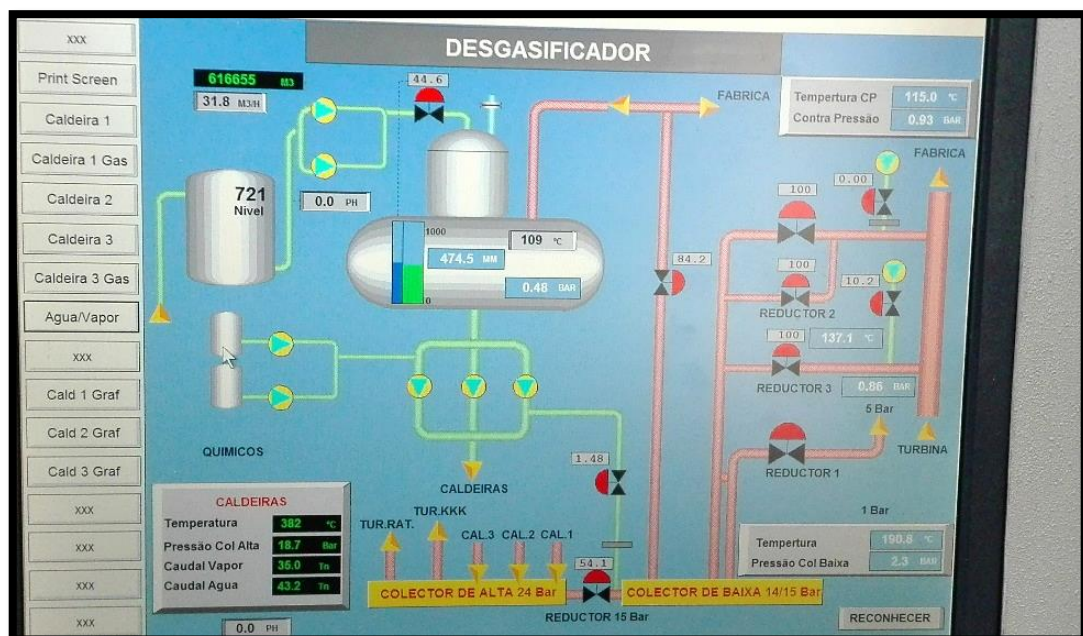


Figura 3.11 Sistema de monitorização do desgasificador e coletores

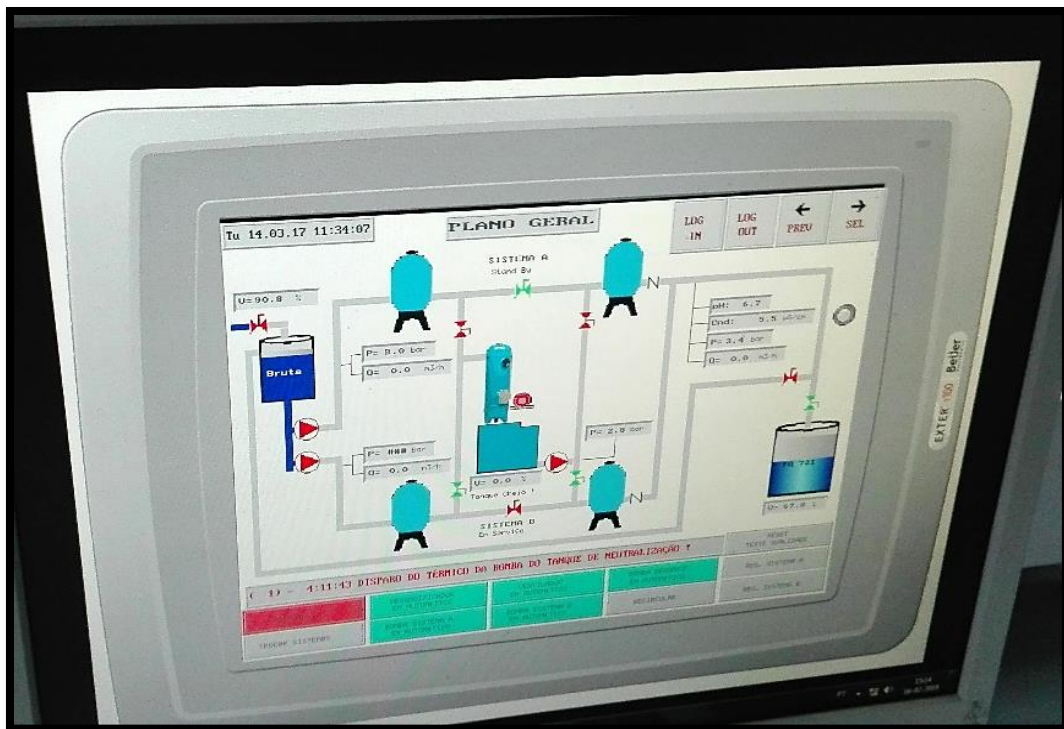


Figura 3.12 Sistema de monitorização do tratamento da água das caldeiras

Através do painel de monitorização da Figura 3.10 foi possível perceber o comportamento que tem o caudal de fuelóleo, quando há variações da sua pressão. Na Tabela 3.1 encontram-se os resultados obtidos com a variação de pressão do fuelóleo. Todos os outros ensaios estão depois apresentados na comparação entre os dois combustíveis, no capítulo 4.

Tabela 3.1 Comportamento do caudal de nafta e da pressão de vapor de atomização em função da pressão de combustível

Caudal nafta (kg/h)	P nafta (barg)	P vapor de atomização (barg)
215	3,5	4,5
265	4,5	5,5
308	5,5	6,5
350	6,5	7,5
390	7,5	8,5
431	8,5	9,5
465	9,5	10,5
520	10,5	11

Como se observa na Tabela 3.1, o caudal de combustível acompanha o crescimento da pressão de nafta aproximadamente num sentido diretamente proporcional. Quanto à

pressão de vapor de atomização, pode-se concluir que está sempre cerca de 1 bar acima da pressão da nafta. Este vapor de atomização é importante para minimizar a produção de fuligem e maximizar a eficiência de combustão.

Como dito anteriormente, não foi possível medir diretamente o teor de oxigênio no painel de monitorização e por isso foi necessário recorrer a um medidor de gases. Este medidor encontra-se representado na Figura 3.13.



*Figura 3.13 Medidor de gases marca Testo modelo 350 XL*

Para além destes parâmetros foi ainda necessário fazer uma determinação das cinzas do combustível e uma caracterização do resíduo gerado na caldeira. Para isto, recorreu-se a uma mufla (apresentada na Figura 3.14) no caso das cinzas, e a um analisador de Carbono Total (Figura 3.15) e analisador de Fluorescência de Raios X (Figura 3.16), no caso de caracterizar o resíduo. Estes equipamentos encontram-se nas figuras seguintes.



Figura 3.14 Mufla marca Nabertherm modelo L5



Figura 3.15 Analisador TOC marca Shimadzu modelo E200V



Figura 3.16 Analisador de fluorescência de raios X marca ThermoScientific modelo XLET 900

Para além dos fatores mencionados teve ainda de ser medida a condutividade da água, que é um parâmetro que entra nas perdas de purga do método indireto. Para esta medição foi usado o condutímetro representado na Figura 3.17 e depois converteu-se esse valor através da Tabela 3.2.



Figura 3.17 Condutímetro (marca Metrohm modelo 712)

Tabela 3.2 Fatores de conversão para a condutividade

<b>Condutividade (<math>\mu\text{s}/\text{cm}</math>)</b>	<b>Fator de conversão (ppm)</b>
<b>&lt;50</b>	1,36508
<b><math>\geq 50</math> e &lt;166</b>	0,94766
<b><math>\geq 166</math> e &lt;333</b>	0,76957
<b><math>\geq 333</math> e &lt;833</b>	0,71592
<b><math>\geq 833</math> e &lt;10000</b>	0,75854
<b><math>\geq 10000</math></b>	0,85043

### 3.2 Limpeza das Caldeiras

Quanto ao resíduo anteriormente falado, este antes de ser caracterizado teve de ser recolhido através de uma limpeza das caldeiras. Esta limpeza foi realizada às 3 caldeiras num sábado em que as caldeiras estavam paradas. O resíduo da caldeira nº2 encontra-se apresentado na Figura 3.18. A recolha deste resíduo é importante ser realizada algumas vezes por ano, para impedir que haja acumulação de detritos e processos corrosivos, o que pode prejudicar o bom funcionamento.



*Figura 3.18 Amostra de resíduo da caldeira nº 2*

Nas Figuras 3.19 a 3.22 está representada a porta da caldeira nº 2, antes e depois da limpeza.



*Figura 3.19 Abertura da caldeira nº 2 antes da limpeza*



*Figura 3.20 Porta da caldeira nº 2 antes da limpeza*



*Figura 3.21 Abertura da caldeira nº 2 depois da limpeza*



*Figura 3.22 Porta da caldeira nº 2 depois da limpeza*

As Figuras 3.23 e 3.24 representam o interior da caldeira nº 2 antes e depois da limpeza, e demonstram também a dificuldade de obter luz para uma boa imagem sem

partículas no ar.



*Figura 3.23 Interior da caldeira nº 2 antes da limpeza*



*Figura 3.24 Interior da caldeira nº 2 depois da limpeza (dificuldade devido ao pó e pouca luz)*

Em seguida, nas Figuras 3.25 e 3.26, é também apresentado o resultado da limpeza no economizador da caldeira nº 2.



*Figura 3.25 Economizador da caldeira nº 2 antes da limpeza*



*Figura 3.26 Economizador da caldeira nº 2 depois da limpeza*

Foi ainda realizada a limpeza na chaminé da caldeira nº 2 que é comum à caldeira nº 3. As Figuras 3.27 a 3.30 representam a chaminé antes e depois da limpeza.



*Figura 3.27 Chaminé das caldeiras 2 e 3 antes da limpeza (1)*



*Figura 3.28 Chaminé das caldeiras 2 e 3 antes da limpeza (2)*



*Figura 3.29 Chaminé das caldeiras 2 e 3 depois da limpeza (1)*



*Figura 3.30 Chaminé das caldeiras 2 e 3 depois da limpeza (2)*

Quanto à quantidade de resíduos recolhidos, foram contabilizados 3 vezes mais resíduos de chaminé para a caldeira 1 em relação à chaminé das caldeiras 2 e 3, uma vez que esta não apresenta um soprador como a chaminé da caldeira estudada.

A planta da casa das caldeiras e respetiva legenda encontram-se no anexo I <sup>[41]</sup>.

### **3.3 Alterações necessárias na caldeira nº 2**

Para a utilização de um novo combustível na caldeira nº 2 foi necessário implementar algumas alterações no processo, como a instalação do reservatório e respetiva bacia de retenção, montagem das mangueras de ligação do reservatório para a caldeira e ainda a montagem de válvulas, de uma bomba e de um tubo rígido que faz a ligação da bomba até à caldeira.

Inicialmente, o primeiro passo foi receber o depósito e decidir todo o percurso que o combustível alternativo iria ter de percorrer do reservatório até à caldeira. Na Figura 3.31 está representado esse depósito, cedido pela empresa fornecedora do combustível.



*Figura 3.31 Reservatório para o combustível alternativo*

As características deste depósito são apresentadas na Tabela 3.3.

*Tabela 3.3 Características do depósito instalado para receber o novo combustível*

<b>Tipo de Reservatório</b>	<b>Vertical</b>
<b>Capacidade máxima</b>	40 000 L
<b>Diâmetro</b>	3000 mm
<b>Altura até ao cone</b>	5980 mm
<b>Tubagem (entrada/saída)</b>	1 ½ "
<b>Boca de visita (diâmetro)</b>	450 mm

Como é possível observar na Figura 3.31 este reservatório foi instalado ao lado da bacia de retenção dos tanques já instalados para o fuelóleo nº4. Por esta razão tomou-se importante arranjar uma estratégia para a passagem do combustível novo, sem que afetasse a circulação de camiões e o abastecimento de nafta para os respetivos tanques. Assim, a solução encontrada foi passar as mangueiras/tubagens pelo piso inferior às caldeiras (denominado galerias) onde também passam todas as tubagens do combustível habitualmente utilizado, antes de chegar a qualquer caldeira.

Decidido o local e as distâncias necessárias para as mangueiras e tubagens, desenhou-se uma isométrica do projeto com as respetivas válvulas necessárias. Este esboço encontra-se representado no anexo J, assim como um esboço do percurso que o combustível vai encontrar do reservatório até à caldeira nº 2, através da planta das galerias.

Quanto às válvulas necessárias, neste caso são precisas cinco. Uma delas de retenção e as outras quatro, válvulas globo, para regular a passagem do combustível para o teste. Uma destas válvulas globo será instalada antes da bomba e as outras duas trabalharão alternadamente, para permitir trabalhar com nafta ou combustível novo. A quarta válvula deste tipo permite que o combustível faça o caminho de retorno, caso a caldeira não esteja em funcionamento. As válvulas utilizadas são as DN 40 e PN 16.

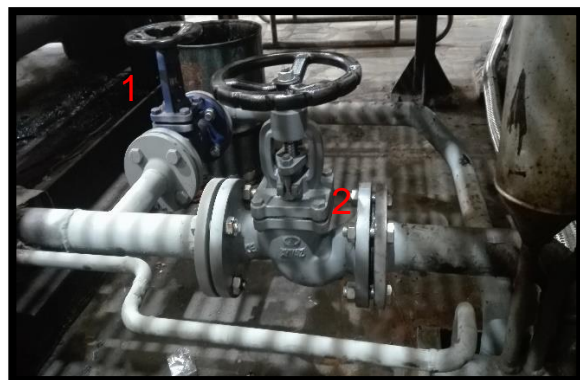
Nas Figuras 3.32 a 3.36 estão representadas as válvulas e bomba necessárias para a passagem do combustível a testar (fuelóleo nº3). A ficha técnica da bomba utilizada encontra-se no anexo K.



*Figura 3. 32 Bomba e Válvula globo utilizadas para o percurso de passagem do fuelóleo nº 3*



*Figura 3.33 Tubagem (antes da ligação à caldeira) com válvula globo instalada*



*Figura 3.34 Tubagem modificada (antes da ligação à caldeira) com válvulas de globo (1) e (2)*



*Figura 3.35 Tubagem antes da intervenção e da nova válvula de globo para o retorno do fuelóleo nº3 ao depósito*



*Figura 3.36 Tubagem com válvula globo para o retorno do fuelóleo nº 3 ao reservatório*

Como é possível observar na Figura 3.34 a tubagem foi modificada de modo a conseguir operar com os dois combustíveis alternadamente para a caldeira nº2. No percurso 1, onde foi adicionado uma válvula globo e uma nova tubagem, passa o combustível em teste. No percurso 2, onde foi adicionado outra válvula globo, passa o fuelóleo nº4, nafta. Estas válvulas permitem que os dois combustíveis não se misturem na tubagem. Para além destas foi ainda adicionada uma válvula de retorno na entrada, onde se abastece o reservatório, que permite que o combustível apenas seja bombeado para dentro do tanque, nunca retornando em sentido contrário para segurança à bombagem do camião de abastecimento.

Nas Figuras 3.35 e 3.36 é possível observar a adição de uma válvula globo para o percurso de retorno do combustível em teste, quando este não está a ser alimentado à caldeira. Deste modo o fuelóleo nº3 está sempre em circulação, não havendo desperdício de combustível. Na Figura 3.37 está representada a válvula de retorno adicionada ao reservatório.



*Figura 3.37 Válvula de retorno instalada na alimentação do reservatório*

Para além da montagem das mangueiras e tubagens foi necessária uma bacia de retenção para este reservatório, de modo a ter uma segurança no caso de derrame. Esta bacia de retenção deve ser construída de acordo com o artigo 8º da portaria nº 131/2002 do ministério da economia. Esta foi construída e encontra-se representada na Figura 3.38, tendo ainda uma abertura para a bacia de retenção já existente.



*Figura 3.38 Bacia de retenção do reservatório novo*

De seguida foi também feita uma ligação à terra, de modo a evitar sobrecargas elétricas. Esta ligação está representada na Figura 3.39.



*Figura 3.39 Ligação à Terra (depósito do combustível novo)*

Para além de todas estas alterações foi ainda preciso estudar a lei existente, de modo a perceber se seria necessária alguma licença adicional para a realização deste teste. Depois de estudados os decreto-lei 388/2007 e 195/2008 foi realizada uma inspeção pelo ISQ ao reservatório e projeto e um averbamento do depósito (comunicado) à câmara municipal do Porto. Em simultâneo foi também alargado o contrato do seguro, de modo a salvaguardar financeiramente a empresa de algum prejuízo. Estas burocracias e o facto de em agosto a maior parte das empresas estarem a trabalhar com os mínimos serviços prejudicaram o desenrolar do teste.



## 4. Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante o trabalho experimental com a respetiva discussão. A maioria dos resultados foi obtido através de um *software* construído em *Excel* para o cálculo do rendimento a partir dos vários métodos estudados.

Inicialmente são apresentados resultados auxiliares para posteriormente calcular os rendimentos da caldeira. Em seguida são apresentados os resultados do rendimento pelos diferentes métodos, as tendências destes em função de diferentes fatores e ainda a sua comparação para os dois combustíveis.

Os resultados dos testes a parâmetros auxiliares ao rendimento da caldeira para o combustível nafta são apresentados na Tabela 4.1.

*Tabela 4.1 Resultados dos testes feitos a alguns parâmetros necessários para o cálculo do rendimento da caldeira*

<b>Parâmetro</b>	<b>Resultado</b>
<b>Cinzas no combustível (nafta)</b>	0,15 % (Anexo B1)
<b>Carbono orgânico no resíduo</b>	21,82 % (Anexo B2)
<b>Carbono inorgânico no resíduo</b>	0 %
<b>Análise elementar do resíduo</b>	Elementos mais abundantes: Enxofre e Carbono (Anexo B3)
<b>Condutividade da água de alimentação (média)</b>	4,22 $\mu\text{s/cm}$ (Anexo B4)
<b>Condutividade da água da caldeira (média)</b>	450,5 $\mu\text{s/cm}$ (Anexo B4)

Os diversos ensaios para a caracterização da caldeira n<sup>o</sup>2 foram realizados num intervalo de pressão de combustível de 4 a 10,5 barg, o que corresponde a um intervalo de caudais (aproximadamente) de nafta de 200 a 550 kg/h, dependendo de vários fatores.

### 4.1. Comparação de Rendimentos entre os métodos direto e indireto

Inicialmente foi importante recolher os dados necessários para o cálculo do rendimento. Estes dados encontram-se apresentados no anexo D e o cálculo do rendimento pelos diferentes métodos está nos anexos F a H.

Na Figura 4.1 é apresentado o rendimento em função do caudal de nafta, para o método indireto tanto baseado na norma ASME como na ADENE.

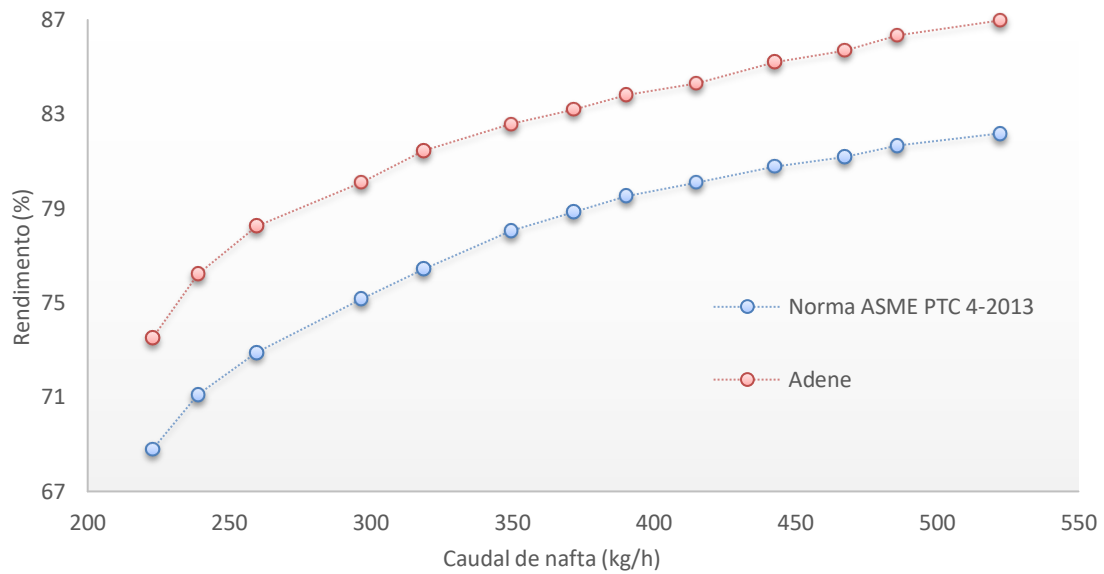


Figura 4. 1 Rendimento da caldeira n°2 (%) em função do caudal de nafta (kg/h), para o método indireto da norma ASME e para o método indireto proposto pela ADENE num dos ensaios realizados

Como é possível observar a partir da figura anterior o rendimento segue uma tendência ascendente com o aumento do caudal de nafta. É ainda possível verificar que o método indireto proposto pela ADENE tem sempre rendimentos superiores ao da norma ASME e isto pode acontecer pelo facto de o primeiro não incluir tantas perdas como o segundo, como demonstrado anteriormente. A diferença relativa deste conjunto de ensaios situa-se num intervalo de 5,0 a 6,9%.

Foram ainda calculados os rendimentos a partir do método direto que se encontram apresentados na Figura 4.2.

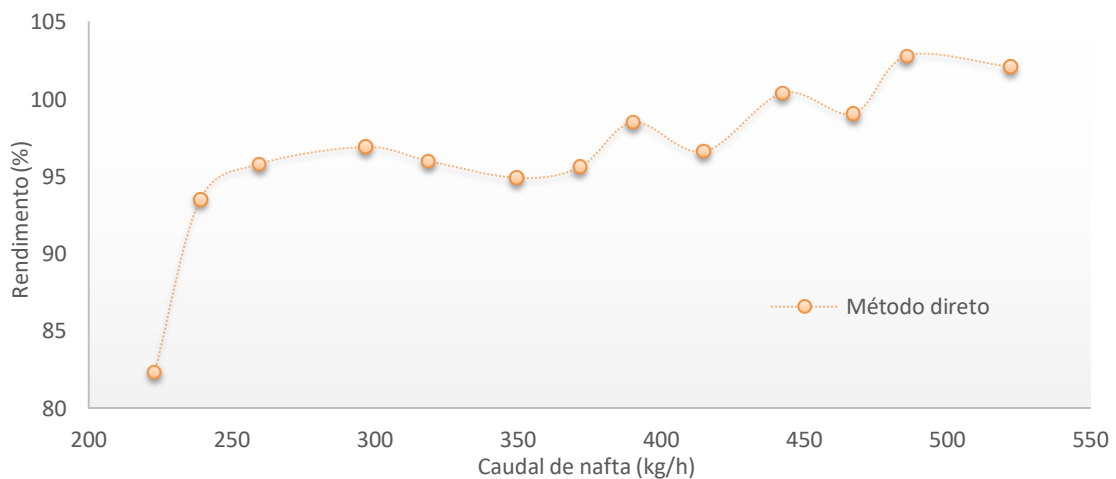


Figura 4. 2 Rendimento da caldeira n°2 em função do caudal de nafta (kg/h), para o método direto

Os rendimentos variaram num intervalo entre 82,3 e 102,8% e, embora estes valores não sigam uma tendência regular, muitos são irrealistas estando acima dos 100. Por esta

razão conclui-se que este método é menos credível e rigoroso que os indiretos.

Na Tabela 4.2 foi feita a comparação dos valores de rendimento entre os métodos mencionados para um caudal elevado de nafta, 522,33 kg/h, e uma pressão superior a 21 barg.

*Tabela 4. 2 Comparação entre o método direto e os métodos indiretos, tanto da norma como o proposto pela ADENE para um caudal de 522kg/h de nafta.*

Perda	ASME PTC 4-2013	ADENE	Método direto
$P_{gs}$	9,51 %	9,95 %	-
$P_{H2O}$	-	1,34 %	
$P_{CO}$	0,041 %	0,01 %	
$P_{rad}$	2,20 %	1,47 %	
$P_p$	0,26 %	0,25 %	
$P_{H2}$	6,36 %	0	
$P_{H2Of}$	0,008 %		
$P_{(hum)ar}$	0,34 %		
$C_{arseco}$	0,44 %		
$C_{hum.ar}$	0,016 %		
$C_{qf}$	0,45 %		
<b>Rendimento</b>	82,19 %	86,98 %	

A partir da Tabela 4.2 foi possível concluir que as perdas com mais influência no rendimento final foram as relativas aos gases de combustão. Estas aumentaram ainda mais com a diminuição do caudal de fuel pois ficaram com um excesso de ar mais elevado, nestes casos o rendimento baixa e o custo operacional aumenta. No entanto, se se diminuir demais a quantidade de excesso de ar, parte do combustível não é queimado e o custo operacional também aumenta. Foi ainda possível verificar que a perda energética originada pela água formada a partir da combustão do  $H_2$  é bastante elevada, contribuindo também para o rendimento observado.

Houve semelhanças nos resultados de algumas perdas energéticas determinadas pelos diferentes métodos indiretos. No entanto, há algumas que não estão incluídas no método indireto baseado na ADENE e que são:  $P_{H2}$ ,  $P_{H2Of}$ ,  $P_{(hum)ar}$ ,  $C_{arseco}$ ,  $C_{hum.ar}$  e  $C_{qf}$ . Estas perdas quando contabilizadas permitem calcular um rendimento inferior com uma diferença relativa média de 5,5%. Se os valores dos rendimentos obtidos pela norma ASME estiveram mais próximos do valor real, isto quer dizer que ainda há margem de progressão na diminuição das perdas energéticas, ou seja, diminuir o caudal de fuel para

as mesmas necessidades do processo.

Quanto ao rendimento obtido pelo método direto para este caudal, o valor está acima de 100%, irreal neste caso e como já se referiu atrás variável quando se altera o caudal. Também por esta razão se concluiu que o método a ser utilizado pela empresa deverá ser o indireto baseado na norma ASME.

## 4.2. Influência do excesso de ar

As perdas energéticas mais elevadas na determinação do rendimento de uma caldeira foram as associadas aos gases secos de combustão e estas dependeram do excesso de ar utilizado. A Figura 4.3 apresenta a variação do rendimento da caldeira nº2, em função do excesso de ar.

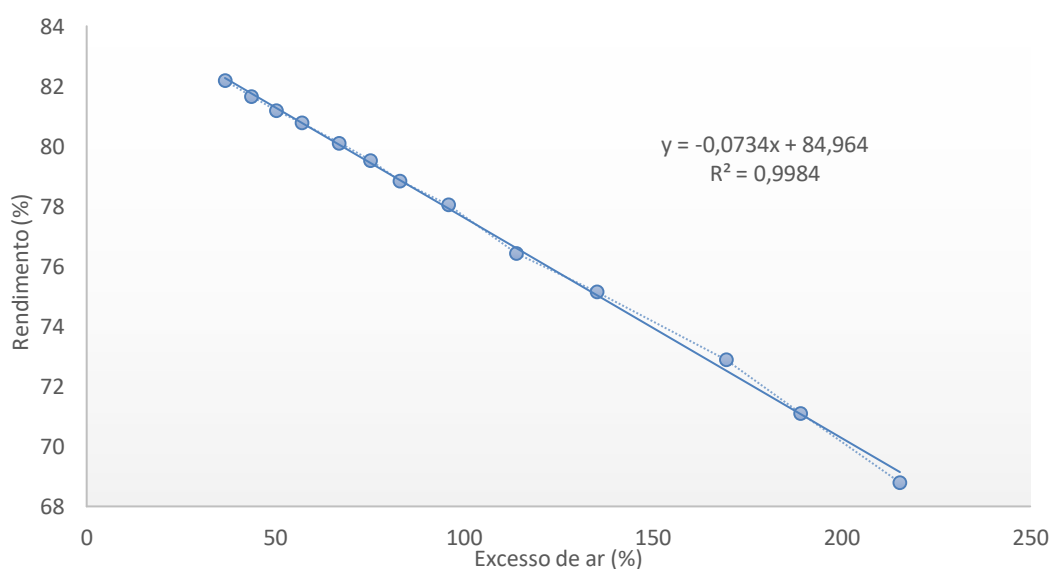


Figura 4. 3. Variação do rendimento da caldeira nº2 em função do excesso de ar utilizado num dos ensaios realizados

Como é possível verificar na Figura 4.3, quanto maior é o excesso de ar, ou seja, quanto maior é o oxigénio presente nos gases de combustão, menor é o rendimento. Neste gráfico, é possível verificar que com um excesso de ar de 215,5%, que corresponde a 14,34% de oxigénio nos gases de combustão, obtém-se um rendimento de 68,80%, enquanto que para um excesso de ar mais baixo, de 36,6% correspondente a 5,63% de O<sub>2</sub> nos gases de combustão da caldeira, obtém-se um rendimento final de 82,19%. Isto deve-se essencialmente, ao facto de o excesso de ar estar diretamente relacionado com a perda associada aos gases secos de combustão explícito na norma ASME PTC 4-2013. No caso do rendimento para o método proposto pela ADENE, estas perdas vão ter também bastante influência e seguir a mesma tendência. Isto deve-se ao facto de estas estarem diretamente relacionadas com a %CO<sub>2</sub>, que tem uma tendência contrária à %O<sub>2</sub>.

Por outras palavras, quando houve um aumento do caudal, a percentagem de  $\text{CO}_2$  também aumentou. Sendo assim, e tal como prevê a equação 56, quanto maior a percentagem de  $\text{CO}_2$ , menor serão estas perdas energéticas e maior será o rendimento.

### 4.3. Influência da pressão da caldeira

Em seguida foram realizados ensaios com uma pressão de vapor diferente, de forma a perceber se esta influenciaria de forma significativa o rendimento da caldeira. Para tal, foram realizados ensaios a pressões inferiores a 21 barg, cujos resultados são apresentados na Figura 4.4.

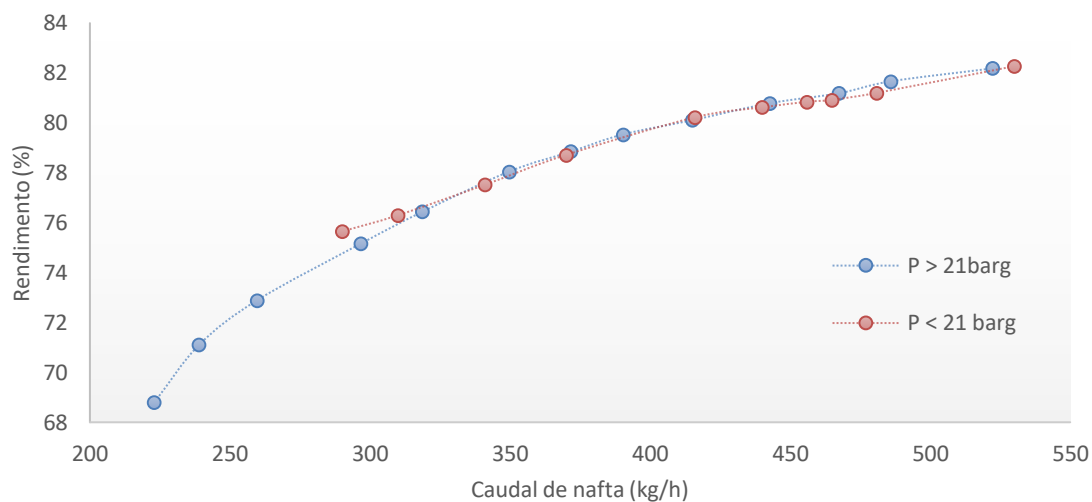


Figura 4. 4 Rendimentos da caldeira em função do caudal de nafta (kg/h), para pressões maiores e menores que 21 barg

As diferenças entre os rendimentos foram pouco significativas, apresentando um desvio relativo inferior a 1%. Não foi possível obter mais ensaios para comparação, devido às dificuldades apresentadas para baixar a pressão em caudais mais baixos.

### 4.4. Variação do rendimento

Paralelamente a todos os ensaios já referidos fez-se ainda uma comparação do rendimento médio ao longo de 4 semanas utilizando a nafta como combustível e tentando manter as condições de operação constantes. Os resultados são apresentados na Figura 4.5.

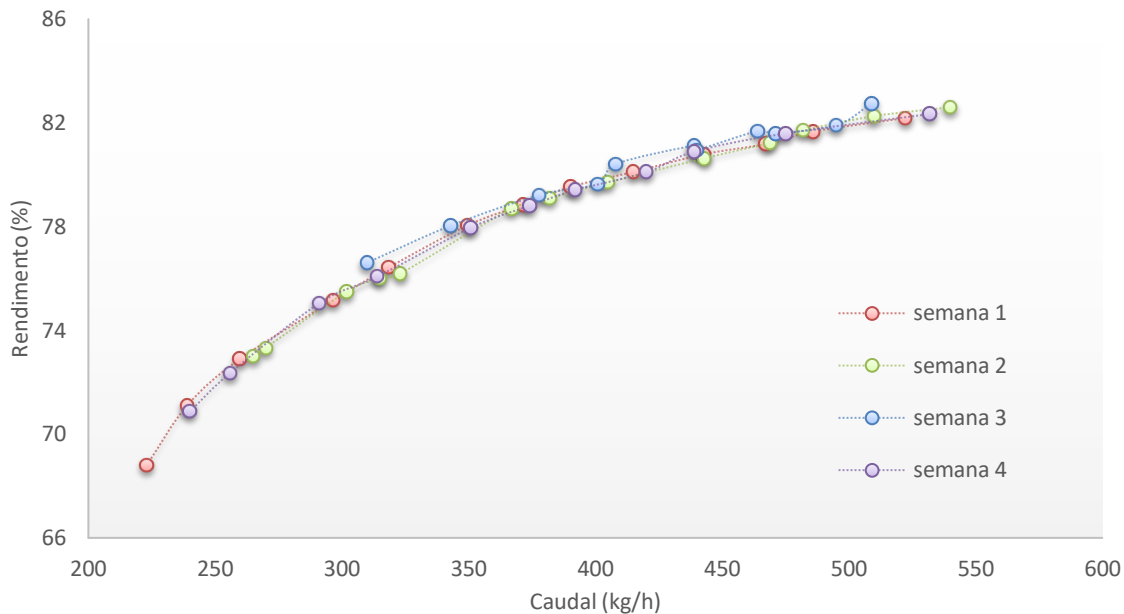


Figura 4.5 Rendimentos da caldeira nº2, em função do caudal de nafta (kg/h), para diferentes semanas de trabalho

Como é possível concluir o rendimento da caldeira não variou significativamente ao longo do tempo. As pequenas variações podem dever-se, essencialmente, à temperatura ambiente que foi diferente e que influenciou as perdas por convecção e radiação.

#### 4.5. Comparação entre combustíveis

A comparação da utilização dos 2 combustíveis em estudo foi realizada durante a semana 1. Na Figura 4.6 apresentam-se estes rendimentos em função do caudal de combustível, que no caso do fuelóleo nº3 foi corrigido pela sua densidade, uma vez que o painel de controlo do equipamento tem por defeito as características da nafta.

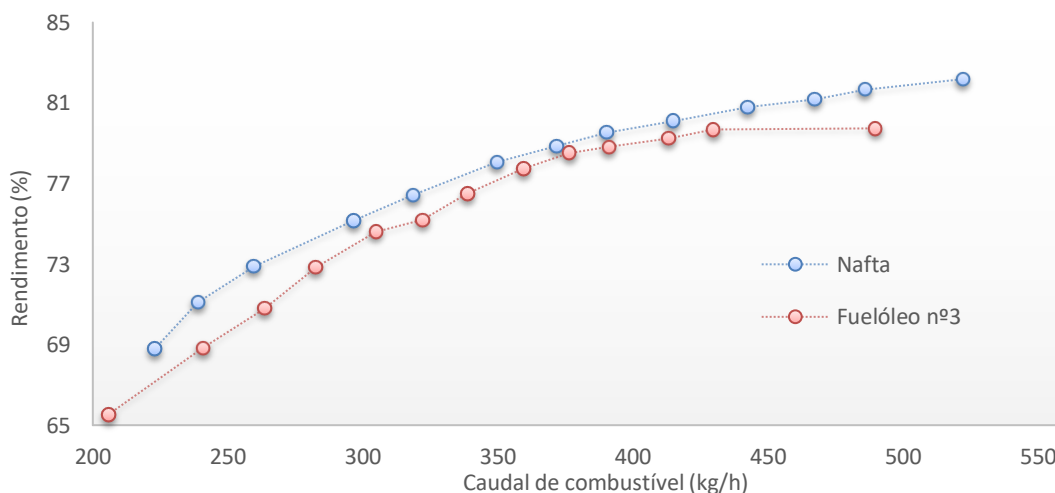


Figura 4.6 Comparação entre o rendimento da nafta e do combustível de teste em função dos caudais de combustível (kg/h)

O rendimento do fuelóleo nº3 foi mais baixo que o da nafta e, por isso, foi necessário estudar soluções para aumentar este rendimento. Analisando os valores das perdas foi possível concluir que a %O<sub>2</sub> foi bastante elevada e, assim, decidiu-se alterar a curva de caudal de ar vs caudal de combustível (ver anexo N). Nas Figuras 4.7 e 4.8 são apresentados a %O<sub>2</sub> e o rendimento do fuelóleo nº3 em função do caudal de combustível após a referida alteração.

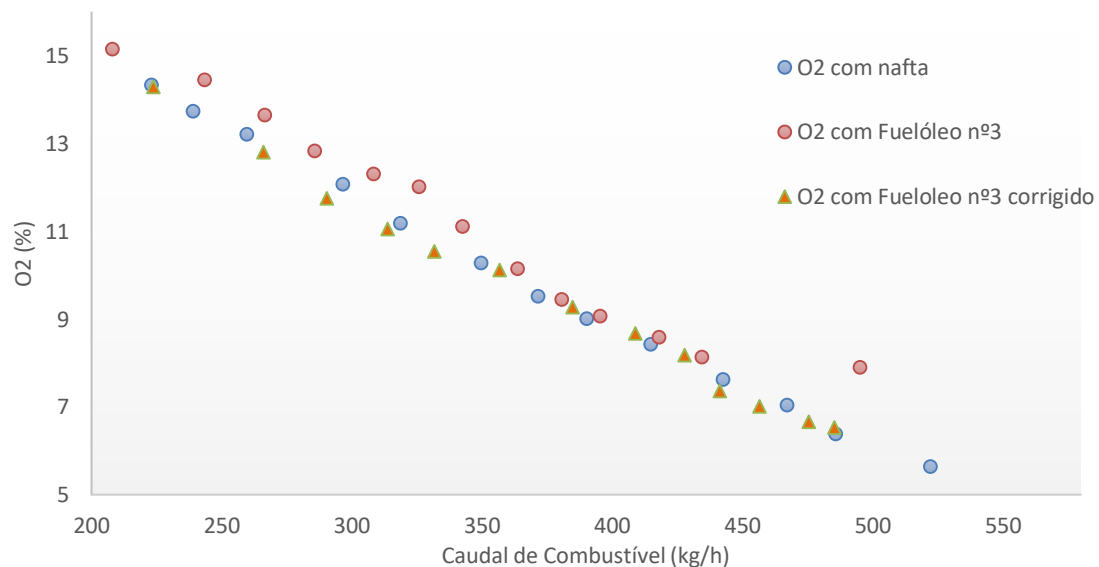


Figura 4.7 Valores de % de O<sub>2</sub> em relação ao caudal de combustível, em kg/h, para cada ensaio

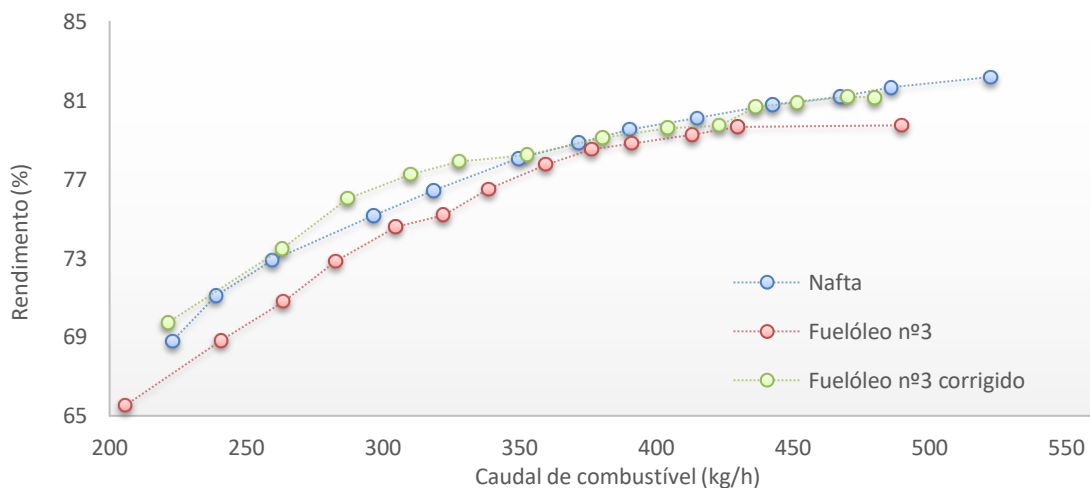


Figura 4.8 Resultados do rendimento da caldeira com nafta, fuelóleo nº3 e fuelóleo nº3 depois de corrigida a % de ar, em função do caudal de combustível (kg/h)

Como é possível observar para a gama de caudais de combustível estudados, o rendimento no caso em que se utilizou o fuelóleo nº3 subiu, sendo praticamente semelhante à do outro combustível. Os valores de rendimento apresentaram-se no intervalo de 69,7 a 81,2%.

O facto de haver dados e resultados diferentes na monitorização da caldeira para os dois combustíveis, obrigou a modificar o programa de controlo e a interface introduzindo um botão (ver seta na Figura 4.9) para alternar o combustível.

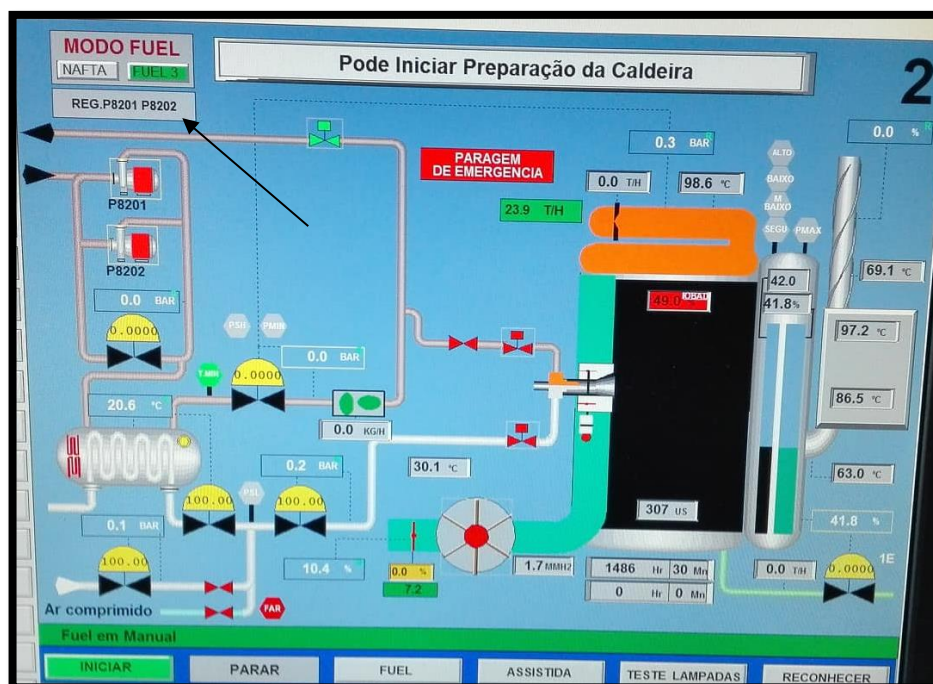


Figura 4.9 Painel de controlo da caldeira com adição de comando para utilização dos dois combustíveis

O novo combustível apresentou um PCI ligeiramente mais elevado do que a nafta e as perdas energéticas relativas ao H<sub>2</sub> que originou também foram superiores, que se traduz em rendimentos mais baixos na caldeira. A explicação está na sua composição, pois continha 13,0% de H<sub>2</sub>, um pouco superior aos 10,6% existentes na nafta.

O caudal de vapor produzido em função do caudal de combustível gasto foi também estudado para comprovar os valores apresentados na Figura 4.8 e os resultados são apresentados na Figura 4.10. O caudal de vapor produzido a partir dos dois combustíveis foi muito semelhante.

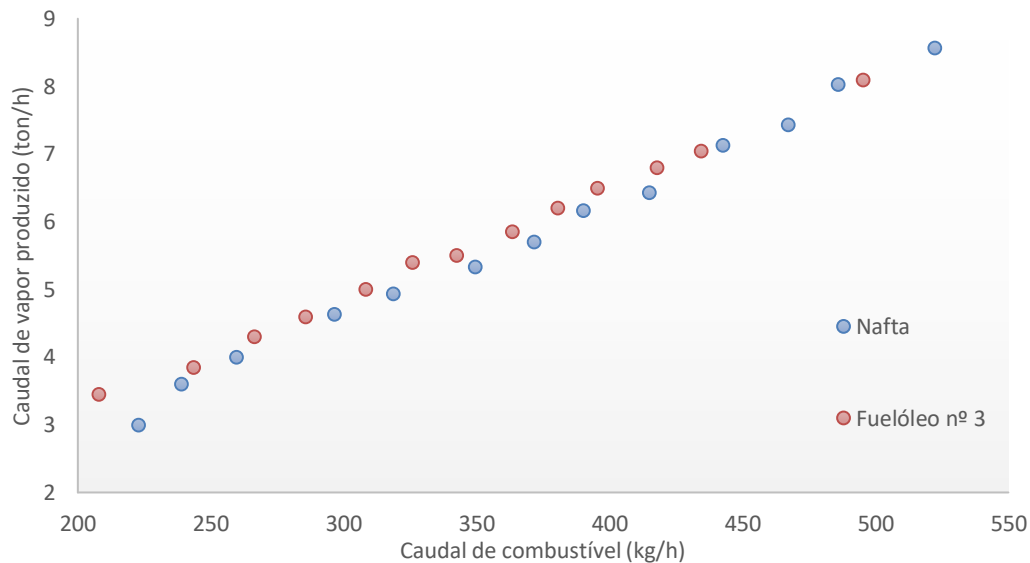


Figura 4.10 Resultados de caudal de vapor produzido, em ton/h, por kg/h de combustível utilizado

Os diferentes gases de combustão em função do caudal de combustível (nafta ou fuelóleo nº3) são apresentados na Figura 4.11.

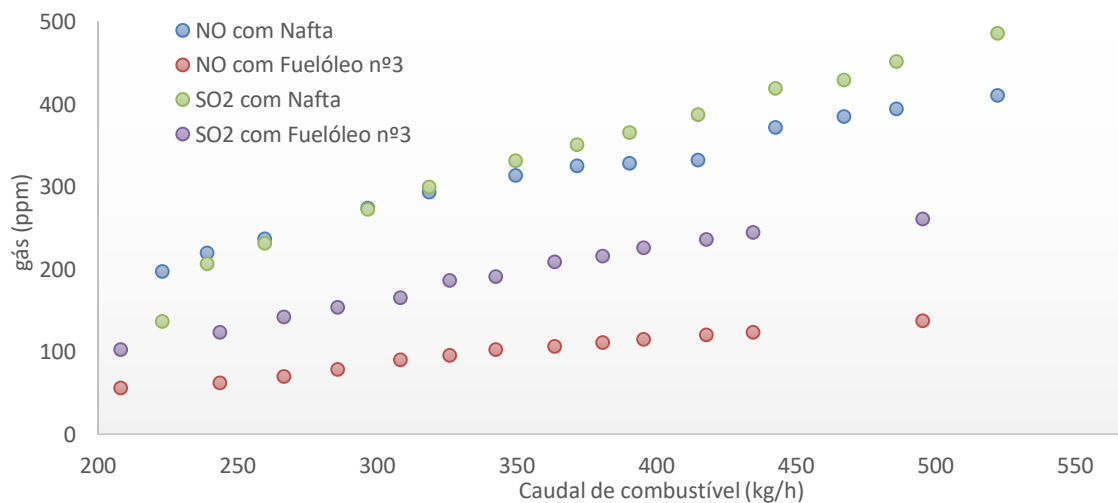


Figura 4.11 Variação do NOx e SO2 em ppm, em função do caudal de cada combustível (kg/h)

A percentagem de NOx e SO<sub>2</sub> aumentou proporcionalmente ao caudal de combustível utilizado. Com o fuelóleo nº3 os valores dos poluentes, NOx e SO<sub>2</sub>, foram inferiores (variação percentual de 66,6 a 71,9% e 25,4 a 46,3% respetivamente), o que é uma grande vantagem para o ambiente e caldeira.

Por fim, analisaram-se as aberturas das válvulas de fuel e de atomização em função dos caudais e pressões de combustível respetivas, para perceber se seria necessário proceder a alguma alteração do sistema de controlo. Nas figuras 4.12 e 4.13 estão representadas as percentagens de aberturas das válvulas de fuel e respetiva atomização

em função do caudal de fuel e da pressão de atomização, respetivamente.

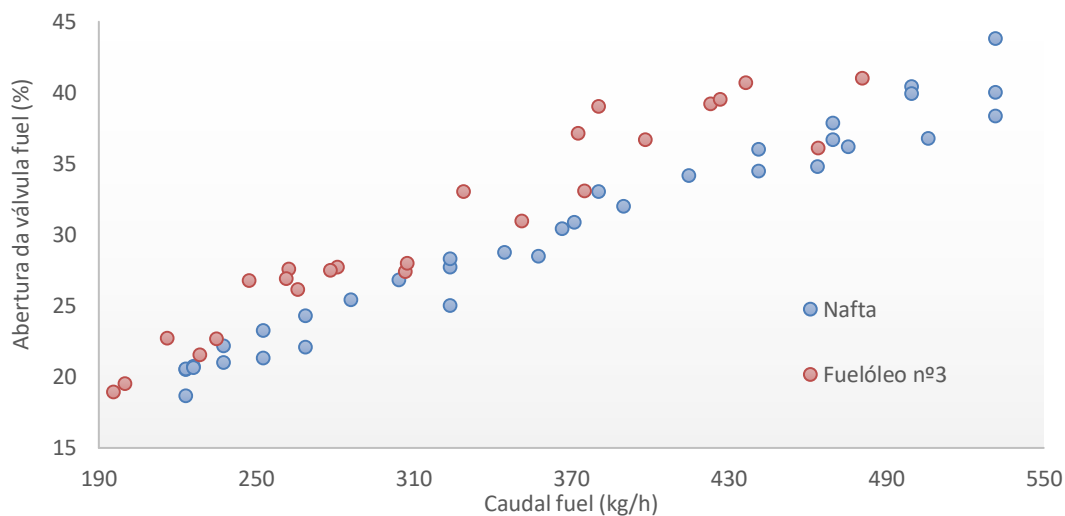


Figura 4.12 Resultados relativos à % de abertura da válvula de fuel, em função do caudal de fuel (kg/h)

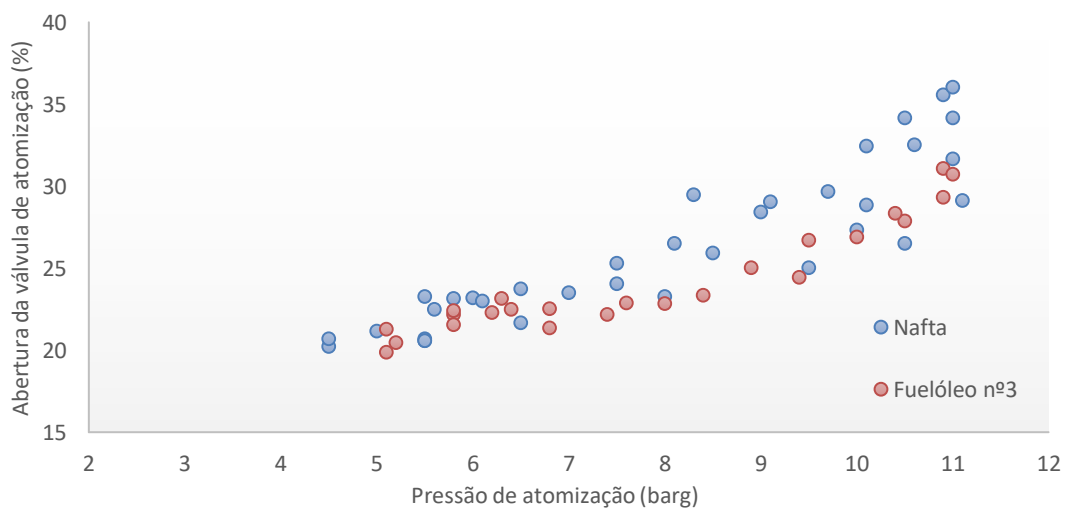


Figura 4.13 Resultados relativos à % de abertura da válvula de atomização, em relação à pressão de atomização (barg)

Os valores da percentagem de abertura das válvulas foram muito idênticos em ambas as situações, não sendo visível uma alteração significativa que demonstre ser necessário alterar a curva de abertura das mesmas em função do caudal de combustível.

No final, após todos os testes à utilização do Fuelóleo nº 3, realizou-se uma paragem da caldeira nº 2, entrou-se no seu interior e, embora tenham sido detetados alguns resíduos depositados no chão, concluiu-se que não existe nenhuma anomalia a registar.

## 5. Análise de Custos e Sugestões de Melhorias

Neste trabalho não foi possível fazer uma análise económica completa, uma vez que os preços dos combustíveis se baseiam em parâmetros que estão em constante mudança, diariamente, como é o exemplo dos índices “ICE Brent Futures” e “High CIF NWE do Fuel 1% S” que nem sempre variam na mesma proporção. A variação nos últimos meses destes parâmetros que influenciam o preço de cada um dos combustíveis, encontra-se apresentada no anexo L <sup>[42]</sup> <sup>[43]</sup>. Contudo poderá ser feita uma análise da evolução dos preços em várias semanas, iniciando na semana em que se conseguiu negociar o preço do combustível alternativo.

O preço do fuelóleo nº3 diminuiu para um valor próximo do da nafta, tal como se pode verificar na Tabela 5.1, e considerou-se um gasto de 50 toneladas/semana.

Tabela 5.1 Preços semanais de cada tipo de combustível no período entre 12 de junho e 10 de setembro

Semana	Nafta (€)	Combustível alternativo (€)	Diferença (%)	Poupança/tonelada (€)	Poupança/semana (€)
12 a 18 Jun	401,84 €	387,11 €	3,67	14,73 €	736,55 €
19 a 25 Jun	398,99 €	386,59 €	3,11	12,40 €	620,16 €
26 a 2 Jul	397,68 €	387,41 €	2,58	10,27 €	513,28 €
3 a 9 Jul	409,73 €	396,19 €	3,30	13,54 €	677,08 €
10 a 16 Jul	411,58 €	396,83 €	3,58	14,75 €	737,48 €
17 a 23 Jul	409,51 €	388,92 €	5,03	20,59 €	1029,45 €
24 a 30 Jul	393,53 €	374,86 €	4,74	18,67 €	933,26 €
31 a 6 Ago	406,38 €	379,81 €	6,54	26,57 €	1328,72 €
7 a 13 Ago	404,17 €	379,81 €	6,03	24,36 €	1218,07 €
14 a 20 Ago	399,73 €	380,88 €	4,72	18,85 €	942,38 €
21 a 27 Ago	392,95 €	380,97 €	3,05	11,98 €	598,90 €
27 a 3 Set	396,73 €	385,55 €	2,82	11,18 €	559,12 €
4 a 10 Set	404,04 €	394,12 €	2,45	9,92 €	495,82 €
11 a 17 Set	400,77 €	398,57 €	0,55	2,20 €	110,00 €
18 a 24 Set	405,34 €	403,31 €	0,50	2,03 €	101,50 €
25 a 1 Out	404,99 €	401,08 €	0,97	3,91 €	195,50 €
2 a 8 Out	422,16 €	413,33 €	2,09	8,83 €	441,50 €
9 a 15 Out	451,9 €	434,8 €	3,78	17,10 €	855,00 €
				Total	12093,78 €

Como é possível observar da tabela anterior, ao longo das 18 semanas poderia ter sido possível poupar 12093,78 € se se tivesse optado pelo fuelóleo nº 3, o que

corresponderia a uma poupança anual de 35031,64 €.

Fatores como o mercado da oferta/procura, restrições ambientais, impostos, logística, entre outros, alteram os valores destes índices e, conseqüentemente, o preço de cada combustível. No entanto pela margem apresentada é possível concluir que o combustível alternativo em estudo trará lucro económico para a empresa.

Na Tabela 5.2 apresentam-se discriminados todos os gastos despendidos para o teste deste combustível na RAR.

*Tabela 5.2 Gastos despendidos nos vários equipamentos/montagens necessários para o teste do combustível alternativo.*

<b>Gastos necessários</b>	<b>Preço</b>
<b>Empresa: Energest</b> Montagem mangueiras; Tubagem aço carbono; 3 Válvulas globo	1150 €
<b>Empresa: STB</b> Construção de nova bacia de retenção	3200 €
<b>Empresas: Ecoslops/Combustoil</b> Reservatório 40000L, válvula de retenção e mangueiras inox	Suportado pela Empresa fornecedora
<b>Empresa: KSB</b> Bomba de carretos SNH 80 ER 46	9350 €
<b>Empresa: BVALVE</b> 1 Válvula globo	95,20 €
<b>Empresa: ISQ</b> Certificado de inspeção do projeto	310 €
<b>Empresa: Fivespillard</b> Técnico especializado em caldeiras de prevenção para o teste do novo fuel	2303 €
<b>Investimento Total</b>	<b>16408,2 €</b>

O investimento total para o teste ou para a futura utilização deste combustível foi de 16408,2 €, como demonstrado na Tabela 5.2. O *payback* (período de recuperação do investimento) deste investimento será de 5 meses e 19 dias, caso se opte pela continuação de utilização do fuelóleo nº3, como demonstrado no anexo M. Convém ainda referir que a bomba usada já pertencia à RAR desde 2005 e foi aproveitada para este fim. Caso não se contabilizasse esta bomba para os cálculos, o *payback* diminuiria para 2

meses e 13 dias.

Em jeito de sugestão destaca-se o isolamento de algumas válvulas e o melhor isolamento das portas da chaminé e economizador, de modo a diminuir as perdas energéticas e aumentar o rendimento da caldeira, a troca de alguns equipamentos/válvulas mais degradados por equipamentos mais recentes e o evitar trabalhar a caudais baixos de combustível, pois o rendimento diminui drasticamente com excessos de ar elevados.

Para além destas medidas poderia ainda ser estudado a aplicação de um permutador de calor para pré-aquecer o ar até cerca de 60°C. Foi feito o cálculo teórico para o ensaio de 522,33 kg/h de nafta e concluiu-se que o rendimento poderia aumentar cerca de 0,4% (aumentaria as perdas associadas à humidade do ar de 0,3 para 1,3%, assim como os créditos relativos à humidade do ar à entrada, de 0,02 para 0,2%, e os créditos devido à energia relativa ao ar seco, de 0,4 para 1,6%). Este aumento do rendimento em apenas 0,4%, em princípio não seria rentável para a empresa devido ao grande investimento inicial da compra e instalação do permutador.



## 6. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

A aplicação do método direto para o cálculo do rendimento da caldeira nº2 mostrou que os seus resultados são pouco rigorosos devido à não contabilização das várias perdas energéticas.

Aplicando o método indireto baseado na norma ASME PTC 4-2013 esta apresentou uma gama de rendimentos entre os 68,8 e os 82,2% para caudais de nafta entre 220 e 550 kg/h. Para a mesma gama de caudais de combustível, os rendimentos obtidos pelo método indireto baseado na ADENE foram acompanhados de uma variação percentual superior entre 5,0 e 6,9%. Esta diferença explica-se porque a norma ASME inclui no seu cálculo mais perdas energéticas e, por tal, mais próximo da realidade e deve ser implementada na empresa.

Analisando os rendimentos a partir da variação do excesso de ar concluiu-se que a melhor gama se obteve com uma percentagem de excesso de ar baixa, inferior a 50%, pois para valores muito altos, a rondar os 200%, o rendimento diminuiu cerca de 13%.

A variação da pressão da caldeira não influenciou os valores de rendimento.

Em relação aos gases de combustão concluiu-se que existe uma tendência para o aumento de CO<sub>2</sub> (de 5,1 para 11,3%), SO<sub>2</sub> (de 137 para 486ppm) e NO<sub>x</sub> (de 197 para 411ppm) com o aumento de caudal de combustível de 223 para 522kg/h. Inversamente, o O<sub>2</sub> e CO nos gases de combustão diminuem (de 14,3 para 5,6% e de 567 para 18ppm, respetivamente) com o aumento de combustível, para os mesmos caudais. Verificou-se ainda que todas as análises aos gases de combustão (empresa Sondar.i) registaram valores inferiores ao VLE (Valor limite de emissão).

Os testes de utilização do novo combustível (fuelóleo nº3) na caldeira nº2 permitiram concluir que os rendimentos se aproximam muito dos obtidos com a nafta, depois de alterada a relação ar-combustível, sendo acompanhados de erros inferiores a 1% para toda a gama de caudais. Com esta alteração, o caudal de vapor produzido para a mesma quantidade de combustível também foi muito semelhante, sendo até 7% superior para o fuelóleo nº3. Acrescente-se ainda a vantagem de, para os mesmos caudais de fuel, se obter uma diminuição da emissão dos poluentes NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub>. Por exemplo, para um caudal a rondar os 490 kg/h, a caldeira emitiu 137 e 261 ppm com fuelóleo nº 3, em vez dos 394 e 452 ppm com nafta. Por fim, resta dizer que a caldeira não apresentou alterações ou anomalias na realização destes testes.

A análise económica realizada à modificação do combustível de alimentação à caldeira nº 2 permitiu concluir que, embora seja necessário um investimento de 16408 €, a empresa consegue um *payback* de 5 meses e 19 dias, caso se considere a aquisição de uma bomba de abastecimento nova.

Como sugestões referem-se a necessidade de projetar um depósito e respetiva bacia de retenção para as 3 caldeiras, o isolamento de algumas válvulas e melhorar o mesmo nas portas da chaminé e economizador (de modo a diminuir as perdas energéticas e aumentar o rendimento da caldeira), a troca de alguns equipamentos/válvulas mais degradados por outros mais recentes e, por fim, evitar trabalhar a caudais baixos de combustível, pois o rendimento diminui drasticamente com excessos de ar elevados.

Sugere-se ainda o estudo da degradação temporal dos equipamentos devido à utilização deste novo combustível ou o estudo da alimentação com fuelóleo nº3 misturado com gás natural, pois a caldeira possui um queimador misto.

Em jeito de conclusão pode-se ainda referir que se ficou com uma instalação que permite a qualquer momento fazer testes com este ou qualquer outro combustível existente no mercado.

## Referências Bibliográficas

- [1] - ADENE (2016). *Relatório final de Ação de Promoção de Eficiência Energética em Caldeiras de Vapor e de Termofluído*;
- [2] - Henrique Bettoni (2014). *Monitoramento das emissões atmosféricas de caldeiras de projetos distintos*;
- [3] - AlMinho (2018). *Manual de boas práticas para a eficiência energética*. [online] disponível em: [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) [acedido a 6 de abril de 2018];
- [4] – DGEG, Direção Geral de Energia e Geologia (2016). *Balanço energético de 2016*;
- [5] - Portal do Estado do Ambiente (2018). *Produção e Consumo de Energia*. [online] disponível em: <https://rea.apambiente.pt/content/produ%C3%A7%C3%A3o-e-consumo-de-energia> [acedido a 6 de abril de 2018];
- [6] - Empresa RAR (2018). [online] disponível em: <http://www.rar.com/pt/> [acedido a 20 de março de 2018];
- [7] - História da RAR (2018). [online] disponível em: <http://www.docerar.pt> [acedido a 20 de março de 2018];
- [8] - Requalificação do edifício RAR Açúcar (2018). [online] disponível em <http://aslassociados.com/en/portfolio-item/requalificacao-do-edificio-rar-acucar-2/> [acedido a 6 de abril 2018];
- [9] - Ana Virgínia Gonçalves Gomes (2010). *Integração Da Análise Energética na Gestão Industrial De Uma Refinaria De Açúcar*. Tese de mestrado em Engenharia Química. Instituto Superior de Engenharia do Porto;
- [10] - Lerenio Machado (2017). *Apontamentos da unidade curricular de “Fenómenos de Conversão” – Mestrado em Engenharia Química, ramo de Energia e Biorrefinaria*;
- [11] - Revista Meio Filtrante (2013). *Normas para construção e utilização de vasos de pressão*;
- [12] - Assis,C (2017). *Apontamentos da unidade curricular de “Utilidades - Vapor de Aquecimento” - Mestrado em Engenharia Química*;
- [13] - Adivan Tonin (2014). *Análise Técnica e Económica Para Queima de Resíduo da Filtração de Biodiesel em Caldeiras*;
- [14] – Manual prático “*Eficiência energética no uso de vapor*” (2013) [online] disponível em: <https://proframonsilva.files.wordpress.com/2013/12/manual-vapor.pdf> [acedido a 4 de abril de 2018];
- [15] – Esquema de caldeira aquatubular – Nationwide Boiler (2018) [online] disponível em: <https://www.nationwideboiler.com/babcock-wilcox-boilers.html> [acedido a 22 de Setembro de 2018];

- [16] - Luiz Carlos Martinelli (2003). *Geradores de Vapor*;
- [17] – Torino Soluzioni Ambientali (2018). Vantagens das caldeiras aquatubulares. [online] Disponível em: <http://www.tsambientali.com.br/como-funcionam-caldeiras-aquatubulares-e-quais-suas-vantagens/> [acedido a 23 de março de 2018];
- [18] – Vale (2018). Operador de Caldeira. [online] disponível em: <http://cntq2.hospedagemdesites.ws/wp-content/uploads/2013/05/Caldeiras.pdf> [acedido a 23 de março de 2018];
- [19] – João Macedo (2016). *Avaliação das Perdas Energéticas e Otimização da Razão Ar/Fuelóleo em Caldeira Aquatubular de Uma Indústria de Processo Químico*. Tese de mestrado em Engenharia Química. Instituto Superior de Engenharia do Porto;
- [20] - Diego Júnior de Oliveira (2014). *Análise da Operação de Caldeiras De Acordo com a NR-13*;
- [21] - Mateus Zart de Arruda (2009). *Análise de combustíveis de caldeiras*;
- [22] - Patrícia Isabel Caramona Fernandes (2015). *Estudo da Biomassa Florestal Residual Consumida em Centrais Termoelétricas*;
- [23] - Friedl, A., Padouvas, E., Rotter, H., Varmuza, K. (2005). *Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition*, Analytica Chimica Acta, 544: 191–198;
- [24] – L.B. Meirelles, S.M.C. da Silva e K. Rajagopal (2014) – *Caraterização da nafta petroquímica para a produção de aromáticos*;
- [25] - Indústria Petroquímica (2018). [online] disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3318388/mod\\_resource/content/1/07.MGS\\_CASO\\_IND\\_PETROQUIMICA.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3318388/mod_resource/content/1/07.MGS_CASO_IND_PETROQUIMICA.pdf) - [acedido a 3 de abril de 2018];
- [26] – GALP (2018) - *Ficha técnica da nafta petroquímica*;
- [27] – José Carlos Laurindo (2014). *Poderes caloríficos de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos*;
- [28] - Ecoslops (2016). *Produzir novos combustíveis a partir de resíduos petrolíferos de navios*;
- [29] – Ecoslops (2016) – *Ficha técnica do combustível marítimo*;
- [30] - Renato Vergnhanini Filho (2017). *Metodologia de Cálculo do Rendimento Térmico de Caldeiras Operando com Carvão Mineral*;
- [31] - ASME, 2013 “*Fired Steam Generators - Performance Test Codes*”. Patente PTC 4;
- [32] - C. Brooks (2010). *Excess air and boiler efficiency*;
- [33] – Paulo Cesar C. Pinheiro, Ramon Molina Valle (2018). *Controle de Combustão: Otimização do Excesso de Ar*. [online] disponível em: <http://www.geocities.ws/paulocpinheiro/papers/excesso.pdf> [acedido a 4 de abril de 2018];
- [34] - Daniela Martins (2015). *Otimização do Funcionamento de Caldeiras Aquatubulares em Indústria de Processo Químico*;

- [35] - Jurandir Itizo Yanagihara (2016). *Maquinas Térmicas: Fornalhas*;
- [36] – Pillard (2014). *GRC Lonoxflam, burners, oil and gas fired*;
- [37] – Thiago Ferrari (2017) – *Conceitos e aplicações das válvulas industriais*;
- [38] - Fecho M.M.; Roque K.A. (2009) - *Mecânica dos Fluidos*;
- [39] – Tubos para canalizações (2018). [online] Disponível em: <http://www.jsoarescorreia.pt/wp-content/uploads/1111/11/tubos.pdf> [acedido a 20 de Julho de 2018];
- [40] – Unival (2018) - Válvulas globo. [online] Disponível em: <https://www.unival.com.br/produto/valvulas-industriais/valvula-globo/> [acedido a 22 de Setembro de 2018];
- [41] – RAR (2018) – *Plantas em AutoCad disponibilizadas pela RAR Açúcar*.
- [42] – Barchart (2018) – Evolução do índice NEW 1%S. [online] Disponível em: <https://www.barchart.com/futures/quotes/J1XV18/interactive-chart> [acedido a 2 de Outubro de 2018];
- [43] – Tfc Markets (2018) – Evolução do índice Brent. [online] Disponível em: <https://www.ifcmarkets.pt/market-data/commodities-prices/brent> [acedido a 2 de Outubro de 2018];



## Anexos

### Anexo A – Características dos combustíveis

#### Anexo A.1 – Poder calorífico e densidade da nafta petroquímica [27]

Na tabela A.1, encontra-se representado os poderes caloríficos e a densidade de combustíveis líquidos segundo o decreto lei n.º 88/90. Desta tabela, foram retirados os dados do poder calorífico da nafta usada neste trabalho.

Tabela A. 1 Poderes Caloríficos Inferiores e Factores de Emissão para Combustíveis

Combustível	PCI (MJ/kg)	PCI (tep/t)	FE (kgCO <sub>2</sub> e/GJ)	FE (kgCO <sub>2</sub> e/tep)
Antracite	26,7	0,638	98,2	4111,4
Betume / Alcatrão	40,2	0,96	80,6	3374,6
Biogasolina e Biodiesel	27	0,645	0	0,0
Briquetes de lignite	20	0,478	101,1	4232,9
Briquetes de turfa	16 — 16,8	0,382 — 0,401	105,9	4433,8
Carvão betuminoso	25,8	0,616	94,5	3956,5
Carvão sub-betuminoso	18,9	0,451	96,0	4019,3
Carvão vegetal	29,5	0,705	0	0,0
Combustível para motor (gasolina)	44 — 45	1,051 — 1,075	69,2	2897,3
Coque de Carvão	28,2	0,674	94,5	3956,5
Coque de forno / lignite ou gás	28,2 — 28,5	0,674 — 0,681	107	4479,9
Coque de Petróleo	31 — 32,5	0,740 — 0,776	97,5	4082,1
Etano	46,4	1,108	61,6	2579,1
<b>Fuelóleo pesado</b>	<b>40 — 40,4</b>	<b>0,955 — 0,965</b>	<b>77,3</b>	<b>3236,4</b>
Fuelóleo	41,2	0,984	77,3	3236,4
Gás de Alto Forno	2,5	0,060	259,4	10860,6
Gás de coqueria e de fábricas de Gás	38,7	0,924	44,7	1871,5
Gás de forno de acearia a oxigénio	7,1	0,170	171,8	7192,9
Gás de petróleo liquefeito	46 — 47,3	1,099 — 1,130	63,0	2637,7
Gás de Refinaria	49,5	1,182	51,3	2147,8
Gás natural (superior a 93% de metano)	47,2 — 48	1,127 — 1,146	56,1	2348,8
Gás natural liquefeito	44,2 — 45,2	1,056 — 1,080	64,1	2683,7
Gás natural (1)	45,1	1,077	64,1	2683,7
Gases de aterro/ lamas de depuração e outros biogases	50,4	1,204	0	0,0
Gasóleo / Diesel	42,3 — 43,3	1,010 — 1,034	74,0	3098,2
Hulha	17,2 — 30,7	0,411 — 0,733	97,5	4082,1
Lignite castanha	5,6 — 10,5	0,134 — 0,251	101,1	4232,9
Lignite negra	10,0 — 21	0,239 — 0,502	101,1	4232,9
Lubrificantes, ceras parafínicas e outros produtos Petrolíferos	40,2	0,960	73,3	3068,9
Madeira / resíduos de Madeira	13,8 — 15,6	0,330 — 0,373	0	0,0
Matérias-primas para refinaria	43	1,027	73,3	3068,9
Metano	50	1,194	54,9	2298,6
Monóxido de Carbono	10,1	0,241	155,2	6497,9
Nafta química / Condensados de gasolina	44,5	1,063	73,3	3068,9
Óleo de xisto	38,1	0,910	73,3	3068,9

## Anexo A. 2 – Características do combustível alternativo

Na figura A.1 apresenta-se a ficha técnica do combustível alternativo utilizado. Nesta imagem, é possível retirar informações como a densidade, o poder calorífico ou mesmo a percentagem de alguns constituintes do combustível.

FICHA TÉCNICA				
<b>NOME DO PRODUTO</b>	FUELÓLEO N.º 3			
<b>NORMA</b>	Decreto-Lei n.º 142/2010 de 31 de Dezembro			
<b>DATA</b>	22-02-2016			
LISTA DE PROPRIEDADES				
Propriedade	Unidade	Método	Norma	Típico
Massa volúmica a 15°C	kg/m <sup>3</sup>	ISO 12185	A relatar	890
Viscosidade cinemática @ 100 °C	mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104	máx. 17	2 - 15
Ponto de inflamação	°C	ISO 2719	min. 60	> 65
Teor de água	% (v/v)	ISO 3733	máx. 0.8	< 0.10
Sedimento total	% (m/m)	ISO 10307-1	máx. 0.20	0.10
Teor de enxofre	% (m/m)	ISO 8754	máx. 1.0	< 0.8
Teor de cinzas	% (m/m)	ISO 6245	máx. 0.15	< 0.05
Poder Calorífico Inferior	MJ/kg	ISO 8217-Anexo E		≥ 41.5
Poder Calorífico Superior	MJ/kg	ISO 8217-Anexo E		≥ 43.5

Figura A.1 Ficha técnica do combustível marítimo utilizado (combustível alternativo) <sup>[29]</sup>

ECOSLOPS PORTUGAL, S.A.  
 RUA FILIPE FOLQUE, 10J 3º ESQ.  
 1050 - 113, LISBOA  
 Portugal  
 228295001



Attention of : Ms. A. Páscoa

### Analysis Report

Report number	: 11201/00010046.2/L/16	Submitted date	: 01-03-2016
Main Object	: Amostra para análise	Sample submitted at	: Saybolt Portugal
Report Date	: 09-03-2016	Date received	: 01-03-2016
Date of issue	: 09-03-2016	Date completed	: 09-03-2016
Sample object	: Amostra para análise	Sample number	: 3394215
Sample type	: Submitted		
Sample submitted as	: Fuelóleo nº3		
Marked	: Amostra para análise (FO - 01+02+03) 01032016-3-1064		

NAME	METHOD	UNIT	SPECS		RESULT
			Min	Max	
Density at 15°C	ISO 12185	kg/m <sup>3</sup>			890.6
Kinematic Viscosity at 100°C	ISO 3104	mm <sup>2</sup> /s			3.201
Flash point (PM) procedure B	EN ISO 2719	°C			83.5
Sulphur (S)	ISO 8754	mass %			0.59
Gross Specific Energy	ISO 8217 (Annex E)	MJ/kg			44.99
Net Specific Energy	ISO 8217 (Annex E)	MJ/kg			42.34

Figura A.2 Ficha de análise do combustível alternativo <sup>[29]</sup>

## Anexo B – Parâmetros auxiliares para o cálculo do rendimento

### Anexo B.1 – Determinação das cinzas do combustível habitual (nafta)

A determinação das cinzas no combustível foi realizada, segundo a norma ASTM D 5347-2001.

O cálculo da %cinzas foi determinado através de:

$$\%cinzas = \frac{m \text{ cinzas}}{m \text{ amostra}} \times 100$$

$$\%cinzas = \frac{0,0071 \text{ g}}{4,7189 \text{ g}} \times 100 = 0,15\%$$

### Anexo B.2 – Determinação do carbono orgânico total no resíduo

Para a determinação do carbono orgânico total do resíduo, realizou-se várias medições, sendo feita uma média entre os valores medidos na figura B.1.

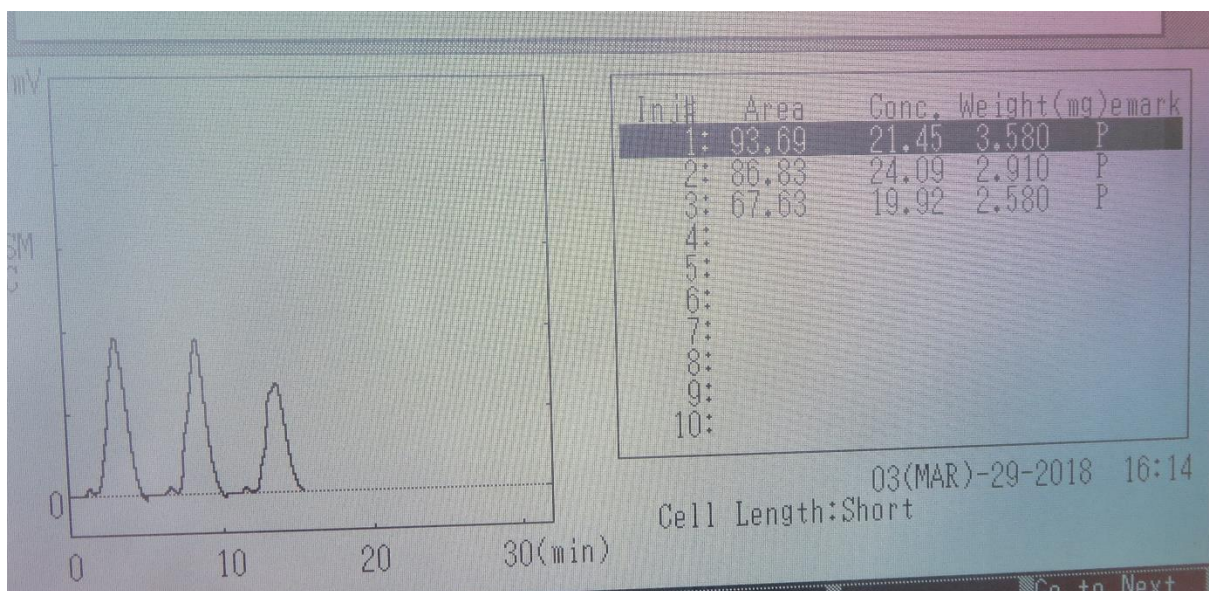


Figura B.1 Resultados da determinação do Carbono orgânico total do resíduo

$$C_{\text{orgânico total}} = \frac{21,45\% + 24,09\% + 19,92\%}{3} = 21,82\%$$

### Anexo B.3 - Análise elementar do resíduo

A análise elementar do resíduo foi realizada 3 vezes, no entanto é apenas apresentado o relatório que atingiu os valores intermédios destas 3 medições. Este relatório está apresentado na figura B.2.



Thermo Fisher Scientific  
900 Middlesex Turnpike  
Billerica, MA 01821.

#### Certificate of Verification

XL3t-46115

Reading No 100  
Mode MINING  
Time 2015-11-16 03:49  
Duration 180.00  
Sequence Final  
Flags 8mm  
SAMPLE  
LOCATION  
INSPECTOR  
MISC  
NOTE



	%	±	Error
Sn	< LOD	:	0.003
Cd	< LOD	:	0.002
Pd	< LOD	:	0.002
Ag	< LOD	:	0.003
Mo	0.006	±	0.001
Nb	< LOD	:	0.002
Zr	< LOD	:	0.002
Sr	0.004	±	0.001
Rb	< LOD	:	0.002
Bi	< LOD	:	0.002
As	0.007	±	0.001
Se	0.010	±	0.001
Au	< LOD	:	0.003
Pb	< LOD	:	0.002
W	< LOD	:	0.007
Zn	0.048	±	0.001
Cu	0.026	±	0.002
Ni	1.821	±	0.020
Sb	0.010	±	0.001
Co	0.138	±	0.011
<b>Fe</b>	<b>14.575</b>	<b>±</b>	<b>0.102</b>
Mn	0.069	±	0.005
Cr	0.120	±	0.005
V	1.517	±	0.014
Ti	0.041	±	0.003
Ca	0.231	±	0.009
K	0.040	±	0.008
Al	< LOD	:	0.377
P	< LOD	:	0.062
Si	0.406	±	0.054
Cl	0.089	±	0.008
<b>S</b>	<b>16.332</b>	<b>±</b>	<b>0.110</b>
Mg	< LOD	:	4.350
Ba	0.008	±	0.004

Figura B. 2. Análise elementar do resíduo

## Anexo B.4 – Condutividade da água

A condutividade da água, permite a partir do cálculo apresentado a seguir, saber o total de sólidos dissolvidos tanto na água de alimentação como na água da caldeira.

- Total de sólidos dissolvidos na alimentação (TDSf):

$$TDSf = \text{Condutividade} \times \text{fator de conversão}$$

$$TDSf = 4,22 \times 1,365 = 5,760$$

- Total de sólidos dissolvidos na caldeira (TDSc):

$$TDSc = 450,5 \times 0,7159 = 322,51$$

## Anexo C – Relatório de controlo de emissões de poluentes atmosféricos



Relatório de ensaio nº 11408  
Código RCR-cl02



RAR Cogeração - Unipessoal Lda  
Caldeiras nº 2 e nº 3

1.	Objetivo dos ensaios.....	2
2.	Informação contratual.....	2
3.	Cronograma dos trabalhos.....	2
4.	Ensaio / Norma de referência / Metodologia.....	2
5.	Equipa técnica.....	2
6.	Equipamentos usados.....	3
7.	Caraterísticas da fonte.....	3
7.1.	Informações determinadas pela Sondar.i.....	3
7.2.	Informações fornecidas pelo operador.....	3
8.	Períodos de amostragem.....	4
9.	Desvios às normas justificações e consequências.....	4
10.	Resultados.....	4
10.1.	Caraterísticas de escoamento.....	4
10.2.	Parâmetros periféricos.....	5
10.3.	Parâmetros solicitados.....	5
10.4.	Validação de brancos de campo.....	5
10.5.	Notas.....	5
11.	Análise de conformidade legal.....	6
11.1.	Análise do cumprimento / incumprimento dos VLE.....	6
11.2.	Análise dos caudais mássicos.....	6
12.	Anexos.....	6

Elaborado por Altina Ribeiro

Aprovado por Rui Almeida  
(Diretor Técnico)



### 1. Objetivo dos ensaios

Cumprimento do Decreto-Lei nº 78/2004 de 3 de abril (artigos 18º, 19º, 20º e 23º), relativo à prevenção e controlo das emissões de poluentes atmosféricos.

### 2. Informação contratual

Operador: RAR Cogeração - Unipessoal Lda  
Localização: Rua Manuel Pinto de Azevedo, 272,4100-320 Porto  
Fonte amostrada: Caldeiras nº 2 e nº 3

### 3. Cronograma dos trabalhos

Amostragem: 23-03-2018  
Análise laboratorial: 26-03 a 10-04-2018  
Emissão do relatório: 11-04-2018

### 4. Ensaio / Norma de referência / Metodologia

Ensaio	Norma de referência	Metodologia	Amostragem	Análise	Data de amostragem	Data de análise
PTS (Partículas Totais Suspensas)	EN 13284-1:2001	Gravimetria	A	A	23-03-2018	26-03-2018
NO <sub>x</sub> (Óxidos de Azoto, expressos em NO <sub>2</sub> )	EN 14792:2005	Quimiluminiscência	A	A	23-03-2018	23-03-2018
SO <sub>2</sub> (Dióxido de Enxofre)	EN 14791:2005	Titulometria (Nítrato de Thorin)	A	A	23-03-2018	04-04-2018
CO (Monóxido de Carbono)	EN 15058:2006	Infravermelhos Não dispersivos	A	A	23-03-2018	23-03-2018
COVT (Compostos Orgânicos Voláteis Totais, expressos em C)	EN 12619:2013	FID (Flame Ionization Detection)	A	A	23-03-2018	23-03-2018
H <sub>2</sub> S (Sulfureto de Hidrogénio)	VDI 3486-2:1979	Titulometria (Iodometria)	A	A	23-03-2018	10-04-2018
O <sub>2</sub> (Oxigénio)	EN 14789:2005	Paramagnético	A	A	23-03-2018	23-03-2018
CO <sub>2</sub> (Dióxido de Carbono)	MI.30 ed2 2015-08-28	Infravermelhos Não dispersivos	A	A	23-03-2018	23-03-2018
H <sub>2</sub> O (Humidade)	EN 14790:2005	Gravimetria	A	A	23-03-2018	23-03-2018
Velocidade	ISO 10780:1994	Pressão diferencial	A	A	23-03-2018	23-03-2018
Caudal Volúmico	ISO 10780:1994	Pressão diferencial	A	A	23-03-2018	23-03-2018
Legenda:	A = Acreditado	NA = Não acreditado	SC = Subcontratado			

Os ensaios assinalados com (SC/A), encontram-se fora do âmbito de acreditação da Sondar.i e foram subcontratados a laboratório com o método acreditado.

Os ensaios assinalados com (SC/NA), encontram-se fora do âmbito de acreditação da Sondar.i e foram subcontratados a laboratório com o método não acreditado.

As amostragens realizadas foram da inteira responsabilidade da Sondar.i.

### 5. Equipa técnica

Trabalho de campo: Nuno Tavares, Ricardo Cardoso  
Análise laboratorial: Juan Mário Pereira, Milena Matias e Miguel Pinto  
Elaboração do relatório: Altina Ribeiro  
Diretor técnico / Validação do relatório: Rui Almeida

Os ensaios assinalados com (\*) não estão incluídos no âmbito da acreditação.  
O conteúdo deste relatório é confidencial, devendo a Sondar.i respeitar esse direito.  
Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente aos itens ensaiados.  
Este relatório só pode ser reproduzido na íntegra, exceto quando seja autorizado pela Sondar.i.  
Página 2 de 6// MS.0219a/53

## 6. Equipamentos usados

Parâmetro	Marca	Modelo	Nº de Série
PTS	SICK Gravimat	SHC 502	78703
CO, NO <sub>x</sub> , CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	Horiba	PG-250	9080047
COVT	Mess Analysetechnik GmbH	PT	4999405
SO <sub>2</sub>	Itrón	G4 Gallus	006054123
H <sub>2</sub> S	Itrón	G4 Gallus	0000033048

## 7. Características da fonte

### 7.1. Informações determinadas pela Sondar.i

Código Sondar.i	RCR-cl02
Diâmetro interno (cm)	192
Área (m <sup>2</sup> )	2,895
N.º de pontos de amostragem (EN 15259:2007)	7+6
N.º de tomas necessárias (EN 15259:2007)	2
N.º de tomas de amostragem existentes	2
Cumprimento da localização da secção de amostragem, relativamente às perturbações a montante e jusante (NP 2167:2007)	Sim
Cumprimento da localização da secção de amostragem (EN 15259:2007, ponto 6.2.1c)	Não

### 7.2. Informações fornecidas pelo operador

Designação da fonte	Caldeiras nº 2 e nº 3
Código interno	CALD-0003/ CALD-0001
Descrição do processo associado	Processo contínuo de combustão com paragem ao fim-de-semana
Condições relevantes do processo	Entrada em vigor antes de 23 de Junho de 2009
Combustível usado	Caldeira 2 100% Fuelóleo Caldeira 3 60% Fuelóleo 40% Gás natural
Equipamentos de redução ou tratamento de emissões	Não existentes
Horário / Tipo de funcionamento	Funcionamento contínuo durante os dias da semana
Altura (m)	30,5
Capacidade nominal (t/h)	Caldeira 2: 13,6 Caldeira 3: 35,0
Capacidade usada (%)	Caldeira 2: 80 Caldeira 3: 80

## 8. Períodos de amostragem

Ensaio	Início	Fim
Caraterísticas de escoamento	11:05	11:47
CO, NO <sub>x</sub> , O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>	11:15	12:00
PTS	11:05	11:47
COVT	11:10	12:00
H <sub>2</sub> S	11:04	11:51
SO <sub>2</sub>	11:03	11:41
H <sub>2</sub> O	11:03	11:41

## 9. Desvios às normas justificações e consequências

Foram efetuados os testes previstos no ponto 6.2.1 c) da EN 15259:2007, que visam assegurar que a localização do plano de amostragem é adequada à caracterização do efluente gasoso. Destes, conclui-se serem cumpridos os requisitos estipulados na norma.

## 10. Resultados

Os valores determinados, constantes deste relatório, são representativos da concentração dos poluentes em causa, para o período de tempo em que se realizou a amostragem e foram corrigidos para as condições normais de pressão e temperatura definidas no artigo 4º, alínea N, Decreto-Lei n.º 78/2004 de 3 de Abril. São elas:

Pressão normal: 760 mmHg (101.3 kPa).

Temperatura normal: 0° C (273.15 K).

A incerteza expandida apresentada está expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo fator K=2, o qual para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de expansão de, aproximadamente, 95%. A incerteza foi calculada de acordo com o documento "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement".

### 10.1. Caraterísticas de escoamento

Ensaio	Valor	Incerteza
Pressão Absoluta no Interior da Conduta (hPa)	1011	±6
Pressão Absoluta no Interior da Conduta (Pa)	101100	±58·10 <sup>4</sup>
Temperatura Média dos Gases (°C)	239	±14
Temperatura Média dos Gases (K)	512	±14
Massa molecular dos Gases em Base Húmida (g/mol)	28,7	±0,3
Velocidade do Escoamento (m/s)	4,4 <sup>*)</sup>	±0,2
Caudal Volúmico Efetivo (m <sup>3</sup> /h)	45621	±16·10 <sup>2</sup>
Caudal Volúmico Seco (Nm <sup>3</sup> /h, ar seco)	21578	±97·10 <sup>4</sup>
Isocinetismo (%)	105	-

Os ensaios assinalados com (\*) não estão incluídos no âmbito da acreditação.

O conteúdo deste relatório é confidencial, devendo a Sondar.i respeitar esse direito.

Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente aos itens ensaiados.

Este relatório só pode ser reproduzido na íntegra, exceto quando seja autorizado pela Sondar.i.

Página 4 de 6// MS.0219a/53

### 10.2. Parâmetros periféricos

Ensaio	Valor (%)	Incerteza
H <sub>2</sub> O	11,1	±0,7
O <sub>2</sub>	2,8	±0,3
CO <sub>2</sub>	11,9	±0,3

### 10.3. Parâmetros solicitados

Ensaio	Concentração (mg/Nm <sup>3</sup> .seco)		Concentração Corrigida (mg/Nm <sup>3</sup> .seco.O <sub>2</sub> ref.)		O <sub>2</sub> ref.	VLE <sup>[1]</sup>	Caudal Mássico (kg/h)		Limiar mássico (kg/h) <sup>[2]</sup>	
	Medida	±	Medida	±			Mínimo	Máximo		
CO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	5034	±25×10 <sup>1</sup>	-	-
CO	377	±9	270	±8	8	500	8,1	±0,4	5	100
NO <sub>x</sub> exp. em NO <sub>2</sub>	348	±16	249	±12	8	500	7,5	±0,5	2	30
SO <sub>2</sub>	281	±27	201	±19	8	1700	6,1	±0,6	2	50
COVT exp. em C	<1,8 <sup>b)</sup>	-	<1,3	-	8	200	<0,04	-	2	30
PTS	187	±12	134	±9	8	150	4,0	±0,3	0,5	5
H <sub>2</sub> S	<2,9 <sup>b)</sup>	-	<2,1	-	8	5	<0,06	-	0,05	1

### 10.4. Validação de brancos de campo

Ensaio	Valor (mg/Nm <sup>3</sup> .seco.8%O <sub>2</sub> )	Critério
SO <sub>2</sub>	<7,5 <sup>b)</sup>	<10% VLE
PTS	<1,1 <sup>b)</sup>	<10% VLE
H <sub>2</sub> S	<2,1 <sup>b)</sup>	-

(Concentração dos brancos de campo corrigida para as mesmas condições da amostra)

### 10.5. Notas

<sup>[1]</sup> Valor Limite de Emissão (VLE) a cumprir, expresso em mg/Nm<sup>3</sup>, gás seco, e quando aplicável corrigido ao oxigénio de referência (Portaria n.º 675/2009 de 23 de junho e Portaria n.º 677/2009 de 23 de junho).

<sup>[2]</sup> Portaria n.º 80/2006 de 23 de janeiro.

<sup>a)</sup> De acordo com o artigo 29º, ponto 3, do Decreto-Lei 78/2004 de 3 de Abril: "(...) sempre que tecnicamente viável, a velocidade de saída dos gases, em regime de funcionamento normal da instalação, deve ser, pelo menos, 6m/s, se o caudal ultrapassar 5000 m<sup>3</sup>/h (...)". Considerando a velocidade média determinada no ponto de amostragem e sabendo que o diâmetro à saída da fonte é de 150 cm, foi calculada uma velocidade de saída dos gases de 7,2 m/s.

<sup>b)</sup> Limite de quantificação.

## 11. Análise de conformidade legal

### 11.1. Análise do cumprimento / incumprimento dos VLE

Os VLE aplicáveis à fonte de emissão constam na legislação indicada no ponto 10.5 deste relatório de ensaio. Constatou-se que todos os VLE foram cumpridos.

### 11.2. Análise dos caudais mássicos

As condições que determinam o regime de monitorização, aplicável à fonte de emissão, constam dos artigos 19.º e 20.º do Decreto-Lei n.º 78/2004, de 3 de abril. Um dos requisitos para essa avaliação é a comparação dos caudais mássicos obtidos, para os poluentes atmosféricos avaliados, com os limiares mássicos mínimos e máximos constantes na tabela n.º 1 da Portaria n.º 80/2006, de 23 de janeiro, para esses mesmos poluentes.

Constatou-se que os caudais mássicos de emissão obtidos para os poluentes de COVT e H<sub>2</sub>S foram inferiores aos limiares mássicos mínimos estabelecidos. Para os restantes poluentes, os caudais mássicos obtidos estiveram compreendidos entre os limiares mássicos mínimo e máximo estabelecidos.

## 12. Anexos

Seguem em anexo os parâmetros auxiliares (parte integrante do relatório), os certificados de calibração dos equipamentos usados e o certificado de acreditação da Sondar.i.

A Sondar.i poderá disponibilizar informação detalhada sobre o Sistema da Qualidade, equipamentos ou outra, mediante solicitação.

## Anexo D – levantamento de dados

Inicialmente, foram medidas todas as temperaturas, caudais, pressões e percentagem de gases para diferentes caudais de combustível (kg/h), a pressões maiores que 21 barg. Na tabela D.1 está apresentada a média destas medições, para efeitos de cálculo.

*Tabela D.1 Média das medições de temperaturas, caudais, pressões e percentagem de gases para diferentes caudais de fuel, a pressões superiores a 21barg*

m fuel (kg/h)	m vap (ton/h)	Tnafta (°C)	Tv (°C)	Tge (°C)	Tgs (°C)	Tae (°C)	Tas (°C)	Tar (°C)	Pv (barg)	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	NO (%)	NOx (ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
223,00	3,00	172,90	258	293	219	213	144	29	21,23	14,34	567	197	197	137	5,05
239,00	3,60	170,87	272	303	219	202	158	29	21,17	13,74	219	220	220	206	5,49
259,67	4,02	164,43	274	310	218	183	139	29	21,07	13,21	95	237	237	231	5,96
296,67	4,63	159,37	273	320	223	188	134	29	21,13	12,07	38	274	274	272	6,67
318,67	4,93	151,63	272	327	227	193	139	29	21,13	11,18	25	293	293	300	7,37
349,67	5,33	147,17	276	331	225	182	137	29	21,13	10,28	19	314	314	332	7,80
371,67	5,70	142,47	277	335	228	188	138	29	21,40	9,52	19	325	325	351	8,21
390,33	6,17	138,13	277	340	227	179	135	29	21,37	9,01	18	328	328	366	8,47
415,00	6,43	135,23	277	344	229	180	134	29	21,30	8,42	19	332	332	387	8,85
442,67	7,13	131,20	277	352	231	175	132	29	21,50	7,63	20	371	371	419	9,50
467,33	7,43	128,23	277	357	234	174	133	29	21,63	7,03	21	385	385	429	10,02
486,00	8,03	126,10	275	360	235	173	132	29	21,53	6,38	18	394	394	452	10,58
522,33	8,57	123,60	275	366	237	174	132	29	21,50	5,63	20	411	411	486	11,27

Na tabela D.2 está apresentado os mesmos parâmetros para pressões inferiores a 21 barg.

Nas tabelas D.3, D.4 e D.5 estão apresentados os mesmos parâmetros da tabela D.1 com a mesma condição de pressão, para semanas diferentes.

*Tabela D.2 Média das medições de temperaturas, caudais, pressões e percentagem de gases para diferentes caudais de fuel, a pressões inferiores a 21barg*

m fuel (kg/h)	m vap (ton/h)	Tnafta (°C)	Tv (°C)	Tge (°C)	Tgs (°C)	Tae (°C)	Tas (°C)	Tar (°C)	Pv (barg)	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	NO (%)	NOx (ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
341,00	3,30	150,00	273	332	225	178	137	30	20,90	10,76	3	304	304	298	7,53
370,00	6,20	145,00	275	335	228	179	137	30	20,70	9,75	1	320	320	315	8,31
416,00	7,20	143,00	271	345	230	174	130	30	19,60	8,40	2	383	383	375	8,95
440,00	7,30	141,00	275	350	233	179	135	30	20,80	7,86	4	397	397	390	9,60
456,00	7,00	136,00	274	352	232	170	128	30	20,60	7,74	5	395	395	391	9,84
465,00	7,10	132,00	275	355	236	176	134	30	20,60	7,36	1	395	395	373	10,01
481,00	7,60	129,00	274	357	235	170	137	30	20,40	7,16	1	407	407	384	10,20
530,00	8,60	127,00	277	367	237	167	129	30	20,80	5,73	2	444	444	461	11,22

*Tabela D.3 Média das medições de temperaturas, caudais, pressões e percentagem de gases para diferentes caudais de fuel, a pressões superiores a 21barg, para outra semana de produção (semana 2)*

m fuel (kg/h)	m vap (ton/h)	Tnafta (°C)	Tv (°C)	Tge (°C)	Tgs (°C)	Tae (°C)	Tas (°C)	Tar (°C)	Pv (barg)	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	NO (%)	NOx (ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
270	5	167	270	305	220	196	145	30	21	12,5	234	201	201	140	5,9
315	4,3	163	271	307	222	187	141	30	21,1	11,1	176	234	234	211	6,3
265	4,5	160	272	311	219	183	139	30	21,2	12,7	182	252	252	223	5,95
302	4,9	149	272	325	224	182	139	30	21,2	11,9	35	291	291	261	6,78
323	5,1	144	273	327	223	182	137	30	21,3	10,95	24	309	309	289	7,51
358	5,5	138	274	328	224	180	135	30	21,4	10,63	10	313	313	302	7,75
367	5,8	136	276	331	225	179	134	30	21,7	9,89	9	320	320	323	8,25
382	5,9	133	275	333	225	179	134	30	21,2	9,62	8	326	326	331	8,5
405	6,3	129	275	338	226	178	135	30	21,3	9,07	8	329	329	348	8,92
443	6,9	127	276	342	228	177	133	30	21,1	8,16	8	372	372	393	9,65
469	7,1	124	277	345	230	176	132	30	21,2	7,38	7	388	388	398	10,06
482	7,4	121	277	351	231	174	131	30	21,4	6,73	8	399	399	414	10,63
510	7,8	118	276	353	233	173	131	30	21,5	5,85	7	405	405	437	11,22

*Tabela D.4 Média das medições de temperaturas, caudais, pressões e percentagem de gases para diferentes caudais de fuel, a pressões superiores a 21barg, para outra semana de produção (semana 3)*

m fuel (kg/h)	m vap (ton/h)	Tnafta (°C)	Tv (°C)	Tge (°C)	Tgs (°C)	Tae (°C)	Tas (°C)	Tar (°C)	Pv (barg)	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	NO (%)	NOx (ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
310	5,5	169	276	320	222	185	141	31	21,5	11,28	52	273	273	270	7,26
343	5,5	162	276	326	223	184	137	31	21,6	10,51	38	300	300	290	7,73
378	6	158	276	330	223	184	139	31	21,6	9,7	34	325	325	324	8,38
408	6,6	153	275	337	225	179	135	31	21,7	8,52	28	353	353	358	9,21
439	7,3	148	275	344	227	178	136	31	22	7,7	27	372	372	389	9,79
464	7,7	146	273	351	230	176	134	31	21,9	6,86	27	385	385	417	10,4
419	7,5	143	271	344	230	174	133	31	21,1	8,06	9	376	376	351	9,3
401	6,6	141	277	334	224	173	138	31	21,6	9,3	7	371	371	334	8,67
509	7,6	137	278	348	228	179	137	31	22,3	5,63	18	415	415	462	11,33
440	4,9	134	263	341	226	164	128	31	21	7,92	6	409	409	380	9,67
471	7,8	128	277	347	228	168	140	31	21,1	7,1	4	416	416	393	9,98
495	8	126	273	353	236	193	139	31	21,6	6,15	6	443	443	440	10,78

*Tabela D.5 Média das medições de temperaturas, caudais, pressões e percentagem de gases para diferentes caudais de fuel, a pressões superiores a 21barg, para outra semana de produção (semana 4)*

m fuel (kg/h)	m vap (ton/h)	Tnafta (°C)	Tv (°C)	Tge (°C)	Tgs (°C)	Tae (°C)	Tas (°C)	Tar (°C)	Pv (barg)	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	NO (%)	NOx (ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
240	4,2	141,2	259	301	220	193	146	31	21,3	13,8	235	211	211	156	5,5
256	4,2	140	262	308	221	191	158	31	21,2	13,3	105	230	230	219	6,01
291	4,5	136,1	263	316	222	188	139	31	21,3	12,15	45	268	268	265	6,57
314	4,8	126,5	262	325	226	187	137	31	21,4	11,45	29	291	291	272	7,26
351	5,2	122,2	263	330	225	187	137	31	21,6	10,35	26	306	306	324	7,77
374	5,7	118,8	264	334	227	184	136	31	21,8	9,63	18	318	318	346	8,16
392	6,2	114,6	265	338	228	182	136	31	21,6	9,08	8	326	326	364	8,48
420	6,5	111,1	265	344	228	181	135	31	21,3	8,53	7	338	338	389	8,91
439	6,9	109,1	265	349	229	179	133	31	21,3	7,61	7	350	350	416	9,46
475	7,3	107,6	266	353	230	176	132	31	21,5	6,81	7	376	367	434	9,93
532	7,9	106	267	357	231	174	132	31	21,5	5,90	6	405	387	447	10,56

As tabelas D.6 a D.11 apresentam os resultados de cada perda para os diferentes ensaios realizados.

*Tabela D.6 Resultados de cada perda associada à caldeira nº2, para os ensaios da semana 1 com pressão superior a 21barg, para o método indireto da norma ASME PTC 4-2013.*

m nafta (kg/h)	Pgs (%)	PH <sub>2</sub> (%)	PH <sub>2</sub> O <sub>r</sub> (%)	P(hum)ar (%)	Pinq (%)	Prad (%)	Pp (%)	Carseco (%)	Chum.ar (%)	Cqf (%)	EF (%)
223	20,00	6,29	0,008	0,72	0,589	5,15	0,21	1,03	0,036	0,70	68,80
239	18,35	6,28	0,008	0,66	0,230	4,81	0,22	0,94	0,033	0,69	71,11
259,67	17,01	6,28	0,008	0,62	0,113	4,42	0,22	0,87	0,031	0,66	72,89
296,67	15,24	6,30	0,008	0,55	0,061	3,87	0,23	0,76	0,027	0,63	75,16
318,67	14,15	6,32	0,008	0,51	0,050	3,61	0,23	0,70	0,025	0,59	76,44
349,67	12,83	6,31	0,008	0,46	0,045	3,29	0,24	0,64	0,023	0,57	78,05
371,67	12,17	6,32	0,008	0,44	0,044	3,09	0,24	0,59	0,021	0,55	78,85
390,33	11,59	6,32	0,008	0,42	0,043	2,94	0,25	0,57	0,020	0,52	79,54
415	11,16	6,33	0,008	0,40	0,043	2,77	0,25	0,54	0,019	0,51	80,11
442,67	10,61	6,34	0,008	0,38	0,042	2,60	0,25	0,51	0,018	0,49	80,79
467,33	10,31	6,35	0,008	0,37	0,042	2,46	0,25	0,49	0,017	0,47	81,19
486	9,9	6,36	0,008	0,36	0,041	2,36	0,25	0,47	0,017	0,46	81,67
522,33	9,51	6,36	0,008	0,34	0,041	2,2	0,26	0,44	0,016	0,45	82,19

*Tabela D.7 Resultados de cada perda associada à caldeira nº2, para os ensaios da semana 1 com pressão superior a 21barg, para o método indireto da ADENE.*

m nafta (kg/h)	Pgc (%)	PH <sub>2</sub> O (%)	PCO (%)	Prad (%)	Pp (%)	EF (%)
223	20,22	1,25	0,6	4,2	0,21	73,52
239	18,6	1,25	0,21	3,5	0,22	76,22
259,67	17,04	1,24	0,09	3,15	0,22	78,26
296,67	15,64	1,27	0,03	2,72	0,23	80,11
318,67	14,45	1,29	0,02	2,56	0,23	81,45
349,67	13,52	1,28	0,01	2,36	0,24	82,59
371,67	13,05	1,29	0,01	2,21	0,24	83,2
390,33	12,58	1,29	0,01	2,04	0,25	83,83
415	12,17	1,3	0,01	1,96	0,25	84,31
442,67	11,45	1,31	0,01	1,77	0,25	85,21
467,33	11,02	1,32	0,01	1,7	0,25	85,7
486	10,49	1,33	0,01	1,57	0,25	86,35
522,33	9,95	1,34	0,01	1,47	0,25	86,98

*Tabela D.8 Resultados de cada perda associada à caldeira nº2, para os ensaios com pressão inferior a 21barg, com a norma ASME PTC 4-2013.*

<b>m nafta (kg/h)</b>	<b>Pgs (%)</b>	<b>PH<sub>2</sub> (%)</b>	<b>PH<sub>2</sub>O<sub>f</sub> (%)</b>	<b>P(hum)ar (%)</b>	<b>Pinq (%)</b>	<b>Prad (%)</b>	<b>Pp (%)</b>	<b>Carseco (%)</b>	<b>Chum.ar (%)</b>	<b>Cqf (%)</b>	<b>EF (%)</b>
341	13,43	6,31	0,008	0,49	0,035	3,25	0,24	0,67	0,024	0,59	77,52
370	12,41	6,33	0,008	0,45	0,035	3,00	0,24	0,61	0,022	0,56	78,72
416	11,20	6,33	0,008	0,40	0,035	2,67	0,24	0,54	0,019	0,55	80,23
440	10,90	6,35	0,008	0,39	0,035	2,52	0,25	0,52	0,018	0,54	80,63
456	10,75	6,34	0,008	0,39	0,035	2,43	0,25	0,52	0,018	0,51	80,85
465	10,66	6,36	0,008	0,38	0,035	2,39	0,25	0,50	0,018	0,49	80,93
481	10,45	6,35	0,008	0,38	0,035	2,31	0,25	0,49	0,018	0,48	81,21
530	9,57	6,36	0,008	0,35	0,035	2,09	0,25	0,45	0,016	0,47	82,27

*Tabela D.9 Resultados de cada perda associada à caldeira nº2, para os ensaios da semana 2 com pressão superior a 21barg, para o método indireto da norma ASME PTC 4-2013*

<b>m nafta (kg/h)</b>	<b>Pgs (%)</b>	<b>PH<sub>2</sub> (%)</b>	<b>PH<sub>2</sub>O<sub>f</sub> (%)</b>	<b>P(hum)ar (%)</b>	<b>Pinq (%)</b>	<b>Prad (%)</b>	<b>Pp (%)</b>	<b>Carseco (%)</b>	<b>Chum.ar (%)</b>	<b>Cqf (%)</b>	<b>EF (%)</b>
270	16,76	6,29	0,008	0,57	0,212	4,11	0,22	0,80	0,029	0,67	73,33
315	14,68	6,30	0,008	0,49	0,130	3,52	0,23	0,69	0,025	0,65	76,01
265	17,05	6,28	0,008	0,58	0,150	4,19	0,23	0,82	0,029	0,64	73,00
302	15,03	6,31	0,008	0,55	0,058	3,67	0,23	0,75	0,027	0,58	75,50
323	14,54	6,30	0,008	0,49	0,049	3,44	0,24	0,68	0,024	0,55	76,19
367	12,38	6,31	0,008	0,45	0,039	3,02	0,24	0,61	0,022	0,51	78,70
382	12,09	6,31	0,008	0,44	0,038	2,91	0,24	0,60	0,021	0,50	79,09
405	11,59	6,32	0,008	0,42	0,037	2,74	0,25	0,57	0,020	0,48	79,71
443	10,88	6,32	0,008	0,39	0,037	2,50	0,25	0,53	0,019	0,47	80,63
469	10,36	6,33	0,008	0,37	0,037	2,37	0,25	0,50	0,018	0,45	81,24
482	9,94	6,34	0,008	0,36	0,037	2,3	0,25	0,48	0,017	0,44	81,70
510	9,46	6,35	0,008	0,34	0,037	2,18	0,25	0,45	0,016	0,42	82,26

*Tabela D.10 Resultados de cada perda associada à caldeira nº2, para os ensaios da semana 3 com pressão superior a 21barg, para o método indireto da norma ASME PTC 4-2013*

m nafta (kg/h)	Pgs (%)	PH <sub>2</sub> (%)	PH <sub>2</sub> O <sub>f</sub> (%)	P(hum)ar (%)	Pinq (%)	Prad (%)	Pp (%)	Carseco (%)	Chum.ar (%)	Cqf (%)	EF (%)
310	14,10	6,30	0,008	0,50	0,068	3,58	0,24	0,70	0,025	0,68	76,61
343	12,98	6,30	0,008	0,47	0,057	3,23	0,24	0,65	0,023	0,65	78,04
378	12,05	6,30	0,008	0,44	0,053	2,94	0,25	0,61	0,021	0,63	79,22
408	11,02	6,31	0,008	0,40	0,048	2,72	0,25	0,55	0,019	0,60	80,41
439	10,45	6,32	0,008	0,38	0,046	2,53	0,25	0,52	0,018	0,57	81,12
464	9,98	6,33	0,008	0,36	0,045	2,39	0,26	0,48	0,017	0,56	81,68
401	11,70	6,31	0,008	0,42	0,037	2,77	0,25	0,58	0,021	0,54	79,65
509	9,09	6,32	0,008	0,33	0,036	2,18	0,26	0,44	0,016	0,52	82,75
440	10,57	6,32	0,008	0,38	0,036	2,52	0,25	0,52	0,019	0,50	80,96
471	10,05	6,32	0,008	0,36	0,035	2,36	0,25	0,49	0,017	0,47	81,59
495	9,79	6,36	0,008	0,35	0,036	2,24	0,25	0,46	0,016	0,46	81,90

*Tabela D.11 Resultados de cada perda associada à caldeira nº2, para os ensaios da semana 4 com pressão superior a 21barg, para o método indireto da norma ASME PTC 4-2013*

m nafta (kg/h)	Pgs (%)	PH <sub>2</sub> (%)	PH <sub>2</sub> O <sub>f</sub> (%)	P(hum)ar (%)	Pinq (%)	Prad (%)	Pp (%)	Carseco (%)	Chum.ar (%)	Cqf (%)	EF (%)
240	18,60	6,29	0,008	0,67	0,246	4,62	0,22	0,95	0,034	0,54	70,87
256	17,49	6,29	0,008	0,63	0,122	4,33	0,22	0,89	0,032	0,53	72,36
291	15,30	6,30	0,008	0,55	0,066	3,81	0,23	0,77	0,027	0,51	75,04
314	14,47	6,32	0,008	0,52	0,053	3,53	0,23	0,72	0,025	0,46	76,07
351	12,91	6,31	0,008	0,47	0,044	3,16	0,24	0,64	0,023	0,44	77,96
374	12,22	6,32	0,008	0,44	0,038	2,97	0,25	0,60	0,021	0,43	78,81
392	11,72	6,33	0,008	0,42	0,037	2,83	0,25	0,57	0,020	0,41	79,41
420	11,20	6,32	0,008	0,41	0,037	2,64	0,25	0,55	0,019	0,39	80,09
439	10,48	6,33	0,008	0,38	0,037	2,53	0,25	0,51	0,018	0,38	80,89
475	9,95	6,33	0,008	0,36	0,036	2,34	0,25	0,48	0,017	0,37	81,59
532	9,42	6,34	0,008	0,34	0,036	2,09	0,26	0,45	0,016	0,37	82,34

A tabela D.12 apresenta os excessos de ar e o rendimento respectivo, em função da percentagem de O<sub>2</sub> para cada caudal do 1ºensaio, ou seja, para o ensaio com pressão maior que 21 barg (1ºsemana) e com nafta.

*Tabela D.12 Resultados do rendimento e do excesso de ar, em função da percentagem de O<sub>2</sub> correspondente a cada caudal do ensaio da semana 1 com pressão superior a 21 barg,*

Caudal (kg/h)	O <sub>2</sub> (%)	Excesso de ar (%)	Rendimento (%)
223	14,34	215,47	68,80
239	13,74	189,12	71,11
259,67	13,21	169,46	72,89
296,67	12,07	135,16	75,16
318,67	11,18	113,92	76,44
349,67	10,28	95,83	78,05
371,67	9,52	82,98	78,85
390,33	9,01	75,15	79,54
415	8,42	66,93	80,11
442,67	7,63	57,03	80,79
467,33	7,03	50,32	81,19
486	6,38	43,61	81,67
522,33	5,63	36,63	82,19

Posteriormente foram medidas todas as temperaturas, caudais, pressões e percentagem de gases para diferentes caudais de fuelóleo nº3. Nas tabelas D.13 a D.15 estão apresentados os resultados destas medições, para efeitos de cálculo. O caudal teve de ser corrigido segundo as densidades, como se vê na equação 63 apresentada a seguir e nas tabelas seguintes.

$$\dot{m}_{\text{corrigido}} = \dot{m}_{\text{fuel ecrã}} * \frac{\rho_{\text{fuelóleo n}^\circ 3}}{\rho_{\text{nafta}}} \quad (63)$$

$$\dot{m}_{\text{corrigido}} = 551 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \frac{0,89 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,99 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 489,8 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ fuelóleo n}^\circ 3$$

*Tabela D.13 Média das medições de temperaturas, caudais, pressões e percentagem de gases para diferentes caudais do novo combustível sem correção da curva Ar/Combustível*

<b>m fuel (kg/h)</b>	<b>m fuel corrig.</b>	<b>m vap (ton/h)</b>	<b>Tnafta (°C)</b>	<b>Tv (°C)</b>	<b>Tge (°C)</b>	<b>Tgs (°C)</b>	<b>Tae (°C)</b>	<b>Tas (°C)</b>	<b>Tar (°C)</b>	<b>Pv (barg)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>NOx (ppm)</b>	<b>SO<sub>2</sub> (ppm)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (ppm)</b>
231,5	205,8	3,45	138,15	271,5	308,5	225	189	154	29,5	18,3	15,15	55,5	102	4,76
271	240,9	3,85	137,35	270,5	317,5	226	191	155,5	29,5	17,95	14,45	62	123	5,335
296,5	263,6	4,3	135,8	269,5	323,5	233	190	136,5	29,5	18	13,645	69,5	141,5	5,935
318	282,7	4,6	122,1	271,5	332	227,5	171,5	128,5	29,5	18,4	12,835	78,5	153,5	6,36
343	304,9	5	124,1	272,5	336	227,5	180	152	29,5	19,25	12,305	89,5	165	7,03
362,5	322,2	5,4	124,15	272,5	340,5	232,5	183	129	29,5	19,35	12,02	95,5	186	7,51
381	338,7	5,5	122,45	273,5	343	231	176,5	134,5	29,5	19,6	11,105	102,5	190,5	7,905
404,5	359,6	5,85	120,55	271,5	346	233	175,5	127,5	29,5	19,05	10,14	106	209	8,145
423,5	376,4	6,2	114,9	271	351,5	234	174	128	29,5	18,75	9,45	111	216	8,685
440	391,1	6,5	113,05	270,5	356,5	236,5	174	129	29,5	18,8	9,06	115	226	9,06
465	413,3	6,8	110,4	270,5	361,5	238,5	174	128	29,5	19,25	8,585	120,5	236	9,365
483,5	429,8	7,05	109	272,5	364,5	239,5	175	128,5	29,5	19,9	8,13	123,5	244	9,685
551	489,8	8,1	106,1	271	380	245	171	127	29,5	19,5	7,9	137	261	10,31

*Tabela D.14 Média das medições de temperaturas, caudais, pressões e percentagem de gases para diferentes caudais do novo combustível com correção da curva Ar/Combustível*

<b>m fuel (kg/h)</b>	<b>m fuel corrig.</b>	<b>m vap (ton/h)</b>	<b>Tnafta (°C)</b>	<b>Tv (°C)</b>	<b>Tge (°C)</b>	<b>Tgs (°C)</b>	<b>Tae (°C)</b>	<b>Tas (°C)</b>	<b>Tar (°C)</b>	<b>Pv (barg)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>NOx (ppm)</b>	<b>SO<sub>2</sub> (ppm)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (ppm)</b>
249	221	3,60	182,90	277	307	225	210	195	35	20,30	14,30	47	98	4,9
296	263	4,10	179,20	275	317	234	211	135	35	20,70	12,80	64	154	6,18
323	287	4,50	171,20	276	325	229	198	144	35	20,90	11,75	75	174	6,77
349	310	5,20	163,30	283	333	228	186	141	35	21,80	11,05	81	188	7,34
369	328	5,50	149,70	283	340	229	179	136	35	22,10	10,54	85	192	7,54
397	353	6,30	136,70	277	346	233	193	187	35	20,60	10,11	92	206	8,04
428	380	6,40	125,30	279	353	235	178	135	35	20,80	9,27	102	225	8,61
455	404	6,90	119,80	276	356	238	180	133	35	20,80	8,67	105	234	9,02
476	423	7,20	117,50	276	368	244	182	133	35	21,70	8,18	112	246	9,44
491	436	7,30	112,70	273	365	240	173	131	35	21,00	7,36	119	260	10,02
508	452	7,60	112,20	276	368	242	176	132	35	21,40	7,01	123	265	10,18
529	470	8,00	109,70	276	368	242	176	132	35	21,40	6,65	126	276	10,52
540	480	7,70	108,90	274	377	245	175	130	35	21,80	6,52	127	279	10,69

*Tabela D.15 Resultados de cada perda associada à caldeira nº2, para os ensaios com o novo combustível sem correção da curva Ar/Combustível*

<b>m nafta (kg/h)</b>	<b>Pgs (%)</b>	<b>PH<sub>2</sub> (%)</b>	<b>PH<sub>2</sub>O<sub>f</sub> (%)</b>	<b>P(hum)ar (%)</b>	<b>Pinq (%)</b>	<b>Prad (%)</b>	<b>Pp (%)</b>	<b>Carseco (%)</b>	<b>Chum.ar (%)</b>	<b>Cqf (%)</b>	<b>EF (%)</b>
205,8	23,02	7,26	0,006	0,83	0,603	4,28	0,18	1,15	0,041	0,52	65,53
240,9	20,65	7,26	0,006	0,75	0,240	3,66	0,19	1,03	0,036	0,52	68,83
263,6	19,06	7,30	0,006	0,69	0,073	3,34	0,20	0,92	0,033	0,51	70,79
282,7	17,20	7,27	0,006	0,61	0,037	3,11	0,21	0,82	0,029	0,44	72,85
304,9	15,67	7,27	0,006	0,57	0,018	2,89	0,22	0,77	0,028	0,45	74,60
322,2	15,20	7,30	0,006	0,57	0,014	2,73	0,22	0,75	0,027	0,45	75,19
338,7	14,00	7,29	0,006	0,51	0,013	2,60	0,23	0,68	0,024	0,44	76,50
359,6	12,87	7,30	0,006	0,47	0,012	2,45	0,23	0,62	0,022	0,44	77,74
376,4	12,16	7,30	0,006	0,44	0,011	2,34	0,23	0,58	0,020	0,41	78,52
391,1	11,90	7,32	0,006	0,43	0,011	2,25	0,23	0,56	0,020	0,38	78,81
413,3	11,56	7,33	0,006	0,42	0,011	2,13	0,23	0,54	0,019	0,38	79,25
429,8	11,2	7,33	0,006	0,41	0,011	2,05	0,24	0,52	0,019	0,38	79,67
489,8	11,34	7,36	0,006	0,41	0,012	1,8	0,23	0,52	0,018	0,36	79,74

*Tabela D.16 Resultados de cada perda associada à caldeira nº2, para os ensaios com o novo combustível com correção da curva Ar/Combustível*

<b>m nafta (kg/h)</b>	<b>Pgs (%)</b>	<b>PH<sub>2</sub> (%)</b>	<b>PH<sub>2</sub>O<sub>f</sub> (%)</b>	<b>P(hum)ar (%)</b>	<b>Pinq (%)</b>	<b>Prad (%)</b>	<b>Pp (%)</b>	<b>Carseco (%)</b>	<b>Chum.ar (%)</b>	<b>Cqf (%)</b>	<b>EF (%)</b>
221	20,09	7,26	0,006	0,73	0,492	3,28	0,21	1,00	0,036	0,76	69,73
263	17,16	7,3	0,006	0,62	0,027	2,76	0,24	0,82	0,029	0,74	73,48
287	14,83	7,28	0,006	0,54	0,011	2,53	0,23	0,73	0,026	0,69	76,02
310	13,71	7,27	0,006	0,50	0,010	2,34	0,24	0,67	0,024	0,65	77,27
328	13,10	7,28	0,006	0,48	0,010	2,21	0,24	0,64	0,023	0,58	77,92
353	12,84	7,3	0,006	0,47	0,010	2,05	0,24	0,62	0,022	0,51	78,24
380	12,03	7,31	0,006	0,44	0,010	1,91	0,24	0,57	0,020	0,46	79,10
404	11,61	7,32	0,006	0,42	0,010	1,79	0,24	0,54	0,019	0,43	79,59
423	11,49	7,35	0,006	0,42	0,010	1,71	0,25	0,52	0,019	0,42	79,72
436	10,59	7,33	0,006	0,39	0,010	1,66	0,25	0,49	0,018	0,4	80,67
452	10,42	7,34	0,006	0,38	0,010	1,6	0,25	0,48	0,017	0,39	80,88
470	10,16	7,34	0,006	0,37	0,010	1,54	0,25	0,47	0,017	0,38	81,19
480	10,21	7,36	0,006	0,37	0,010	1,51	0,25	0,46	0,016	0,38	81,14

Os valores de abertura das válvulas de fuel e atomização para os dois combustíveis, estão representados nas tabelas D.17 a D.20.

*Tabela D.17. Valores de abertura da válvula de nafta (%) em função da pressão (barg) e do caudal respetivo de fuel (kg/h)*

caudal fuel (kg/h)	pressão fuel (barg)	abertura válvula fuel (%)	caudal fuel (kg/h)	pressão fuel (barg)	abertura válvula fuel (%)
223,1	3,5	20,6	366,4	7,5	30,4
223,1	3,5	20,6	380,3	7,8	33,1
223,1	3,5	18,7	371,0	7,6	30,9
225,9	3,6	20,8	389,9	8,0	32,0
225,9	3,6	20,7	414,8	8,5	34,2
237,4	4,0	22,2	441,4	9,0	36,1
237,4	4,0	21,1	441,4	9,0	34,5
252,6	4,5	23,3	463,8	9,4	34,8
252,6	4,5	21,3	469,6	9,5	37,9
268,7	5,0	24,3	469,6	9,5	36,7
268,7	5,0	22,1	475,5	9,6	36,2
285,9	5,5	25,5	499,7	10,0	40,5
304,2	6,0	26,8	499,7	10,0	40,0
323,7	6,5	27,7	499,7	10	40,5
323,7	6,5	28,3	505,9	10,1	36,8
323,7	6,5	25,0	531,6	10,5	43,8
344,4	7,0	28,8	531,6	10,5	40,1
357,5	7,3	28,5	531,6	10,5	38,4

*Tabela D.18 Valores de abertura da válvula de fuelóleo nº3 (%) em função da pressão (barg) e do caudal respetivo de fuel (kg/h)*

caudal fuel (kg/h)	pressão fuel (barg)	abertura válvula fuel (%)	caudal fuel (kg/h)	pressão fuel (barg)	abertura válvula fuel (%)
423,1	9,9	39,3	200,0	4,8	22,7
426,7	9,4	39,6	195,6	4,1	19,5
398,2	8,9	36,7	247,1	4,1	19,0
380,4	8,4	39,1	216,0	4,9	26,8
375,1	7,9	33,1	262,2	4,2	22,7
351,1	7,5	31,0	261,3	5,3	27,6
328,9	7	33,1	307,6	5,4	26,9
306,7	6,4	27,4	278,2	6,9	28,0
280,9	5,9	27,7	372,4	5,7	27,5
265,8	5,3	26,2	436,4	8,5	37,2
228,4	4,9	21,6	464,0	10,0	40,7
234,7	4,8	22,7	480,9	9,5	36,1

Tabela D.19 Valores de abertura da válvula de atomização (%) em função da pressão de nafta (barg)

pressão atomização (barg)	abertura válvula (%)	pressão atomização (barg)	abertura válvula (%)
4,5	20,22	8,3	29,5
4,5	20,7	8,5	25,92
5	21,19	9	28,44
5,5	20,7	9,1	29,07
5,5	20,58	9,5	25,04
5,5	23,28	9,7	29,67
5,5	20,58	10	27,33
5,6	22,52	10,1	28,86
5,8	23,15	10,1	32,47
6	23,21	10,5	26,54
6,1	23	10,5	34,17
6,5	21,7	10,6	32,55
6,5	23,75	10,9	35,57
7	23,52	11	31,69
7,5	24,08	11	34,17
7,5	25,31	11	36,04
8	23,27	11,1	29,13
8,1	26,53	11,1	29,15

Tabela D.20 Valores de abertura da válvula de atomização (%) em função da pressão de fuelóleo nº 3 (barg)

pressão atomização (barg)	abertura válvula (%)	pressão atomização (barg)	abertura válvula (%)
10,9	29,32	5,1	19,89
10,5	27,89	5,1	21,31
10	26,9	5,8	21,56
9,4	24,45	5,2	20,48
8,9	25,04	6,3	23,16
8,4	23,38	6,4	22,51
8	22,86	7,6	22,89
7,4	22,19	6,8	22,56
6,8	21,35	9,5	26,73
6,2	22,32	10,9	31,11
5,8	22,17	10,4	28,35
5,8	22,43	11	30,74

## Anexo E – Excesso de ar

Para o cálculo do excesso de ar, foi utilizada a equação 62. Em seguida é apresentado um exemplo de cálculo para o ensaio com caudal de 522,33 kg/h de nafta.

$$XpA = \frac{\%O_2}{21 - \%O_2} * 100$$

Substituindo:

$$XpA = \frac{5,33}{21 - 5,33} * 100 = 34,04 \%$$

Para além da equação 62, poderia ter sido usada a equação 61, como se vê de seguida.

$$XpA = \left( \frac{\%CO_{2m\acute{a}x}}{\%CO_{2real}} - 1 \right) * 100$$

Substituindo:

$$XpA = \left( \frac{15}{11,27} - 1 \right) * 100 = 33,10 \%$$

Como é possível observar, a diferença entre um método e outro não é muito significativa, e por isso decidiu usar-se a equação 62 para os restantes ensaios.

## Anexo F – Cálculo do rendimento pelo método indireto da norma ASME PTC 4-2008

Exemplo de cálculo para valores do ensaio com caudal 522,33 kg/h e pressão acima dos 21barg:

✓ Perdas associadas aos gases secos ( $P_{gs}$ )

$$P_{gs} = 100 * M_{gs} * H(gases)s (\%)$$

Substituindo:

$$P_{gs} = 100 * 4,43 * 10^{-7} * 2,15 * 10^5 = 9,51 \%$$

$$M_{gs} = M_{gc} - M_{hum}(gc)$$

Substituindo:

$$M_{gs} = 4,74 * 10^{-7} - 3,10 * 10^{-8} = 4,43 * 10^{-7} \text{ kg/J}$$

$$M_{gc} = M_{Arseco} + M_{hum}(ar) + M_{gh}$$

Substituindo:

$$M_{gc} = 4,42 * 10^{-7} + 8,65 * 10^{-9} + 2,35 * 10^{-8} = 4,74 * 10^{-7} \text{ kg/J}$$

$$M_{Arseco} = Fm(ar)f \left( 1 + \frac{XpA}{100} \right)$$

Substituindo:

$$M_{Arseco} = 13,76 * \left( 1 + \frac{36,63}{100} \right) = 4,42 * 10^{-7} \text{ kg/J}$$

$$M(ar)f = \frac{Fm(ar)t}{PCS}$$

Substituindo:

$$M(ar)f = \frac{13,76}{4,25 * 10^7} = 3,24 * 10^{-7} \text{ kg/J}$$

$$M_{hum}(ar) = Fm(hum)ar_s * M_{Arseco}$$

Substituindo:

$$M_{hum}(ar) = 0,0196 * 4,42 * 10^{-7} = 8,65 * 10^{-9} \text{ kg/J}$$

$$Fm(hum)ar_s = 0,622 * \left( \frac{Pp(H_2O)ar}{Pa - Pp(H_2O)ar} \right)$$

Substituindo:

$$Fm(hum)ar_s = 0,622 * \left( \frac{0,448}{14,696 - 0,448} \right) = 0,0196 \frac{kg}{kg \text{ fuel}}$$

$$Pp(H_2O)ar = 0,01 * Hrel * Ps(H_2O)$$

Substituindo:

$$Pp(H_2O)ar = 0,01 * 55 * 0,815 = 0,448 \text{ psia}$$

$$Ps(H_2O) = 0,019257 + 1,289 * 10^{-3} * T + 1,21122 * 10^{-5} * T^2 + 4,534 * 10^{-7} * T^3 \\ + 6,84188 * 10^{-11} * T^4 + 2,197092 * 10^{-11} T^5$$

Substituindo:

$$Ps(H_2O) = 0,019257 + 1,289 * 10^{-3} * 95 + 1,21122 * 10^{-5} * 95^2 + 4,534 * 10^{-7} * 95^3 \\ + 6,84188 * 10^{-11} * 95^4 + 2,197092 * 10^{-11} * 95^5 = 0,815 \text{ psia}$$

$$Mgh = \frac{100 - \%cinzasf - \%Cinq. - FmS * \%Sf}{100 * PCS}$$

Substituindo:

$$Mgh = \frac{100 - 0,15 - 0,042 - 0 * 1}{100 * 4,25 * 10^7} = 2,35 * 10^{-8} \text{ kg/J}$$

$$M(CO_2)s = \frac{Fm(CO_2)s}{PCS}$$

Substituindo:

$$M(CO_2)s = \frac{0}{4,25 * 10^7} = 0$$

$$M(H_2O)s = \frac{Fm(H_2O)s}{PCS}$$

Substituindo:

$$M(H_2O)s = \frac{0}{4,25 * 10^7} = 0$$

$$M(H_2O)ad = \frac{Fm(H_2O)ad}{PCS}$$

Substituindo:

$$M(H_2O)ad = \frac{0}{4,25 * 10^7} = 0$$

$$Mhum(gc) = Mhum(f) + Mhum(H_2) + Mhum(ar)$$

Substituindo:

$$Mhum(gc) = 2,82 * 10^{-11} + 2,36 * 10^{-8} + 8,65 * 10^{-9} = 3,10 * 10^{-8} \text{ kg/J}$$

$$Mhum(f) = \frac{\%H_2Of}{100 * PCS}$$

Substituindo:

$$Mhum(f) = \frac{0,12}{100 * 4,25 * 10^7} = 2,82 * 10^{-11} \text{ kg/J}$$

$$Mhum(H_2) = 8,937 * \frac{\%H_2F}{100 * PCS}$$

Substituindo:

$$Mhum(H_2) = 8,937 * \frac{10,64}{100 * 4,25 * 10^7} = 2,24 * 10^{-8} \text{ kg/J}$$

$$H(gases)s = (C0 + C1T + C2T^2 + C3T^3 + C4T^4 + C5T^5) * 2326$$

Substituindo:

$$H(gases)s = \left( -123,19 + 0,407 * \left( \frac{458,6 + 459,7}{1,8} \right) + 5,80 * 10^{-6} * \left( \frac{458,6 + 459,7}{1,8} \right)^2 + 6,33 * 10^{-8} * \left( \frac{458,6 + 459,7}{1,8} \right)^3 - 2,92 * 10^{-11} * \left( \frac{458,6 + 459,7}{1,8} \right)^4 + 2,49 * 10^{-15} * \left( \frac{458,6 + 459,7}{1,8} \right)^5 \right) * 2326 = 2,15 * 10^5 \text{ J/kg}$$

✓ Perdas associadas à queima de H<sub>2</sub> do combustível ( $P_{H_2}$ )

$$P_{H_2} = 100 * Mhum(H_2) * (H(vap)s - H(\text{água})ref)$$

Substituindo:

$$P_{H_2} = 100 * 2,24 * 10^{-8} * (2,95 * 10^6 - 1,05 * 10^5) = 6,36 \%$$

$$Mhum(H_2) = 8,937 * \frac{\%H_2f}{100 * PCS}$$

Substituindo:

$$Mhum(H_2) = 8,937 * \frac{10,64}{100 * 4,25 * 10^7} = 2,24 * 10^{-8} \text{ kg/J}$$

$$H(vap)s = (0,4329 * T + (3,958 * 10^{-5}) * T^2 + 1062,2) * 2326$$

Substituindo:

$$H(vap)s = (0,4329 * 458,6 + (3,958 * 10^{-5}) * 458,6^2 + 1062,2) * 2326 = 2,95 * 10^6 \text{ J/kg}$$

- ✓ Perdas associadas à água de um combustível líquido ( $P_{H_2O_f}$ )

$$P_{H_2O_f} = 100 * M_{hum}(f) * (H(vap)_s - H(água)_{ref})$$

Substituindo:

$$P_{H_2O_f} = 100 * 2,82 * 10^{-11} * (2,95 * 10^6 - 1,05 * 10^5) = 0,008\%$$

- ✓ Perdas associadas à humidade do ar ( $P_{(hum)ar}$ )

$$P_{(hum)ar} = 100 * Fm(H_2O)_{ar} * MAr_{seco} * H(vap)_c$$

Substituindo:

$$P_{(hum)ar} = 100 * 0,019 * 4,42 * 10^{-7} * 4,05 * 10^5 = 0,34\%$$

$$Fm(H_2O)_{ar} = \frac{Fm(hum)_{ar_s}}{1 + Fm(hum)_{ar_s}}$$

Substituindo:

$$Fm(H_2O)_{ar} = \frac{0,0196}{1 + 0,0196} = 0,019 \frac{kg}{kg \text{ fuel}}$$

$$H(vap)_c = (0,4408 * T + (2,381 * 10^{-5}) * (T^2) + (9,638 * 10^{-9}) * (T^3) - 34,1) * 2326$$

Substituindo:

$$H(vap)_c = (0,4408 * 458,6 + (2,381 * 10^{-5}) * (458,6^2) + (9,638 * 10^{-9}) * (458,6^3) - 34,1) * 2326 = 4,05 * 10^5 \text{ J/kg}$$

- ✓ Perdas nos inqueimados ( $\Sigma P_{inq}$ )

$$\Sigma P_{inq} = P_{CO} + P(C_{inq})_r + P(H_2)_{inq})_r$$

Substituindo:

$$\Sigma P_{inq} = 0,008 + 0,033 + 0 = 0,041 \%$$

$$P_{CO} = \%CO_{gc} * MOr_{seco} * MMCO * \left( \frac{PCS(C)_r}{PCS} \right)$$

Substituindo:

$$P_{CO} = 0,002 * 0,623 * 28,01 * \left( \frac{3,37 * 10^7}{4,25 * 10^7} \right) = 0,008 \%$$

$$MOr_{seco} = MOPr + MOar * \left( 0,7905 + \left( \frac{XpA}{100} \right) \right)$$

Substituindo:

$$MO_{ar\ seco} = 0,073 + 0,475 * (0,7905 + \left(\frac{36,63}{100}\right)) = 0,623 \frac{\text{moles}}{\text{kg fuel}}$$

$$MOPr = \left(\frac{\%Cq}{1201,1}\right) + (1 - FmS) * \left(\frac{\%Sf}{3206,5}\right) + \left(\frac{\%N_2f}{2801,34}\right)$$

Substituindo:

$$MOPr = \left(\frac{87,49}{1201,1}\right) + (1 - 0,9997) * \left(\frac{1}{3206,5}\right) + \left(\frac{0,6}{2801,34}\right) = 0,073 \frac{\text{moles}}{\text{kg fuel}}$$

$$FmS = \frac{1 - \frac{\%SO_2gc * (MOPrt + MO_{ar}(SO_2)) * (0,7905 + MO_{hum})}{100 * \left[1 - (1 + MO_{hum}) * \frac{\%O_2gc}{20,95}\right] * MO(SO_2)f}}{1 + K \left(\frac{\frac{\%SO_2gc}{100}}{1 - (1 + MO_{hum}) * \frac{\%O_2gc}{20,95}}\right)}$$

Substituindo:

$$FmS = \frac{1 - \frac{0,0486 * (0,126 + 0,475 * (0,7905 + 0,0309))}{100 * \left[1 - (1 + 0,0309) * \frac{5,33}{20,95}\right] * 0,0003}}{1 + 0,989 * \left(\frac{\frac{0,0486}{100}}{1 - (1 + 0,0309) * \frac{5,33}{20,95}}\right)} = 0,9997 \frac{\text{kg}}{\text{kg fuel}}$$

$$MO_{ar}(SO_2) = \left(\frac{1}{0,2095}\right) * \left(\left(\frac{\%Cq}{1201,1}\right) + \left(\frac{\%H_2f}{403,2}\right) + \left(\frac{\%Sf}{3206,5}\right)\right)$$

Substituindo:

$$MO_{ar}(SO_2) = \left(\frac{1}{0,2095}\right) * \left(\left(\frac{87,49}{1201,1}\right) + \left(\frac{10,64}{403,2}\right) + \left(\frac{1}{3206,5}\right)\right) = 0,475 \frac{\text{moles}}{\text{kg fuel}}$$

$$MO_{hum} = Fm(H_2O)_{ar} * 1,608$$

Substituindo:

$$MO_{hum} = 0,0192 * 1,608 = 0,0309 \frac{\text{moles}}{\text{kg fuel}}$$

$$K = 2,387 * (0,7905 + MO_{hum}) - 1$$

Substituindo:

$$K = 2,387 * (0,7905 + 0,0309) - 1 = 0,961$$

$$MO(SO_2)f = \frac{\%Sf}{3206,5}$$

Substituindo:

$$MO(SO_2)f = \frac{1}{3206,5} = 0,0003 \frac{\text{moles}}{\text{kg fuel}}$$

$$MOar = \frac{Fm(ar)t}{28,9625}$$

Substituindo:

$$MOar = \frac{13,76}{28,9625} = 0,475 \frac{\text{moles}}{\text{kg fuel}}$$

$$P(Cinq)r = \%Cinq * \frac{PCS(C)r}{PCS}$$

Substituindo:

$$P(Cinq)r = 0,0419 * \frac{3,37 * 10^7}{4,25 * 10^7} = 0,033 \%$$

$$\%Cinq = \%C(inq)r * Fmr$$

Substituindo:

$$\%Cinq = 21,82 * 0,00192 = 0,0419 \%$$

$$Fmr = \frac{\%cinzasf + 100 * Fmsorb}{100 - \%C(inq)r}$$

Substituindo:

$$Fmr = \frac{0,15 + 100 * 0}{100 - 21,82} = 0,00192 \frac{\text{kg}}{\text{kg fuel}}$$

✓ Perdas associadas à radiação e convecção ( $P_{rad}$ )

$$P_{rad} = \frac{C1 * (Hconv + Hrad) * A * (Tsup - Tar) * 100}{Qf}$$

Substituindo:

$$P_{rad} = \frac{0,293 * (0,792 + 1,013) * 3961,2 * (149 - 84,2) * 100}{6,17 * 10^6} = 2,20 \%$$

$$Hconv = o \text{ maior de } 0,2 * (Tsup - Tar)^{0,33} \text{ ou } 0,35Var^{0,8}$$

Substituindo:

$$Hconv_1 = 0,2 * (149 - 84,2)^{0,33} = 0,792 \frac{\text{Btu}}{\text{F.h.ft}^2}$$

$$H_{conv_2} = 0,35 * 1,67^{0,8} = 0,528 \frac{Btu}{F.h.ft^2}$$

$$H_{rad} = 0,847 + (2,367 * 10^{-3})T_{dif} + (2,94 * 10^{-6}) * (T_{dif}^2) + (1,37 * 10^{-9}) * (T_{dif}^3)$$

Substituindo:

$$\begin{aligned} H_{rad} &= 0,847 + (2,367 * 10^{-3}) * 64,8 + (2,94 * 10^{-6}) * (64,8^2) + (1,37 * 10^{-9}) * (64,8^3) \\ &= 1,013 \frac{Btu}{F.h.ft^2} \end{aligned}$$

✓ Perdas associadas às purgas ( $P_P$ )

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

Substituindo:

$$P_P = \frac{(218,92 - 127) * 1,786 * (100 - 18,46)}{(218,92 - 127) * 1,786 + (100 - 1,786) * (660 - 127)} = 0,26\%$$

$$T_p = ((P_v + 1) * (101,3/1000) + 7,4408)/0,0444$$

Substituindo:

$$T_p = \frac{(21,5 + 1) * \left(\frac{101,3}{1000}\right) + 7,4408}{0,0444} = 218,92 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p = \frac{Mr_p}{Mr_{H_2O}} * 100$$

Substituindo:

$$p = \frac{315,06}{17640} * 100 = 1,786 \%$$

$$Mr_p = \frac{(Mr_{H_2O} * TDS_f)}{TDS_c}$$

Substituindo:

$$Mr_p = \frac{(17640 * 5,76)}{322,51} = 315,06 \text{ lbm/h}$$

✓ Créditos associadas ao ar seco ( $C_{ar seco}$ )

$$C_{ar seco} = 100 * M_{ar seco} * H(ar)_e$$

Substituindo:

$$C_{ar seco} = 100 * 4,42 * 10^{-7} * 10048,32 = 0,45\%$$

- ✓ Créditos associados à humidade do ar ( $C_{hum.ar}$ )

$$C_{hum.ar} = 100 * Fm(H_2O)_{ar} * Marseco * H(vap)e$$

Substituindo:

$$C_{hum.ar} = 100 * 0,0192 * 4,40 * 10^{-7} * 18610,3 = 0,016\%$$

- ✓ Créditos devido ao calor sensível no combustível ( $C_{qf}$ )

$$C_{qf} = 100 * \frac{Hf}{PCS}$$

Substituindo:

$$C_{qf} = 100 * \frac{191592}{4,25 * 10^7} = 0,45\%$$

- Energia associada ao combustível

$$Qf = Mrf * PCS$$

Substituindo:

$$Qf = 0,1451 * 4,25 * 10^7 = 6,17 * 10^6 W$$

- Entalpias
- Entalpia do combustível:

$$Hf = 2326 * (C1 + C2 * API + C3 * T + C4 * API * T + (C5 + C6 * API) * T^2)$$

Substituindo:

$$Hf = 2326 * (-30,016 - 0,114 * 11,26 + 0,373 * 254,48 + 1,43 * 10^{-3} * 11,26 * 254,48 + (2,18 * 10^{-4} + 7 * 10^{-7} * 11,26) * 254,48^2) = 191591,7 \text{ kJ/kg}$$

Sendo que:

$$^{\circ}API = \frac{141,5 - 131,5g_{esp}}{g_{esp}} = \frac{141,5 - 131,5 * 0,99}{0,99} = 11,26^{\circ}API$$

$$g_{esp} = \frac{\rho}{62,4}$$

$$g_{esp} = \frac{61,85}{62,4} = 0,991$$

- Cálculo do rendimento

$$EF = 100 - (Perdas - Créditos)$$

$$EF = 100 - (9,51 + 6,36 + 0,008 + 0,34 + 0,041 + 0,26 + 2,20 - 0,44 - 0,016 - 0,45) = 82,19 \%$$

## Anexo G – Cálculo do rendimento pelo método indireto proposto pela ADENE

Exemplo de cálculo para valores do ensaio com caudal 522,33kg/h e pressão acima dos 21barg:

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

$$P_{gc} = \frac{k2 * (T_{gcs} - T(ar)e)}{\%CO_2gc}$$

Substituindo:

$$P_{gc} = \frac{0,555 * (237 - 35)}{11,28} = 9,94 \%$$

$$k2 = \frac{255 * \%Cf}{PCI}$$

Substituindo:

$$k2 = \frac{255 * 87,49}{40200} = 0,555$$

- ✓ Perdas associadas à entalpia do vapor de água nos gases de combustão ( $P_{H_2O}$ )

$$P_{H_2O} = \frac{(\%H_2Of + 9\%H_2f) * (210 - 4,2 * T(ar)e + 2,1 * T_{gcs})}{PCI}$$

Substituindo:

$$P_{H_2O} = \frac{(0,12 + 9 * 10,64) * (210 - 4,2 * 35 + 2,1 * 237)}{40200} = 1,34\%$$

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

$$P_{co} = \frac{k3 * \%COgc}{\%COgc + \%CO_2gc}$$

Substituindo:

$$P_{co} = \frac{54 * 0,002}{0,002 + 11,28} = 0,01 \%$$

- ✓ Perdas por radiação e convecção;

$$Prad = \frac{\text{consumo vap. à cap. máxima}}{\text{consumo vap. atual}} * 1,4$$

Substituindo:

$$Prad = \frac{9}{8,57} * 1,4 = 1,47 \%$$

- Cálculo do rendimento

$$EF = 100 - Perdas$$

Substituindo:

$$EF = 100 - 9,94 - 1,34 - 0,01 - 1,47 - 0,25 = 86,98 \%$$

## Anexo H – Cálculo do rendimento pelo método direto

Exemplo de cálculo para valores do ensaio com caudal 522,33kg/h e pressão acima dos 21barg:

$$EF = \frac{\dot{m}_{vap} * (h_v - h_l)}{\dot{m}_{comb} * PCI}$$

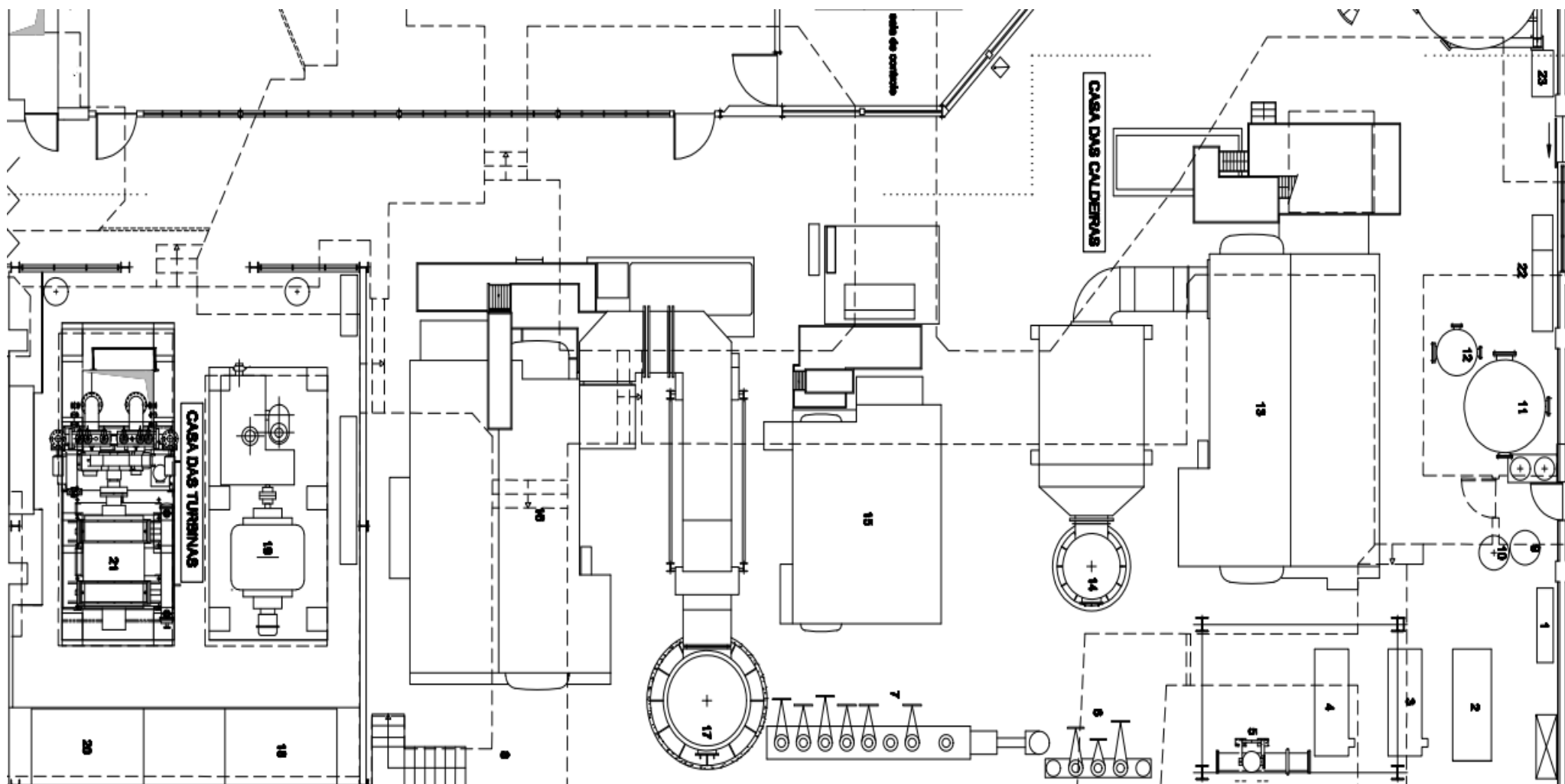
Sendo  $T_v$  igual a 275°C e  $P_v = 21,50$ barg,  $h_v = 2956,5$  kJ/kg.

Sendo  $T_{desgaseificador} = 109$ °C,

$$h_l = 4,19 * 109 = 456,71 \text{ kJ/kg}$$

$$EF = \frac{8,57 * 1000 * (2956,5 - 456,71)}{522,33 * 40200} = 102,1 \%$$

Anexo I – Planta da casa das caldeiras [41]



**Legenda:**

- 1- Quadro elétrico bombas de água p/ caldeiras;
- 2- Bomba nº1 de injeção p/caldeiras;
- 3- Bomba nº2 de injeção p/caldeiras;
- 4- Bomba nº3 de injeção p/caldeiras;
- 5- Permutador para desgasificador;
- 6- Coletor de vapor de 15 kg/cm<sup>2</sup> pressão;
- 7- Coletor de vapor de 24 kg/cm<sup>2</sup> pressão;
- 8- Secador de ar p/instrumentação;
- 9- Depósito de fosfatos;
- 10- Depósito de sulfitos;
- 11- Depósito de ar p/ filtro de prensa 3 – 12m<sup>2</sup>;
- 12- Depósito de ar p/ filtro de prensa 3 – 2m<sup>2</sup>;
- 13- Caldeira nº1;
- 14- Chaminé da caldeira nº1;
- 15- Caldeira nº2;
- 16- Caldeira nº3;
- 17- Chaminé das caldeiras 2 e 3;
- 18- Transformador 1;
- 19- Grupo gerador nº1;
- 20- Transformador 2;
- 21- Grupo gerador 2 (KKK);
- 22- Quadro geral baixa tensão;
- 23- Quadro elétrico distrib. p/ casa das caldeiras.

## Anexo J – Esboço da montagem

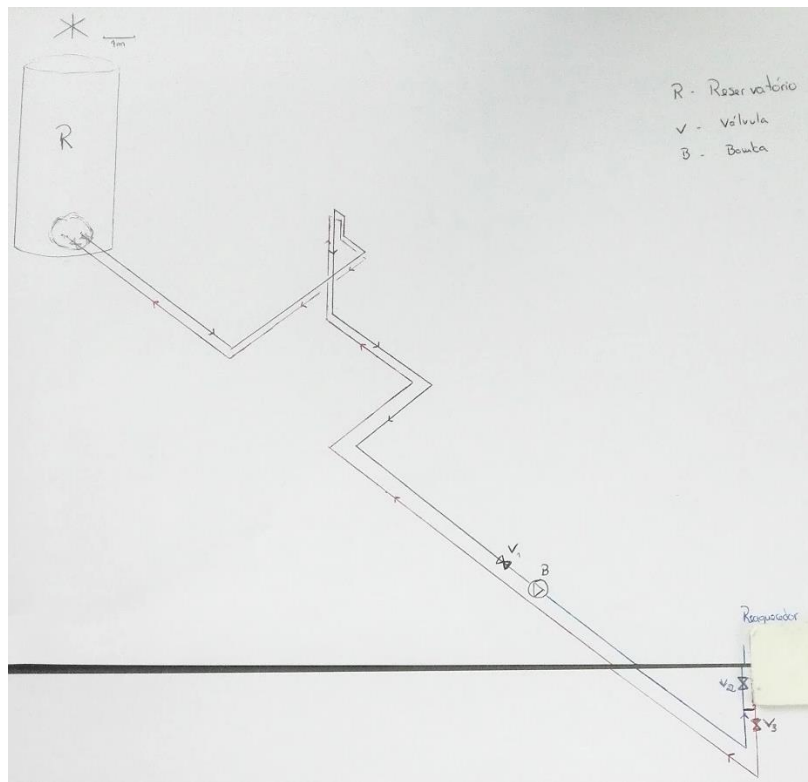


Figura J.1 Esboço de isométrica do projeto de montagem do percurso reservatório – caldeira

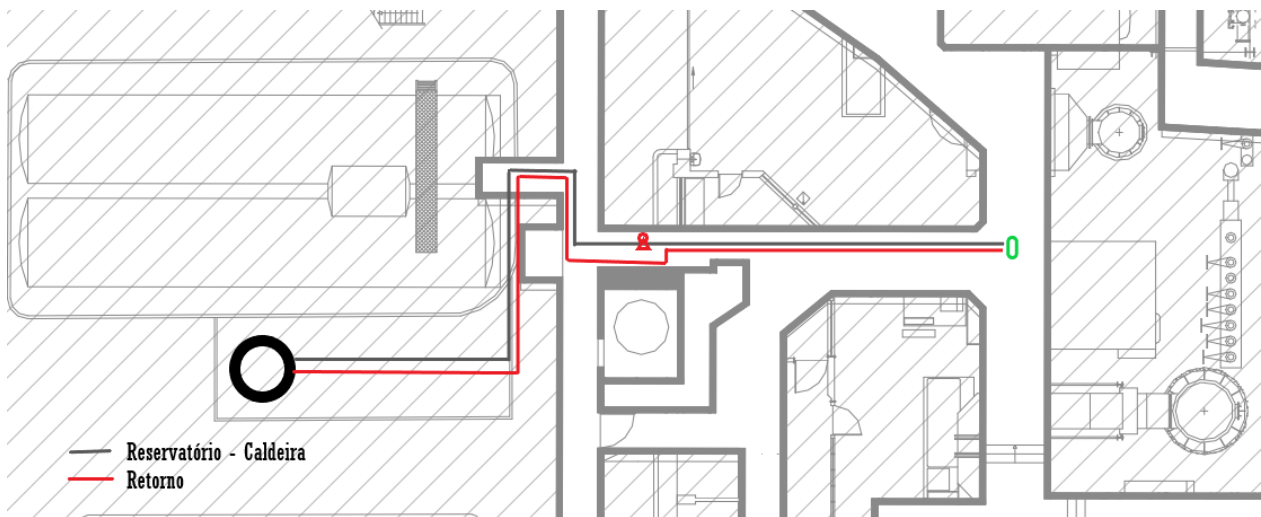


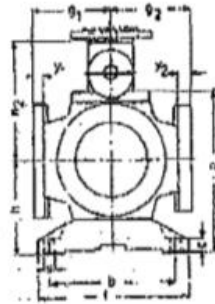
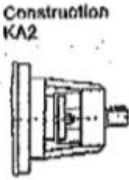
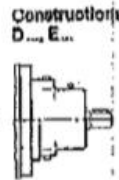
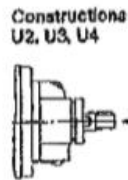
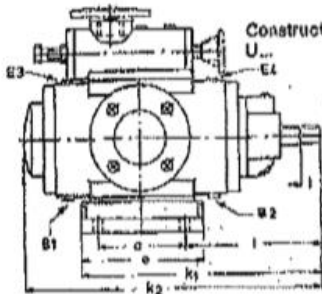
Figura J.2 Planta das galerias com respectivo percurso do combustível do reservatório até à caldeira

Anexo K – Ficha técnica da Bomba utilizada

Série SNH...ER...



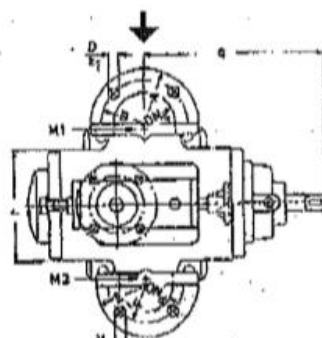
Encombrament pompage - Ne concerne pas les constructions chaudironnées.  
 SNH... - Pompe horizontale à embase.  
 Pailier intérieur, avec garniture mécanique, construction U...  
 Pailier intérieur, avec garniture à tressés, construction U2  
 Pailier intérieur, avec joints à lèvres, constructions U3 et U4  
 Pailier extérieur, avec garniture mécanique, constructions D... et E... (à 90° ou type 1900/3600 seulement)  
 Pailier extérieur, avec garniture à tressés, construction KA2



Vue suivant flèche X pour construction U4 uniquement, type 40 à 440

Bout d'arbre toutes constructions

Orientation des tubulures:  
 Tubulures d'aspiration et de refoulement en épaisseur en ligne (N-LINE) sur l'axe de la pompe.  
 Le sens d'écoulement peut être inversé sans changer le sens de rotation, en tournant le corps de pompe de 180°.



Dimensions et raccordement de la soupape.  
 Pour montage flansé sur la pompe, voir feuillet d'encombrant VM 617 F / ... 2004, page 39  
 Pour montage sur tuyauterie, voir feuillet d'encombrant VM 617 F / ... 2004, page 37

Sens de rotation:  
 Zone des aiguilles d'ans montre vu côté commande.  
 Cotes indiquées en mm

Types de pompe	Encombrant								Fixation								Bout d'arbre			
	b	k1	l1	g1	g	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	aa	bb	cc	dd	
40	106	286	109	182	189	230	180	70	144	10	114	170	198	12,0	10	29	21,5	6	6	
80	118	327	186	176	213	275	195	70	144	10	114	170	235	12,0	19	81	21,5	6	6	
120	150	411	303	207	205	317	165	140	190	15	190	210	248	14,5	24	45	27,0	8	8	
210	180	446	300	217	286	352	205	140	190	15	190	210	281	14,5	28	69	31,0	8	8	
280	190	531	330	247	320	390	220	200	300	30	280	350	291	24,0	52	49	35,0	10	10	
440	230	580	316	257	350	440	245	200	300	30	280	350	340	24,0	38	69	41,0	10	10	
680	216	630	300	307	380	490	270	200	300	30	280	350	360	24,0	42	85	48,0	12	12	
940	225	680	308	317	400	555	290	200	300	30	280	350	450	24,0	48	78	51,5	14	14	
1300	240	750	385	382	430	570	310	300	370	35	360	430	420	24,0	40	85	51,5	14	14	
1700	290	808	380	402	470	630	350	300	370	35	360	430	460	24,0	65	85	59,0	16	16	
2200	305	885	1130	407	460	715	360	300	370	35	360	430	545	24,0	80	95	64,0	18	18	
2900/3600	310	1045	1323	487	578	820	414	340	420	30	430	470	650	24,0	70	130	74,5	20	20	

Le site mécanisé pour coupes à rebord droit peut, suivant le type de coupes, être plus petit. Pour coupes avec rebord à la hache, voir feuillet d'encombrant VM 617 F / ... 2004, page 33

Types de pompe	Aspiration										Refoulement										Branchements aux Ø			
	DN150 - PN18 (DIN 2533, Form B)					DN200 - PN10 (DIN 2532, Form B)					PN40 (DIN 2530, Form B)					PN64 (DIN 2548, Form B) Ø					Vidange	Purge d'air	Presses de man.	
	DN2	A	B	D	D1	y1	z1	DN2	E	F	H	G2	y2	z2	E	F	H	G2	y2	z2				
40	32	140	100	18	100	18	4	25	115	85	14	100	18	4	140	100	18	106	24	4	G 1/4	G 1/4	G 1/4	
80	35	165	145	18	120	20	4	50	135	125	16	120	22	4	180	135	22	124	26	4	G 1/4	G 1/4	G 1/4	
120	35	185	145	18	130	20	4	50	165	125	16	130	22	4	180	185	22	134	26	4	G 1/4	G 1/4	G 1/4	
210	36	230	180	18	150	22	8	85	185	145	18	150	24	8	205	180	22	152	28	3	G 3/8	G 3/8	G 1/2	
280	100	220	180	18	185	24	8	80	200	160	18	165	26	0	215	170	22	167	28	3	G 3/8	G 3/8	G 3/4	
440	125	250	210	18	180	20	0	100	235	180	22	180	28	8	250	200	26	182	30	3	G 1/2	G 1/2	G 1/2	
680	125	250	210	18	185	26	0	100	255	190	22	195	28	8	280	200	26	197	30	3	G 1/2	G 1/2	G 1/2	
940	150	285	240	22	205	26	8	125	270	220	26	205	30	8	295	240	30	209	34	3	G 1/2	G 1/2	G 1/2	
1300	180	285	240	22	220	26	8	125	270	220	26	220	30	8	295	240	30	224	34	3	G 3/4	G 3/4	G 1/2	
1700	200	340	295	22	240	26	8	150	300	250	26	240	34	8	345	280	33	242	38	3	G 3/4	G 3/4	G 1/2	
2200	260	340	295	22	250	26	8	150	300	250	26	260	34	8	345	280	33	252	38	3	G 3/4	G 3/4	G 1/2	
2900/3600	250	365	350	22	300	28	12	200	375	320	30	300	40	12	-	-	-	-	-	-	-	G 3/4	G 3/4	G 1/2

Concerns uniquement les coupes de pompe de force nominale FDS 400-12 (DIN 809-40). Ser. 617/2004. \* Tolerances au pas de gear: B 1/2 - 3/4 - 1 1/2 - 2 1/2 - 3 1/2 - 4 1/2 - 5 1/2 - 6 1/2 - 8 1/2 - 10 1/2 - 12 1/2 - 15 1/2 - 20 1/2 - 25 1/2 - 30 1/2 - 35 1/2 - 40 1/2 - 45 1/2 - 50 1/2 - 55 1/2 - 60 1/2 - 65 1/2 - 70 1/2 - 75 1/2 - 80 1/2 - 85 1/2 - 90 1/2 - 95 1/2 - 100 1/2 - 105 1/2 - 110 1/2 - 115 1/2 - 120 1/2 - 125 1/2 - 130 1/2 - 135 1/2 - 140 1/2 - 145 1/2 - 150 1/2 - 155 1/2 - 160 1/2 - 165 1/2 - 170 1/2 - 175 1/2 - 180 1/2 - 185 1/2 - 190 1/2 - 195 1/2 - 200 1/2 - 205 1/2 - 210 1/2 - 215 1/2 - 220 1/2 - 225 1/2 - 230 1/2 - 235 1/2 - 240 1/2 - 245 1/2 - 250 1/2 - 255 1/2 - 260 1/2 - 265 1/2 - 270 1/2 - 275 1/2 - 280 1/2 - 285 1/2 - 290 1/2 - 295 1/2 - 300 1/2 - 305 1/2 - 310 1/2 - 315 1/2 - 320 1/2 - 325 1/2 - 330 1/2 - 335 1/2 - 340 1/2 - 345 1/2 - 350 1/2 - 355 1/2 - 360 1/2 - 365 1/2 - 370 1/2 - 375 1/2 - 380 1/2 - 385 1/2 - 390 1/2 - 395 1/2 - 400 1/2 - 405 1/2 - 410 1/2 - 415 1/2 - 420 1/2 - 425 1/2 - 430 1/2 - 435 1/2 - 440 1/2 - 445 1/2 - 450 1/2 - 455 1/2 - 460 1/2 - 465 1/2 - 470 1/2 - 475 1/2 - 480 1/2 - 485 1/2 - 490 1/2 - 495 1/2 - 500 1/2 - 505 1/2 - 510 1/2 - 515 1/2 - 520 1/2 - 525 1/2 - 530 1/2 - 535 1/2 - 540 1/2 - 545 1/2 - 550 1/2 - 555 1/2 - 560 1/2 - 565 1/2 - 570 1/2 - 575 1/2 - 580 1/2 - 585 1/2 - 590 1/2 - 595 1/2 - 600 1/2 - 605 1/2 - 610 1/2 - 615 1/2 - 620 1/2 - 625 1/2 - 630 1/2 - 635 1/2 - 640 1/2 - 645 1/2 - 650 1/2 - 655 1/2 - 660 1/2 - 665 1/2 - 670 1/2 - 675 1/2 - 680 1/2 - 685 1/2 - 690 1/2 - 695 1/2 - 700 1/2 - 705 1/2 - 710 1/2 - 715 1/2 - 720 1/2 - 725 1/2 - 730 1/2 - 735 1/2 - 740 1/2 - 745 1/2 - 750 1/2 - 755 1/2 - 760 1/2 - 765 1/2 - 770 1/2 - 775 1/2 - 780 1/2 - 785 1/2 - 790 1/2 - 795 1/2 - 800 1/2 - 805 1/2 - 810 1/2 - 815 1/2 - 820 1/2 - 825 1/2 - 830 1/2 - 835 1/2 - 840 1/2 - 845 1/2 - 850 1/2 - 855 1/2 - 860 1/2 - 865 1/2 - 870 1/2 - 875 1/2 - 880 1/2 - 885 1/2 - 890 1/2 - 895 1/2 - 900 1/2 - 905 1/2 - 910 1/2 - 915 1/2 - 920 1/2 - 925 1/2 - 930 1/2 - 935 1/2 - 940 1/2 - 945 1/2 - 950 1/2 - 955 1/2 - 960 1/2 - 965 1/2 - 970 1/2 - 975 1/2 - 980 1/2 - 985 1/2 - 990 1/2 - 995 1/2 - 1000 1/2 - 1005 1/2 - 1010 1/2 - 1015 1/2 - 1020 1/2 - 1025 1/2 - 1030 1/2 - 1035 1/2 - 1040 1/2 - 1045 1/2 - 1050 1/2 - 1055 1/2 - 1060 1/2 - 1065 1/2 - 1070 1/2 - 1075 1/2 - 1080 1/2 - 1085 1/2 - 1090 1/2 - 1095 1/2 - 1100 1/2 - 1105 1/2 - 1110 1/2 - 1115 1/2 - 1120 1/2 - 1125 1/2 - 1130 1/2 - 1135 1/2 - 1140 1/2 - 1145 1/2 - 1150 1/2 - 1155 1/2 - 1160 1/2 - 1165 1/2 - 1170 1/2 - 1175 1/2 - 1180 1/2 - 1185 1/2 - 1190 1/2 - 1195 1/2 - 1200 1/2 - 1205 1/2 - 1210 1/2 - 1215 1/2 - 1220 1/2 - 1225 1/2 - 1230 1/2 - 1235 1/2 - 1240 1/2 - 1245 1/2 - 1250 1/2 - 1255 1/2 - 1260 1/2 - 1265 1/2 - 1270 1/2 - 1275 1/2 - 1280 1/2 - 1285 1/2 - 1290 1/2 - 1295 1/2 - 1300 1/2 - 1305 1/2 - 1310 1/2 - 1315 1/2 - 1320 1/2 - 1325 1/2 - 1330 1/2 - 1335 1/2 - 1340 1/2 - 1345 1/2 - 1350 1/2 - 1355 1/2 - 1360 1/2 - 1365 1/2 - 1370 1/2 - 1375 1/2 - 1380 1/2 - 1385 1/2 - 1390 1/2 - 1395 1/2 - 1400 1/2 - 1405 1/2 - 1410 1/2 - 1415 1/2 - 1420 1/2 - 1425 1/2 - 1430 1/2 - 1435 1/2 - 1440 1/2 - 1445 1/2 - 1450 1/2 - 1455 1/2 - 1460 1/2 - 1465 1/2 - 1470 1/2 - 1475 1/2 - 1480 1/2 - 1485 1/2 - 1490 1/2 - 1495 1/2 - 1500 1/2 - 1505 1/2 - 1510 1/2 - 1515 1/2 - 1520 1/2 - 1525 1/2 - 1530 1/2 - 1535 1/2 - 1540 1/2 - 1545 1/2 - 1550 1/2 - 1555 1/2 - 1560 1/2 - 1565 1/2 - 1570 1/2 - 1575 1/2 - 1580 1/2 - 1585 1/2 - 1590 1/2 - 1595 1/2 - 1600 1/2 - 1605 1/2 - 1610 1/2 - 1615 1/2 - 1620 1/2 - 1625 1/2 - 1630 1/2 - 1635 1/2 - 1640 1/2 - 1645 1/2 - 1650 1/2 - 1655 1/2 - 1660 1/2 - 1665 1/2 - 1670 1/2 - 1675 1/2 - 1680 1/2 - 1685 1/2 - 1690 1/2 - 1695 1/2 - 1700 1/2 - 1705 1/2 - 1710 1/2 - 1715 1/2 - 1720 1/2 - 1725 1/2 - 1730 1/2 - 1735 1/2 - 1740 1/2 - 1745 1/2 - 1750 1/2 - 1755 1/2 - 1760 1/2 - 1765 1/2 - 1770 1/2 - 1775 1/2 - 1780 1/2 - 1785 1/2 - 1790 1/2 - 1795 1/2 - 1800 1/2 - 1805 1/2 - 1810 1/2 - 1815 1/2 - 1820 1/2 - 1825 1/2 - 1830 1/2 - 1835 1/2 - 1840 1/2 - 1845 1/2 - 1850 1/2 - 1855 1/2 - 1860 1/2 - 1865 1/2 - 1870 1/2 - 1875 1/2 - 1880 1/2 - 1885 1/2 - 1890 1/2 - 1895 1/2 - 1900 1/2 - 1905 1/2 - 1910 1/2 - 1915 1/2 - 1920 1/2 - 1925 1/2 - 1930 1/2 - 1935 1/2 - 1940 1/2 - 1945 1/2 - 1950 1/2 - 1955 1/2 - 1960 1/2 - 1965 1/2 - 1970 1/2 - 1975 1/2 - 1980 1/2 - 1985 1/2 - 1990 1/2 - 1995 1/2 - 2000 1/2 - 2005 1/2 - 2010 1/2 - 2015 1/2 - 2020 1/2 - 2025 1/2 - 2030 1/2 - 2035 1/2 - 2040 1/2 - 2045 1/2 - 2050 1/2 - 2055 1/2 - 2060 1/2 - 2065 1/2 - 2070 1/2 - 2075 1/2 - 2080 1/2 - 2085 1/2 - 2090 1/2 - 2095 1/2 - 2100 1/2 - 2105 1/2 - 2110 1/2 - 2115 1/2 - 2120 1/2 - 2125 1/2 - 2130 1/2 - 2135 1/2 - 2140 1/2 - 2145 1/2 - 2150 1/2 - 2155 1/2 - 2160 1/2 - 2165 1/2 - 2170 1/2 - 2175 1/2 - 2180 1/2 - 2185 1/2 - 2190 1/2 - 2195 1/2 - 2200 1/2 - 2205 1/2 - 2210 1/2 - 2215 1/2 - 2220 1/2 - 2225 1/2 - 2230 1/2 - 2235 1/2 - 2240 1/2 - 2245 1/2 - 2250 1/2 - 2255 1/2 - 2260 1/2 - 2265 1/2 - 2270 1/2 - 2275 1/2 - 2280 1/2 - 2285 1/2 - 2290 1/2 - 2295 1/2 - 2300 1/2 - 2305 1/2 - 2310 1/2 - 2315 1/2 - 2320 1/2 - 2325 1/2 - 2330 1/2 - 2335 1/2 - 2340 1/2 - 2345 1/2 - 2350 1/2 - 2355 1/2 - 2360 1/2 - 2365 1/2 - 2370 1/2 - 2375 1/2 - 2380 1/2 - 2385 1/2 - 2390 1/2 - 2395 1/2 - 2400 1/2 - 2405 1/2 - 2410 1/2 - 2415 1/2 - 2420 1/2 - 2425 1/2 - 2430 1/2 - 2435 1/2 - 2440 1/2 - 2445 1/2 - 2450 1/2 - 2455 1/2 - 2460 1/2 - 2465 1/2 - 2470 1/2 - 2475 1/2 - 2480 1/2 - 2485 1/2 - 2490 1/2 - 2495 1/2 - 2500 1/2 - 2505 1/2 - 2510 1/2 - 2515 1/2 - 2520 1/2 - 2525 1/2 - 2530 1/2 - 2535 1/2 - 2540 1/2 - 2545 1/2 - 2550 1/2 - 2555 1/2 - 2560 1/2 - 2565 1/2 - 2570 1/2 - 2575 1/2 - 2580 1/2 - 2585 1/2 - 2590 1/2 - 2595 1/2 - 2600 1/2 - 2605 1/2 - 2610 1/2 - 2615 1/2 - 2620 1/2 - 2625 1/2 - 2630 1/2 - 2635 1/2 - 2640 1/2 - 2645 1/2 - 2650 1/2 - 2655 1/2 - 2660 1/2 - 2665 1/2 - 2670 1/2 - 2675 1/2 - 2680 1/2 - 2685 1/2 - 2690 1/2 - 2695 1/2 - 2700 1/2 - 2705 1/2 - 2710 1/2 - 2715 1/2 - 2720 1/2 - 2725 1/2 - 2730 1/2 - 2735 1/2 - 2740 1/2 - 2745 1/2 - 2750 1/2 - 2755 1/2 - 2760 1/2 - 2765 1/2 - 2770 1/2 - 2775 1/2 - 2780 1/2 - 2785 1/2 - 2790 1/2 - 2795 1/2 - 2800 1/2 - 2805 1/2 - 2810 1/2 - 2815 1/2 - 2820 1/2 - 2825 1/2 - 2830 1/2 - 2835 1/2 - 2840 1/2 - 2845 1/2 - 2850 1/2 -

## Anexo L -Variação dos índices NWE 1%S e Brent

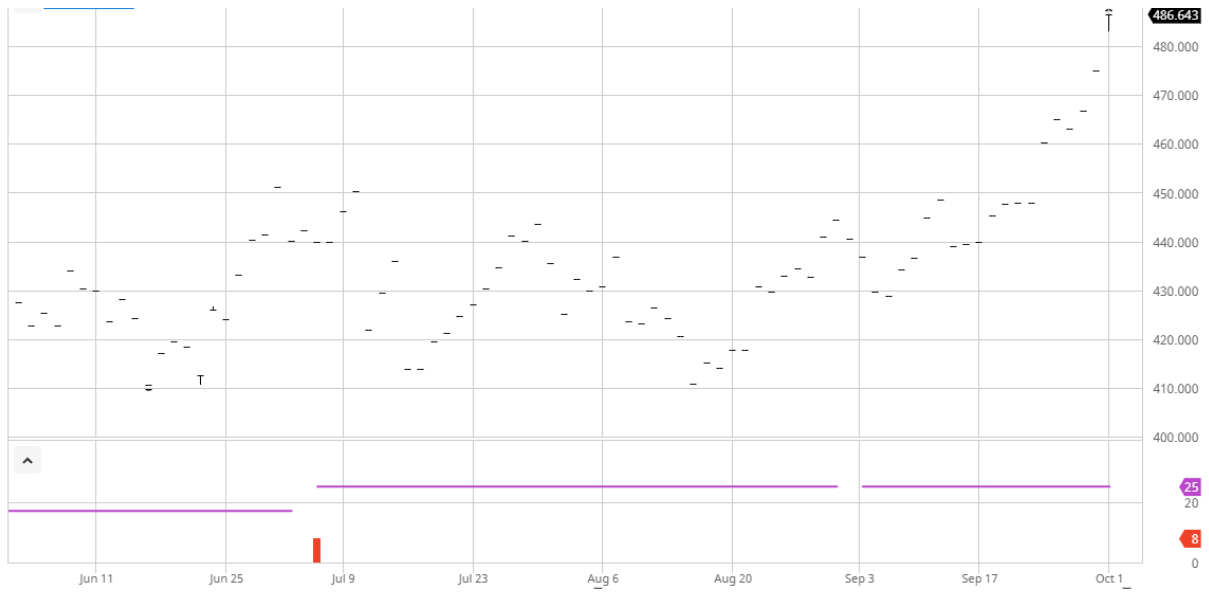


Figura L.1 Variação do NWE 1%S, índice que influencia o preço da nafta, entre junho e outubro [42]



Figura L.2 Variação do Brent, índice que influencia o preço do fuelóleo nº3, entre junho e outubro [43]

### Anexo M – Cálculo do *payback* do projeto

Para calcular o *payback* é necessário saber o custo do investimento para este teste e também o benefício financeiro, apresentado no capítulo 5.

$$\textit{Payback} = \frac{\textit{Custo do investimento}}{\textit{Benefício financeiro anual}}$$

$$\textit{Payback} = \frac{16408,2}{35031,64} = 0,47 \textit{ anos} = 5 \textit{ meses e } 19 \textit{ dias}$$

## Anexo N – Curvas Ar/Combustível

As curvas de abertura do ventilador em relação ao caudal de combustível estão apresentadas na Figura N.1.

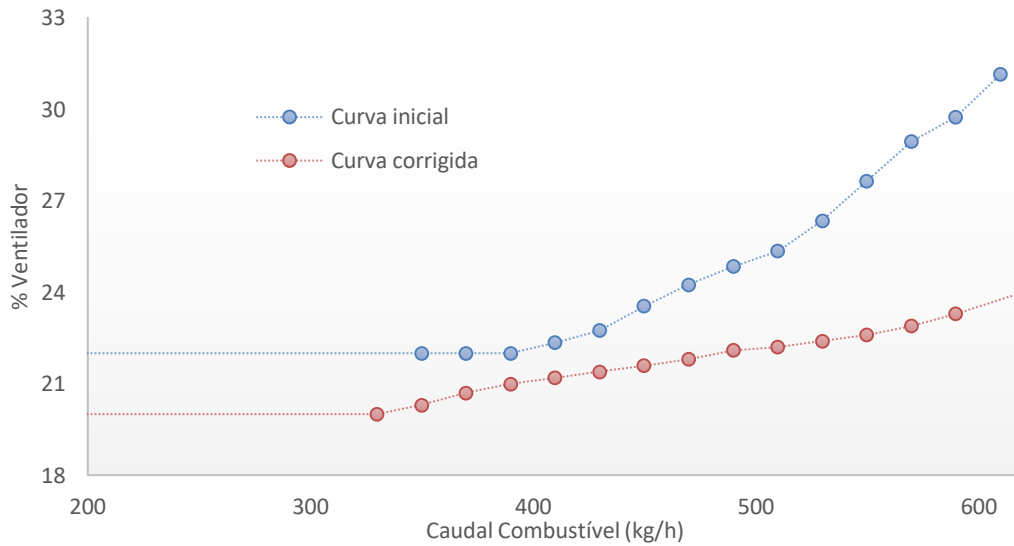


Figura N. 1 Curvas inicial e corrigida da % de Ar do ventilador em relação ao caudal de fuel utilizado na caldeira n°2