



Análise e Otimização do Rendimento de Caldeiras Industriais de Vapor Sobreaquecido

ANTÓNIO LUÍS LAGINHAS RIBEIRO

julho de 2024



ISEP INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA DO PORTO

Análise e Otimização do Rendimento de Caldeiras Industriais de Vapor Sobreaquecido

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química

julho 2024

Autor

António Luís Laginhas Ribeiro

Orientadores

Doutor Christopher Silva Alves de Sá – ISEP

Mestre Luís Miguel Domingos Peixoto Braga – RAR

Mestre Hugo Lobo Pereira - RAR

Agradecimentos

A realização desta dissertação não seria possível sem o contributo e a colaboração de várias pessoas, direta ou indiretamente. Por isso, não podia deixar de lhes agradecer.

Em primeiro lugar, ao Eng.º Christopher Sá, o meu orientador do ISEP, por todo o apoio e orientação que me prestou. A sua rápida resposta aos problemas que iam surgindo foi imperial para a realização deste trabalho.

Ao Eng.º Luís Braga, pela orientação dada e por me ter dado a oportunidade de estagiar numa empresa tão prestigiada como a RAR – Refinarias de Açúcar Reunidas.

Ao Eng.º Hugo Lobo, por todo o apoio, cooperação e ensinamentos que me transmitiu ao longo deste estágio.

À Eng.º Filipa Brandão, pelas sugestões fornecidas à realização deste trabalho.

A todo o corpo docente do Departamento de Engenharia Química do Instituto Superior de Engenharia do Porto, por todos os ensinamentos que me passaram ao longo da licenciatura e do mestrado.

À Equipa de Fogueiros da RAR, por todo o apoio, boa disposição e paciência que tinham para comigo.

Às minhas colegas Estagiárias, Salomé Gaspar e Cláudia Cova, por todos os momentos, positivos e negativos, que passamos juntos. A entajuda demonstrada foi fulcral para a realização deste trabalho.

À minha amiga Lia Monteiro, que também realizou estágio ao mesmo tempo, um especial obrigado pela confiança, ajuda e partilha que demonstramos um pelo outro.

Ao meu amigo Rui Silva, pelo grande apoio que me deu durante todo este estágio.

Aos meus pais e irmã, por me manterem sempre motivado e acreditarem nas minhas capacidades e por todo o amor que têm por mim.

Por fim, mas não menos importante, a todos os meus amigos, Inêses, Simão, Ricardo, Catarina, Francisca, Gil, Elsa e Tiago por todos os momentos que passamos ao longo destes 6 anos. Sem vocês não tinha chegado onde cheguei.

Sumário

O presente trabalho teve como objetivo principal determinar a eficiência energética das três caldeiras aquatubulares que fazem parte da central de Cogeração da RAR Açúcar e produzem vapor sobreaquecido. Estas utilizam como combustível o fuelóleo nº4 e/ou gás natural (GN), sendo que as caldeiras 1 e 3 têm a possibilidade de queimar os dois combustíveis, simultaneamente ou não, enquanto a caldeira 2 apenas queima fuelóleo nº4.

Foram realizados ensaios em carga das 3 caldeiras e, após análise dos gases de combustão e das perdas energéticas, determinaram-se os rendimentos segundo as normas ASME (American Society of Mechanical Engineers) PTC 4-2013, ADENE (2019) e o método direto.

Concluiu-se que os métodos indiretos são mais rigorosos que o método direto, que apresentou limitações. Verificou-se também que o rendimento difere conforme o tipo de combustível queimado e no caso da queima de fuelóleo nº4, para um caudal médio de 536,2 kg/h, os valores de rendimento foram iguais a 71,4, 85,2 e 80,3% (ASME), para as caldeiras 1, 2 e 3, respetivamente. Para o GN obteve-se um rendimento médio de 94,0% (ASME) na caldeira 1 e para a queima mista com razões de Fuelóleo nº4/GN de 90/10, 80/20 e 70/30, os rendimentos foram 83,2%, 84,6% e 83,2% (ASME), respetivamente.

As perdas económicas associadas às perdas térmicas nas caldeiras foram significativas e com valores compreendidos entre [883,14 – 1223,67] €/dia. Num ensaio teste onde se diminuiu o caudal de ar alimentado à caldeira 2, modificando a abertura da válvula de ar de 22% para 18%, as perdas diminuíram para um intervalo compreendido em [746,89 – 1087,65] €/dia, fazendo sentido implementar um sistema de controlo que otimize o processo de queima do combustível.

Palavras-Chave: Caldeira, Aquatubular, Eficiência Energética, Rendimento, Fuelóleo, Gás Natural, ASME, ADENE.

Abstract

The main objective of this study was to determine the energy efficiency of the three watertube boilers from RAR Açúcar cogeneration plant. These use fuel oil No. 4 and/or natural gas (NG) as fuel, with boilers 1 and 3 having the option of burning both fuels simultaneously or not, while boiler 2 only burns fuel oil No. 4.

On-load tests were carried out on the three boilers and, after analyzing the flue gases and measuring the energy losses, the yields were determined according to the ASME (American Society of Mechanical Engineers) PTC 4-2013 standards and the ADENE Manual (2019) for Energy Audits in Industry and the direct method.

It was concluded that indirect methods are more accurate than the direct method, which has its limitations. It was also found that the efficiency differs according to the type of fuel burned and in the case of burning fuel oil no. 4, for an average flow rate of 536.2 kg/h, the efficiency values were equal to 71.4, 85.2 and 80.3%, for boilers 1, 2 and 3, respectively. With the same standard and for NG, an average yield of 94.0% was obtained for boiler 1 and for mixed firing with fuel oil/NG ratios of 90/10, 80/20 and 70/30, the yields were 83.2%, 84.6% and 83.2%, respectively.

The economic losses associated with the boilers were significant and ranged from [883.14 - 1223.67] €/day. In a test run where the air flow fed to boiler 2 was reduced from a percentage of air valve opening of 22% to 18%, the losses fell to a range of [746.89 - 1087.65] €/day, so it made sense to implement a control system to optimize the fuel burning process.

Keywords: Boiler, Watertube, Energy Efficiency, Yield, Fuel Oil, Natural Gas, ASME, ADENE.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	A Empresa	2
2	Tecnologia em Estudo	3
2.1	Caldeiras/Geradores de Vapor	3
2.1.1	Caldeiras Aquatubulares	3
2.1.2	Componentes de uma caldeira	4
2.2	Combustíveis	5
2.2.1	Fuelóleo nº4	5
2.2.2	Gás Natural(GN).....	7
2.3	Rendimento de Caldeiras/Geradores de vapor	7
3	Central de Cogeração da RAR Açúcar	9
3.1	Caldeiras aquatubulares	9
3.2	Sistemas de monitorização	13
3.3	Analisador dos gases de combustão e Analisador do Carbono Orgânico Total em amostra líquida	16
4	Resultados e Discussão.....	19
4.1	Comparação entre rendimentos determinados pela norma ASME PTC 4-2013 e ADENE (2019)	19
4.2	Comparação dos Rendimentos nas 3 Caldeiras para a Queima de Fuelóleo nº4 24	
4.3	Efeito da Queima Mista nos Rendimentos das Caldeiras.....	25
4.4	Comparação de rendimentos determinados pelo método direto.....	27
5	Análise Económica das Perdas Térmicas e Sugestões de Melhoria	31
6	Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros	35
	Bibliografia.....	37

Anexo A	Parâmetros auxiliares necessários à determinação do rendimento de caldeiras.	39
A.1	- Determinação da composição elementar do GN	39
A.2	- Determinação do Carbono orgânico total no resíduo	40
Anexo B	Levantamento de lados	42
Anexo C	Exemplo de cálculo do Rendimento de caldeiras/geradores de vapor	52
C.1	- Método indireto para o cálculo do rendimento pela norma ASME PTC 4-2013	52
C.1.1	Exemplo de cálculo dos rendimentos de caldeiras pelo método indireto segundo a norma ASME PTC 4-2013	71
C.2	- Método Indireto para o cálculo do rendimento, proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria (2019) -	77
C.2.1	Exemplo de cálculo do rendimento de caldeiras pelo método indireto segundo o Manual de Auditorias Energéticas na Indústria.....	81
C.3	- Método Direto para o cálculo do rendimento.....	82
C.3.1	Exemplo de cálculo dos rendimentos de caldeiras pelo método direto..	83
Anexo D	Resultados dos ensaios	84
Anexo E	Cálculos associados à análise Económica	100

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Esquema de uma caldeira aquatubular [6].....	4
Figura 2.2 - Tanques de armazenamento de Fuelóleo nº4	6
Figura 3.1 - Queimadores mistos na Caldeira 1 da RAR Cogeração	9
Figura 3.2 - Sobreaquecedor da Caldeira 1 na RAR Cogeração	10
Figura 3.3 - Economizador da Caldeira 1	11
Figura 3.4 - Coletor de Alta Pressão	12
Figura 3.5 - Coletor de Baixa Pressão	12
Figura 3.6 - Fluxograma da Sala da central da Cogeração da RAR Açúcar.....	13
Figura 3.7 - Painel de monitorização da Caldeira 3	13
Figura 3.8 - Painel de monitorização do desgasificador.....	15
Figura 3.9 - Painel de monitorização do sistema de tratamento de água alimentada às caldeiras	16
Figura 3.10 - Detetor de gases de combustão da marca Testo e modelo 310	17
Figura 3.11 - Analisador de Carbono Orgânico Total da marca Schimadzu modelo TOC-V CSN.....	17
Figura 4.1 - Rendimentos na caldeira 1 segundo a norma ASME PTC 4-2013 e ADENE, com queima de GN	20
Figura 4.2 - Rendimentos da caldeira 1 segundo a norma ASME PTC 4-2013 e ADENE, com queima de fuelóleo nº4.	21
Figura 4.3 - Rendimentos obtidos no primeiro ensaio realizado na caldeira 2, para queima de fuelóleo nº4, segundo a norma ASME PTC 4-2013 e ADENE	21
Figura 4.4 - Rendimentos obtidos no segundo ensaio realizado na caldeira 2, para queima de fuelóleo nº4, segundo a norma ASME PTC 4-2013 e ADENE	22
Figura 4.5 - Rendimentos obtidos no primeiro ensaio realizado na caldeira 3 para queima de fuelóleo nº4 segundo a norma ASME PTC 4-2013 e ADENE	23
Figura 4.6 - Rendimentos obtidos num segundo ensaio realizado na caldeira 3 segundo a norma ASME PTC 4-2013 e ADENE	23
Figura 4.7 - Comparação dos Rendimentos obtidos na queima de fuelóleo nº4 para as 3 caldeiras que fazem parte da RCOG.....	24
Figura 4.8 - Rendimentos obtidos para um ensaio na caldeira 3 com queima mista na razão de 90/10 de fuelóleo nº4 e GN, respetivamente	25

Figura 4.9 - Rendimentos obtidos para um ensaio na caldeira 3 com queima mista na razão de 80/20 de fuelóleo nº4 e GN, respetivamente	26
Figura 4.10 - Rendimentos obtidos para um ensaio na caldeira 3 com queima mista na razão de 70/30 de fuelóleo nº4 e GN, respetivamente.....	26
Figura 4.11 - Rendimentos obtidos segundo o método direto, para as 3 caldeiras com queima de diferentes caudais de fuelóleo nº4.....	28
Figura 4.12 - Rendimentos obtidos pelo método direto, na caldeira 1, com queima de GN	28
Figura 4.13 - Comparação dos rendimentos pelo método direto, para a caldeira 3, com queima mista nas razões 90/10, 80/20 e 70/30 de Fuelóleo nº4/GN	29
Figura 5.1 - Comparação entre o primeiro ensaio realizado na caldeira 2, com queima de fuelóleo nº4 e válvula de Ar a 22%, e o mesmo com 18%.....	32
Figura 5.2 - Estratégia de Controlo proposta de se implementar nas caldeiras da RCOG	33

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Constituição do Fuelóleo nº4 utilizado.....	6
Tabela 2.2 - Constituição elementar do gás natural utilizado.....	7
Tabela 4.1 - Comparação de custo total dos combustíveis utilizados nos ensaios realizados na caldeira 3, com queima mista ou apenas com Fuelóleo nº4	27
Tabela 5.1 – Perdas monetárias devido a perdas térmicas na realização do primeiro ensaio na caldeira 2, com queima de fuelóleo nº4.....	31
Tabela 5.2 – Perda monetária devido a perda térmica na caldeira 2, com a menor abertura da válvula do ventilador, queima de fuelóleo nº4, e poupança associada quando comparado com o 1º ensaio	32
Tabela A.1- Composição do Gás Natural	39
Tabela A.2 – Valores obtidos de Carbono orgânico total no resíduo.....	40
Tabela A.3 - Fator de Conversão da Condutividade em Sólidos dissolvidos totais	41
Tabela B.1 - Recolha de todas as medições de caudais, pressões, temperaturas, teor de gases e condutividades para diferentes caudais de fuelóleo nº4 na caldeira 1	43
Tabela B.2 - Recolha de todas as medições de caudais, pressões, temperaturas, teor de gases e condutividades para diferentes caudais de GN na caldeira 1	44
Tabela B.3 - Recolha de todas as medições de caudais, pressões, temperaturas, teor de gases e condutividades para um primeiro ensaio para diferentes caudais de fuelóleo nº4 na caldeira 2.....	45
Tabela B.4 - Recolha de todas as medições de caudais, pressões, temperaturas, teor de gases e condutividades para um segundo ensaio para diferentes caudais de fuelóleo nº4 na caldeira 2.....	46
Tabela B.5 - Recolha de todas as medições de caudais, pressões, temperaturas, teor de gases e condutividades para um primeiro ensaio para diferentes caudais de fuelóleo nº4 na caldeira 3.....	47
Tabela B.6 - Recolha de todas as medições de caudais, pressões, temperaturas, teor de gases e condutividades para um segundo ensaio para diferentes caudais de fuelóleo nº4 na caldeira 3.....	48
Tabela B.7 - Recolha de todas as medições de caudais, pressões, temperaturas, teor de gases e condutividades para um ensaio com queima mista na razão 90/10 de fuelóleo nº4/gás natural na caldeira 3	49

Tabela B.8 - Recolha de todas as medições de caudais, pressões, temperaturas, teor de gases e condutividades para um ensaio com queima mista na razão 80/20 de fuelóleo nº4/gás natural na caldeira 3	50
Tabela B.9 - Recolha de todas as medições de caudais, pressões, temperaturas, teor de gases e condutividades para um ensaio com queima mista na razão 70/30 de fuelóleo nº4/gás natural na caldeira 3	51
Tabela C.1 - Valores de K_2 para diferentes combustíveis	78
Tabela C.2 - Valores de K_3 de diferentes combustíveis	80
Tabela C.3 - Perdas à capacidade nominal para diferentes tipos de caldeiras	80
Tabela D.1 - Resultados obtidos com o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria, na caldeira 1 com queima de fuelóleo nº4.	85
Tabela D.2 - Resultados obtidos com o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013, na caldeira 1 com queima de fuelóleo nº4.....	86
Tabela D.3 - Resultados obtidos para o primeiro ensaio com o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria, na caldeira 2 com queima de fuelóleo nº4.	87
Tabela D.4 - Resultados obtidos para o segundo ensaio com o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria, na caldeira 2 com queima de fuelóleo nº4.....	87
Tabela D.5 - Resultados obtidos para o primeiro ensaio com o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013, na caldeira 2 com queima de fuelóleo nº4.	88
Tabela D.6 - Resultados obtidos para o segundo ensaio com o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013, na caldeira 2 com queima de fuelóleo nº4.	89
Tabela D.7 - Resultados obtidos para o primeiro ensaio com o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria, na caldeira 3 com queima de fuelóleo nº4.	90
Tabela D.8 - Resultados obtidos para o segundo ensaio com o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria, na caldeira 3 com queima de fuelóleo nº4.	90
Tabela D.9 - Resultados obtidos para o primeiro ensaio com o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013, na caldeira 3 com queima de fuelóleo nº4.	91
Tabela D.10 - Resultados obtidos para o segundo ensaio com o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013, na caldeira 3 com queima de fuelóleo nº4.	92

Tabela D.11 - Resultados obtidos para o ensaio com o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Industria, na caldeira 1 com queima de Gás Natural.	93
Tabela D.12 - Resultados obtidos para o ensaio com o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013, na caldeira 1 com queima de Gás Natural.	94
Tabela D.13 - Resultados obtidos para o ensaio com o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Industria, na caldeira 3 com queima mista na razão de 90/10 de Fuelóleo nº/Gás Natural.	95
Tabela D.14 - Resultados obtidos para o ensaio com o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Industria, na caldeira 3 com queima mista na razão de 80/20 de Fuelóleo nº/Gás Natural.	95
Tabela D.15 - Resultados obtidos para o ensaio com o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Industria, na caldeira 3 com queima mista na razão de 70/30 de Fuelóleo nº/Gás Natural.	96
Tabela D.16 - Resultados obtidos para o ensaio com o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013, na caldeira 3 com queima mista na razão de 90/10 de Fuelóleo nº/Gás Natural.	97
Tabela D.17 - Resultados obtidos para o ensaio com o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013, na caldeira 3 com queima mista na razão de 80/20 de Fuelóleo nº/Gás Natural.	98
Tabela D.18 - Resultados obtidos para o ensaio com o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013, na caldeira 3 com queima mista na razão de 70/30 de Fuelóleo nº/Gás Natural.	99
Tabela E.1 - Recolha de todas as medições de caudais, pressões, temperaturas, teor de gases e condutividades, para o ensaio realizado na caldeira 2 com queima de fuelóleo nº4, e menor abertura da válvula do ventilador	101
Tabela E.2 - Resultados obtidos para o ensaio com o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Industria, na caldeira 2 com queima de fuelóleo nº4, para uma menor abertura da válvula do ventilador.	102
Tabela E.3 - Resultados obtidos para o segundo ensaio com o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013, na caldeira 2 com queima de fuelóleo nº4, para uma menor abertura da válvula do ventilador.	103

Tabela E.4 - Custos associados ao primeiro ensaio realizado na caldeira 2, com queima de fuelóleo nº4.....	104
Tabela E.5 - Custos associados ao ensaio realizado na caldeira 2, com queima de fuelóleo nº4, com uma menor abertura da válvula do ventilador (18%).....	105

Nomenclatura

Sigla Norma	Sigla Utilizada	Definição	Unidades Norma	Unidades Utilizadas
Af	A	Área superficial do gerador de vapor	ft^2	m^2
DnA	ρ_{ar}	Densidade do ar húmido	$\frac{lbm}{ft^3}$	$\frac{kg}{m^3}$
DnFg	ρ_{gases}	Densidade dos gases de combustão	$\frac{lbm}{ft^3}$	$\frac{kg}{m^3}$
DVpCO	%CO _{gc}	CO nos gases de combustão	% volume	
DVpCO2	%CO _{2gc}	CO ₂ nos gases de combustão	% volume	
DVpHc	%Hc _{gc}	Hidrocarbonetos nos gases de combustão	% volume	
DVpH2O	%H _{2Ogc}	H _{2O} nos gases de combustão	% volume	
DVpN2	%N _{2gc}	N ₂ nos gases de combustão	% volume	
DVpO2	%O _{2gc}	O ₂ nos gases de combustão	% volume	
DVpSO2	%SO _{2gc}	SO ₂ nos gases de combustão	% volume	
EF	η	Eficiência da caldeira	%	
Ep	P _{sp}	Todas as perdas exceto a das purgas	%	
Hca	H _{conv}	Coeficiente de transferência de calor por convecção	$\frac{Btu}{h F ft^2}$	$\frac{J}{m^2 s C}$
HDAEn	H _{ar e}	Entalpia do ar seco à entrada do sistema	$\frac{Btu}{lbm}$	$\frac{J}{kg}$
HDFgLvCr	H _{gc s}	Entalpia dos gases de combustão à saída do economizador	$\frac{Btu}{lbm}$	$\frac{J}{kg}$
Hfo	H _f	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 _{Cr}	Poder calorífico superior do Carbono no resíduo	$\frac{Btu}{lbm}$	$\frac{J}{kg}$
HHVS	PCS	Poder calorífico superior do combustível	$\frac{Btu}{lbm}$	$\frac{J}{kg}$

Hra	H_{rad}	Coefficiente de transferência de calor por radiação	$\frac{Btu}{h F ft^2}$	$\frac{J}{m^2 s C}$
HStLvCr	$H_{v s}$	Entalpia do vapor à saída do economizador	$\frac{Btu}{lbm}$	$\frac{J}{kg}$
HWRe	$H_{água ref}$	Entalpia da água à temperatura de referência	$\frac{Btu}{lbm}$	$\frac{J}{kg}$
HWvEn	$H_{v e}$	Entalpia do vapor à temperatura de entrada do ar	$\frac{Btu}{lbm}$	$\frac{J}{kg}$
HWvLvCr	$H_{v c}$	Entalpia do vapor corrigida à temperatura de saída dos gases do economizador	$\frac{Btu}{lbm}$	$\frac{J}{kg}$
LHVC	PCI	Poder calorífico inferior	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{J}{kg}$
MFrAsF	F_{mc}	Fração mássica de cinzas no combustível	$\frac{massa}{massa fuel}$	
MFrAz	F_{ma}	Fração mássica do ar no ar total	$\frac{massa}{massa}$	
MFrCO2Sb	$F_{mCO_2 s}$	Fração mássica de CO ₂ no “sorbent”	$\frac{massa}{massa sorbent}$	
MFrFg	$F_{mg s}$	Fração mássica do gás seco	$\frac{massa}{massa fuel}$	
MFrRs	F_{mr}	Fração mássica do resíduo	$\frac{massa}{massa fuel}$	
MFrSb	F_{ms}	Fração mássica do “sorbent”	$\frac{massa}{massa fuel}$	
MFrSc	F_{mS}	Fração mássica de captação de enxofre	$\frac{massa}{massa fuel}$	
MFrThACr	$F_{ma t}$	Fração mássica de ar teórico	$\frac{massa}{massa fuel}$	
MFrWA	$F_{mH_2O a}$	Fração mássica do H ₂ O no ar	$\frac{massa}{massa ar seco}$	
MFrWad	$F_{mH_2O ad}$	Fração mássica de H ₂ O adicional	$\frac{massa}{massa ar seco}$	
MFrWDA	$F_{mhum as}$	Fração mássica da humidade no ar seco	$\frac{massa}{massa ar seco}$	
MFrWF	$F_{mH_2O f}$	Fração mássica de água no combustível	$\frac{massa}{massa fuel}$	

MFrWSb	$F_{mH_2O\ s}$	Fração mássica de água no “sorbent”	$\frac{massa}{massa\ sorbent}$	
MoDFg	n_{as}	Moles de ar seco por massa de combustível	$\frac{moles}{massa\ fuel}$	
MoDPc	n_p	Moles de produtos (CO ₂ , N ₂ e SO ₂)	$\frac{moles}{massa\ fuel}$	
MoFg	n_{gs}	Moles de gás seco	$\frac{moles}{massa\ fuel}$	
MoSO2	n_{SO_2}	Moles de SO ₂	$\frac{moles}{massa\ fuel}$	
MoCO2Sb	$n_{CO_2\ s}$	Moles de CO ₂ no “Sorbent”	$\frac{moles}{massa\ fuel}$	
MoThACr	$n_{a\ t}$	Moles de ar teórico necessário	$\frac{moles}{massa\ fuel}$	
MoWA	n_{hum}	Moles de humidade	$\frac{moles}{massa\ fuel}$	
MpAsF	%cinzas _f	Cinzas no combustível	% mássica	
MpCb	%C _q	Carbono queimado	% mássica	
MpCf	%C _f	Carbono no combustível	% mássica	
MpCRs	%C _{inq\ r}	Carbono inqueimado no resíduo	% mássica	
MpH2F	%H _{2\ f}	Hidrogénio no combustível	% mássica	
MpH2OF	%H ₂ O _f	H ₂ O no combustível	% mássica	
MpN2F	%N _{2\ f}	N ₂ no combustível	% mássica	
MpO2F	%O _{2\ f}	O ₂ no combustível	% mássica	
MpSf	%S _f	Enxofre no combustível	% mássica	
MpToCRs	%C _{t\ r}	Total de carbono no resíduo	% mássica	
MpUbC	%C _{inq}	Carbono inqueimado	% mássica	
MpUbH2	%H _{2\ inq}	H ₂ inqueimado	% mássica	
MqSO2Sb	$M_{CO_2\ s}$	Fração mássica do CO ₂ no “sorbent” a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
MqDA	M_{as}	Fração mássica do ar seco a dividir pelo poder calorífico do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$

MqDFg	M _{gs}	Fração mássica de gás seco que sai do gerador de vapor a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
MqFg	M _{gc}	Fração mássica dos gases de combustão a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
MqFgF	M _{gh}	Fração mássica dos gases húmidos no combustível a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
MqRs	M _{res}	Fração mássica do resíduo a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
MqThACr	M _{at f}	Fração mássica de ar teórico no combustível a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
MqWA	M _{hum a}	Fração mássica de água relativa à humidade do ar a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
MqWAd	M _{H₂O ad}	Fração mássica de água adicional a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
MqWf	M _{hum f}	Fração mássica da humidade no combustível a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
MqWFg	M _{hum gc}	Fração mássica da humidade nos gases de combustão a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
MqWH ₂ F	M _{hum H₂}	Fração mássica da água na combustão de hidrogénio a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
MqWSb	M _{H₂O s}	Fração mássica do H ₂ O no “sorbent” a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$

M_{qWvF}	M_{H_2Ovf}	Fração mássica da água num combustível gasoso a dividir pelo poder calorífico superior do combustível	$\frac{lbm}{Btu}$	$\frac{kg}{J}$
M_{rF}	M_{rf}	Caudal mássico de combustível	$\frac{lbm}{h}$	$\frac{kg}{s}$
M_{rH_2O}	M_{rH_2O}	Caudal mássico de H ₂ O à entrada da caldeira	$\frac{ton}{h}$	$\frac{kg}{s}$
M_{rP}	M_{rp}	Caudal mássico de purgas	$\frac{ton}{h}$	$\frac{kg}{s}$
M_{wCO}	MM_{CO}	Massa molar do CO	$\frac{massa}{moles}$	
M_{wCO_2}	MM_{CO_2}	Massa molar do CO ₂	$\frac{massa}{moles}$	
M_{wDFg}	MM_{gcs}	Massa molar dos gases de combustão secos	$\frac{massa}{moles}$	
M_{wFg}	MM_{gch}	Massa molar dos gases de combustão húmidos	$\frac{massa}{moles}$	
M_{wHc}	MM_{hc}	Massa molar dos hidrocarbonetos	$\frac{massa}{moles}$	
P_a	P_a	Pressão barométrica	psia	Pa
P_{pWvA}	P_{pH_2Oa}	Pressão parcial do vapor de água no ar	psia	Pa
P_{sWvT}	P_{SH_2O}	Pressão de saturação do vapor de água à temperatura T	psia	Pa
Q_{pBDA}	C_{as}	Créditos associados à entrada de energia relativa ao ar seco	%	
Q_{pBSIF}	C_{sulf}	Créditos associados à sulfonação	%	
Q_{pBWA}	C_{huma}	Créditos associados à humidade do ar à entrada da caldeira	%	
Q_{pLALg}	P_{infa}	Perdas associadas à infiltração de ar	%	
Q_{pLAG}	P_{eqaq}	Perdas associadas aos equipamentos de controlo de ar quente	%	

Q_{pLCO}	P_{CO}	Perdas associadas ao monóxido de carbono presentes nos gases de combustão	%
Q_{pLDFg}	P_{gs}	Perdas associadas aos gases secos	%
P_{qLH2F}	P_{H2}	Perdas associadas à queima de H_2 no combustível	%
P_{qLH2Rs}	$P_{H2\ inq}$	Perdas associadas ao hidrogénio inqueimado no resíduo	%
P_{qLNOx}	P_{NOx}	Perdas associadas à formação de NO_x	%
Q_{pLPr}	P_{Pv}	Perdas associadas ao pulverizador	%
Q_{pLRs}	P_{res}	Perdas associadas ao calor sensível do resíduo	%
Q_{pLSmUb}	$\sum P_{inq}$	Somatório das perdas relativas aos inqueimados	%
Q_{pLUbc}	P_{C_r}	Perdas associadas ao carbono inqueimado no resíduo	%
Q_{pLWA}	$P_{hum\ a}$	Perdas associadas à humidade do ar	%
Q_{pLWF}	$P_{H2O\ f}$	Perdas associadas à água no combustível	%
Q_{pP}	P_p	Perdas associadas às Purgas	%
Q_{rBF}	$C_{q\ f}$	Créditos associados ao calor sensível no combustível	%
Q_{rBSb}	$C_{q\ s}$	Créditos associados ao calor sensível no “sorbent”	%
Q_{rBWAd}	$C_{hum\ ad}$	Créditos associados a humidades adicionais	%
Q_{rBX}	$C_{eq\ aux}$	Créditos associados a equipamentos auxiliares	%
Q_{rF}	Q_f	Energia associada ao combustível	$\frac{Btu}{h}$
Q_{rLAc}	P_{PAQ}	Perdas associadas ao pré-aquecedor	%
Q_{rLCIh}	$P_{calc\ s}$	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 associadas à convecção e radiação	%	
QrLWAd	$P_{hum\ ad}$	Perdas associadas à humidade adicional	%	
QrLWSb	$P_{ag\ s}$	Perdas associadas à água no “sorbet”	%	
Rhm	H_{rel}	Humidade relativa	$\frac{massa}{massa}$	
Sg	g_{esp}	Gravidade específica a 16°C	$\frac{massa}{massa}$	
TAEn	$T_{a\ e}$	Temperatura do ar à entrada do sistema	°C	
Tae	$T_{ag\ e}$	Temperatura da água à entrada do sistema	°F	
Tdi	T_{dif}	Diferença de temperaturas	°F	°C
TFg	T_{gc}	Temperatura dos gases de combustão	°F	°C
TFgEn	$T_{gc\ e}$	Temperatura dos gases de combustão à entrada do sistema	°F	°C
TFgLvCr	$T_{gc\ s}$	Temperatura dos gases à saída do economizador	°F	°C
TMnFgLvCr	$T_{gc\ s}$	Temperatura dos gases à saída do economizador	°F	°C
TMnA	T_a	Temperatura média do ar ambiente	°F	°C
TMnAf	T_{sup}	Temperatura média da superfície	°F	°C
Tp	T_p	Temperatura das Purgas	°F	°C
Tre	T_{ref}	Temperatura de referência	°F	°C
Va	V_a	Velocidade do ar	$\frac{ft}{seg}$	$\frac{m}{s}$
VpCO	$\%CO_{gc}$	CO nos gases de combustão	% volume	
VpCO2	$\%CO_2\ gc$	CO ₂ nos gases de combustão	% volume	
VpH2O	$\%H_2O_{gc}$	H ₂ O nos gases de combustão	% volume	
VpO ₂	$\%O_2\ gc$	O ₂ nos gases de combustão	% volume	

V_{pSO_2}	$\%SO_2_{gc}$	SO ₂ nos gases de combustão	% volume
X_{pA}	X_{pA}	Excesso de ar	% massa

Lista de Abreviaturas

ADENE – Agência para a Energia

ASME – American Society of Mechanical Engineers;

ASTM – American Society for Testing and Materials;

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto;

RAR – Refinaria de Açúcar Reunidas;

RCOG – RAR Cogeração.

1 Introdução

O conteúdo deste relatório é fruto do trabalho realizado no âmbito da unidade curricular (UC) de Dissertação do Mestrado em Engenharia Química do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

O objetivo principal é a determinação da eficiência energética das 3 caldeiras aquatubulares localizadas na Unidade de Cogeração da RAR (RCOG) que produzem vapor sobreaquecido para o processo fabril. As caldeiras utilizam como combustível o fuelóleo nº 4 e/ou gás natural (GN), sendo que nas caldeiras 1, 2 e 3 é possível a queima de fuelóleo nº4 e nas caldeiras 1 e 3 há a possibilidade de queima mista com ambos os combustíveis.

Deste modo, o relatório começa por fazer um breve enquadramento sobre a regulamentação relacionada com a eficiência energética na Europa e, em particular, em Portugal (subcapítulo 1.1.) e por apresentar a RAR em termos da sua evolução histórica e volume atual de produção de açúcar refinado (subcapítulo 1.2.). Posteriormente, tem o Capítulo 2 a descrever a tecnologia que foi estudada sobre caldeiras aquatubulares e o Capítulo 3 a descrever o planeamento dos ensaios experimentais. No Capítulo 4 faz-se a apresentação e discussão de resultados e, por fim, no Capítulo 5 faz-se uma análise económica das perdas térmicas nas caldeiras e apresentam-se algumas sugestões de melhoria para aumento da eficiência energética.

1.1 Enquadramento

Devido à elevada exigência de redução de consumo de produtos derivados do petróleo e ao aumento de custos de produção, a redução de consumos energéticos ou o aumento da eficiência energética passou a ter elevada importância.

A nível industrial têm vindo a ser revistos os procedimentos relacionados com a eficiência energética e, na Europa, foram aplicadas regulamentações. A Diretiva 2012/27/EU e a 2018/2022/EU estabelecem metas e medidas que visam que a eficiência energética seja uma prioridade nas decisões de investimento, em especial, na indústria.

Em Portugal foi implementado o plano nacional de ação para eficiência energética (PNAEE) em 2013 (RCM n.º 20/2013, de 10 de abril) e o sistema de gestão de consumos intensivos de energia (SGCIE) em 2008 (Decreto-Lei n.º 71/2008, de 15 de Abril), onde

existem requisitos para a monitorização, gestão e eficiência energética de instalações com consumos intensivos de energia[1]. Estas indústrias devem ser capazes de estabelecer estratégias para aumentar a eficiência energética, conhecendo melhor os seus processos sob o ponto de vista energético (térmico e elétrico), equipamentos, produtos e desperdícios de forma a diagnosticar, além das necessidades, oportunidades de uma gestão energética mais eficaz.

A RAR, como consumidor intensivo de energia, tem apostado em estudos como o presente para melhorar a sua eficiência energética, tendo como guia as metas estabelecidas para Portugal e UE de se atingir uma melhoria de 32,5% em eficiência energética.

1.2 A Empresa

Em 1963, iniciou-se a construção das instalações da RAR e, em 1967, começou a laborar com uma capacidade de produção instalada de 25000 t/ano. As vendas da RAR, nesse mesmo ano, atingiram um volume correspondente a uma quantidade de 22000 toneladas, o que correspondia a cerca de 11,8% da produção nacional.

Em 1973 a RAR adquire a Refinaria Angola, situada em Matosinhos, passando o seu volume de vendas a representar cerca de 45% do mercado nacional. A partir de 1991, a atividade produtiva foi concentrada, o que levou ao encerramento da Refinaria de Matosinhos e a Refinaria do Porto forneceria então a capacidade necessária ao completo processamento das necessidades de açúcar da RAR.

Atualmente, a capacidade produtiva da RAR Açúcar é superior a 240000 t/ano, sendo uma referência no mercado ibérico, com produtos e serviços inovadores e com uma aposta clara na qualidade. A RAR Açúcar mostra uma preocupação continua em garantir a qualidade e segurança alimentar dos seus produtos, através do compromisso de melhoria continua do seu comportamento ambiental. Tal é comprovado através das certificações obtidas e confirmadas ao longo destes últimos anos como por exemplo a Certificação “Internacional Food Standard” (IFS), Kosher, Halal e ISO 9001 e 14001. Além disso, encontra-se reconhecida pela “Ecocert”, como importador de rama biológica e refinador e distribuidor de açúcar de cana biológico [2][3].

2 Tecnologia em Estudo

No presente Capítulo serão abordados alguns conceitos sobre caldeiras aquatubulares, visto ser a tecnologia utilizada no processo em estudo.

2.1 Caldeiras/Geradores de Vapor

Uma caldeira, ou gerador de calor, pode ser descrita como um equipamento capaz de produzir vapor através de um combustível e água. Numa linguagem mais científica, uma caldeira converte a energia química de um combustível em energia calorífica que é cedida à água, direta ou indiretamente, para produzir vapor.

As suas características básicas são decididas pelo combustível usado, mas, no caso do tamanho, é escolhido pela quantidade de vapor necessário para alimentar, por exemplo, uma turbina, ou um conjunto de processos numa fábrica.

Há diversos modos de classificar uma caldeira e uma possível é através do que flui no interior dos seus tubos. As caldeiras podem ser classificadas como piro-tubulares ou tubos de fumo, no caso dos gases de combustão passarem pelo interior e a água a ser aquecida no exterior desses tubos, ou aquatubulares para o caso da água circular no interior e os gases pelo exterior desses tubos. As caldeiras do tipo aquatubulares serão o tipo de caldeiras em destaque no foco do estudo desta dissertação [4].

Na secção 2.1.1 e 2.1.2 será descrita a configuração típica de uma caldeira aquatubular, incluindo os seus constituíntes.

2.1.1 Caldeiras Aquatubulares

Uma caldeira aquatubular contém quatro partes: barrilete inferior com água de alimentação (também conhecido como barrilete de lamas), barrilete superior de vapor, conjunto de tubos a ligar os dois barriletes e secção de sobreaquecedor/economizador. Dentro da caldeira a água circula pelo interior dos tubos, arrefecendo no sentido descende e após reaquecimento sobe até ao barrilete superior. O vapor saturado é extraído na parte superior do barrilete para servir os vários utilizadores, ou então é encaminhado para um sobreaquecedor, permutador que usa os gases de combustão para aumentar a temperatura do vapor e torna-lo sobreaquecido. Com vista a aumentar a eficiência energética do processo, os gases de combustão são também utilizados para aquecer a água de alimentação [5][6].

Na Figura 2.1 encontra-se um esquema de uma caldeira aquatubular.

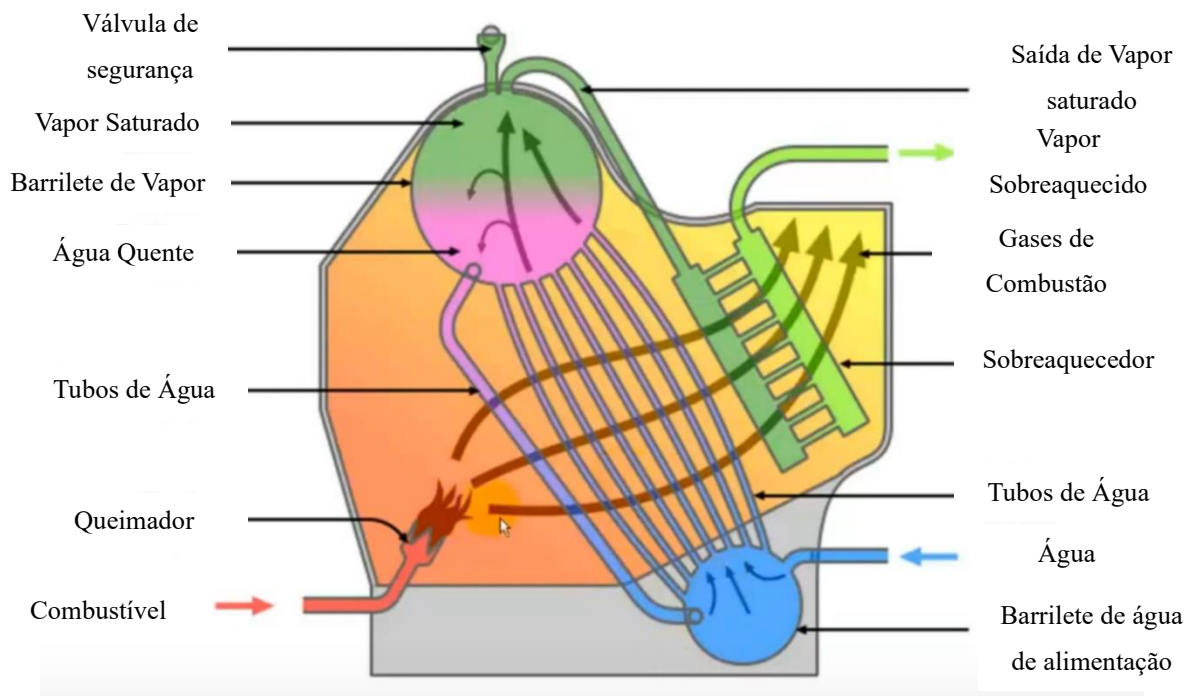


Figura 2.1 - Esquema de uma caldeira aquatubular [6]

2.1.2 Componentes de uma caldeira

Os geradores de vapor são construídos segundo normas ou códigos vigentes no país em questão. As unidades mais modernas e de maior dimensão são normalmente equipadas com:

- Fornalha – Corresponde ao local onde ocorre a queima do combustível. Os queimadores queimam a mistura de ar e combustível para o interior de uma câmara de combustão [7];
- Câmara de combustão – Contém gases de combustão com temperatura suficientemente elevada e constante, permitindo, assim, que todo o combustível queime antes dos gases alcançarem a tubagem para troca de calor com a água [8];
- Queimadores – têm a função de alimentar o combustível com o comburente maximizando o aproveitamento do poder calorífico do combustível. Os queimadores mistos são capazes de operar com dois combustíveis em simultâneo.

Tal resulta não só na redução de emissão de gases de combustão, mas também numa combustão mais económica[9][10].

- Sobreaquecedor – Consiste num permutador utilizado para aumentar a temperatura do vapor produzido. Possui áreas superficiais elevadas o que torna as trocas de calor eficientes [11][12].
- Economizador – É também um permutador utilizado para trocar calor entre os gases de combustão e a água que alimenta a caldeira. Caracteriza-se por reduzir os custos de operação e de combustível devido à recuperação de energia dos gases de combustão [13].
- Pré-aquecedor – Utiliza calor residual proveniente dos gases de combustão para pré-aquecer o ar que é utilizado na queima do combustível. Dependendo do tipo da instalação e do combustível utilizado, é capaz de aquecer o ar para temperaturas compreendidas entre os 120 e 300°C. Neste estudo, nenhuma das 3 caldeiras possui um pré-aquecedor de ar [11].
- Chaminé – Tem como função remover os gases de combustão da instalação, lançando-os para a atmosfera [11].

2.2 Combustíveis

Compostos capazes de reagir com o oxigénio numa queima, resultando numa reação exotérmica com libertação energia sob a forma de calor, são designados de combustíveis.

2.2.1 Fuelóleo nº4

No tempo atual, a matéria-prima fundamental do setor industrial é a fuelóleo nº4 petroquímica. Este combustível trata-se de uma fração do petróleo, a qual é produzida por destilação direta do petróleo numa faixa de ebulição entre [38 – 204]°C, por craqueamento catalítico, por hidrocraqueamento do gasóleo de vácuo (fuelóleo nº4 sintética) e através da reação de Fischer Tropsch do metano [14].

O fuelóleo nº4 utilizado na RAR Cogeração (RCOG) é fornecido à mesma pela GALP Energia, possui na sua composição hidrocarbonetos no intervalo de C5-C12 e pequenas composições de enxofre e água. A sua composição específica foi fornecida em março de 2024 e está apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Constituição do Fuelóleo nº4 utilizado

Constituintes	%(m/m)
C	87,6
H ₂	11,5
S	0,23
H ₂ O	0,47
Cinzas	0,1
Sedimentos	0,1

Nota: Os componentes C e H₂, presentes em maiores percentagens, foram analisados segundo a norma ASTM D 5291-16. A determinação das cinzas foi realizada segundo a norma ASTM D 482, o teor em enxofre pela norma ASTM D 2622 e o teor de água foi determinado pela norma ASTM D 95.

Na Figura 2.2 encontram-se representados os tanques de fuelóleo nº4.

*Figura 2.2 - Tanques de armazenamento de Fuelóleo nº4*

Uma vez que é relevante para o estudo, obteve-se da GALP Energia os dados do poder calorífico inferior e a densidade do combustível. O combustível tem um PCI de 40166 kJ/kg e uma densidade de 970 kg/m³ [15].

2.2.2 Gás Natural(GN)

Nas condições de pressão e temperatura ambiente, o GN é uma mistura no estado gasoso de hidrocarbonetos parafínicos leves, dos quais o que está em maior proporção é o metano. Em relação a outros combustíveis disponíveis ele é um gás pouco poluente, apresentando baixas concentrações de contaminantes como nitrogénio, dióxido de carbono, compostos de enxofre e água. [16].

A composição elementar do GN utilizado foi fornecida pela Portgás [17] e é apresentada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Constituição elementar do gás natural utilizado

Constituintes	%mássica
C	74,8
H ₂	23,6
N ₂	0,5
O ₂	1,1
Total	100

Nota: Estes valores foram obtidos por cálculos que se encontram presentes no Anexo A.1.

2.3 Rendimento de Caldeiras/Geradores de vapor

Neste estudo, os cálculos do Rendimento das Caldeiras foram realizados por métodos indiretos de acordo com a norma ASME PTC 4-2013 e o Manual de Auditorias Energéticas na Indústria da ADENE de 2019 [18][19]. As equações de ambos os métodos encontram-se presentes no Anexo C.

Fez-se também o cálculo dos rendimentos das caldeiras através do método direto (presente no Anexo C) para comparação de métodos.

3 Central de Cogeração da RAR Açúcar

No seguinte Capítulo são apresentados os equipamentos da RCOG com especial relevos para as caldeiras e seus constituintes.

3.1 Caldeiras aquatubulares

A RAR Cogeração tem 3 caldeiras aquatubulares foco de estudo neste trabalho.

A caldeira 2 possui um único queimador capaz de queimar fuel nº4, enquanto as caldeiras 1 e 3 possuem queimadores mistos para queimar fuel e gás natural, simultaneamente, ou alternadamente. Na Figura 3.1 mostram-se os 2 queimadores da caldeira 1 da RAR Cogeração.

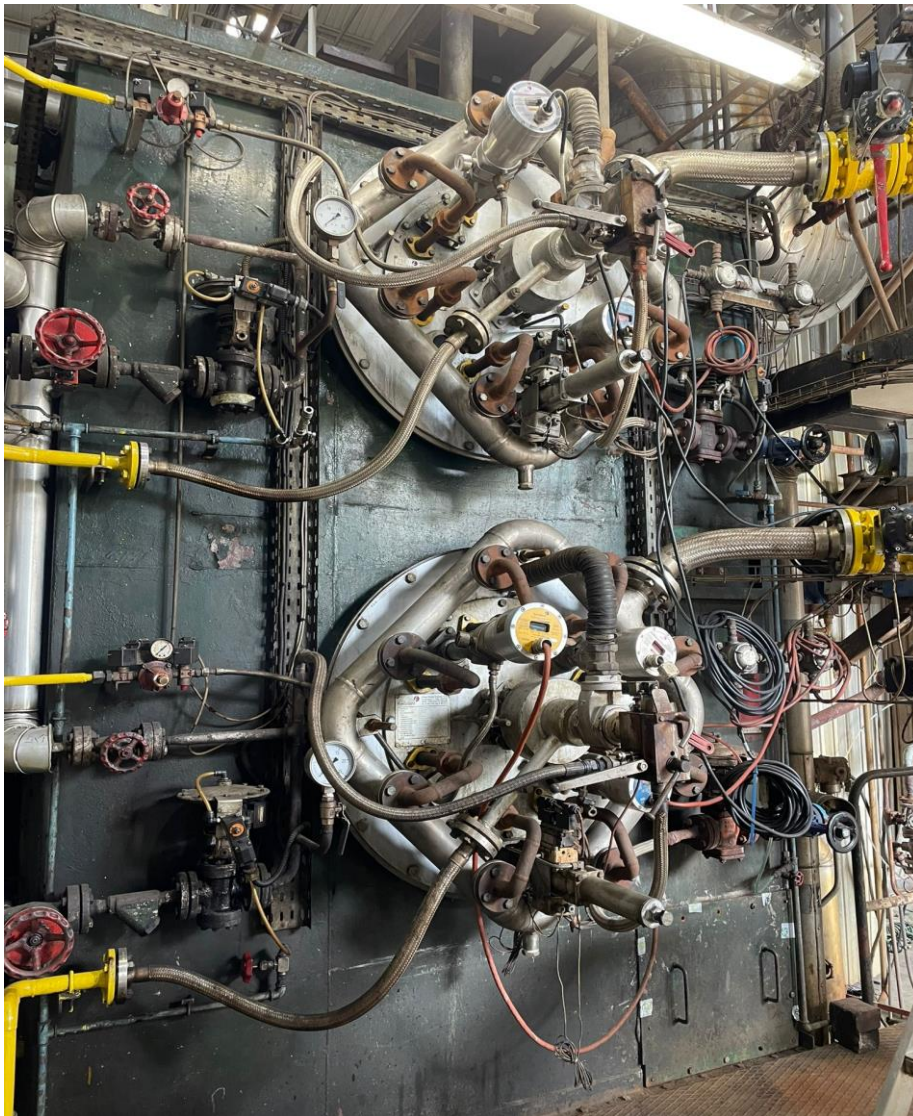


Figura 3.1 - Queimadores mistos na Caldeira 1 da RAR Cogeração

Nas 3 caldeiras estão acoplados um sobreaquecedor, um economizador e um pré-aquecedor de combustível, não havendo pré-aquecedor de ar, este entra à temperatura ambiente.

No sobreaquecedor, a passagem dos gases de combustão permite sobreaquecer o vapor saturado até temperaturas médias de 350°C, bem como arrefecer os gases que vão para a atmosfera. A Figura 3.2 mostra o sobreaquecedor da caldeira 1.



Figura 3.2 - Sobreaquecedor da Caldeira 1 na RAR Cogeração

Nos economizadores, permuta-se calor dos gases de combustão com a necessidade de aquecer a água de alimentação ao barrilete de ebulição, o que se traduz num aumento do

rendimento térmico da caldeira. Na Figura 3.3 evidencia-se o economizador da caldeira 1.



Figura 3.3 - Economizador da Caldeira 1

Após ser produzido, o vapor segue para um coletor de vapor de alta pressão (24 bar) e deste é reduzido para o coletor de baixa pressão, com valores compreendidos entre os 14 e 15 bar. Nas Figuras 3.4 e 3.5 são apresentados os coletores de alta e de baixa pressão, respetivamente.



Figura 3.4 - Coletor de Alta Pressão



Figura 3.5 - Coletor de Baixa Pressão

Para melhor compreensão, na Figura 3.6 está representado um fluxograma da central de cogeração da RAR Açúcar.

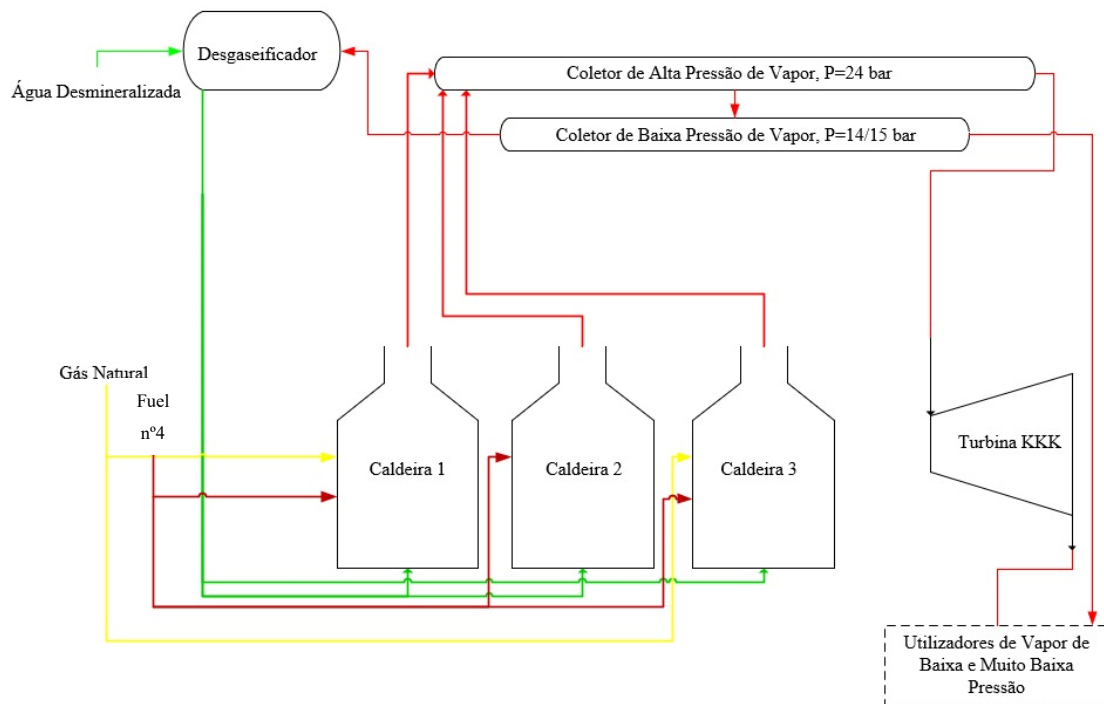


Figura 3.6 - Fluxograma da Sala da central da Cogeração da RAR Açúcar

3.2 Sistemas de monitorização

Grande parte dos valores dos parâmetros necessários à determinação do rendimento das caldeiras foram obtidos com recurso a sistemas de monitorização existentes na sala das caldeiras. Na Figura 3.7 está representado o painel de monitorização da caldeira nº3 com a respetiva legenda.

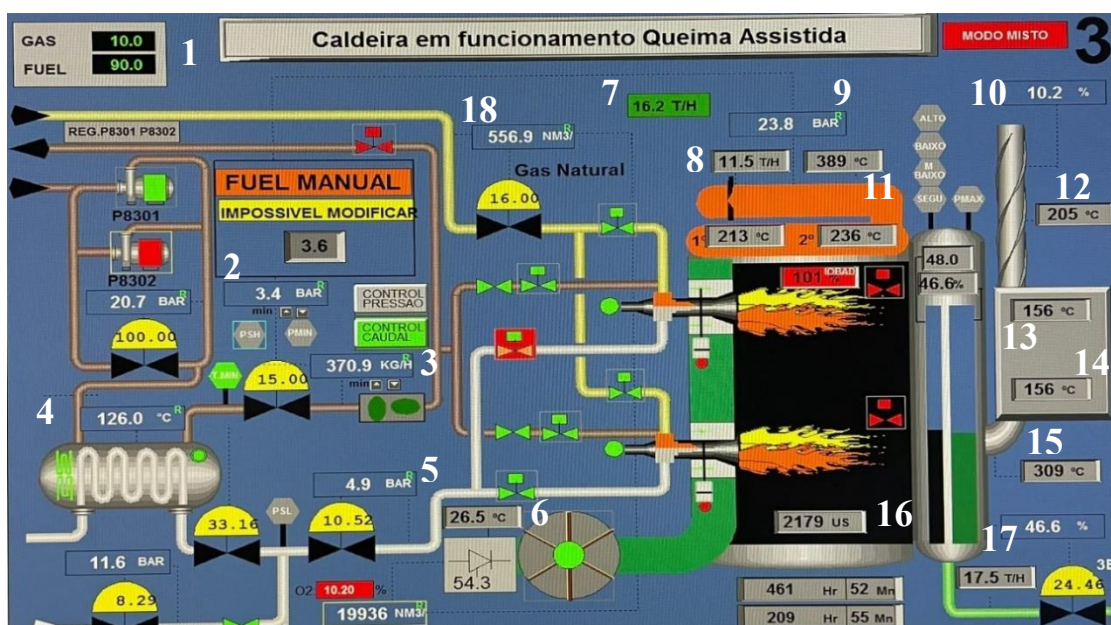


Figura 3.7 - Painel de monitorização da Caldeira 3

Legenda:

- 1- Razão de Gás Natural/Fuel n°4;
- 2- Pressão de alimentação do Fuel n°4;
- 3- Caudal de alimentação de Fuel n°4;
- 4- Temperatura de alimentação de Fuel n°4;
- 5- Caudal de atomização;
- 6- Temperatura do ar ambiente;
- 7- Caudal de vapor produzido pelo conjunto de caldeiras da RAR Cogeração;
- 8- Caudal de vapor produzido pela caldeira 3 da RAR Cogeração;
- 9- Pressão de vapor produzido;
- 10- Percentagem de O₂ presente nos gases de combustão (inoperável);
- 11- Temperatura do vapor;
- 12- Temperatura dos gases de combustão à saída do economizador;
- 13- Temperatura da água à entrada do economizador;
- 14- Temperatura da água à saída do economizador;
- 15- Temperatura dos gases de combustão à entrada do economizador;
- 16- Condutividade da água na caldeira;
- 17- Caudal de alimentação de água à caldeira;
- 18- Caudal de alimentação de gás natural.

Para além deste painel, existem mais dois displays que auxiliaram à recolha de dados, um com informações sobre o desgasificador (Figura 3.8), onde é possível conhecer a temperatura de entrada da água nas caldeiras e outro do sistema de tratamento de água (Figura 3.9), onde é possível verificar a condutividade da água de alimentação.



Figura 3.8 - Painel de monitorização do desgasificador

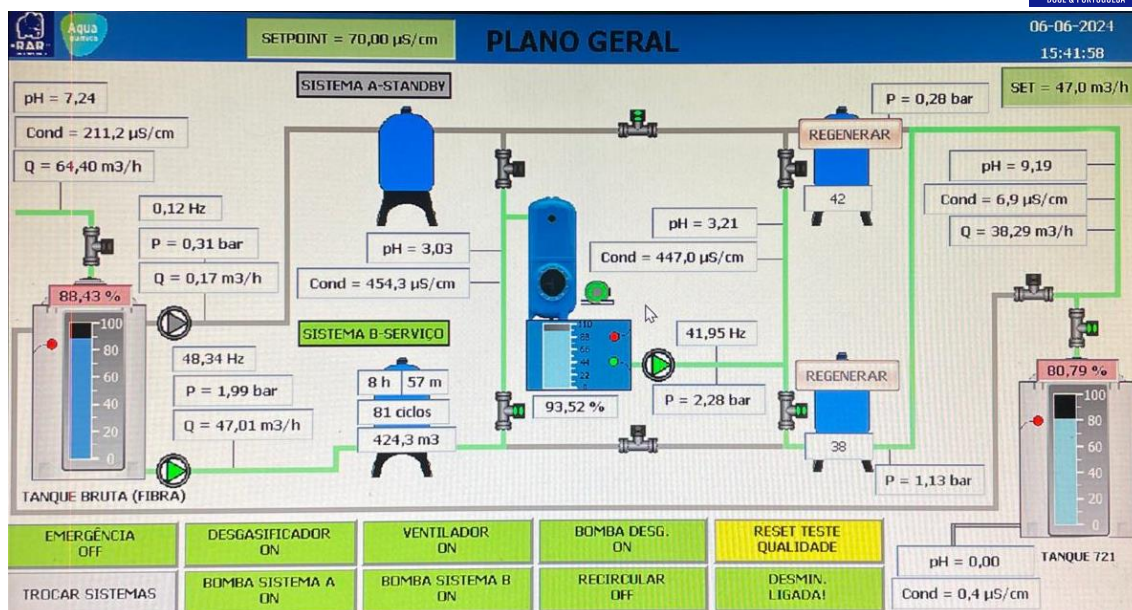


Figura 3.9 - Painel de monitorização do sistema de tratamento de água alimentada às caldeiras

O sistema de tratamento de água funciona com dois conjuntos A e B, cada qual com uma resina catiónica e aniónica, que alternam no tratamento da água, enquanto o A está a funcionar, o B encontra-se em regeneração e vice-versa.

3.3 Analisador dos gases de combustão e Analisador do Carbono Orgânico Total em amostra líquida

Foi necessário utilizar um medidor de gases para se conhecer a composição gasosa da corrente de gases de combustão à saída da caldeira para o cálculo do rendimento. Para tal, utilizou-se um medidor cedido pelo ISEP da marca Testo modelo 310 que se encontra representado na Figura 3.10.



Figura 3.10 - Detetor de gases de combustão da marca Testo e modelo 310

Utilizou-se também um analisador de carbono total orgânico da marca Schimadzu modelo TOC-V CSN, que se encontra no ISEP, com o intuito de verificar se haveria alguma matéria orgânica presente nos resíduos sólidos da queima de fuelóleo nº 4 das caldeiras (Figura 3.11).



Figura 3.11 - Analisador de Carbono Orgânico Total da marca Schimadzu modelo TOC-V CSN

4 Resultados e Discussão

Os rendimentos das 3 caldeiras foram determinados em ensaios com diferentes caudais de combustível. As gamas de variação de caudal de fuelóleo nº4 foram de [300 - 1800] kg/h para as Caldeiras 1 e 3 e de [200 – 600] kg/h para a Caldeira 2. No caso do GN, para a caldeira 1, a gama de variação do seu caudal foi de [600 – 1900] m³/h, equivalente a [400 – 1600] kg/h.

Analisou-se a composição dos gases de combustão (apenas o teor de O₂, CO e CO₂) e registaram-se todos os dados necessários à determinação dos rendimentos pelos métodos indiretos e direto (estes dados encontram-se tabelados no Anexo B).

Os ensaios permitiram medir parâmetros do combustível, da água de alimentação e do vapor como: temperaturas, pressões e caudais, que são necessários para a determinação das perdas de calor e rendimentos segundo as normas ASME e ADENE.

Na secção 4.1. são apresentados os rendimentos e na secção 4.2. é feita uma comparação desses nas três caldeiras, apenas para o método ASME. O estudo sobre o impacto de uma queima mista nos rendimentos é apresentado no subcapítulo 4.3 e, por fim, no subcapítulo 4.4 são apresentados os valores calculados pelo método direto.

4.1 Comparação entre rendimentos determinados pela norma ASME PTC 4-2013 e ADENE (2019)

Usando os caudais, temperaturas e pressões medidos durante os ensaios nas caldeiras com diferentes caudais de combustível, determinaram-se rendimentos segundo a norma ASME PTC 4-2013 e o Manual de Auditorias Energéticas na Indústria da ADENE. Note-se que as purgas de fundo efetuadas nas caldeiras apenas ocorrem 1 vez por turno durante 20 segundos originando baixos caudais. Existem também purgas denominadas “contínuas” que são efetuadas pelo topo do ebulidor quando se atinge a condutividade de cerca de 1000 µS/cm, estas duram de 5 a 10 s e o caudal contínuo também é baixo. Neste trabalho foi considerado o pior cenário admitindo que a operação de purgagem é feita automaticamente consoante o teor de sólidos dissolvidos totais.

Na Figura 4.1 estão representados os resultados obtidos no ensaio realizado na caldeira 1, segundo as duas normas referidas, com queima de gás natural.

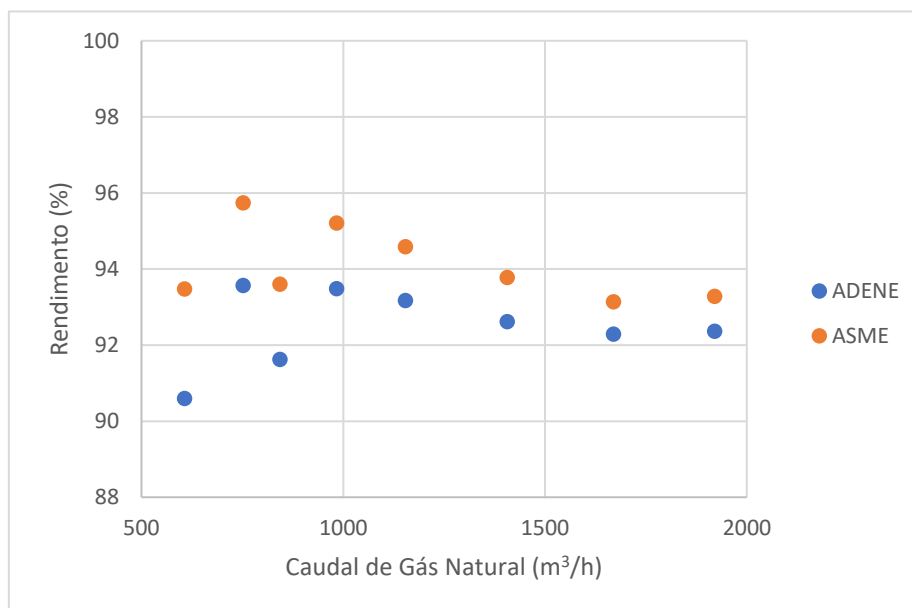


Figura 4.1 - Rendimentos na caldeira 1 segundo a norma ASME PTC 4-2013 e ADENE, com queima de GN

Pela Figura 4.1 observa-se que os rendimentos da caldeira 1 calculados por ambos os métodos (ASME e ADENE) têm a mesma tendência evolutiva à medida que se aumenta o caudal de GN, o rendimento aumenta cerca de 2-3% (de 93,13 para 95,73% ou 90,59 para 93,57%) com o aumento do caudal de 606,7 para 1920,5 m³/h e tende a estabilizar pelos 93%. Admite-se que este ligeiro aumento do rendimento se deve à diminuição da razão ar/combustível e consequente diminuição das perdas térmicas pelos gases de combustão.

A queima do GN origina altos rendimentos na caldeira, mas o teor de CO₂ libertado nos gases de combustão é mais baixo do que com outros combustíveis, o que pode não é benéfico para a etapa da carbonatação.

Na Figura 4.2 apresenta-se a evolução dos rendimentos da caldeira 1 quando se eleva o caudal de fuelóleo nº4 de 525,1 para 1954,9 kg/h.

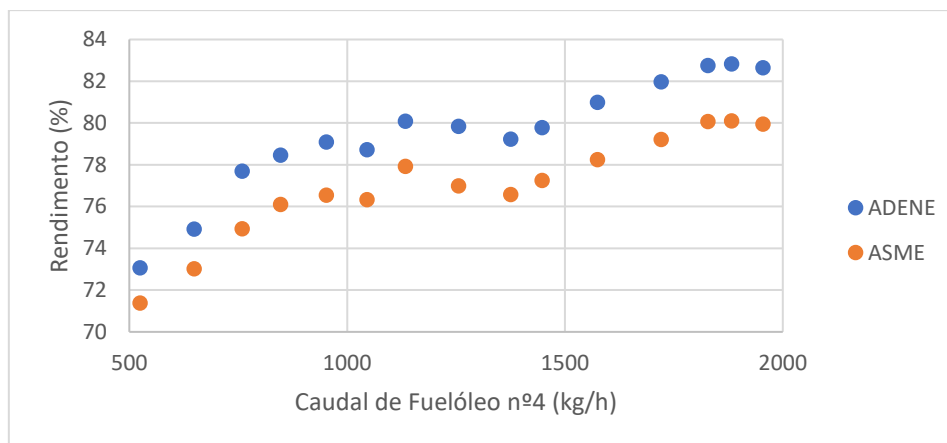


Figura 4.2 - Rendimentos da caldeira 1 segundo a norma ASME PTC 4-2013 e ADENE, com queima de fuelóleo nº4.

Da análise da figura é possível aferir que os rendimentos apresentados por ambas os métodos (ASME e ADENE) são idênticos embora com aumentos mais pronunciados (de 71,4 para 79,9% ou 73,1 para 82,7%, respetivamente) do que se observa aquando da combustão com GN.

Para o fuelóleo nº4, a maior parte das perdas térmicas consideradas pela norma ASME são contabilizáveis para o cálculo do rendimento da caldeira, ao contrário do que acontece com o GN. Este fuelóleo possui na sua composição um teor de outros compostos como enxofre e água, que sob a forma gasosa necessitaram de calor e baixaram o rendimento da caldeira. Para comprovação deste fator, dever-se-iam efetuar análises aos SOx e ao vapor de água nos gases de combustão, bem como análises termográficas.

Na Figura 4.3 estão representados os rendimentos obtidos num primeiro ensaio realizado na caldeira 2, para diferentes caudais de fuelóleo nº4, segundo os dois métodos indiretos já referidos.

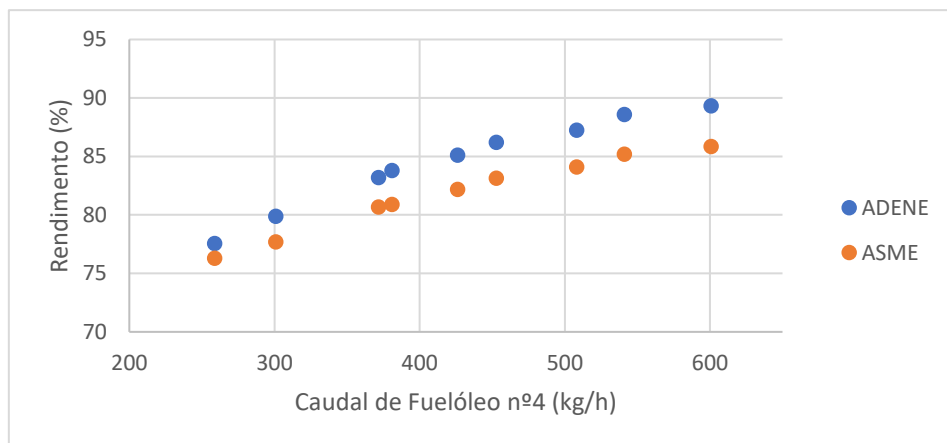


Figura 4.3 - Rendimentos obtidos no primeiro ensaio realizado na caldeira 2, para queima de fuelóleo nº4, segundo a norma ASME PTC 4-2013 e ADENE

Como se pode observar pela Figura 4.3, o rendimento da caldeira 2 aumentou linearmente de 76,3 para 85,9% ou de 77,5 para 89,3%, com o aumento de fuelóleo nº4 de 258,8 para 600,8 kg/h. Note-se que o comportamento da evolução do rendimento observado por ambos os métodos é similar, sendo os da ASME com valores inferiores, o que era expectável dado que a fuelóleo nº4 possui água, e esta é considerada nos termos de perdas energéticas.

Esta caldeira 2 tem maior limitação na quantidade de fuelóleo nº4 a queimar, uma vez que possui um único queimador, mas um incremento no caudal de combustível de 342 kg/h permite um incremento no rendimento de cerca de 9,6% (ASME) ou 11,8% (ADENE).

Na Figura 4.4, mostra-se a evolução dos valores de rendimento da caldeira 2, num segundo ensaio com o mesmo combustível, à medida que se eleva o caudal de fuelóleo nº4 de 256,0 para 614,2 kg/h.

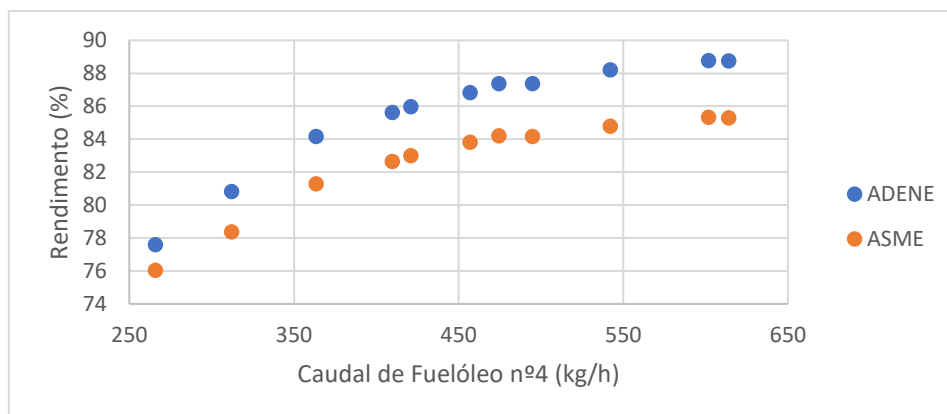


Figura 4.4 - Rendimentos obtidos no segundo ensaio realizado na caldeira 2, para queima de fuelóleo nº4, segundo a norma ASME PTC 4-2013 e ADENE

Como se pode observar na Figura, com o aumento referido do caudal o rendimento aumentou de 76,1 para 85,3% (ASME) ou de 77,6 para 88,8% (ADENE), que são valores próximos aos da queima de fuelóleo nº4.

Na Figura 4.5, mostram-se os rendimentos da caldeira 3 obtidos no primeiro ensaio, para queima de fuelóleo nº4, segundo ambas as normas ASME e ADENE.

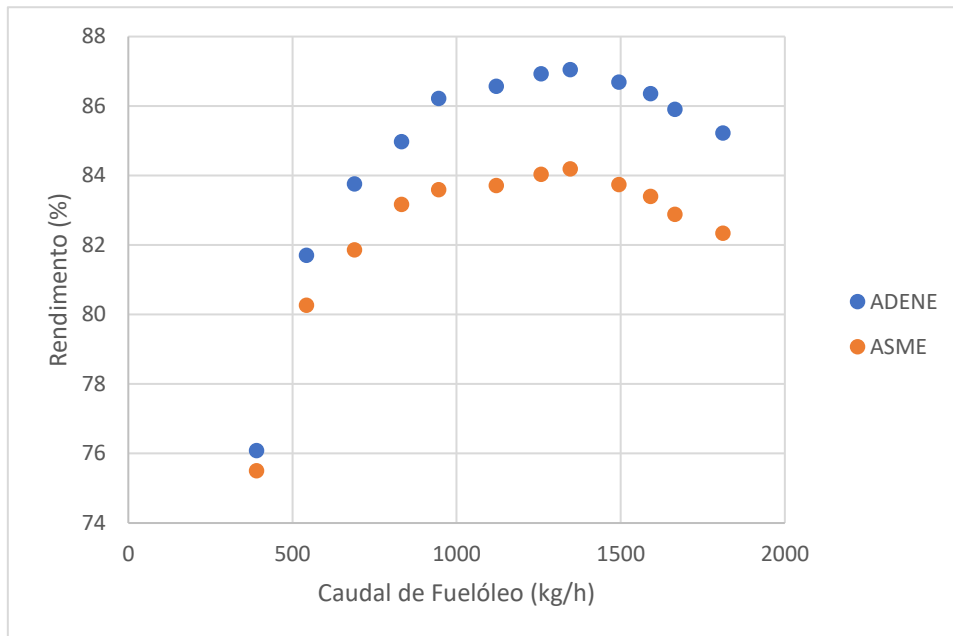


Figura 4.5 - Rendimentos obtidos no primeiro ensaio realizado na caldeira 3 para queima de fuelóleo nº4 segundo a norma ASME PTC 4-2013 e ADENE

Para um aumento do caudal de 390,3 a 1345,4 kg/h os rendimentos calculados aumentaram, no entanto se voltarmos a aumentar o caudal até 1811,1 kg/h inverte-se o sentido e há uma diminuição. Esta diminuição de rendimento ocorre, pois a queima é incompleta resultando no aumento de CO nos gases de combustão.

Na Figura 4.6 encontram-se os rendimentos obtidos para o segundo ensaio de queima de fuelóleo nº4 efetuado na Caldeira 3.

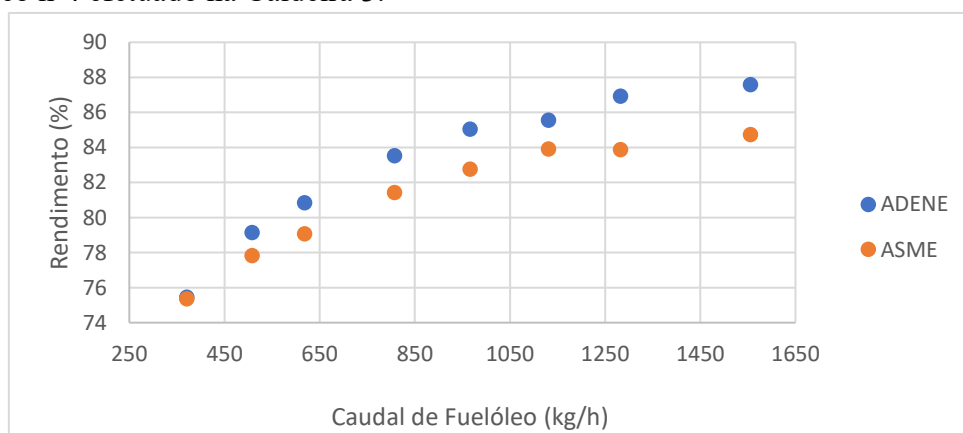


Figura 4.6 - Rendimentos obtidos num segundo ensaio realizado na caldeira 3 segundo a norma ASME PTC 4-2013 e ADENE

Como se pode observar na Figura, com o aumento do caudal de 370,5 para 1555,4 kg/h o rendimento aumentou de 75,4 para 84,7% (ASME) ou de 75,4 para 87,6% (ADENE). Neste caso não houve qualquer diminuição do rendimento com o aumento do caudal de combustível, sendo um perfil evolutivo próximo do que se observou na caldeira 2.

4.2 Comparação dos Rendimentos nas 3 Caldeiras para a Queima de Fuelóleo nº4

Com o intuito de realizar uma comparação dos rendimentos nas 3 caldeiras foram utilizados apenas os rendimentos determinados segundo a norma ASME PTC 4-2013, pois esta considera maior número de termos de perdas energéticas.

Na Figura 4.7 estão incluídos os valores dos rendimentos dos primeiros ensaios realizados nas caldeiras 1, 2, 3 em função do caudal de Fuelóleo nº 4.

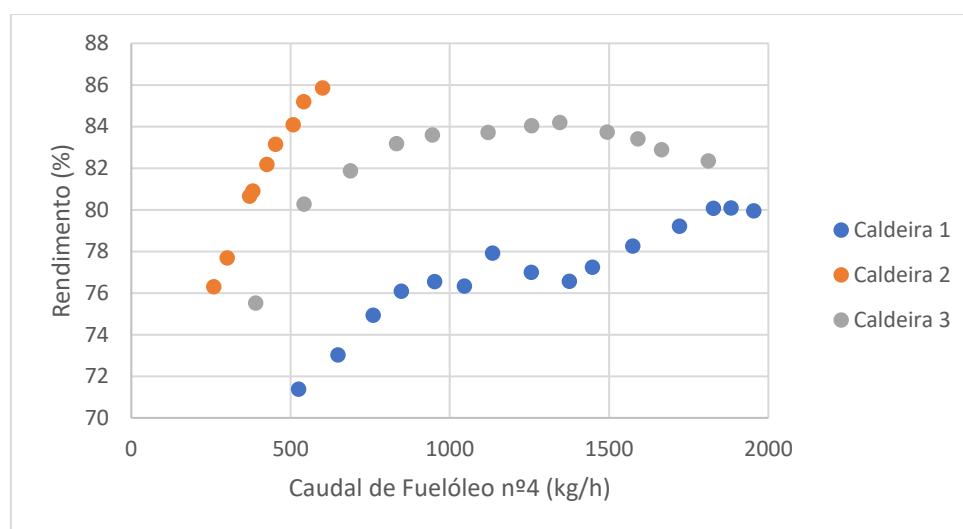


Figura 4.7 - Comparação dos Rendimentos obtidos na queima de fuelóleo nº4 para as 3 caldeiras que fazem parte da RCOG.

Como é possível observar, os rendimentos da caldeira 2 são os mais elevados e obtidos com caudais mais baixos. O motivo é que esta caldeira apenas possui um queimador e tem menos perdas energéticas.

Para um caudal médio de fuelóleo de 536,2 kg/h os valores de rendimento foram iguais a 71,4, 85,2 e 80,3%, para as caldeiras 1, 2 e 3, respetivamente. Há pois uma diferença de 13,8% no rendimento das caldeiras para o mesmo caudal de combustível. No entanto, a caldeira 2, que apresenta rendimentos mais elevados, não consegue operar para caudais de fuelóleo nº4 superiores a 600-700 kg/h.

O teor de CO nos gases de combustão no 1º ensaio da Caldeira 1 é de 567 ppm (Tabela B.1), que é um valor muito alto comparativamente aos medidos nas outras caldeiras. É

indicativo que a Caldeira 1 poderia estar com algum problema operatório que a levou a uma desregulação na queima de combustível. Mais tarde comprovou-se uma avaria no ventilador de ar alimentado e foi, posteriormente, intervencionada.

Outros fatores que podem explicar os rendimentos serem inferiores são as flutuações na medição da composição dos gases de combustão, sujidade ou incrustações e diferente isolamento térmico.

4.3 Efeito da Queima Mista nos Rendimentos das Caldeiras

Foi possível realizar testes com queima mista de fuelóleo nº4 e gás natural, simultaneamente. Estes ensaios foram realizados na caldeira 3 para razões de caudais de fuelóleo nº4/GN de 90/10, 80/20 e 70/30.

Na Figura 4.8 pode-se observar os valores dos rendimentos determinados pelas normas ASME e ADENE em função da razão de caudais de fuelóleo/GN de 90/10.

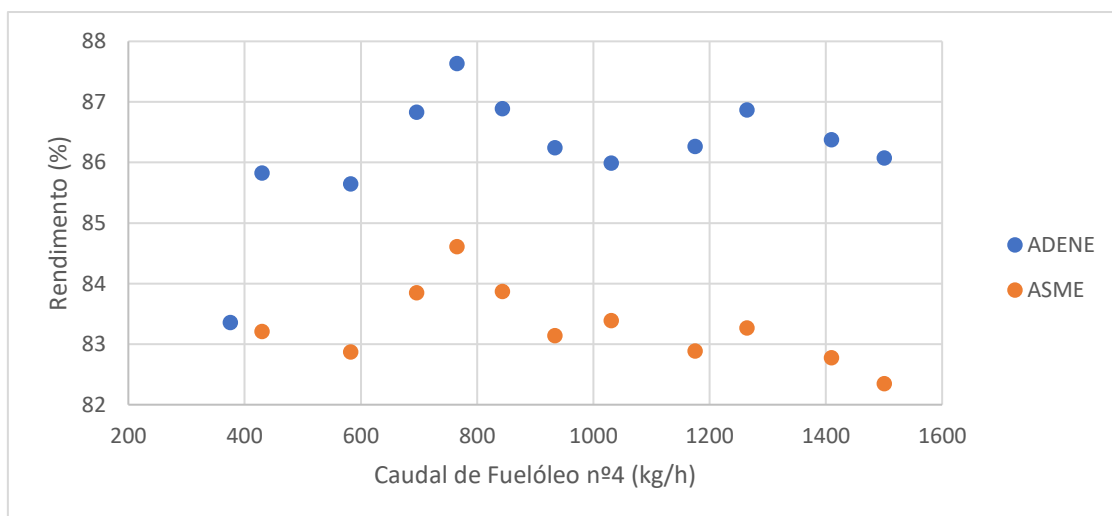


Figura 4.8 - Rendimentos obtidos para um ensaio na caldeira 3 com queima mista na razão de 90/10 de fuelóleo nº4 e GN, respetivamente

Como é possível observar, os rendimentos da caldeira 3 apresentam um comportamento oscilatório com valores médios de 83,2% (ASME) ou 86,2% (ADENE). Esta ligeira instabilidade pode ter origem na sensibilidade da válvula de GN para caudais baixos. Mesmo assim, são valores mais altos dos que se apresentou apenas com fuelóleo pois acrescenta-se o combustível “limpo” GN.

Avaliaram-se as restantes razões de caudais de combustíveis e na Figura 4.9 encontram-se os valores do rendimento na caldeira 3 para a razão de fuelóleo/GN 80/20.

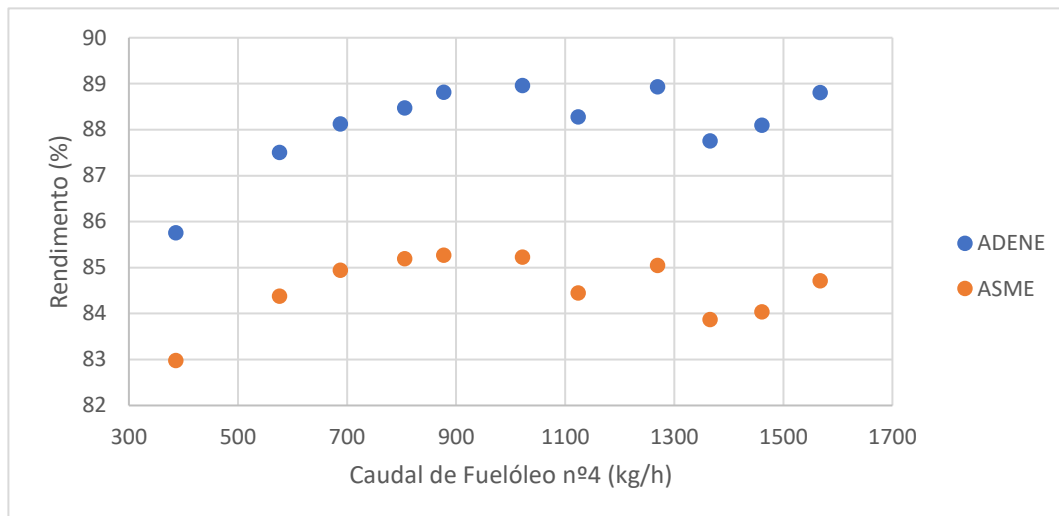


Figura 4.9 - Rendimentos obtidos para um ensaio na caldeira 3 com queima mista na razão de 80/20 de fuelóleo nº4 e GN, respetivamente

Pela figura observa-se que existe uma tendência inicial de aumento do rendimento com o aumento do caudal, mas no global os valores variaram entre 83,0 e 85,3% (ASME) ou 85,8 e 89,0% (ADENE) para uma gama de caudais misto (razão fuelóleo/GN de 80/20) entre 386,2 e 1567,5 kg/h.

Na Figura 4.10 encontram-se os rendimentos na caldeira 3 para diferentes caudais mistos numa razão de fuelóleo nº4/GN de 70/30.

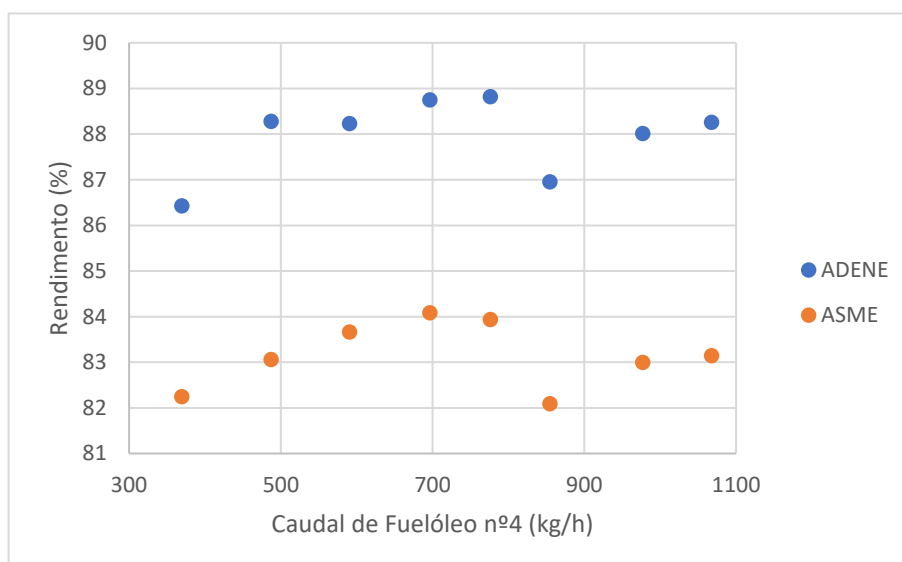


Figura 4.10 - Rendimentos obtidos para um ensaio na caldeira 3 com queima mista na razão de 70/30 de fuelóleo nº4 e GN, respetivamente

Os valores dos rendimentos variaram entre 82,3 e 84,1% (ASME) ou 86,4 e 88,8% (ADENE) com o aumento do caudal misto de 369,6 a 1067,7 kg/h. Algumas inversões na tendência de aumento do rendimento pelo aumento do caudal devem-se a um aumento na perda térmica nos gases de combustão devido à diminuição do teor de CO₂.

Por fim realizou-se uma comparação com base nos preços do GN e fuelóleo nº4, com o intuito de aferir a viabilidade económica desta queima mista, o GN com 40€/MWh e o fuelóleo nº4 com 600€/t. Assim, na Tabela 4.1 encontram-se os rendimentos (ASME) e os custos associados à queima de um caudal médio misto em diferentes razões Fuelóleo/GN e ensaios realizados apenas com queima de fuelóleo nº4.

Tabela 4.1 - Comparação de custo total dos combustíveis utilizados nos ensaios realizados na caldeira 3, com queima mista ou apenas com Fuelóleo nº4

	90/10	80/20	70/30	Fuelóleo nº4
Rendimento médio (%)	83,2	84,6	83,2	81,9
Fuelóleo nº4 (kg/h)	917,4	1013,1	727,5	1046,0
GN (kg/h)	101,9	253,3	311,8	-
Custo total (€)	610,0	755,9	618,8	627,6

Em suma, a queima mista, apesar de aumentar os rendimentos da Caldeira 3, os seus valores não ultrapassaram 2,7%. O melhor custo total obteve-se para a razão 90/10 de fuelóleo/GN embora o rendimento mais elevado obteve-se para a razão 80/20. Concluiu-se a necessidade de aprofundar o estudo do uso da queima mista por ambas as razões, ou seja, melhor rendimento e mais baixo custo.

4.4 Comparação de rendimentos determinados pelo método direto.

Os rendimentos para os ensaios já apresentados foram também determinados pelo método direto. Na Figura 4.11, estão representados esses rendimentos (equações no Anexo C) para os ensaios realizados com queima de fuelóleo nº4 nas caldeiras 1, 2 e 3. Note-se que para a caldeira 2 e 3 estão demonstrados os resultados dos primeiros ensaios realizados com queima de fuelóleo nº4.

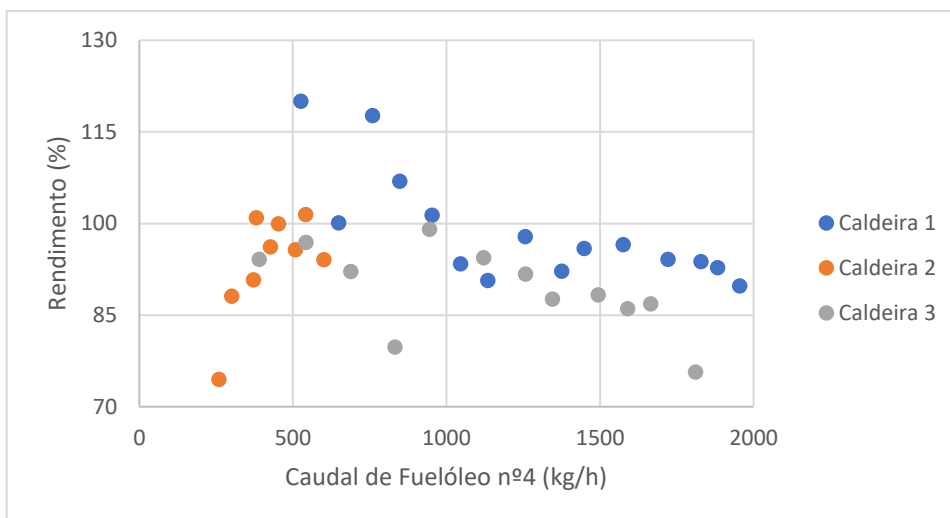


Figura 4.11 - Rendimentos obtidos segundo o método direto, para as 3 caldeiras com queima de diferentes caudais de fuelóleo n^o4

Pela Figura 4.11 é possível verificar que alguns pontos estão acima dos 100%, porque este método não considera as perdas de calor. Vê-se também há a tendência da diminuição dos valores dos rendimentos para caudais de fuelóleo superiores a 500 kg/h, porque as perdas energéticas vão diminuindo com o aumento do caudal de combustível

Na Figura 4.12 estão apresentados os rendimentos obtidos através do método direto, na caldeira 1, com queima de gás natural.

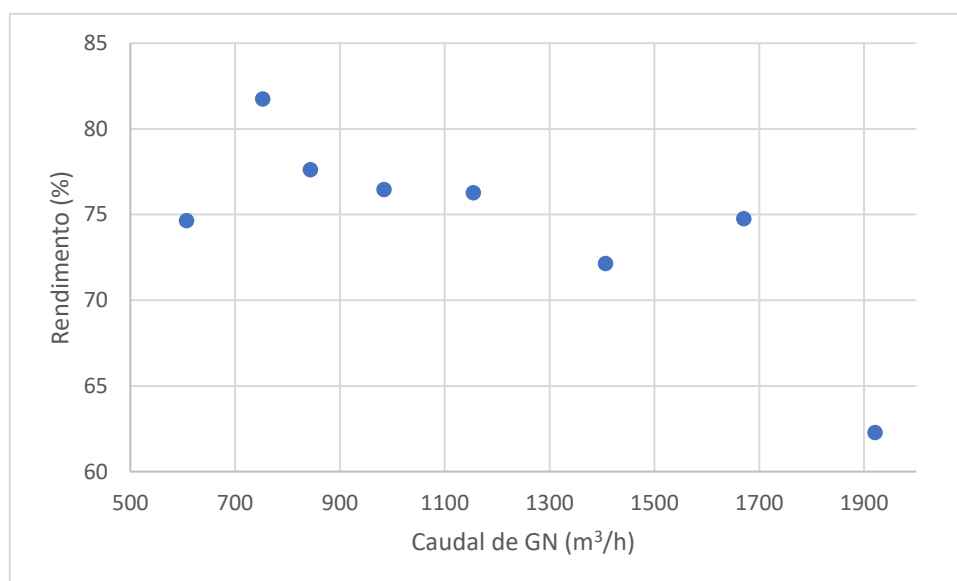


Figura 4.12 - Rendimentos obtidos pelo método direto, na caldeira 1, com queima de GN

Pela figura é possível verificar que, apesar dos rendimentos serem inferiores a 100%, é observável um comportamento oscilatório e decrescente do rendimento. Admite-se que o ensaio foi irregular devido à não alimentação de água make-up ao ebulidor. Além disso, o teor de CO nos gases de combustão foi aumentando ao longo do ensaio, o que terá influência na conversão do poder calorífico do combustível em caudal e temperatura do vapor formado.

Os resultados dos rendimentos na caldeira 3 obtidos pelo método direto para a queima mista são apresentados na Figura 4.13.

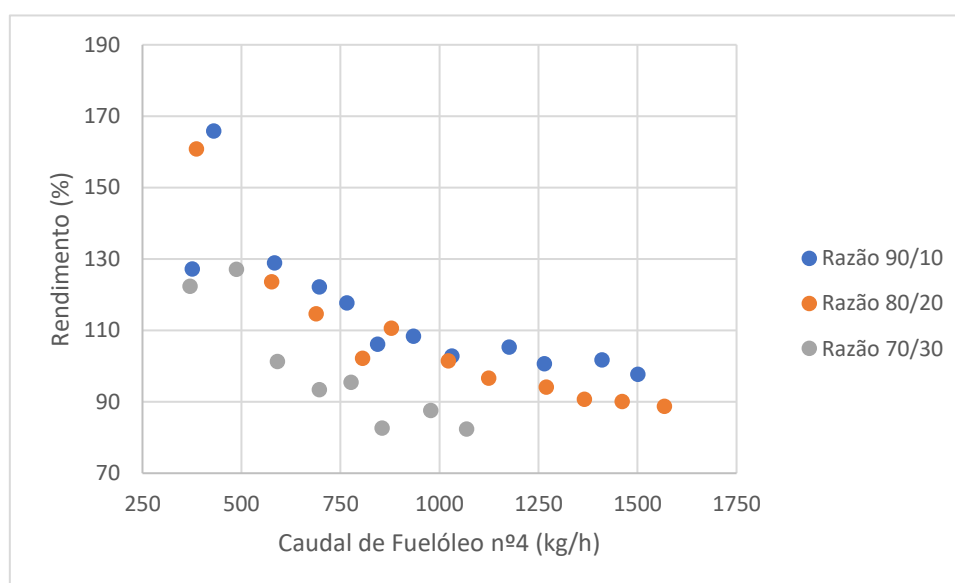


Figura 4.13 - Comparação dos rendimentos pelo método direto, para a caldeira 3, com queima mista nas razões 90/10, 80/20 e 70/30 de Fuelóleo nº4/GN

Como é possível observar pela Figura 4.13, existem muitos rendimentos acima dos 100%, o que mostra mais uma vez que este método não é rigoroso. Também é possível verificar que quanto menor for a razão de Fuelóleo/GN, menores serão os rendimentos, o que era expectável pois como já foi observado, o rendimento de uma caldeira tende a aumentar com o aumento de gás natural queimado.

5 Análise Económica das Perdas Térmicas e Sugestões de Melhoria

Após a análise dos rendimentos das 3 caldeiras decidiu-se estudar as perdas monetárias associadas às perdas térmicas. Para tal, sabendo que os preços do fuelóleo nº4 e GN são de 600€/t e 40€/MWh, e tomando o exemplo do primeiro ensaio realizado na caldeira 2 obtiveram-se os seguintes resultados da Tabela 5.1 (cálculos no Anexo E).

Tabela 5.1 – Perdas monetários devido a perdas térmicas na realização do primeiro ensaio na caldeira 2, com queima de fuelóleo nº4

m_{fuel} (kg/h)	€ _{perdido} (€/dia)
258,8	883,14
300,9	966,62
371,8	1035,61
381,0	1047,87
426,2	1093,65
452,2	1097,61
508,4	1164,56
541,2	1153,87
600,8	1223,67

Como é possível observar, o aumento de caudal de combustível origina mais perdas térmicas e, conseqüentemente, perdas monetárias. Estas perdas térmicas estão associadas às perdas de calor sensível nos gases de combustão.

Realizou-se um ensaio na mesma caldeira 2, onde se alterou a abertura da válvula do ventilador que alimenta o ar à caldeira, de 22% (*setpoint*) para 18%. Este ensaio visou confirmar que quanto maior o excesso de ar, maior seriam as perdas associadas aos

mesmos. Na Figura 5.1 encontra-se a comparação entre ensaios e os rendimentos (ASME) (os resultados da determinação dos rendimentos estão em Anexo E).

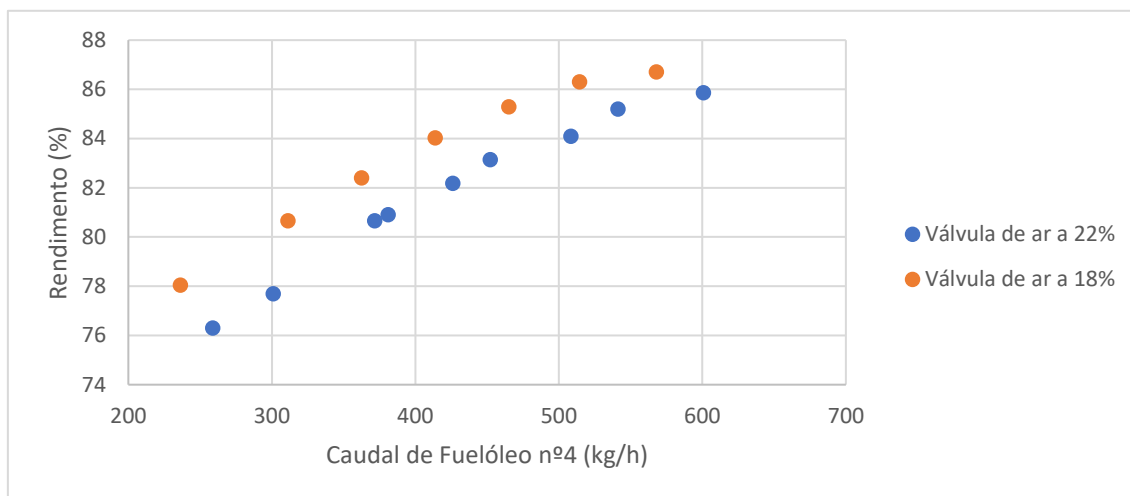


Figura 5.1 - Comparação entre o primeiro ensaio realizado na caldeira 2, com queima de fuelóleo nº4 e válvula de Ar a 22%, e o mesmo com 18%

Como é possível observar, os rendimentos da caldeira 2 aumentaram cerca de 1,7% a 3,2%, no entanto verificou-se a existência de fumos negros para o último ponto do ensaio com menor abertura da válvula de ar alimentado. Tal aconteceu porque a queima do combustível não foi total (o excesso de ar resultou num valor de 4,6%).

Na Tabela 5.2, encontram-se os valores monetários perdidos devido a perdas térmicas na caldeira 2 com uma menor razão ar/combustível, bem como a poupança associada quando comparado com o primeiro ensaio.

Tabela 5.2 – Perda monetária devido a perda térmica na caldeira 2, com a menor abertura da válvula do ventilador; queima de fuelóleo nº4, e poupança associada quando comparado com o 1º ensaio

m_{fuel} (kg/h)	€ _{perdido} (€/dia)	Poupança (€/dia)	Poupança (%)
236,2	746,9	136,2	15,4
311,2	866,6	100,0	10,3
362,5	918,6	117,0	11,3
413,9	951,9	96,0	9,2
465,2	985,3	108,4	9,9
514,5	1014,5	83,1	7,6
567,9	1087,7	76,9	6,6

Como é possível observar na Tabela 5.2, a diminuição da abertura da válvula de ar alimentado permite melhorar o processo de queima e, conseqüentemente, os rendimentos obtidos na caldeira, traduziu-se numa poupança significativa num intervalo de [6,6 – 15,4] %.

Faz, então, sentido a implementação de uma estratégia de controlo que vise melhorar as condições da queima com a quantidade de ar alimentada à caldeira, tendo em atenção a não formação de fumos de combustão, ou seja, queima incompleta de combustível. Assim, na Figura 5.2, encontra-se uma proposta de estratégia de controlo para ser implementada nas caldeiras.

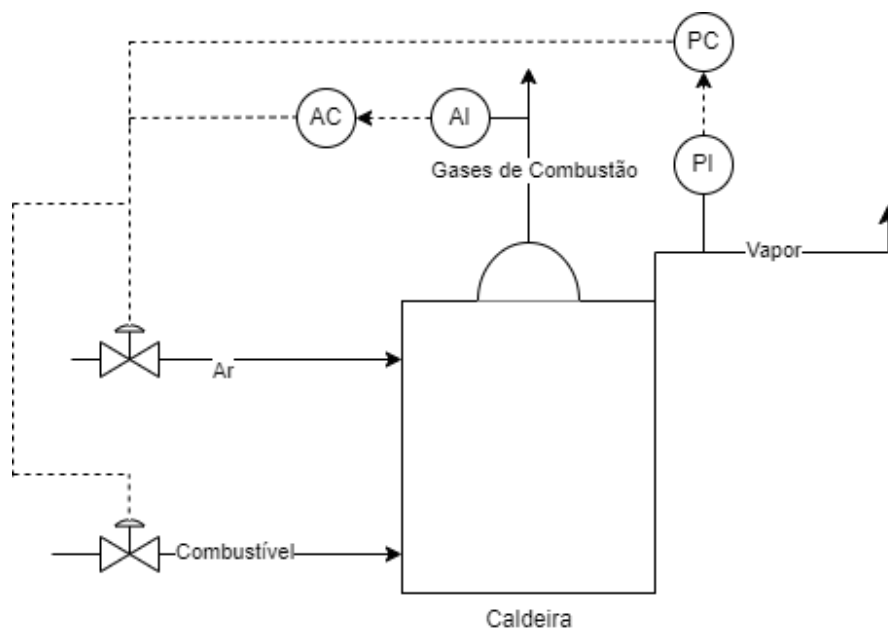


Figura 5.2 - Estratégia de Controlo proposta de se implementar nas caldeiras da RCOG

A estratégia de controlo baseia-se em definir um *setpoint* para a pressão de vapor, que deve ser igual ou inferior a 24 bar, pois é a pressão máxima do coletor de alta pressão. Assim, caso o consumo de vapor e a sua pressão aumente para valores superiores a 24 bar, o sistema diminui a pressão do combustível (com controlo em cascata de regulação da sua alimentação seja este fuelóleo nº4, GN ou ambos) e regula a abertura da válvula do ar alimentado à caldeira.

O *setpoint* dos caudais de alimentação de combustível e ar, além de ter de ter em conta a pressão de vapor, deve considerar o teor de oxigénio ou excesso de ar presente nos gases

de combustão. De acordo com os ensaios realizados, uma boa sugestão de *setpoint* para o excesso de ar nos gases de combustão seria um valor superior a 5%.

Esta estratégia oferece uma melhor eficiência energética na operação das caldeiras, bem como uma diminuição dos gases emitidos e, conseqüentemente, menor perda térmica e maior poupança no consumo de combustível (€).

6 Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros

Neste estudo foram realizados ensaios e determinados os rendimentos em 3 caldeiras aquatubulares que produzem vapor sobreaquecido a aproximadamente 24 bar e temperatura superior a 221°C para diferentes valores de caudal de combustível. Para a determinação dos rendimentos segundo as normas ASME PTC 4-2013 e ADENE (2019) foi analisado a composição dos gases de combustão para identificar os teores de CO, CO₂ e O₂, assim como as perdas de calor.

Primeiramente, verificou-se que os métodos indiretos ASME e ADENE para a determinação dos rendimentos de caldeiras são mais rigorosos que o método direto, pois este método apresentou em algumas operações valores acima dos 100%.

De seguida, verificou-se que o rendimento das caldeiras diferiu em cerca de 23,2% conforme o tipo de combustível queimado (fuelóleo nº4 e GN). Por exemplo, para um caudal médio de fuelóleo nº 4 de 536,2 kg/h, o valor de rendimento na caldeira 1 foi de 71,4% (ASME) enquanto com GN, para um caudal médio de 553,1 kg/h o rendimento médio foi de 94,6% (ASME).

Não foram realizados ensaios com queima de GN na caldeira 3 uma vez que se verificaram falhas na válvula de admissão (a mesma fechava espontaneamente para caudais baixos).

As 3 caldeiras têm rendimentos diferentes para o mesmo caudal médio de fuelóleo nº 4 de 536,2 kg/h, com valores iguais a 71,4, 85,2 e 80,3%, para as caldeiras 1, 2 e 3 (ASME).

Na queima mista obteve-se para a caldeira 3 com razões de Fuelóleo nº4/GN de 90/10, 80/20 e 70/30, rendimentos de 83,2%, 84,6% e 83,2% (ASME), respetivamente (não foram realizados ensaios na caldeira 1 com queima mista dado que havia erros na calibração do ventilador).

As perdas económicas associadas às perdas térmicas nas 3 caldeiras foram significativas com valores compreendidos entre [883,14 – 1223,67] €/dia. No ensaio onde se diminuiu o ar alimentado à caldeira 3 (abertura da válvula diminuiu de 22% para 18%), verificou-se que as perdas económicas de combustível associadas às perdas térmicas diminuíram para um intervalo compreendido em [746,89 – 1087,65] €, existindo assim uma poupança de

cerca de 6,6% (para 567,9 kg/h de fuelóleo nº4) e 15,4% (para 236,2 kg/h). Estes resultados mostram bem a necessidade de implementar um sistema de controlo de admissão de ar que otimize o processo de queima do combustível.

Para trabalhos futuros sugere-se avaliar a influência de diferentes tipos de fuelóleo nº4 ou de misturas de combustíveis na eficiência das caldeiras e suas emissões gasosas, ou explorar o uso de combustíveis alternativos, por exemplo com aditivos que possam melhorar a eficiência da combustão e reduzir as emissões.

Outra sugestão interessante passa por efetuar o levantamento de dados de variáveis processuais críticas a nível de segurança e das estratégias de controlo a adotar para se certificar as caldeiras segundo a norma NFPA 85. Esta norma visa a otimização do controlo de caldeiras a nível do controlo básico distribuído e dos sistemas de emergência e *shutdown*.

Bibliografia

- [1] ACCEPT, «Eficiência Energética na Indústria: Menos Consumo, Mais Futuro!» Acedido: 4 de Abril de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.accept.pt/eficiencia-energetica-na-industria/>
- [2] RAR Açúcar, «A Marca». Acedido: 3 de Março de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://docerar.pt/a-marca/>
- [3] GRUPO RAR, «RAR - Refinarias de Açúcar Reunidas, S.A.» Acedido: 3 de Março de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.rar.com/pt/empresas/rar-acucar/#a-empresa>
- [4] K. Rayaprolu, *Boilers For Power and Process*.
- [5] Babcock Wanson, «Caldeiras Aquatubulares». Acedido: 7 de Março de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.babcock-wanson.com/pt-pt/produtos/caldeiras-industriais/caldeiras-aquatubulares-vapor/>
- [6] V. Pedrotti, «Análise de Processos e Equipamentos de Geração e de Distribuição de Vapor Visando Licenciamento Ambiental».
- [7] E. Bazzo, *Geração de Vapor*, 2.^a ed.
- [8] Icaterm, «Conheça as principais partes componentes da caldeira de vapor». Acedido: 22 de Abril de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.icaterm.com.br/conheca-as-principais-partes-componentes-da-caldeira-de-vapor/>
- [9] fives, «Pillard LONOxFLAM AS Oil and gas burner».
- [10] D. F. Ferreira Martins, «Otimização do Funcionamento de Caldeiras Aquatubulares em Indústria de Processo Químico».
- [11] L. Carlos Martinelli Jr, «Geradores de Vapor».
- [12] J. Carlos e W. Junior, «AVALIAÇÃO DOS DANOS POR FLUÊNCIA NO SUPERAQUECEDOR DA CALDEIRA DE CO DA REFAP S/A SEGUNDO API STD 530», 2009.

- [13] J. Harold e S. Arnao, «Caldeiras Aquatubulares de Bagaço-Estudo do Sistema de Recuperação de Energia».
- [14] L. Braga Meirelles, K. Rajagopal, e P. Sílvia Maria Cruzeiro da Silva, «CARACTERIZAÇÃO DA FUELÓLEO Nº4 PETROQUÍMICA PARA PRODUÇÃO DE AROMÁTICOS», 2014.
- [15] Galp, «FUEL N.º 4 BTE 0,5%».
- [16] J. P. Teixeira, *Gás natural: o energético mais competitivo*.
- [17] Portgás, «Composição do gás natural ». Acedido: 1 de Abril de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.portgas.pt/profissionais/apoio/composicao-do-gas-natural/>
- [18] The American Society of Mechanical Engineers, «Fired Steam Generators - Performance Test Codes». [Em linha]. Disponível em: www.spic.ir
- [19] ADENE, «Manual de Auditorias Energéticas na Indústria».
- [20] Geração de energia elétrica, «Poder Calorífico». Acedido: 23 de Março de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>

Anexo A Parâmetros auxiliares necessários à determinação do rendimento de caldeiras.

No seguinte capítulo, encontram-se todas os dados e cálculos realizados para a determinação de parâmetros auxiliares necessários à determinação do rendimento de caldeiras.

A.1 - Determinação da composição elementar do GN

Na Tabela A.1 encontram-se as percentagens máximas das médias nacionais referentes a cada composto que faz parte da composição do GN [17].

Tabela A.1- Composição do Gás Natural

Composto	%molar	MM (g/mol)
CH ₄ (metano)	90,05	16,04
C ₂ H ₆ (etano)	6,45	30,07
C ₃ H ₈ (propano)	1,74	44,10
C ₄ H ₁₀ (n-butano)	0,23	58,12
C ₄ H ₁₀ (i-butano)	0,27	58,12
C ₅ H ₁₂ (n-pentano)	0,02	72,15
C ₅ H ₁₂ (i-pentano)	0,01	72,15
C ₆ H ₁₄ (n-hexano)	0,01	86,18
CO ₂ (Dióxido de Carbono)	0,63	44,01
N ₂ (Azoto)	0,58	28,01

O peso molecular do GN foi conseguido através da Equação A.1.

$$MM_{GN} = \sum(\%molar_{composto} * MM_{composto}) \quad (A.1)$$

Substituindo tem-se:

$$\begin{aligned}
 MM_{GN} &= 16,04 * \frac{90,05}{100} + 30,07 * \frac{6,45}{100} + 44,10 * \frac{1,74}{100} + 58,12 * \frac{0,23}{100} + 58,12 * \frac{0,27}{100} \\
 &+ 72,15 * \frac{0,02}{100} + 72,15 * \frac{0,01}{100} + 86,18 * \frac{0,01}{100} + 44,01 * \frac{0,63}{100} + 28,01 \\
 &* \frac{0,58}{100} = 17,92 \text{ g/mol}
 \end{aligned}$$

Em seguida, é demonstrado como calcular a percentagem molar do carbono, por exemplo, no GN através da Equação A.2.

$$\%C_{molar} = \frac{N_{Carbono,CxHy} * \%C_{xHyGN}}{n_{Total}} \quad (A.2)$$

Substituindo tem-se:

$$\begin{aligned} \%C_{molar} &= \frac{1 * 90,05 + 2 * 6,45 + 3 * 1,74 + 4 * 0,23 + 4 * 0,27 + 5 * 0,02 + 5 * 0,01 + 6 * 0,01 + 1 * 0,63}{531,3} \\ &= 0,2090 * 100 = 20,90\% \end{aligned}$$

Finalmente, para converter a percentagem molar em percentagem mássica, utiliza-se a seguinte Equação A.3.

$$\%C_{mássica} = \frac{\%C_{molar} * MM_C}{m_{Total}} \quad (A.3)$$

Substituindo tem-se:

$$\%C_{mássica} = \frac{20,9 * 12,01}{335,7} = 74,8\%$$

A.2 - Determinação do Carbono orgânico total no resíduo

Para a determinação do carbono orgânico total do resíduo, foram realizados 3 medições, tendo sido feita uma média dos valores medidos. Os valores obtidos encontram-se representados na Tabela A.2

Tabela A.2 – Valores obtidos de Carbono orgânico total no resíduo

Ensaio	Carbono presente no resíduo (%)
1º ensaio	3,42
2º ensaio	2,15
3º ensaio	0,74
Média	2,10

$$C_{orgânico\ total} = \frac{3,42 + 2,15 + 0,74}{3} = 2,10\%$$

A.3 - Condutividade da água

Os sólidos dissolvidos tanto na água de alimentação como na água da caldeira são determinados com recurso a um fator de conversão que se encontra representado na Tabela A.3.

Tabela A.3 - Fator de Conversão da Condutividade em Sólidos dissolvidos totais

Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Fator de conversão (ppm)
<50	1,365079
>49 e <166	0,947658
≥ 166 e <333	0,769574
>332 e <833	0,715920
>832 e <10000	0,758544
>9999	0,850432

Um exemplo do cálculo da determinação do total de sólidos dissolvidos é o que se apresenta em seguida através da Equação A.4.

- Total de sólidos dissolvidos na alimentação (STD_f):

$$STD_f = \text{Condutividade} * \text{fator de conversão} \quad (\text{A.4})$$

$$STD_f = 1,9 * 1,365079 = 2,59 \text{ ppm}$$

- Total de sólidos dissolvidos na caldeira (STD_c):

$$STD_c = 358,36 * 0,715920 = 256,56 \text{ ppm}$$

Anexo B Levantamento de lados

Numa primeira instância, foi realizado um levantamento de temperaturas, pressões, caudais, composição dos gases de combustão e o Total de Sólidos Dissolvidos para diferentes caudais de fuelóleo nº4. Nas Tabelas B.1 e B.2 estão apresentados os dados recolhidos aos ensaios realizados na caldeira 1 com a queima de gás natural e fuelóleo nº4, respetivamente. Nas Tabelas B.3 e B.4 estão apresentados os dados recolhidos aos ensaios realizados na caldeira 2 com a queima de fuelóleo nº4. Nas Tabelas B.5 e B.6 estão apresentados os dados recolhidos aos ensaios realizados na caldeira 3 com a queima de fuelóleo nº4. Nas Tabelas B.7 e B.8 e B.9 estão apresentados os dados recolhidos aos ensaios realizados na caldeira 3 com a queima mista de fuelóleo nº4 e gás natural em razões de 90/10, 80/20 e 70/30, respetivamente.

Tabela B.1 - Recolha de todas as medições de caudais, pressões, temperaturas, teor de gases e condutividades para diferentes caudais de fuelóleo n^o4 na caldeira 1

m_{fuel} (kg/h)	T_{fuel} (°C)	m_{vap} (ton/h)	T_{vap} (°C)	$T_{gc\ e}$ (°C)	$T_{gc\ s}$ (°C)	$T_{ag\ e}$ (°C)	$T_{ag\ s}$ (°C)	T_a (°C)	P_{vap} (barg)	$m_{água}$ (ton/h)	O_2 (%)	CO (ppm)	CO_2 (%)	STD_f (mg/L)	STD_c (mg/L)
525,21	137,52	10,58	353,29	334,80	174,59	139,67	168,43	30,19	20,64	13,66	14,38	567,93	4,01	24,30	18,97
648,86	132,48	10,89	355,34	346,10	178,70	141,73	176,64	30,50	19,51	12,02	13,66	230,05	4,41	25,94	18,97
759,26	129,09	14,99	352,26	355,34	182,81	141,73	182,81	30,81	17,66	12,53	12,73	72,92	4,92	25,94	18,97
847,58	122,83	15,20	354,32	366,64	191,02	141,73	186,91	31,02	16,64	16,64	11,81	57,51	5,38	24,43	18,97
952,44	118,52	16,12	363,56	379,99	196,16	141,73	187,94	31,12	16,53	11,61	11,30	53,40	5,72	24,30	18,97
1046,00	121,70	16,23	375,88	394,37	203,35	141,73	193,08	31,63	17,77	14,17	10,99	53,40	5,89	27,44	18,97
1133,81	126,32	16,84	406,69	411,83	212,59	141,73	201,29	32,04	21,88	11,71	9,24	61,62	6,87	28,53	18,97
1256,23	111,33	20,44	373,83	428,26	207,45	141,73	182,81	33,69	21,05	17,77	10,37	63,67	6,23	26,07	18,97
1375,56	121,29	21,05	376,91	433,39	219,78	141,73	186,91	34,10	20,64	26,19	10,06	70,86	6,41	26,07	18,97
1448,07	124,88	23,00	382,04	444,69	226,97	141,73	186,91	34,40	20,44	22,49	9,24	72,92	6,81	26,07	18,97
1574,80	122,93	25,16	384,10	455,99	234,16	141,73	195,13	34,71	20,75	21,36	7,91	82,16	7,61	26,07	18,97
1721,46	121,29	26,80	385,13	464,20	238,26	141,73	196,16	34,82	21,46	24,85	6,68	86,27	8,30	26,07	18,97
1828,06	120,36	28,35	386,15	469,34	242,37	141,73	195,13	34,82	22,49	26,60	5,34	87,30	8,99	26,07	18,97
1883,00	121,49	28,86	387,18	472,42	244,43	141,73	192,05	34,92	23,72	26,60	5,14	96,54	9,15	26,07	18,97
1954,59	123,86	28,96	390,26	481,66	247,51	141,73	191,02	35,02	23,72	26,70	5,14	96,54	9,15	26,07	18,97

Tabela B.2 - Recolha de todas as medições de caudais, pressões, temperaturas, teor de gases e condutividades para diferentes caudais de GN na caldeira 1

mGN (m ³ /h)	m _{vap} (ton/h)	T _{vap} (°C)	T _{gc e} (°C)	T _{gc s} (°C)	T _{ag e} (°C)	T _{ag s} (°C)	T _a (°C)	P _{vap} (barg)	m _{água} (ton/h)	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	STD _f (mg/L)	STD _c (mg/L)
606,75	7,39	332,75	279,34	134,54	134,54	175,62	32,66	23,21	0,00	19,10	4,11	1,38	5,33	21,31
752,07	9,86	372,80	294,75	140,70	140,70	171,51	28,45	23,21	0,00	17,05	2,05	2,46	3,93	21,87
843,58	10,58	356,37	294,75	141,73	141,73	172,54	28,24	21,77	12,02	14,69	3,08	3,83	6,17	22,15
983,66	12,02	381,02	311,18	144,81	140,70	174,59	28,24	23,21	10,78	14,17	3,08	4,12	4,77	22,99
1153,94	14,07	379,99	326,59	147,89	140,70	175,62	28,65	23,42	11,50	12,12	5,14	5,27	5,19	22,15
1406,37	16,23	378,96	346,10	153,02	141,73	178,70	28,86	23,72	13,56	11,61	6,16	5,55	5,89	22,43
1670,11	19,92	384,10	372,80	161,24	140,70	182,81	29,06	23,93	16,74	8,73	11,30	7,15	5,89	20,75
1920,49	19,00	394,37	401,56	170,48	140,70	186,91	29,47	24,65	17,25	7,39	13,35	7,39	5,89	21,31

Tabela B.3 - Recolha de todas as medições de caudais, pressões, temperaturas, teor de gases e condutividades para um primeiro ensaio para diferentes caudais de fuelóleo n°4 na caldeira 2

m_{fuel} (kg/h)	T_{fuel} (°C)	m_{vap} (ton/h)	T_{vap} (°C)	$T_{\text{gc e}}$ (°C)	$T_{\text{gc s}}$ (°C)	$T_{\text{ag e}}$ (°C)	$T_{\text{ag s}}$ (°C)	T_a (°C)	P_{vap} (barg)	$m_{\text{água}}$ (ton/h)	O_2 (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	STD _f (mg/L)	STD _c (mg/L)
258,80	123,55	3,29	317,34	280,37	195,13	138,65	167,40	34,30	22,39	5,39	12,02	91,40	5,32	2,66	263,48
300,91	128,48	4,52	317,34	283,45	198,21	140,70	176,64	35,84	22,49	5,29	11,19	90,38	5,78	2,66	250,82
371,77	127,55	5,75	318,37	288,59	199,24	136,59	177,67	35,64	22,49	6,25	8,93	96,54	7,03	2,94	250,51
381,02	122,42	6,57	312,21	289,61	198,21	133,51	170,48	36,87	21,88	6,59	8,83	97,57	7,10	2,94	250,51
426,21	118,82	6,98	319,40	293,72	198,21	137,62	168,43	36,87	22,49	5,77	7,50	102,70	7,84	3,08	250,51
452,91	118,41	7,70	321,45	297,83	199,24	136,59	167,40	37,59	22,80	6,20	6,26	110,92	8,52	3,08	250,51
508,37	114,10	8,32	311,18	299,88	200,27	132,48	163,29	39,13	21,36	9,33	4,62	109,89	9,44	5,75	258,38
541,23	126,73	9,35	321,45	297,83	196,16	140,70	173,56	44,37	23,52	6,86	3,59	92,43	10,01	6,17	284,16
600,80	114,10	9,65	313,24	303,99	198,21	132,48	160,21	44,78	22,80	8,14	2,05	105,78	10,88	6,17	420,00

Tabela B.4 - Recolha de todas as medições de caudais, pressões, temperaturas, teor de gases e condutividades para um segundo ensaio para diferentes caudais de fuelóleo nº4 na caldeira 2

m_{fuel} (kg/h)	T_{fuel} (°C)	m_{vap} (ton/h)	T_{vap} (°C)	$T_{gc\ e}$ (°C)	$T_{gc\ s}$ (°C)	$T_{ag\ e}$ (°C)	$T_{ag\ s}$ (°C)	T_a (°C)	P_{vap} (barg)	$m_{água}$ (ton/h)	O_2 (%)	CO (ppm)	CO_2 (%)	STD_f (mg/L)	STD_c (mg/L)
265,99	132,69	3,39	308,10	273,18	195,13	138,65	175,62	38,10	22,18	4,58	12,32	97,57	5,15	2,52	418,13
312,21	145,22	4,83	318,37	276,26	197,18	143,78	183,83	38,51	22,90	5,02	10,99	87,30	5,89	2,66	418,13
363,56	126,83	5,96	319,40	280,37	195,13	140,70	171,51	40,36	22,39	5,33	8,83	87,30	7,10	2,80	245,54
409,77	121,70	6,37	320,42	284,48	194,10	134,54	167,40	41,39	22,39	7,16	7,50	94,48	7,84	2,80	245,54
421,07	119,34	6,47	314,26	285,51	195,13	134,54	168,43	41,49	22,39	7,74	6,98	98,59	8,12	2,80	245,54
457,02	118,82	6,98	321,45	288,59	195,13	135,56	166,37	42,00	23,11	7,68	5,85	103,73	8,70	3,50	272,67
474,47	126,83	7,81	306,05	282,43	195,13	143,78	159,19	39,64	22,90	9,20	5,14	95,51	9,15	3,50	257,17
495,01	116,56	7,70	324,53	288,59	192,05	132,48	161,24	39,44	22,90	8,47	5,34	100,65	9,04	3,93	267,94
542,26	114,31	9,14	317,34	292,70	194,10	134,54	161,24	39,54	22,90	0,02	3,80	106,81	9,90	6,17	252,83
614,15	113,69	9,76	317,34	298,86	196,16	131,46	161,24	39,95	23,31	0,02	2,57	106,81	10,59	6,17	252,83
601,82	113,18	9,86	317,34	298,86	196,16	132,48	164,32	39,85	23,21	0,02	2,46	108,86	10,61	6,31	252,83

Tabela B.5 - Recolha de todas as medições de caudais, pressões, temperaturas, teor de gases e condutividades para um primeiro ensaio para diferentes caudais de fuelóleo n.º4 na caldeira 3

m_{fuel} (kg/h)	T_{fuel} (°C)	m_{vap} (ton/h)	T_{vap} (°C)	$T_{gc e}$ (°C)	$T_{gc s}$ (°C)	$T_{ag e}$ (°C)	$T_{ag s}$ (°C)	T_a (°C)	P_{vap} (barg)	$m_{água}$ (ton/h)	O_2 (%)	CO (ppm)	CO_2 (%)	STD_f (mg/L)	STD_c (mg/L)
390,26	129,50	6,16	353,29	250,59	166,37	143,78	143,78	29,27	18,79	18,38	13,25	63,67	4,63	7,99	106,08
542,26	113,69	8,63	401,56	258,80	170,48	139,67	135,56	29,17	23,42	15,41	9,76	50,32	6,58	9,25	107,06
688,09	116,98	10,48	387,18	262,91	171,51	143,78	143,78	29,58	22,29	14,48	8,01	56,49	7,55	10,23	106,08
832,38	115,85	10,99	383,07	270,10	175,62	144,81	143,78	29,78	22,49	17,36	5,85	69,84	8,70	10,65	108,03
944,84	125,81	15,51	381,02	277,29	179,73	145,83	144,81	30,71	21,57	18,49	5,24	76,00	9,10	9,25	102,19
1120,46	115,85	17,56	375,88	284,48	181,78	142,75	145,83	31,53	19,41	26,50	4,52	87,30	9,50	11,36	106,08
1257,05	118,72	19,00	393,34	295,78	186,91	139,67	143,78	31,73	18,59	22,39	3,39	90,38	10,13	11,36	105,11
1345,37	126,22	19,41	395,40	299,88	187,94	139,67	143,78	32,04	19,10	26,19	2,67	97,57	10,53	12,34	105,11
1494,29	127,86	21,67	401,56	313,24	194,10	139,67	143,78	32,35	20,54	25,37	2,57	99,62	10,59	13,60	106,08
1590,10	127,66	22,49	399,50	319,40	197,18	139,67	144,81	32,56	21,26	28,45	2,46	104,75	10,64	14,86	106,08
1664,77	125,81	23,72	402,58	324,53	199,24	139,67	145,83	32,86	21,98	28,65	2,88	109,89	10,41	16,26	107,06
1811,11	125,09	22,39	413,88	340,96	208,48	140,70	146,86	33,79	22,39	27,73	2,67	107,84	10,57	17,52	107,06

Tabela B.6 - Recolha de todas as medições de caudais, pressões, temperaturas, teor de gases e condutividades para um segundo ensaio para diferentes caudais de fuelóleo n^o4 na caldeira 3

m_{fuel} (kg/h)	T_{fuel} (°C)	m_{vap} (ton/h)	T_{vap} (°C)	$T_{gc\ e}$ (°C)	$T_{gc\ s}$ (°C)	$T_{ag\ e}$ (°C)	$T_{ag\ s}$ (°C)	T_a (°C)	P_{vap} (barg)	$m_{água}$ (ton/h)	O_2 (%)	CO (ppm)	CO_2 (%)	STD_f (mg/L)	STD_c (mg/L)
370,54	127,66	5,55	390,26	264,97	170,48	140,70	142,75	29,68	20,13	14,79	13,35	60,59	4,58	2,66	121,66
508,37	141,42	7,39	379,99	256,75	167,40	142,75	141,73	30,50	19,51	10,68	12,43	52,38	5,09	2,66	122,63
618,25	135,77	8,83	376,91	258,80	171,51	145,83	144,81	30,71	19,10	15,10	11,50	51,35	5,61	2,66	123,60
807,43	123,96	10,99	376,91	271,13	178,70	145,83	146,86	31,43	18,79	15,41	8,93	66,76	7,03	6,17	123,60
966,20	117,59	12,32	387,18	280,37	183,83	146,86	146,86	31,63	19,62	15,51	7,39	81,13	7,90	3,08	124,58
1130,93	116,05	10,48	414,91	293,72	188,97	148,92	150,97	31,84	24,13	16,12	5,34	97,57	9,04	3,08	126,52
1282,52	121,80	18,49	381,02	298,86	181,78	140,70	144,81	32,04	21,05	20,75	5,34	89,35	9,04	6,17	106,08
1555,39	122,73	19,10	417,99	322,48	197,18	142,75	148,92	32,56	24,34	22,29	2,26	104,75	10,75	5,75	103,16

Tabela B.7 - Recolha de todas as medições de caudais, pressões, temperaturas, teor de gases e condutividades para um ensaio com queima mista na razão 90/10 de fuelóleo n°4/gás natural na caldeira 3

m _{fuel} (kg/h)	m _{GN} (kg/h)	T _{fuel} (°C)	m _{vap} (ton/h)	T _{vap} (°C)	T _{gc e} (°C)	T _{gc s} (°C)	T _{ag e} (°C)	T _{ag s} (°C)	T _a (°C)	P _{vap} (barg)	m _{água} (ton/h)	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	STD _f (mg/L)	STD _c (mg/L)
375,57	41,73	134,95	8,73	398,48	275,24	171,51	143,78	144,81	28,24	24,13	15,92	7,19	43,13	8,01	10,94	117,76
429,90	47,77	127,14	13,04	395,40	283,45	176,64	144,81	144,81	28,55	23,00	30,40	5,03	48,27	9,21	10,94	123,60
582,72	64,75	124,88	13,76	392,31	283,45	175,62	143,78	144,81	28,65	22,90	23,11	5,65	50,32	8,87	10,94	118,74
696,20	77,36	132,59	15,61	388,21	281,40	173,56	143,78	144,81	28,45	22,29	21,16	4,21	54,43	9,67	10,94	119,71
765,42	85,05	132,79	16,53	387,18	284,48	174,59	143,78	146,86	28,55	22,29	19,82	2,46	57,51	10,64	10,94	119,71
843,68	93,74	124,47	16,43	388,21	296,80	180,75	143,78	144,81	29,17	22,70	22,80	3,39	64,70	10,13	10,94	117,76
933,85	103,76	125,60	18,49	398,48	325,56	201,29	147,89	148,92	30,30	23,42	26,80	3,90	69,84	9,84	7,43	118,74
1030,70	114,52	130,53	19,41	392,31	323,51	201,29	148,92	148,92	29,68	22,80	26,19	3,70	70,86	9,39	6,59	119,71
1175,40	130,60	132,79	22,59	401,56	338,91	208,48	147,89	148,92	32,56	23,11	32,04	3,49	81,13	10,07	9,67	119,71
1264,44	140,49	119,03	23,31	393,34	325,56	196,16	144,81	145,83	32,04	22,39	28,14	3,80	85,24	9,90	9,25	119,71
1409,87	156,65	118,11	26,19	399,50	350,21	213,62	146,86	148,92	31,73	23,00	29,06	3,70	87,30	9,95	7,01	120,68
1500,86	166,76	118,82	26,80	396,42	346,10	208,48	145,83	145,83	33,17	22,49	31,94	4,52	93,46	9,50	9,25	120,68

Tabela B.8 - Recolha de todas as medições de caudais, pressões, temperaturas, teor de gases e condutividades para um ensaio com queima mista na razão 80/20 de fuelóleo n°4/gás natural na caldeira 3

m_{fuel} (kg/h)	m_{GN} (kg/h)	T_{fuel} (°C)	m_{vap} (ton/h)	T_{vap} (°C)	$T_{gc\ e}$ (°C)	$T_{gc\ s}$ (°C)	$T_{ag\ e}$ (°C)	$T_{ag\ s}$ (°C)	T_a (°C)	P_{vap} (barg)	$m_{água}$ (ton/h)	O_2 (%)	CO (ppm)	CO_2 (%)	STD_f (mg/L)	STD_c (mg/L)
386,15	96,54	141,83	12,73	400,53	292,70	182,81	144,81	146,86	27,83	23,62	17,97	6,16	47,24	8,59	1,82	120,68
576,15	144,04	135,26	14,69	388,21	282,43	174,59	142,75	143,78	27,52	22,49	19,31	4,62	56,49	9,44	1,82	120,68
688,09	172,02	134,13	16,23	394,37	291,67	179,73	142,75	143,78	27,22	22,90	21,36	2,88	56,49	10,35	2,24	121,66
805,68	201,42	147,17	17,05	378,96	287,56	178,70	144,81	146,86	27,32	22,18	20,64	2,67	66,76	10,53	1,96	121,66
877,78	219,44	149,22	20,03	388,21	296,80	182,81	142,75	143,78	27,63	22,18	25,26	2,16	100,65	10,81	1,82	121,66
1021,76	255,44	139,77	21,46	378,96	296,80	180,75	142,75	143,78	27,32	21,98	21,88	2,26	76,00	10,75	2,24	121,66
1124,15	281,04	117,59	22,39	389,23	312,21	190,00	142,75	143,78	27,32	22,18	28,76	2,88	77,03	10,41	2,24	122,63
1269,47	317,37	124,37	24,65	387,18	321,45	193,08	142,75	144,81	28,76	22,18	26,70	1,54	119,13	11,15	1,82	122,63
1365,70	341,43	127,86	25,47	395,40	343,02	207,45	143,78	144,81	30,50	22,90	30,81	2,77	83,19	10,48	2,24	122,63
1461,11	365,28	115,74	27,11	391,29	335,83	202,32	142,75	144,81	29,89	22,39	32,45	2,77	90,38	10,48	2,24	122,63
1567,51	391,88	104,34	28,65	391,29	338,91	204,37	141,73	142,75	29,99	22,49	34,61	1,13	99,62	11,39	1,82	123,60

Tabela B.9 - Recolha de todas as medições de caudais, pressões, temperaturas, teor de gases e condutividades para um ensaio com queima mista na razão 70/30 de fuelóleo n°4/gás natural na caldeira 3

m _{fuel} (kg/h)	m _{GN} (kg/h)	T _{fuel} (°C)	m _{vap} (ton/h)	T _{vap} (°C)	T _{gc e} (°C)	T _{gc s} (°C)	T _{ag e} (°C)	T _{ag s} (°C)	T _a (°C)	P _{vap} (barg)	m _{água} (ton/h)	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	STD _f (mg/L)	STD _c (mg/L)
369,62	158,41	131,66	10,58	400,53	273,18	172,54	146,86	146,86	27,52	23,62	17,66	7,29	40,05	7,95	1,40	148,91
487,11	208,76	128,89	14,58	385,13	273,18	173,56	147,89	147,89	27,73	22,29	19,20	6,06	47,24	9,12	1,40	118,74
590,63	253,13	128,07	14,07	389,23	279,34	175,62	146,86	146,86	27,63	22,49	19,82	4,93	55,46	9,27	1,40	145,01
696,41	298,46	123,34	15,30	388,21	285,51	177,67	146,86	146,86	28,65	22,29	18,90	4,01	63,67	9,79	1,40	130,41
776,10	332,62	126,73	17,46	384,10	286,53	178,70	147,89	147,89	28,65	22,18	21,77	4,21	68,81	9,67	1,40	119,71
854,87	366,37	120,98	16,53	399,50	316,32	193,08	146,86	146,86	30,30	23,31	25,16	6,06	61,62	8,64	1,40	109,98
977,29	418,84	109,99	20,03	399,50	319,40	196,16	147,89	148,92	30,19	22,90	28,24	4,21	73,94	9,67	2,24	122,63
1067,77	457,62	116,67	20,75	383,07	310,15	187,94	146,86	146,86	29,78	21,77	22,70	4,52	78,05	9,50	3,22	121,66

Anexo C Exemplo de cálculo do Rendimento de caldeiras/geradores de vapor

Primeiramente, foi realizado um exemplo de cálculo do método indireto pela norma ASME PTC 4-2013, depois o mesmo método pelo Manual de Auditorias Energéticas na Industria e, finalmente, um exemplo de cálculo do método direto. Todos estes exemplos de cálculo utilizaram um mesmo ensaio como base.

C.1 - Método indireto para o cálculo do rendimento pela norma ASME PTC 4-2013

De acordo com esta norma, o rendimento de uma caldeira é dado pela Equação C.1.

$$\eta = \frac{\text{output}}{\text{input}} * 100 \quad (C.1)$$

Em que:

η - Rendimento da caldeira (%)

A mesma pode ser traduzida na Equação C.2 e simplificada na Equação C.3.

$$\eta = \frac{Q_F + (Créditos - Perdas) * Q_F}{Q_F} * 100 \quad (C.2)$$

Em que:

Q_F - Calor do combustível (J/s)

$$\eta = 100 + Créditos - Perdas \quad (C.3)$$

Assim, como se pode observar nas equações anteriores, é necessário primeiramente efetuar a determinação de todos créditos e perdas associados ao gerador de calor.

Segundo a norma ASME PTC 4 – 2013, as Perdas associadas ao gerador de calor são:

1. Perdas por gases secos;

As perdas associadas aos gases secos podem ser determinadas através da Equação C.4.

$$P_{gs} = 100 * M_{gs} * H_{gcs} \quad (C.4)$$

Em que:

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

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

$H_{gc\ s}$ – Entalpia dos gases secos à temperatura de saída do economizador (J/kg).

O cálculo de M_{gs} é feito como se observa na Equação C.5.

$$M_{gs} = M_{gc} - M_{hum\ gc} \quad (C.5)$$

Em que:

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

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

Do mesmo modo, o cálculo de M_{gc} é dado pela Equação C.6.

$$\begin{aligned} M_{gc} &= M_{as} + M_{hum\ a} + M_{gh} + M_{CO_2\ s} + M_{H_2O\ s} + M_{H_2O\ ad} \\ &= M_{as} + M_{hum\ a} + M_{gh} \quad (C.6) \end{aligned}$$

Em que:

M_{as} – Fração mássica do ar seco a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

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

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

$H_{CO_2\ s}$ – Fração mássica de CO_2 no “sorbent” a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

$M_{H_2O\ s}$ – Fração mássica de H_2O no “sorbent” a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

$M_{H_2O\ ad}$ – Fração mássica de humidade adicional a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J).

Note-se que na determinação do rendimento segundo a norma ASME PTC4 – 2013 o termo “sorbent” é recorrente. Tal corresponde a um composto químico que tem como função a captura de espécies poluentes. No entanto, no presente estudo não foi usado e, assim, todos os valores associados ao mesmo, serão nulos. Da mesma forma, não foi considerada qualquer humidade adicional e, por isso, qualquer valor associado também será nulo.

Para o cálculo de M_{as} utilizou-se a Equação C.7.

$$M_{as} = M_{at\ f} * \left(1 + \frac{XpA}{100}\right) \quad (C.7)$$

Em que:

$M_{at\ f}$ – Fração mássica de ar teórico a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

XpA – Excesso de ar (%).

O excesso do ar é determinado pela equação C.8.

$$XpA = \frac{\%O_{2\ f}}{21 - \%O_{2\ f}} * 100 \quad (C.8)$$

Em que:

XpA – Excesso de ar (%);

$\%O_{2\ f}$ – Percentagem de O_2 no combustível (%)

A determinação de $M_{at\ f}$ é feita a partir da Equação C.9

$$M_{at\ f} = \frac{F_{mat}}{PCS} \quad (C.9)$$

Em que:

F_{mat} – Fração mássica de ar teórico (kg/kg);

PCS – Poder calorífico superior (J/kg)

A determinação de F_{mat} é dada pela equação C.10

$$F_{mat} = 0,1151 * \%C_q + 0,3429 * H_{2f} + 0,0431 * \%S_f - 0,0432 * \%O_{2f} \quad (C.10)$$

Em que:

F_{mat} – Fração mássica de ar teórico (kg/kg);

$\%C_q$ – Percentagem de Carbono queimado (%);

$\%H_{2f}$ – Percentagem de H2 presente no combustível (%);

$\%S_f$ – Percentagem de Enxofre no combustível (%);

$\%O_{2f}$ – Percentagem de O2 no combustível (%).

A determinação de $M_{hum a}$ é feita através da Equação C.11.

$$M_{hum a} = F_{mhum as} * M_{as} \quad (C.11)$$

$F_{mhum as}$ – Fração mássica da humidade no ar seco (kg/kg ar seco)

Por sua vez, $F_{mhum as}$ é calculada a partir da Equação C.12.

$$F_{mhum as} = 0,622 * \left(\frac{P_{p_{H_2O a}}}{P_a - P_{p_{H_2O a}}} \right) \quad (C.12)$$

$P_{p_{H_2O a}}$ – Pressão parcial do vapor de água no ar (psia);

P_a – Pressão barométrica do ar (psia)

A $P_{p_{H_2O a}}$ é determinada através da Equação C.13.

$$P_{p_{H_2O a}} = 0,01 * H_{rel} * P_{S_{H_2O}} \quad (C.13)$$

Em que:

P_{SH_2O} – Pressão de saturação de vapor de água (psia);

H_{rel} – Humidade relativa no ar (%).

A P_{SH_2O} é dada pela Equação C.14.

$$P_{SH_2O} = 0,019257 + 1,289 * 10^{-3} * T + 1,21122 * 10^{-5} * T^2 + 4,534 * 10^{-7} * T^3 + 6,84188 * 10^{-11} * T^4 + 2,197092 * 10^{-11} * T^5 \quad (C.14)$$

M_{gh} é calculado através da Equação C.15

$$M_{gh} = \frac{100 - \%cinzas_f - \%C_{inq} - F_{ms} * \%S_f}{100 * PCS} \quad (C.15)$$

Em que:

$\%cinzas_f$ – Percentagem de cinzas no combustível (%);

$\%C_{inq}$ – Percentagem de carbono inqueimado (%);

F_{ms} – Fração mássica de captação de enxofre (kg/kg);

$\%S_f$ – Percentagem de enxofre no combustível (%)

Para o cálculo da $M_{hum_{gc}}$ é utilizada a Equação C.16

$$\begin{aligned} M_{hum_{gc}} &= M_{hum_f} + M_{H_2O_{vf}} + M_{hum_{H_2}} + M_{H_2O_s} + M_{hum_a} + M_{H_2O_{ad}} \\ &= M_{hum_f} + M_{H_2O_{vf}} + M_{hum_{H_2}} + M_{hum_a} \quad (C.16) \end{aligned}$$

Em que:

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

M_{hum_f} – Fração mássica de humidade no combustível a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

$M_{H_2O_{v f}}$ – Fração mássica de água no combustível gasoso a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

$M_{hum H_2}$ – Fração mássica de água utilizada na queima de H_2 do combustível a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

$M_{H_2O s}$ – Fração mássica de água no “sorbent” a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

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

$M_{H_2O ad}$ – Fração mássica de água presente na humidade adicional (kg/J);

A Equação C.17 mostra como é determinado a $M_{hum f}$

$$M_{hum f} = \frac{\%H_2O_f}{100 * PCS} \quad (C. 17)$$

Em que:

$M_{hum f}$ – Fração mássica da água presente no combustível a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

$\%H_2O_f$ – Percentagem de água presente no combustível (%);

$M_{H_2O_{v f}}$ calcula-se da mesma maneira que $M_{hum f}$ substituindo para a percentagem de água no combustível gasoso e o respetivo PCS.

Para a determinação de $M_{hum H_2}$ utilizou-se a Equação C.18.

$$M_{hum H_2} = 8,937 * \frac{\%H_2_f}{100 * PCS} \quad (C. 18)$$

Em que:

$M_{hum H_2}$ – Fração mássica de humidade proveniente da queima de H_2 a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

$\%H_2_f$ – Percentagem de H_2 presente no combustível (%);

Para a determinação de $H_{gc\ s}$ utilizou-se a Equação C.19.

$$H_{gc\ s} = (C0 + C1 * T + C2 * T^2 + C3 * T^3 + C4 * T^4 + C5 * T^5) * 2326 \quad (C.19)$$

Em que:

$H_{gc\ s}$ – Entalpia dos gases de combustão à saída do economizador (J/kg);

C0 a C5 – Corresponde a constantes as quais dependem da temperatura.

2. Perdas por formação de água através da queima de H_2 presente no combustível;

As perdas relativas à queima do H_2 presente no combustível são determinadas através da Equação C.20.

$$P_{H_2} = 100 * M_{hum\ H_2} * (H_{v\ s} - H_{agua\ ref}) \quad (C.20)$$

Em que:

P_{H_2} – Perdas relativa à queima de H_2 no combustível (%);

$M_{hum\ H_2}$ – Fração mássica de humidade proveniente da queima de H_2 a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

$H_{v\ s}$ – Entalpia do vapor à temperatura de saída dos gases do economizador (J/kg);

$H_{agua\ ref}$ – Entalpia da água à temperatura de referência, 25°C (J/kg).

A entalpia de vapor à temperatura de saída dos gases do economizador é dada pela Equação C.21.

$$H_{v\ s} = (0,4329 * T + (3,958 * 10^{-5}) * T^2 + 1062,2) * 2326 \quad (C.21)$$

Em que:

$H_{v\ s}$ – Entalpia do vapor à temperatura de saída dos gases do economizador (J/kg).

3. Perdas pela queima de água de um combustível líquido;

As perdas associadas à queima de água presente num combustível líquido são determinadas pela Equação C.22.

$$P_{H_2O f} = 100 * M_{hum f} * (H_{v s} - H_{agua ref}) \quad (C.22)$$

$P_{H_2O f}$ – Perdas associadas à queima de água presente no combustível líquido (%);

$M_{hum f}$ – Fração mássica de água presente no combustível a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

$H_{v s}$ – Entalpia do vapor à temperatura de saída dos gases do economizador (J/kg).

$H_{agua ref}$ – Entalpia da água à temperatura de referência, 25°C (J/kg).

4. Perdas associadas à humidade presente no ar;

As perdas relativas à humidade presente no ar estão representadas na Equação C.23.

$$P_{hum a} = 100 * F_{mH_2O a} * M_{as} * H_{v c} \quad (C.23)$$

Em que:

$P_{hum a}$ – Perdas relativas à humidade presente no ar (%);

$F_{mH_2O a}$ – Fração mássica de água presente no ar, por massa de ar seco (massa/massa de ar seco);

M_{as} – Fração mássica de ar seco a dividir pelo poder calorífico superior de combustível (kg/J);

$H_{v c}$ – Entalpia corrigida de vapor à temperatura de saída dos gases de combustão do economizador (J/kg).

A fração mássica de água presente no ar é obtida pela Equação C.24.

$$F_{mH_2O\ a} = \frac{F_{mhum\ as}}{1 + F_{mhum\ as}} \quad (C.24)$$

Em que:

$F_{mH_2O\ a}$ – Fração mássica de água presente no ar, por massa de ar seco (massa/massa de ar seco);

$F_{mhum\ as}$ – Fração mássica de humidade no ar seco (massa/massa de ar seco)

A $H_{v\ c}$ é dada pela Equação C.25.

$$H_{v\ c} = (0,4408 * T + (2,381 * 10^{-5}) * T^2 + (9,638 * 10^{-9}) * T^3 - 34,1) * 2326 \quad (C.25)$$

Em que:

$H_{v\ c}$ – Entalpia corrigida de vapor à temperatura de saída dos gases de combustão do economizador (J/kg).

5. Perdas pelo somatório de inqueimados;

O somatório das perdas nos inqueimados é dado pela Equação C.26.

$$\sum P_{inq} = P_{CO} + P_{Cinq\ r} + P_{H_2inq\ r} \quad (C.26)$$

Para o cálculo das perdas relativas ao CO nos gases de combustão é utilizada a Equação C.27.

$$P_{CO} = \%CO_{gc} * n_{as} * MM_{CO} * \left(\frac{PCS_{Cr}}{PCS} \right) \quad (C.27)$$

Em que:

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

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

n_{as} – moles de ar seco por massa de combustível (mol/massa de combustível);

MM_{CO} – Massa molar do CO (28,09 kg/kmol);

PCS_{C_r} – Poder calorífico superior do carbono no resíduo (kJ/kg).

Para o cálculo de moles de ar seco por massa de combustível é dado pela Equação C.28.

$$n_{as} = n_p * n_{at} * \left(0,7905 + \frac{XpA}{100} \right) \quad (C.28)$$

Em que:

n_{as} – Moles de ar seco por massa de combustível (mol/massa de combustível);

n_p – Moles de produtos secos provenientes da queima do combustível (mol/massa de combustível);

n_{at} – Moles de ar teórico por massa de combustível (mol/massa do combustível);

XpA – Excesso de ar (%).

O n_p é dado pela expressão apresentada como Equação C.29.

$$\begin{aligned} n_p &= \left(\frac{\%C_q}{1201,1} \right) + (1 - F_{mS}) * \left(\frac{\%S_f}{3206,5} \right) + \left(\frac{\%N_{2f}}{2801,34} \right) + n_{CO_2s} \\ &= \left(\frac{\%C_q}{1201,1} \right) + (1 - F_{mS}) * \left(\frac{\%S_f}{3206,5} \right) + \left(\frac{\%N_{2f}}{2801,34} \right) \quad (C.29) \end{aligned}$$

Em que:

$\%C_q$ – Percentagem mássica de Carbono queimado (%);

F_{mS} – Fração mássica de captação de Enxofre (massa/massa de fuel);

$\%S_f$ – Percentagem mássica de Enxofre no combustível (%);

$\%N_{2f}$ – Percentagem mássica de Azoto no combustível (%);

n_{CO_2s} – Moles de CO₂ no “sorbent” (moles/massa de fuel).

F_{mS} , por sua vez, determina-se utilizando a Equação C.30.

$$F_{mS} = \frac{1 - \frac{\%SO_2_{gc} * (n_{pt} * n_{a\ tSO_2}) * (0,7905 * n_{hum})}{100 * \left[1 - (1 + n_{hum}) * \frac{\%O_2_{gc}}{20,95} \right] * n_{SO_2\ f}}}{1 + K * \left(\frac{\frac{\%SO_2_{gc}}{100}}{1 - (1 + n_{hum}) * \frac{\%O_2_{gc}}{20,95}} \right)} \quad (C.30)$$

Em que:

F_{mS} – Fração mássica de captação de enxofre (massa/massa de fuel);

$\%SO_2_{gc}$ – Percentagem de SO_2 nos gases de combustão (%);

n_{pt} – somatório de moles de produtos mais moles de água no combustível, na humidade adicional e no “sorbet” (moles/ massa de fuel);

$n_{a\ tSO_2}$ – Moles de ar teórico necessários para os gases do combustível se converterem em SO_2 (moles/ massa de fuel);

n_{hum} – moles de humidade por moles de ar seco (moles/ massa de fuel);

$n_{SO_2\ f}$ – número máximo de moles de SO_2 por massa do combustível (moles/ massa fuel).

K- Constante dependente de n_{hum} .

Para calcular $n_{a\ tSO_2}$ utilizou-se a Equação (C.31).

$$n_{a\ tSO_2} = \left(\frac{1}{0,2095} \right) * \left(\left(\frac{\%C_q}{1201,1} \right) + \frac{\%H_2\ f}{403,2} + \left(\frac{\%S_f}{3206,5} \right) + \left(\frac{\%O_2\ f}{3199,9} \right) \right) \quad (C.31)$$

O n_{hum} é dado pela Equação C.32.

$$n_{hum} = F_{mH_2O\ a} * 1,608 \quad (C.32)$$

Em que:

n_{hum} – moles de humidade por moles de ar seco (moles/moles de ar seco);

$F_{mH_2O a}$ – Fração mássica de humidade no ar por massa de ar seco (massa/massa ar seco).

A constante K é determinada utilizando a Equação C.33.

$$K = 2,387 * (0,7905 + n_{hum}) - 1 \quad (C.33)$$

Em que:

n_{hum} – moles de humidade por moles de ar seco (moles/moles de ar seco);

$n_{SO_2 f}$ determinou-se através da Equação C.34.

$$n_{SO_2 f} = \frac{\%S_f}{3206,5} \quad (C.34)$$

A Equação C.35 foi utilizada com o objetivo de determinar o número de moles de ar teórico por massa de combustível.

$$n_{a t} = \frac{F_{ma t}}{28,9625} \quad (C.35)$$

Em que:

$n_{a t}$ – Moles de ar teórico por massa de combustível (mol/massa do combustível);

$F_{ma t}$ – Fração mássica de ar teórico (kg/kg);

Para a determinação das perdas geradas pelo carbono inqueimado presente no resíduo, utilizou-se a Equação C.36.

$$P_{C r} = \%C_{inq} * \frac{PCS_{Cr}}{PCS} \quad (C.36)$$

Em que:

$P_{C r}$ – Perdas associadas ao carbono inqueimado presente no resíduo (%);

$\%C_{inq}$ – Percentagem de carbono inqueimado no resíduo (%);

PCS_{C_r} – Poder calorífico superior do carbono no resíduo (32,74 kJ/kg [20]);

PCS – Poder calorífico superior do combustível (kJ/kg).

A percentagem de carbono inqueimado no resíduo é dado pela Equação C.37.

$$\%C_{inq} = \%C_{inq_r} * F_{mr} \quad (C.37)$$

Em que:

$\%C_{inq}$ – Percentagem de carbono inqueimado (%);

$\%C_{inq_r}$ – Percentagem de carbono inqueimado no resíduo (%);

F_{mr} – Fração mássica de resíduo (kg/kg).

A determinação da fração mássica de resíduo fez-se utilizando a Equação C.38.

$$F_{mr} = \frac{\%cinzas_f + F_{ms}}{100 - \%C_{inq_r}} \quad (C.38)$$

Em que:

F_{mr} – Fração mássica de resíduos (kg/kg);

$\%cinzas_f$ – Percentagem de cinzas no combustível (%);

F_{ms} – Fração mássica de “Sorbent” (kg/kg);

$\%C_{inq_r}$ – Percentagem de carbono inqueimado no resíduo (%).

Relativamente às perdas associadas ao hidrogénio inqueimado presente no resíduo, estas consideraram-se zero dado à impossibilidade de fazer a sua medição e, também, por serem consideradas sempre muito baixas.

6. Perdas por convecção e radiação;

As perdas associadas à convecção e radiação são dadas pela Equação C.39.

$$P_{rad} = C1 * (H_{conv} + H_{rad}) * A * (T_{sup} - T_a) \quad (C.39)$$

Em que:

P_{rad} – Perdas associadas à convecção e à radiação (W);

$C1$ – Constante com valor igual a 0,293 W;

H_{conv} – Coeficiente de transferência de calor por convecção (Btu/ft²*h*°F);

H_{rad} – Coeficiente de transferência de calor por radiação (Btu/ft²*h*°F);

A – Área do gerador de vapor (ft²);

T_{sup} – Temperatura média da superfície (°F);

T_a – Temperatura média do ar ambiente (°F).

Note-se que esta perda vem em W pois $C1$ está em W. Assim sendo, H_{conv} e H_{rad} virão em unidades do sistema inglês e não nas unidades SI.

A determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção é dada pela Equação C.40.

$$H_{conv} = 0,2 * (T_{sup} - T_a)^{0,33} \quad (C.40)$$

Em que:

H_{conv} – coeficiente de transferência de calor por convecção (Btu/ft²*h*°F);

T_{sup} – Temperatura média de superfície (°F);

T_a – Temperatura média do ar ambiente (°F).

A determinação do coeficiente de transferência de calor por radiação é dada pela Equação C.41.

$$H_{rad} = 0,847 + 2,367 * 10^{-3} * T_{dif} + 2,94 * 10^{-6} * (T_{dif})^2 + 1,37 * 10^{-9} * (T_{dif})^3 \quad (C.41)$$

Em que:

H_{rad} – coeficiente de transferência de calor por radiação (Btu/ft²*h*°F);

T_{dif} – Diferença de temperaturas entre a temperatura média da superfície e a temperatura média do ar ambiente (°F)

7. Perdas nas Purgas;

Para a determinação das perdas nas purgas foi utilizada a Equação C.42.

$$P_p = \frac{(T_p - T_{ag e}) * p * (100 - P_{sp})}{(T_p - T_{ag e}) * p + (100 - p) * (660 - T_{ag e})} \quad (C.42)$$

Em que:

P_p – Perdas devido às purgas (%)

T_p – Temperatura das purgas (°C);

$T_{ag e}$ – Temperatura da água à entrada do economizador;

p – Percentagem de purgas comparativamente ao total de água alimentada à caldeira (%);

P_{sp} – Todas as perdas consideradas anteriormente (%).

Relativamente à temperatura das purgas, assumiu-se que seria igual à temperatura de saturação à pressão de vapor da caldeira.

O cálculo da percentagem de purgas teve por base a Equação C.43.

$$p = \frac{M_{rp}}{M_{rH2O}} * 100 \quad (C.43)$$

Em que:

p – Percentagem de purgas (%);

M_{rp} – Caudal mássico de purgas (ton/h);

M_{rH2O} – Caudal mássico de água de alimentação (ton/h).

O caudal mássico de purgas é dado pela Equação C.44.

$$M_{rp} = \frac{(M_{rH_2O} * TDS_f)}{TDS_c} \quad (C.44)$$

Em que:

M_{rp} – Caudal mássico de purgas (ton/h);

M_{rH_2O} – Caudal mássico de água de alimentação (ton/h);

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

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

8. Perdas pela saída de hidrocarbonetos nos gases de combustão;

As perdas associadas à saída de hidrocarbonetos nos gases de combustão são dadas pela Equação C.45.

$$P_{Hc} = \%Hc_{gc} * n_{as} * MM_{hc} * \frac{PCS_{hc}}{PCS} \quad (C.45)$$

Em que:

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

$\%Hc_{gc}$ – Percentagem de hidrocarbonetos nos gases de combustão medidos em base seca (% volume);

n_{as} – Moles de ar seco por kg de combustível (moles/kg combustível);

MM_{hc} – Massa molar dos hidrocarbonetos (massa/moles);

PCS_{hc} – Poder calorífico superior dos hidrocarbonetos (J/kg);

PCS – Poder calorífico superior do combustível (J/kg).

As seguintes perdas foram aproximadas a zero. A razão para tal apresenta-se em seguida:

- P_{res} – A perda associada ao calor sensível do resíduo aproximou-se a zero uma vez que a contabilização da fração mássica de resíduo gerado é difícil de se fazer e, também devido à percentagem de cinzas ter um valor muito baixo.
- P_{pv} – Esta perda é igual a zero uma vez que não existem rejeições no pulverizador;
- $P_{eq a}$ – Esta perda é zero uma vez que não existe nenhum equipamento de controlo de ar;
- P_{Nox} – Esta perda é igual a zero dado que não existe formação de Nox;
- $P_{hum ad}$ – Esta perda é igual a zero uma vez que não existe humidade adicional;
- $P_{calc s}$ – Esta perda é igual a zero dado que não é utilizado “sorbent”;
- $P_{ag s}$ – Esta perda é igual a zero dado que não é utilizado sorbent;
- $P_{c rec}$ – Esta perda é igual a zero uma vez que não existe recirculação de correntes;
- $P_{ag fria}$ – Esta perda é igual a zero pois nenhum equipamento exterior à caldeira, utilizada água fria, que possa remover calor da mesma;
- P_{PAQ} – Esta perda é igual a zero dado que não existe nenhum pré-aquecedor de ar.

Da mesma maneira, os créditos associados a um gerador de vapor pela mesma norma são:

1. Créditos pela entrada de energia associada ao ar seco;

Os créditos que estão associados ao ar seco são determinados utilizando a Equação C.46.

$$C_{as} = 100 * M_{as} * H_{a e} \quad (C.46)$$

Em que:

C_{as} – Créditos associados ao ar seco que entra na caldeira (%);

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

$H_{a e}$ – Entalpia do ar seco à temperatura ambiente (J/kg).

2. Créditos devidos à humidade do ar à entrada da caldeira;

Os créditos devido à humidade do ar à entrada da caldeira são dados pela Equação C.47.

$$C_{hum\ a} = 100 * F_{mH2O\ a} * M_{as} * H_{vap\ e} \quad (C.47)$$

Em que:

$C_{hum\ a}$ - Créditos associados à humidade do ar que entra na caldeira (%);

$F_{mH2O\ a}$ - Fração mássica da humidade no ar (massa/massa ar seco);

M_{as} - Fração mássica de ar seco correspondente ao excesso de ar utilizado a dividir pelo poder calorífico superior do combustível (kg/J);

$H_{vap\ e}$ - Entalpia do vapor à temperatura de entrada do ar na caldeira (J/kg).

3. Créditos associados ao calor sensível do combustível;

Os créditos devidos ao calor sensível no combustível são determinados através da Equação C.48.

$$C_{qf} = 100 * \frac{H_f}{PCS} \quad (C.48)$$

Em que:

C_{qf} - Créditos associados ao calor sensível do combustível (%);

H_f - Entalpia do combustível (J/kg);

PCS - Poder calorífico superior do combustível (J/kg).

Os seguintes créditos foram aproximados a zero. As razões por tal são apresentadas em seguida:

- C_{sulf} - Este crédito foi igualado a zero uma vez que não ocorre sulfonação;
- $C_{eq\ aux}$ - Este crédito é igual a zero dado que não existem equipamentos auxiliares que interfiram no balanço;
- C_{qs} - Este crédito é igual a zero uma vez que não é utilizado “sorbent”;
- $C_{hum\ ad}$ - Este crédito é igual a zero dado que não existem humidades adicionais a ser consideradas.

Relativamente à energia associada ao combustível, a mesma é determinada a partir da Equação C.49.

$$Q_f = M_{rf} * PCS \quad (C.49)$$

Em que:

Q_f – Energia associada ao combustível (J/s);

M_{rf} – Caudal mássico de combustível (kg/s);

PCS – Poder calorífico superior do combustível (J/kg).

A entalpia do combustível é determinada utilizando a Equação C.50.

$$H_f = 2326 * (C1 + C2 * API + C3 * T + C4 * API * T + (C5 + C6 * API) * T^2) \quad (C.50)$$

Em que:

H_f – Entalpia do combustível (J/kg)

C1 a C6 – Constantes

T – Temperatura do combustível (°C)

Onde API se calcula, por sua vez, a partir da Equação C.51.

$$API = \frac{141.5 - 131.5 * g_{esp}}{g_{esp}} \quad (C.51)$$

Em que:

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

A gravidade específica determina-se com a Equação C.52.

$$g_{esp} = \frac{\rho}{62,4} \quad (C.52)$$

Em que:

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

ρ – Densidade do combustível (kg/m³)

Para a determinação da entalpia do ar e do vapor de água, utilizou-se a Equação C.53.

$$H = cp * (T - 77) \quad (C.53)$$

Em que:

H – Entalpia do ar ou do vapor de água (J/kg)

cp – calor específico (Btu/lmb*°F)

T – Temperatura de entrada do ar no sistema (°F).

C.1.1 Exemplo de cálculo dos rendimentos de caldeiras pelo método indireto segundo a norma ASME PTC 4-2013

Para o exemplo de cálculo utilizou-se um teste com um caudal de 525,21 kg/h de fuelóleo nº4, na caldeira 1.

1. Perdas por gases secos;

De acordo com a Equação C.10, calculou-se F_{mat} .

$$\begin{aligned} F_{mat} &= 0,1151 * 87,6 + 0,3429 * 11,5 + 0,0431 * 0,23 - 0,0432 * 0 \\ &= 14,03 \frac{kg \text{ de ar}}{kg \text{ de combustível queimado}} \end{aligned}$$

Através da Equação C.9, determinou-se M_{atf} .

$$M_{atf} = \frac{14,03}{42704811,3} = 3,28 * 10^{-7} \frac{kg \text{ de ar}}{J \text{ de combustível}}$$

Com a Equação C.8, determinou-se XpA .

$$XpA = \frac{14,38}{21 - 14,38} * 100 = 217,13\%$$

M_{as} é calculado a partir da Equação C.7.

$$M_{as} = 3,28 * 10^{-7} * \left(1 + \frac{217,13}{100}\right) = 1,0 * 10^{-6} \frac{kg \text{ de ar}}{J \text{ de combustível}}$$

Determinou-se P_{SH2O} utilizando a Equação C.14.

$$\begin{aligned} P_{SH2O} &= 0,019257 + 1,289 * 10^{-3} * 95 + 1,21122 * 10^{-5} * 95^2 + 4,534 * 10^{-7} \\ &* 95^3 + 6,84188 * 10^{-11} * 95^4 + 2,197092 * 10^{-11} * 95^5 = 1,17 \text{ psia} \end{aligned}$$

Com a Equação C.13, determinou-se Pp_{H2Oa} .

$$Pp_{H2Oa} = 0,01 * 55 * 1,17 = 0,64 \text{ psia}$$

$Fm_{hum as}$ foi calculado a partir da Equação C.12.

$$Fm_{hum as} = 0,622 * \left(\frac{0,64}{14,696 - 0,64}\right) = 0,028 \frac{kg \text{ de água}}{kg \text{ ar}}$$

Com a Equação C.11, determinou-se $M_{hum a}$.

$$M_{hum a} = 0,028 * 1,0 * 10^{-6} = 2,96 * 10^{-8} \frac{kg \text{ de ar}}{J \text{ de combustível}}$$

Para a determinação de M_{gh} utilizou-se a Equação C.15.

$$M_{gh} = \frac{100 - 0,091 - 0,00196 - 0 * 0,23}{100 * 42705811,3} = 2,34 * 10^{-8} \frac{kg \text{ gases húmidos}}{J \text{ de combustível}}$$

$M_{hum f}$ foi determinado pela Equação C.17.

$$M_{hum f} = \frac{0,47}{100 * 42704811,3} = 1,10 * 10^{-10} \frac{kg \text{ água}}{J \text{ de combustível}}$$

Através da Equação C.18, foi determinado $M_{hum H2}$.

$$M_{hum H2} = 8,937 * \frac{11,5}{100 * 42704811,3} = 2,41 * 10^{-8} \frac{kg H_2}{J \text{ de combustível}}$$

$M_{hum gc}$ é então calculado pela Equação C.16.

$$\begin{aligned} M_{hum gc} &= 1,10 * 10^{-10} + 2,41 * 10^{-8} + 2,96 * 10^{-8} \\ &= 5,38 * 10^{-8} \frac{kg \text{ humidade}}{J \text{ de combustível}} \end{aligned}$$

A partir da Equação C.6, determinou-se M_{gc} .

$$\begin{aligned} M_{gc} &= 1,0 * 10^{-6} + 2,96 * 10^{-8} + 2,34 * 10^{-8} \\ &= 1,095 * 10^{-6} \frac{kg \text{ gases de combustão}}{J \text{ de combustível}} \end{aligned}$$

Pela Equação C.5, determinou-se M_{gs} .

$$M_{gs} = 1,095 * 10^{-6} - 5,38 * 10^{-8} \frac{kg \text{ gases secos de combustão}}{J \text{ de combustível}}$$

$H_{gc s}$ foi determinada pela Equação C.19.

$$\begin{aligned} H_{gc s} &= (-0,1231899 * 10^3 + 0,4065568 * 174,59 + 0,5795050 * 10^{-5} * 174,59^2 \\ &\quad + 0,6331121 * 10^{-7} * 174,59^3 - 0,2924434 * 10^{-10} * 174,59^4 \\ &\quad + 0,2491009 * 10^{-14} * 174,59^5) * 2326 \\ &= 211614 \frac{J}{kg \text{ de combustível}} \end{aligned}$$

Finalmente, P_{gs} foi determinada pela Equação C.4.

$$P_{gs} = 100 * 5,38 * 10^{-8} * 211614 = 22,03\%$$

2. Perdas por formação de água através da queima de H_2 presente no combustível;

H_{vs} foi determinado pela Equação C.21.

$$\begin{aligned} H_{vs} &= (0,4329 * 174,59 + 3,958 * 10^{-5} * 174,59^2 + 1062,2) * 2326 \\ &= 2649283 \frac{J}{kg \text{ de vapor}} \end{aligned}$$

O cálculo desta perda foi realizado através da Equação C.20.

$$P_{H_2} = 100 * 2,41 * 10^{-8} * (2649283 - 45,06 * 2326) = 6,12\%$$

3. Perdas pela queima de água de um combustível líquido;

O cálculo de $P_{H_2O f}$ foi realizado através da Equação C.22.

$$P_{H_2O f} = 100 * 1,10 * 10^{-10} * (2649283 - 45,06 * 2326) = 0,028\%$$

4. Perdas associadas à humidade presente no ar;

H_{vc} foi determinado segundo a Equação C.25.

$$\begin{aligned} H_{vc} &= (0,4408 * 174,59 + 2,381 * 10^{-5} * 174,59^2 + 9,638 * 10^{-9} * 174,59^3 \\ &\quad - 34,1) * 2326 = 101498 \frac{J}{kg \text{ de vapor}} \end{aligned}$$

Através da Equação C.24, foi calculado o $F_{m_{H_2O a}}$.

$$F_{m_{H_2O a}} = \frac{0,028}{1 + 0,028} = 0,028 \frac{kg \text{ de água}}{kg \text{ de ar}}$$

Finalmente, a $P_{hum a}$ é dada pela Equação C.23.

$$P_{hum a} = 100 * 0,028 * 1,0 * 10^{-6} * 101498 = 0,29\%$$

5. Perdas pelo somatório de inqueimados;

A determinação da F_{mr} foi feita através da Equação C.38.

$$Fm_r = \frac{0,091 + 100 * 0}{100 - 2,10} = 0,00093 \frac{kg \text{ de resíduo}}{kg \text{ de combustível}}$$

A percentagem de Carbono que não foi queimado foi determinada pela Equação C.37.

$$\%C_{inq} = 2,10 * 0,00093 = 0,00196\%$$

Então, a P_{cinqr} foi determinada através da Equação C.36.

$$P_{Cinq r} = 0,00196 * \frac{32736,6}{42705811,3} = 1,50 * 10^{-6}$$

Pela Equação C.35 determinou-se o número de moles teórico de ar.

$$n_{at} = \frac{14,03}{28,9635} = 0,48 \frac{mol \text{ de ar}}{kg \text{ de combustível}}$$

O n_{hum} foi obtido pela Equação C.32.

$$n_{hum} = 0,028 * 1,608 = 0,045 \frac{mol \text{ de água}}{kg \text{ de combustível}}$$

O número de moles de produtos foi determinado pela Equação C.29.

$$n_p = \frac{87,6}{1201,1} + (1 - 0) * \frac{0,23}{3206,5} + \frac{0}{2801,43} + 0 = 0,073 \frac{mol \text{ de produtos}}{kg \text{ de combustível}}$$

O n_{as} foi determinado recorrendo à Equação C.28.

$$n_{as} = 0,073 + 0,48 * \left(0,7905 + \frac{217,13}{100}\right) = 1,51 \frac{mol \text{ de ar seco}}{kg \text{ de combustível}}$$

Para as P_{CO} foi utilizada a Equação C.27.

$$P_{CO} = 0,057 * 1,51 * 28,01 * \frac{32736,6}{42705811,3} = 0,0018\%$$

Finalmente, o Somatório das perdas associadas aos não queimados foi determinado pela Equação C.26.

$$\sum P_{inq} = 0,0018 + 1,50 * 10^{-6} + 0 = 0,0018\%$$

6. Perdas por convecção e radiação;

Pela Equação C.41 foi determinado o H_{rad} .

$$H_{rad} = 0,847 + (2,367 * 10^{-3}) * (149 - (30,19 * 1,8 + 32)) + (2,94 * 10^{-6}) * (149 - (30,19 * 1,8 + 32))^2 + (1,37 * 10^{-9}) * (149 - (30,19 * 1,8 + 32))^3 = 1,01 \frac{Btu}{ft^2 \cdot h \cdot ^\circ F}$$

A Equação C.40 foi utilizada para determinar H_{conv} .

$$H_{conv} = 0,2 * (149 - (30,19 * 1,8 + 32))^{0,33} = 0,78 \frac{Btu}{ft^2 \cdot h \cdot ^\circ F}$$

A equação C.39 foi então utilizada para determinar P_{rad} .

$$P_{rad} = 0,293 * (0,78 + 1,01) * 275,38 * (149 - (30,19 * 1,8 + 32)) = 9051,89 W$$

Para ser possível contabilizar esta perda em percentagem, utilizou-se a seguinte Equação.

$$P_{rad} = \frac{9051,89 * 100}{\frac{525,21}{3600} * 42705811,3} = 0,15\%$$

7. Perdas nas Purgas;

O caudal de purgas foi determinado pela Equação C.44.

$$M_{rp} = 13,66 * \frac{24,95}{257,34} = 1,32 \frac{ton}{h}$$

A percentagem de purgas foi obtida a partir da Equação C.43.

$$p = \frac{1,32}{13,66} * 100 = 9,66\%$$

As perdas das purgas foram então determinadas utilizando a Equação C.42.

$$P_p = \frac{(216 - 139,67) * 9,66 * (100 - 20,31 - 6,11 - 0,028 - 0,26 - 0,0017 - 0,15)}{(216 - 139,67) * 9,66 + (100 - 9,66) * (660 - 139,67)} = 1,11\%$$

8. Perdas pela saída de hidrocarbonetos nos gases de combustão;

Uma vez que nestes ensaios, não se verificou a existência de hidrocarbonetos, então a Equação C.45 resulta em:

$$P_{Hc} = 0$$

1. Créditos pela entrada de energia associada ao ar seco;

Para a determinação da entalpia do ar, foi utilizada a Equação C.53.

$$H_{ae} = 0,2405 * (87,35 - 77) * 2326 = 5229,77 \frac{kJ}{kg \text{ de ar}}$$

Então, para calcular este crédito utilizou-se a Equação C.46.

$$C_{as} = 100 * 1,0 * 10^{-6} * 5229,77 = 0,54\%$$

2. Créditos devidos à humidade do ar à entrada da caldeira;

Da mesma forma, para calcular a entalpia de vapor à temperatura de entrada do ar da caldeira, utilizou-se a Equação C.53.

$$H_{ve} = 0,446 * (87,35 - 77) * 2326 = 9698,45 \frac{kJ}{kg \text{ de vapor}}$$

Então, para determinar este crédito, utilizou-se a Equação C.47.

$$C_{hum a} = 100 * 0,028 * 1,0 * 10^{-6} * 9698,45 = 0,028\%$$

3. Créditos associados ao calor sensível do combustível;

Para a gravidade específica do fuelóleo nº4, utilizou-se a Equação C.52.

$$Sg = \frac{60,56}{62,4} = 0,97 \frac{lbm}{lbm}$$

O grau API foi determinado com recurso à Equação C.51.

$$API = \frac{(141,5 - 131,5 * 0,97)}{0,97} = 14,29 \text{ } ^\circ API$$

A entalpia do combustível foi então determinada com a Equação C.50.

$$\begin{aligned} H_f = & (-30,016 - 0,11426 * 14,29 + 0,373 * (137,52 * 1,8 + 32) + 0,143 * 10^{-2} \\ & * 14,29 * (137,52 * 1,8 + 32) + (0,2184 * 10^{-3} + 7,0 * 10^{-7} * 14,29) \\ & * (137,52 * 1,8 + 32)^2 = 223697 \frac{kJ}{kg \text{ de combustível}} \end{aligned}$$

Finalmente, este crédito é determinado pela Equação C.50.

$$C_{qf} = 100 * \frac{223697}{42705811,3} = 0,52\%$$

Para o cálculo final do rendimento, utilizou-se a Equação C.3.

$$\eta = 100 - 22,03 - 6,12 - 0,028 - 0,29 - 0,0018 - 0,15 - 1,11 + 0,54 + 0,028 + 0,52 = 71,37\%$$

C.2 - Método Indireto para o cálculo do rendimento, proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria (2019) -

Segundo este manual, o rendimento de uma caldeira é dado pela Equação C.54.

$$\eta = 100 - \text{Perdas} \quad (C.54)$$

Em que:

η – Rendimento de uma caldeira (%);

Perdas – Perdas de calor numa caldeira (%).

Como se pode observar, o rendimento segundo este manual, não envolve os créditos, sendo apenas consideradas as perdas durante o processo da queima. As perdas que este manual assume como relevantes para a determinação do rendimento da caldeira são:

1. Perdas associadas ao combustível nas cinzas volantes;

Uma vez que esta perda apenas é considerada para combustíveis sólidos, e os combustíveis em uso são líquido ou gasoso, esta perda é desprezada e considerada nula.

2. Perdas associadas ao combustível nas cinzas de fundo;

Pela mesma razão que a anterior, esta perda também é desprezada e considerada nula.

3. Perdas associadas ao calor sensível nos gases secos de combustão;

As perdas associadas ao calor sensível nos gases de combustão são obtidas através da Equação C.55.

$$P_{gc} = \frac{K_2 * (T_{gcs} - T_{ae})}{\%CO_{2gc}} \quad (C.55)$$

Em que:

P_{gc} – Perdas associadas ao calor sensível nos gases secos de combustão (%);

K_2 – Constante dependente do combustível utilizado;

T_{gcs} – Temperatura dos gases de combustão à saída do economizador (°C);

T_{ae} – Temperatura do ar à entrada da caldeia (°C);

$\%CO_2_{gc}$ – Percentagem de CO2 nos gases de combustão (%).

A constante K_2 depende do tipo de combustível que é utilizado nas caldeiras. Na Tabela C.1 estão apresentados os valores desta constante para diferentes tipos de combustíveis.

Tabela C.1 - Valores de K_2 para diferentes combustíveis

Combustível	Valor de K_2
Carvão	0,65
Gasóleo	0,51
Fuelóleo	0,54
Propano	0,45
Gás natural	0,39

Note-se que estes valores são baseados no PCI do combustível em questão e, portanto, é possível calcular esta constante para qualquer combustível utilizando a Equação C.56.

$$K_2 = \frac{255 * \%C_f}{PCI} \quad (C.56)$$

Em que:

K_2 - Constante dependente do combustível;

$\%C_f$ – Percentagem de carbono no combustível;

PCI – Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg).

4. Perdas associadas à entalpia do vapor de água nos gases de combustão;

Para a determinação das perdas associadas à entalpia do vapor de água nos gases de combustão, utiliza-se a Equação C.57.

$$P_{H_2O} = \frac{\%H_2O_f + 9 * \%H_2 f * (210 - 4,2 * T_{a e} + 2,1 * T_{g c s})}{PCI} \quad (C.57)$$

Em que:

P_{H_2O} – Perdas associadas à entalpia do vapor de água nos gases de combustão (%);

$\%H_2O_f$ – Percentagem de água presente no combustível (%);

$\%H_2 f$ – Percentagem de H_2 presente no combustível (%);

$T_{a e}$ – Temperatura de ar à entrada da caldeira (°C);

$T_{g c s}$ – Temperatura dos gases de combustão à saída do economizador (°C)

5. Perdas associadas aos inqueimados nos gases de combustão;

O cálculo para a determinação das perdas associadas aos inqueimados nos gases de combustão é feito através da Equação C.58.

$$P_{CO} = \frac{K_3 * \%CO_{gc}}{\%CO_{gc} + \%CO_{2 gc}} \quad (C.58)$$

Em que:

P_{CO} – Perdas associadas aos inqueimados nos gases de combustão (%);

K_3 – Constante dependente do combustível utilizado;

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

$\%CO_{2 gc}$ – Percentagem de CO₂ nos gases de combustão (%).

A escolha de K_3 foi feita com base na Tabela C.2.

Tabela C.2 - Valores de K_3 de diferentes combustíveis

Combustível	Valores de K_3
Carvão	63,0
Gasóleo	53,0
Fuelóleo	54,0
Propano	48,0
Gás natural	40,0

6. Perdas associadas à radiação, convecção e outras perdas não-contabilizáveis nas caldeiras;

Para a determinação das perdas associadas à radiação, convecção e outras perdas não-contabilizáveis nas caldeiras tem-se em conta que as mesmas são relativas à capacidade máxima de produção da caldeira. Assim sendo, é necessário efetuar um estudo sobre a capacidade nominal com base na Tabela C.3. Posteriormente, é necessário converter esse mesmo valor, o qual depende do caudal máximo de combustível que a caldeira permite utilizar e do caudal que foi utilizado em determinado ensaio.

Tabela C.3 - Perdas à capacidade nominal para diferentes tipos de caldeiras

Tipo de caldeira	Perdas à capacidade nominal (%)
Caldeiras aquatubulares ou pirotubulares com potência superior ou igual a 5MW	1,4
Caldeiras aquatubulares ou pirotubulares com potência entre 2 e 5 MW	1,6
Caldeiras aquatubulares ou pirotubulares com potência inferior a 2 MW	2,0
Caldeiras de refratário ou tubos de fumo com topo seco ou com soleira de refratário	3,0
Caldeiras de água quente em ferro fundido	4,5

Assim, as perdas por radiação, convecção e outras perdas não contabilizáveis determinam-se através da Equação C.59.

$$P_{rad} = \frac{P_{cn} * M_{vap Max}}{M_{vap}} \quad (C.59)$$

Em que:

P_{rad} – Perdas associadas à radiação, convecção e outras perdas não contabilizáveis (%);

P_{cn} – Perdas à capacidade nominal (%);

$M_{vap Max}$ – Caudal máximo de vapor produzido (ton/h);

M_{vap} – Caudal de vapor produzido (ton/h).

7. Perdas associadas às purgas.

Este manual determina esta perda de maneira igual à norma ASME PTC 4-2013, pelo que o seu valor será igual para ambos os métodos.

C.2.1 Exemplo de cálculo do rendimento de caldeiras pelo método indireto segundo o Manual de Auditorias Energéticas na Indústria.

Para o exemplo de cálculo utilizou-se um teste com um caudal de 525,21 kg/h de fuelóleo nº4, na caldeira 1.

1. Perdas associadas ao calor sensível nos gases secos de combustão;

A Equação C.56 foi utilizada para determinar a contante K_2 .

$$K_2 = \frac{255 * 87,6}{40166,4} = 0,56$$

Para a determinação desta perda, foi utilizada a Equação C.55.

$$P_{gc} = \frac{0,56 * (174,59 - 30,19)}{4,01} = 20,05\%$$

2. Perdas associadas à entalpia do vapor de água nos gases de combustão;

A Equação C.57 foi utilizada para determinar P_{H_2O} .

$$P_{H_2O} = \frac{(0,47 + 9 * 11,5 * (210 - 4,2 * 30,19 + 2,1 * 174,59))}{40166,4} = 1,16\%$$

3. Perdas associadas aos inqueimados nos gases de combustão;

A Equação C.58 foi utilizada para determinar a P_{CO} .

$$P_{CO} = \frac{54 * 0,057}{0,057 + 4,01} = 0,75\%$$

4. Perdas associadas à radiação, convecção e outras perdas não-contabilizáveis nas caldeiras;

Para determinar as perdas por radiação, convecção e outras perdas não contabilizáveis, utilizou-se a Equação C.59.

$$P_{rad} = \frac{1,4 * 28,86}{10,58} = 3,82\%$$

5. Perdas associadas às purgas.

Uma vez que esta perda se determina da mesma maneira para ambas as normas, pela Equação C.44 determinou-se o caudal mássico de purgas.

$$M_{rp} = \frac{13,66 * 24,30}{257,34} = 1,32 \text{ ton/h}$$

Pela Equação C.43 determinou-se a percentagem de purgas.

$$p = \frac{1,32}{13,66} * 100 = 9,66\%$$

Finalmente, pela Equação C.42, foi determinado o P_p .

$$P_p = \frac{((216 - 139,67) * 9,66 * (100 - 20,05 - 1,16 - 0,75 - 3,82))}{(216 - 139,67) * 9,66 + (100 - 9,66) * (660 - 139,67)} = 1,15$$

Assim, o rendimento final foi determinado pela Equação C.54.

$$\eta = 100 - 20,05 - 1,16 - 0,75 - 3,82 - 1,15 = 73,07\%$$

C.3- Método Direto para o cálculo do rendimento.

O método direto tem por base as entradas e saídas de energia. Neste método, a energia cedida pelo combustível usado é comparada à ganha pela água ou outro fluido de trabalho.

Assim, o rendimento, segundo este método, é calculado como está representado na Equação C.60.

$$\eta = \frac{M_{vap} * (H_v - H_{ag})}{M_f * PCI} * 100 \quad (C.60)$$

Em que:

η – rendimento da caldeira (%);

M_{vap} – Caudal de combustível (kg/h);

H_v – Entalpia do vapor na temperatura de saída do mesmo (kJ/kg);

H_{ag} – Entalpia da água à temperatura de alimentação da mesma (kJ/kg);

M_f – Caudal de combustível (kg/h);

PCI – Poder calórico inferior do combustível (kJ/kg).

C.3.1 Exemplo de cálculo dos rendimentos de caldeiras pelo método direto.

Para o exemplo de cálculo utilizou-me um teste com um caudal de 525,21 kg/h de fuelóleo nº4, na caldeira 1.

Assim, para determinar o rendimento segundo o método direto, utilizou-se a Equação C.60.

$$\eta = \frac{10580 * (2837,90 - 444,4)}{525,21 * 40166,4} * 100 = 120,02\%$$

Anexo D Resultados dos ensaios

Após o levantamento de todos os dados necessários, procedeu-se à determinação de todas as perdas e créditos, quando necessários, para a obtenção dos rendimentos das 3 caldeiras da RCOG.

Nas Tabelas D.1 e D.2 encontram-se os resultados obtidos para o ensaio na caldeira 1 com queima de fuelóleo nº4, segundo o Manual de Auditorias Energéticas na Indústria e a norma ASME PTC 4-2013, respetivamente. Para a caldeira 2, os resultados dos ensaios realizados com queima de fuelóleo nº4 estão presentes nas Tabelas D.3 e D.4 segundo o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria e nas Tabelas D.5 e D.6 segundo o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013.

Relativamente à caldeira 3, os ensaios realizados com queima de fuelóleo nº4 estão presentes nas Tabelas D.7 e D.8, segundo o método indireto proposto pelo manual de Auditorias Energéticas na Indústria e nas Tabelas D.9 e D.10, segundo o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013. Os resultados do ensaio com queima de gás natural na caldeira 1, encontram-se nas Tabelas D.11, segundo o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria e D.12, segundo o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013.

Para os ensaios mistos, os resultados encontram-se nas Tabelas D.13, D.14 e D.15, segundo o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria, para razões de queima mista de 90/10, 80/20 e 70/30, respetivamente. Para a queima mista segundo a norma ASME PTC 4-2013, os resultados encontram-se nas Tabelas D.16, D.17 e D.18 para razões de 90/10, 80/20 e 70/30, respetivamente.

Tabela D.1 - Resultados obtidos com o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria, na caldeira 1 com queima de fuelóleo nº4.

m_{fuel} (kg/h)	P_{gc} (%)	P_{H_2O} (%)	P_{CO} (%)	P_{rad} (%)	P_p (%)	Rendimento (%)
525,21	20,05	1,16	0,75	3,82	1,15	73,07
648,86	18,71	1,18	0,28	3,71	1,21	74,92
759,26	17,18	1,20	0,08	2,69	1,15	77,70
847,58	16,54	1,24	0,06	2,66	1,05	78,46
952,44	16,05	1,27	0,05	2,51	1,05	79,08
1046,00	16,20	1,30	0,05	2,49	1,24	78,72
1133,81	14,61	1,34	0,05	2,40	1,51	80,08
1256,23	15,50	1,30	0,06	1,98	1,33	79,84
1375,56	16,11	1,36	0,06	1,92	1,32	79,23
1448,07	15,73	1,40	0,06	1,76	1,29	79,77
1574,80	14,58	1,43	0,06	1,61	1,35	80,98
1721,46	13,63	1,45	0,06	1,51	1,38	81,97
1828,06	12,85	1,48	0,05	1,43	1,45	82,75
1883,00	12,73	1,49	0,06	1,40	1,49	82,83
1954,59	12,91	1,50	0,06	1,40	1,49	82,65

Tabela D.2 - Resultados obtidos com o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013, na caldeira 1 com queima de fuelóleo nº4.

m_{fuel} (kg/h)	P_{gs} (%)	P_{H2} (%)	P_{H2Of} (%)	$P_{\text{hum a}}$ (%)	$\sum P_{\text{inq}}$ (%)	P_{rad} (%)	P_{p} (%)	C_{as} (%)	$C_{\text{hum a}}$ (%)	$C_{\text{q f}}$ (%)	Rendimento (%)
525,21	22,03	6,12	0,03	0,29	0,00184	0,15	1,11	0,54	0,03	0,52	71,37
648,86	20,31	6,13	0,03	0,28	0,00067	0,12	1,16	0,52	0,03	0,50	73,02
759,26	18,44	6,14	0,03	0,25	0,00019	0,10	1,09	0,49	0,03	0,48	74,94
847,58	17,30	6,16	0,03	0,25	0,00013	0,09	1,01	0,45	0,02	0,45	76,09
952,44	16,81	6,18	0,03	0,24	0,00012	0,08	1,01	0,44	0,02	0,43	76,55
1046,00	16,87	6,20	0,03	0,25	0,00011	0,07	1,19	0,46	0,02	0,44	76,33
1133,81	14,99	6,22	0,03	0,23	0,00011	0,06	1,46	0,42	0,02	0,47	77,92
1256,23	16,20	6,21	0,03	0,24	0,00013	0,05	1,26	0,57	0,03	0,39	76,99
1375,56	16,65	6,24	0,03	0,26	0,00014	0,05	1,26	0,58	0,03	0,44	76,57
1448,07	15,98	6,26	0,03	0,25	0,00013	0,04	1,23	0,56	0,03	0,46	77,25
1574,80	14,79	6,27	0,03	0,24	0,00013	0,04	1,29	0,52	0,03	0,37	78,25
1721,46	13,75	6,28	0,03	0,22	0,00013	0,04	1,32	0,48	0,02	0,36	79,22
1828,06	12,79	6,29	0,03	0,21	0,00012	0,04	1,39	0,44	0,02	0,36	80,07
1883,00	12,73	6,30	0,03	0,21	0,00013	0,03	1,43	0,43	0,02	0,37	80,09
1954,59	12,89	6,31	0,03	0,21	0,00013	0,03	1,42	0,44	0,02	0,37	79,94

Tabela D.3 - Resultados obtidos para o primeiro ensaio com o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria, na caldeira 2 com queima de fuelóleo n.º4.

m_{fuel} (kg/h)	P_{gc} (%)	$P_{\text{H}_2\text{O}}$ (%)	P_{CO} (%)	P_{rad} (%)	P_{purgas} (%)	Rendimento (%)
258,80	16,81	1,23	0,093	4,20	0,13	77,54
300,91	15,62	1,23	0,084	3,05	0,14	79,88
371,77	12,93	1,23	0,074	2,40	0,17	83,19
381,02	12,64	1,21	0,074	2,10	0,17	83,80
426,21	11,45	1,21	0,071	1,98	0,18	85,11
452,91	10,55	1,21	0,070	1,79	0,18	86,20
508,37	9,49	1,20	0,063	1,66	0,34	87,24
541,23	8,43	1,12	0,050	1,48	0,33	88,59
600,80	7,85	1,13	0,052	1,43	0,23	89,31

Tabela D.4 - Resultados obtidos para o segundo ensaio com o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria, na caldeira 2 com queima de fuelóleo n.º4

m_{fuel} (kg/h)	P_{gc} (%)	$P_{\text{H}_2\text{O}}$ (%)	P_{CO} (%)	P_{rad} (%)	P_{purgas} (%)	Rendimento (%)
265,99	16,97	1,18	0,10	4,07	0,08	77,59
312,21	14,97	1,19	0,08	2,86	0,08	80,82
363,56	12,13	1,16	0,07	2,32	0,16	84,17
409,77	10,84	1,14	0,07	2,17	0,17	85,62
421,07	10,52	1,15	0,07	2,13	0,17	85,96
457,02	9,79	1,14	0,06	1,98	0,20	86,83
474,47	9,45	1,17	0,06	1,77	0,19	87,37
495,01	9,39	1,15	0,06	1,79	0,23	87,38
542,26	8,68	1,16	0,06	1,51	0,38	88,21
614,15	8,20	1,17	0,05	1,41	0,40	88,76
601,82	8,19	1,17	0,06	1,40	0,41	88,77

Tabela D.5 - Resultados obtidos para o primeiro ensaio com o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013, na caldeira 2 com queima de fuelóleo n.º4.

m_{fuel} (kg/h)	P_{gs} (%)	P_{H_2} (%)	$P_{H_2O_f}$ (%)	$P_{hum a}$ (%)	$\sum P_{inq}$ (%)	P_{rad} (%)	P_p (%)	C_{as} (%)	$C_{hum a}$ (%)	$C_{q f}$ (%)	Rendimento (%)
258,80	18,06	6,17	0,03	0,26	0,00	0,25	0,13	0,72	0,04	0,45	76,30
300,91	16,80	6,18	0,03	0,25	0,00	0,20	0,13	0,77	0,04	0,48	77,69
371,77	13,72	6,19	0,03	0,20	0,00	0,17	0,16	0,61	0,03	0,47	80,66
381,02	13,54	6,18	0,03	0,20	0,00	0,15	0,16	0,68	0,03	0,45	80,90
426,21	12,20	6,18	0,03	0,18	0,00	0,14	0,17	0,61	0,03	0,43	82,18
452,91	11,23	6,19	0,03	0,16	0,00	0,13	0,17	0,59	0,03	0,43	83,14
508,37	10,15	6,19	0,03	0,15	0,00	0,10	0,32	0,60	0,03	0,41	84,09
541,23	9,36	6,18	0,03	0,14	0,00	0,07	0,31	0,77	0,04	0,47	85,19
600,80	8,69	6,18	0,03	0,13	0,00	0,07	0,22	0,73	0,04	0,41	85,86

Tabela D.6 - Resultados obtidos para o segundo ensaio com o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013, na caldeira 2 com queima de fuelóleo n.º4.

m_{fuel} (kg/h)	P_{gs} (%)	P_{H_2} (%)	$P_{\text{H}_2\text{Of}}$ (%)	$P_{\text{hum a}}$ (%)	$\sum P_{\text{inq}}$ (%)	P_{rad} (%)	P_{p} (%)	C_{as} (%)	$C_{\text{hum a}}$ (%)	$C_{\text{q f}}$ (%)	Rendimento (%)
265,99	18,70	6,17	0,03	0,27	0,00	0,21	0,07	1,05	0,05	0,41	76,05
312,21	16,37	6,18	0,03	0,24	0,00	0,17	0,08	0,94	0,05	0,46	78,37
363,56	13,33	6,17	0,03	0,19	0,00	0,14	0,15	0,88	0,04	0,39	81,29
409,77	11,95	6,17	0,03	0,17	0,00	0,12	0,16	0,84	0,04	0,37	82,65
421,07	11,57	6,17	0,03	0,17	0,00	0,11	0,16	0,82	0,04	0,36	83,00
457,02	10,71	6,17	0,03	0,16	0,00	0,10	0,19	0,78	0,04	0,35	83,82
474,47	10,22	6,17	0,03	0,15	0,00	0,11	0,18	0,64	0,03	0,39	84,20
495,01	10,20	6,17	0,03	0,15	0,00	0,11	0,22	0,64	0,03	0,35	84,16
542,26	9,38	6,17	0,03	0,14	0,00	0,10	0,36	0,59	0,03	0,34	84,78
614,15	8,84	6,18	0,03	0,13	0,00	0,08	0,38	0,56	0,03	0,34	85,29
601,82	8,79	6,18	0,03	0,13	0,00	0,09	0,39	0,56	0,03	0,33	85,32

Tabela D.7 - Resultados obtidos para o primeiro ensaio com o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria, na caldeira 3 com queima de fuelóleo n.º4.

m_{fuel} (kg/h)	P_{gc} (%)	P_{H_2O} (%)	P_{CO} (%)	P_{rad} (%)	P_{purgas} (%)	Rendimento (%)
390,26	16,46	1,12	0,07	5,39	0,86	76,09
542,26	11,94	1,15	0,04	3,85	1,31	81,71
688,09	10,46	1,15	0,04	3,17	1,42	83,76
832,38	9,32	1,17	0,04	3,02	1,46	84,98
944,84	9,11	1,18	0,05	2,14	1,30	86,22
1120,46	8,80	1,18	0,05	1,89	1,50	86,58
1257,05	8,52	1,21	0,05	1,75	1,54	86,93
1345,37	8,24	1,21	0,05	1,71	1,74	87,05
1494,29	8,50	1,24	0,05	1,53	1,99	86,69
1590,10	8,61	1,26	0,05	1,48	2,25	86,36
1664,77	8,89	1,26	0,06	1,40	2,49	85,90
1811,11	9,19	1,30	0,06	1,48	2,74	85,23

Tabela D.8 - Resultados obtidos para o segundo ensaio com o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria, na caldeira 3 com queima de fuelóleo n.º4.

m_{fuel} (kg/h)	P_{gc} (%)	P_{H_2O} (%)	P_{CO} (%)	P_{rad} (%)	P_{purgas} (%)	Rendimento (%)
370,54	17,10	1,14	0,07	5,99	0,26	75,44
508,37	14,95	1,12	0,06	4,49	0,26	79,13
618,25	13,96	1,14	0,05	3,76	0,25	80,84
807,43	11,64	1,17	0,05	3,02	0,60	83,52
966,20	10,72	1,19	0,06	2,70	0,30	85,04
1130,93	9,67	1,22	0,06	3,17	0,34	85,55
1282,52	9,21	1,18	0,05	1,80	0,84	86,92
1555,39	8,51	1,26	0,05	1,74	0,86	87,58

Tabela D.9 - Resultados obtidos para o primeiro ensaio com o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013, na caldeira 3 com queima de fuelóleo n.º4.

m_{fuel} (kg/h)	P_{gs} (%)	P_{H_2} (%)	$P_{\text{H}_2\text{Of}}$ (%)	$P_{\text{hum a}}$ (%)	$\sum P_{\text{inq}}$ (%)	P_{rad} (%)	P_{p} (%)	C_{as} (%)	$C_{\text{hum a}}$ (%)	C_{qf} (%)	Rendimento (%)
390,26	17,97	6,10	0,03	0,23	0,00	0,20	0,85	0,38	0,02	0,48	75,51
542,26	12,67	6,11	0,03	0,17	0,00	0,15	1,28	0,26	0,01	0,40	80,27
688,09	11,03	6,12	0,03	0,14	0,00	0,11	1,38	0,24	0,01	0,42	81,87
832,38	9,67	6,13	0,03	0,13	0,00	0,09	1,42	0,22	0,01	0,41	83,17
944,84	9,50	6,14	0,03	0,13	0,00	0,08	1,25	0,25	0,01	0,46	83,60
1120,46	9,19	6,14	0,03	0,13	0,00	0,06	1,44	0,28	0,01	0,41	83,71
1257,05	8,83	6,15	0,03	0,12	0,00	0,06	1,47	0,27	0,01	0,43	84,04
1345,37	8,53	6,16	0,03	0,12	0,00	0,05	1,66	0,27	0,01	0,47	84,19
1494,29	8,75	6,17	0,03	0,13	0,00	0,05	1,90	0,28	0,01	0,47	83,74
1590,10	8,83	6,18	0,03	0,13	0,00	0,04	2,15	0,28	0,01	0,47	83,40
1664,77	9,13	6,19	0,03	0,13	0,00	0,04	2,38	0,30	0,02	0,46	82,89
1811,11	9,43	6,21	0,03	0,14	0,00	0,04	2,62	0,33	0,02	0,46	82,35

Tabela D.10 - Resultados obtidos para o segundo ensaio com o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013, na caldeira 3 com queima de fuelóleo nº4.

m_{fuel} (kg/h)	P_{gs} (%)	P_{H_2} (%)	$P_{\text{H}_2\text{Of}}$ (%)	$P_{\text{hum a}}$ (%)	$\sum P_{\text{inq}}$ (%)	P_{rad} (%)	P_{p} (%)	C_{as} (%)	$C_{\text{hum a}}$ (%)	C_{qf} (%)	Rendimento (%)
370,54	18,64	6,11	0,03	0,24	0,00	0,21	0,25	0,42	0,02	0,39	75,35
508,37	16,34	6,11	0,03	0,21	0,00	0,15	0,25	0,45	0,02	0,44	77,83
618,25	15,09	6,12	0,03	0,20	0,00	0,12	0,24	0,42	0,02	0,42	79,06
807,43	12,35	6,13	0,03	0,17	0,00	0,09	0,58	0,37	0,02	0,37	81,41
966,20	11,26	6,15	0,03	0,16	0,00	0,07	0,29	0,34	0,02	0,35	82,75
1130,93	10,04	6,16	0,03	0,14	0,00	0,06	0,33	0,30	0,02	0,34	83,90
1282,52	9,67	6,14	0,03	0,13	0,00	0,06	0,80	0,31	0,02	0,37	83,86
1555,39	8,74	6,18	0,03	0,13	0,00	0,04	0,83	0,28	0,01	0,37	84,72

Tabela D.11 - Resultados obtidos para o ensaio com o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria, na caldeira 1 com queima de Gás Natural.

mGN (m ³ /h)	P _{gc} (%)	P _{H₂O} (%)	P _{CO} (%)	P _{rad} (%)	P _{purgas} (%)	Rendimento (%)
606,75	0,30	0,02	0,01	3,77	5,31	90,59
752,07	0,18	0,02	0,00	2,83	3,40	93,57
843,58	0,12	0,02	0,00	2,64	5,61	91,62
983,66	0,11	0,02	0,00	2,32	4,06	93,48
1153,94	0,09	0,02	0,00	1,98	4,73	93,17
1406,37	0,09	0,02	0,00	1,72	5,55	92,62
1670,11	0,07	0,02	0,01	1,40	6,22	92,28
1920,49	0,08	0,02	0,01	1,47	6,07	92,36

Tabela D.12 - Resultados obtidos para o ensaio com o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013, na caldeira 1 com queima de Gás Natural.

mGN (m ³ /h)	P _{gs} (%)	P _{H2} (%)	P _{H2Ovf} (%)	P _{hum a} (%)	∑P _{inq} (%)	P _{rad} (%)	P _p (%)	C _{as} (%)	C _{hum a} (%)	C _{qf} (%)	Rendimento (%)
606,75	0,887	0,100	0,000	0,006	0,000	0,114	5,477	0,027	0,001	0,028	93,471
752,07	0,611	0,101	0,000	0,003	0,000	0,107	3,478	0,006	0,000	0,028	95,734
843,58	0,506	0,101	0,000	0,002	0,000	0,096	5,725	0,003	0,000	0,028	93,601
983,66	0,502	0,101	0,000	0,002	0,000	0,083	4,135	0,003	0,000	0,028	95,208
1153,94	0,471	0,101	0,000	0,002	0,000	0,070	4,803	0,003	0,000	0,028	94,584
1406,37	0,479	0,101	0,000	0,002	0,000	0,057	5,620	0,003	0,000	0,028	93,772
1670,11	0,471	0,102	0,000	0,001	0,000	0,047	6,274	0,002	0,000	0,028	93,134
1920,49	0,486	0,102	0,000	0,001	0,000	0,041	6,126	0,002	0,000	0,028	93,275

Tabela D.13 - Resultados obtidos para o ensaio com o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria, na caldeira 3 com queima mista na razão de 90/10 de Fuelóleo n°Gás Natural.

m_{fuel} (kg/h)	m_{GN} (kg/h)	P_{gc} (%)	$P_{\text{H}_2\text{O}}$ (%)	P_{CO} (%)	P_{rad} (%)	P_{purgas} (%)	Rendimento (%)
375,574	41,730	9,64	1,27	0,0283	4,3	1,41	83,36
429,902	47,767	8,67	1,29	0,0275	2,9	1,31	85,83
582,720	64,747	8,93	1,28	0,0298	2,7	1,38	85,65
696,203	77,356	8,09	1,28	0,0296	2,4	1,37	86,83
765,423	85,047	7,40	1,28	0,0284	2,3	1,38	87,64
843,681	93,742	8,07	1,31	0,0336	2,3	1,42	86,89
933,851	103,761	9,37	1,42	0,0373	2,0	0,90	86,25
1030,697	114,522	9,86	1,42	0,0397	1,9	0,75	85,99
1175,402	130,600	9,41	1,43	0,0423	1,7	1,19	86,26
1264,442	140,494	8,94	1,37	0,0452	1,6	1,17	86,87
1409,866	156,652	9,85	1,47	0,0461	1,4	0,82	86,38
1500,858	166,762	9,95	1,43	0,0517	1,4	1,10	86,08

Tabela D.14 - Resultados obtidos para o ensaio com o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria, na caldeira 3 com queima mista na razão de 80/20 de Fuelóleo n°Gás Natural.

m_{fuel} (kg/h)	m_{GN} (kg/h)	P_{gc} (%)	$P_{\text{H}_2\text{O}}$ (%)	P_{CO} (%)	P_{rad} (%)	P_{purgas} (%)	Rendimento (%)
386,152	96,538	9,41	1,44	0,028	3,2	0,21	85,76
576,147	144,037	8,13	1,39	0,031	2,7	0,21	87,51
688,090	172,023	7,68	1,43	0,028	2,5	0,27	88,12
805,682	201,420	7,50	1,42	0,032	2,4	0,22	88,47
877,777	219,444	7,48	1,44	0,048	2,0	0,21	88,81
1021,762	255,441	7,44	1,43	0,036	1,9	0,26	88,96
1124,154	281,039	8,15	1,49	0,038	1,8	0,26	88,28
1269,475	317,369	7,68	1,49	0,055	1,6	0,21	88,93
1365,705	341,426	8,81	1,56	0,041	1,6	0,26	87,75
1461,113	365,278	8,58	1,54	0,044	1,5	0,26	88,10
1567,510	391,878	7,99	1,55	0,045	1,4	0,21	88,81

Tabela D.15 - Resultados obtidos para o ensaio com o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria, na caldeira 3 com queima mista na razão de 70/30 de Fuelóleo n°Gás Natural.

m_{fuel} (kg/h)	mGN (kg/h)	P_{gc} (%)	$P_{\text{H}_2\text{O}}$ (%)	P_{CO} (%)	P_{rad} (%)	P_{purgas} (%)	Rendimento (%)
369,62	158,41	9,21	1,47	0,025	2,75	0,13	86,42
487,11	208,76	8,07	1,47	0,026	1,99	0,16	88,28
590,63	253,13	8,05	1,49	0,030	2,06	0,13	88,23
696,41	298,46	7,68	1,49	0,032	1,90	0,15	88,75
776,10	332,62	7,83	1,50	0,035	1,66	0,16	88,82
854,87	366,37	9,51	1,57	0,036	1,76	0,18	86,95
977,29	418,84	8,66	1,59	0,038	1,45	0,25	88,01
1067,77	457,62	8,40	1,54	0,041	1,40	0,36	88,25

Tabela D.16 - Resultados obtidos para o ensaio com o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013, na caldeira 3 com queima mista na razão de 90/10 de Fuelóleo n°/Gás Natural.

m_{fuel} (kg/h)	m_{GN} (kg/h)	P_{gs} (%)	P_{H_2} (%)	$P_{H_2O_f}$ (%)	$P_{hum a}$ (%)	$\sum P_{inq}$ (%)	P_{rad} (%)	P_p (%)	C_{as} (%)	$C_{hum a}$ (%)	C_{qf} (%)	Rendimento (%)
375,574	41,730	10,302	6,620	0,025	0,136	0,000	0,191	1,375	0,163	0,008	0,453	81,975
429,902	47,767	9,156	6,634	0,025	0,124	0,000	0,165	1,263	0,154	0,008	0,418	83,213
582,720	64,747	9,473	6,631	0,025	0,127	0,000	0,122	1,329	0,165	0,008	0,408	82,875
696,203	77,356	8,559	6,626	0,025	0,114	0,000	0,102	1,315	0,142	0,007	0,442	83,850
765,423	85,047	7,790	6,629	0,025	0,104	0,000	0,093	1,328	0,133	0,007	0,443	84,614
843,681	93,742	8,480	6,645	0,025	0,117	0,000	0,082	1,357	0,164	0,008	0,406	83,872
933,851	103,761	9,692	6,701	0,025	0,144	0,000	0,072	0,862	0,215	0,011	0,411	83,141
1030,697	114,522	9,576	6,701	0,025	0,143	0,000	0,066	0,727	0,188	0,010	0,433	83,392
1175,402	130,600	9,791	6,721	0,025	0,149	0,000	0,052	1,129	0,299	0,015	0,443	82,890
1264,442	140,494	9,396	6,687	0,025	0,137	0,000	0,050	1,117	0,284	0,015	0,382	83,268
1409,866	156,652	10,145	6,735	0,025	0,157	0,000	0,045	0,780	0,270	0,014	0,378	82,775
1500,858	166,762	10,406	6,721	0,025	0,158	0,000	0,040	1,042	0,344	0,018	0,381	82,351

Tabela D.17 - Resultados obtidos para o ensaio com o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013, na caldeira 3 com queima mista na razão de 80/20 de Fuelóleo n°/Gás Natural.

m_{fuel} (kg/h)	m_{GN} (kg/h)	P_{gs} (%)	P_{H_2} (%)	$P_{H_2O_f}$ (%)	$P_{hum a}$ (%)	$\sum P_{inq}$ (%)	P_{rad} (%)	P_p (%)	C_{as} (%)	$C_{hum a}$ (%)	C_{qf} (%)	Rendimento (%)
386,152	96,538	9,929	7,123	0,021	0,141	0,000	0,164	0,204	0,132	0,007	0,424	82,980
576,147	144,037	8,582	7,099	0,021	0,118	0,000	0,111	0,204	0,106	0,005	0,398	84,375
688,090	172,023	7,946	7,114	0,021	0,112	0,000	0,094	0,255	0,084	0,004	0,394	84,940
805,682	201,420	7,811	7,111	0,021	0,109	0,000	0,080	0,213	0,087	0,004	0,445	85,191
877,777	219,444	7,758	7,123	0,021	0,111	0,000	0,073	0,202	0,096	0,005	0,453	85,267
1021,762	255,441	7,718	7,117	0,021	0,109	0,000	0,063	0,250	0,085	0,004	0,416	85,228
1124,154	281,039	8,383	7,144	0,021	0,123	0,000	0,057	0,246	0,088	0,005	0,330	84,450
1269,475	317,369	7,909	7,153	0,022	0,118	0,000	0,048	0,200	0,133	0,007	0,356	85,047
1365,705	341,426	9,073	7,194	0,022	0,141	0,000	0,042	0,247	0,208	0,011	0,370	83,868
1461,113	365,278	8,855	7,179	0,022	0,136	0,000	0,040	0,247	0,185	0,009	0,323	84,038
1567,510	391,878	8,177	7,185	0,022	0,127	0,000	0,037	0,202	0,173	0,009	0,281	84,713

Tabela D.18 - Resultados obtidos para o ensaio com o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013, na caldeira 3 com queima mista na razão de 70/30 de Fuelóleo n°/Gás Natural.

m_{fuel} (kg/h)	m_{GN} (kg/h)	P_{gs} (%)	P_{H2} (%)	P_{H2Of} (%)	$P_{hum a}$ (%)	$\sum P_{inq}$ (%)	P_{rad} (%)	P_p (%)	C_{as} (%)	$C_{hum a}$ (%)	C_{qf} (%)	Rendimento (%)
369,617	158,407	10,252	7,542	0,018	0,137	0,000	0,148	0,123	0,127	0,006	0,333	82,245
487,106	208,760	9,446	7,545	0,018	0,127	0,000	0,112	0,148	0,126	0,006	0,324	83,059
590,628	253,126	8,870	7,552	0,018	0,121	0,000	0,092	0,125	0,112	0,006	0,321	83,661
696,409	298,461	8,473	7,558	0,018	0,116	0,000	0,076	0,138	0,148	0,008	0,306	84,082
776,104	332,616	8,626	7,561	0,018	0,119	0,000	0,068	0,149	0,150	0,008	0,317	83,933
854,875	366,375	10,465	7,606	0,018	0,153	0,000	0,058	0,164	0,244	0,013	0,298	82,090
977,293	418,840	9,436	7,615	0,018	0,140	0,000	0,051	0,234	0,213	0,011	0,262	82,992
1067,772	457,617	9,227	7,590	0,018	0,132	0,000	0,047	0,338	0,199	0,010	0,284	83,141

Anexo E Cálculos associados à análise Económica

Com o intuito de realizar a análise económica realizou-se um estudo sobre os custos relativos ao primeiro ensaio realizado na caldeira 2, com queima de fuelóleo nº4. Note-se que a escolha deste ensaio em particular teve por base o facto de que a caldeira disponível para estudar a aplicação de possíveis melhorias era a 2 e, portanto, para uma melhor comparação, decidiu-se utilizar outro ensaio também realizado nesta caldeira.

Assim, na Tabela E.1 encontram-se todos os dados recolhidos para a determinação dos rendimentos associados a este ensaio. Nas Tabelas E.2 e E.3 encontram-se os resultados segundo o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013 e pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria, respetivamente.

Na Tabela E.4, encontra-se o total de perdas associado ao primeiro ensaio realizado na caldeira 2, com queima de fuelóleo nº4, bem como os custos associados.

Na Tabela E.5, encontra-se o total de perdas associado ao ensaio realizado na caldeira 2, com queima de fuelóleo nº4, para uma menor abertura da válvula do ventilador (18%), bem como os custos associados.

Tabela E.1 - Recolha de todas as medições de caudais, pressões, temperaturas, teor de gases e condutividades, para o ensaio realizado na caldeira 2 com queima de fuelóleo n.º4, e menor abertura da válvula do ventilador

m_{fuel} (kg/h)	T_{fuel} (°C)	m_{vap} (ton/h)	T_{vap} (°C)	T_{ge} (°C)	T_{gs} (°C)	T_{ae} (°C)	T_{as} (°C)	T_{ar} (°C)	P_{vap} (barg)	$m_{água}$ (ton/h)	O_2 (%)	CO (ppm)	CO_2 (%)	STD_f (mg/L)	STD_c (mg/L)
236,2	136,3	3,9	237,2	265,0	184,9	136,6	189,0	37,8	20,7	5,0	11,8	87,3	5,4	1,4	214,0
311,2	135,8	5,1	316,3	276,3	186,9	145,8	181,8	38,4	23,6	4,7	10,0	88,3	6,5	1,4	214,0
362,5	129,9	5,4	311,2	278,3	185,9	139,7	170,5	37,5	21,5	5,2	8,3	96,5	7,4	1,4	214,0
413,9	127,0	6,4	311,2	282,4	187,9	138,6	172,5	38,3	22,0	6,6	6,2	108,9	8,6	1,4	214,0
465,2	123,1	7,2	310,2	285,5	186,9	133,5	167,4	38,3	22,1	7,4	4,1	114,0	9,7	1,4	214,0
514,5	119,6	8,3	307,1	288,6	186,9	135,6	164,3	38,9	22,2	7,9	2,0	107,8	10,9	1,4	214,0
567,9	117,4	8,6	309,1	288,6	186,9	135,6	163,3	38,8	24,3	7,8	0,9	111,9	11,5	1,4	214,0

Tabela E.2 - Resultados obtidos para o ensaio com o método indireto proposto pelo Manual de Auditorias Energéticas na Indústria, na caldeira 2 com queima de fuelóleo nº4, para uma menor abertura da válvula do ventilador.

m_{fuel} (kg/h)	P_{gc} (%)	P_{H_2O} (%)	P_{CO} (%)	P_{rad} (%)	P_{purgas} (%)	Rendimento (%)
236,2	15,20	1,13	0,08745	3,09	0,09	80,40
311,2	12,76	1,14	0,07361	2,35	0,09	83,58
362,5	11,18	1,14	0,07051	2,22	0,09	85,30
413,9	9,69	1,14	0,06838	1,90	0,09	87,10
465,2	8,50	1,14	0,06322	1,68	0,10	88,52
514,5	7,53	1,13	0,05324	1,45	0,10	89,73
567,9	7,16	1,13	0,05250	1,40	0,10	90,16

Tabela E.3 - Resultados obtidos para o segundo ensaio com o método indireto proposto pela norma ASME PTC 4-2013, na caldeira 2 com queima de fuelóleo nº4, para uma menor abertura da válvula do ventilador.

m_{fuel} (kg/h)	P_{gs} (%)	P_{H2} (%)	P_{H2Of} (%)	$P_{hum a}$ (%)	$\sum P_{inq}$ (%)	P_p (%)	C_{as} (%)	$C_{hum a}$ (%)	$C_{q f}$ (%)	Rendimento (%)
236,2	16,76183	6,149238	0,027984	0,233179	0,000204	0,08	0,966941	0,049624	0,51752	78,04
311,2	14,10086	6,154385	0,028007	0,197851	0,000171	0,08	0,843776	0,043303	0,514903	80,66
362,5	12,20653	6,151811	0,027996	0,170593	0,000162	0,09	0,683819	0,035094	0,485216	82,40
413,9	10,54069	6,156959	0,028019	0,148568	0,000155	0,09	0,622884	0,031967	0,470734	84,03
465,2	9,208111	6,154385	0,028007	0,129286	0,000142	0,10	0,547144	0,02808	0,451187	85,29
514,5	8,163568	6,154385	0,028007	0,114648	0,000119	0,09	0,507664	0,026054	0,433801	86,31
567,9	7,745046	6,154385	0,028007	0,108783	0,000116	0,09	0,47814	0,024539	0,422604	86,70

Tabela E.4 - Custos associados ao primeiro ensaio realizado na caldeira 2, com queima de fuelóleo n.º4

m_{fuel} (kg/h)	E_{fuel} (kJ/h)	Rendimento (%)	€_{Fuel} (€/h)	$\text{€}_{\text{Energia}}$ (€/kJ)	Total de Perdas (%)	E_{usada} (kJ/h)	E_{perdida} (kJ/h)	$\text{€}_{\text{perdido}}$ (€/h)	$\text{€}_{\text{perdido}}$ (€/dia)
258,8	11052264,0	76,30	155,28	0,000014	23,70	8433150	2619114	36,80	883,14
300,9	12850178,6	77,69	180,54	0,000014	22,31	9983487	2866692	40,28	966,62
371,8	15878020,6	80,66	223,08	0,000014	19,34	12806725	3071295	43,15	1035,61
381,0	16270914,1	80,90	228,60	0,000014	19,10	13163256	3107658	43,66	1047,87
426,2	18201216,8	82,18	255,72	0,000014	17,82	14957811	3243406	45,57	1093,65
452,2	19311567,9	83,14	271,32	0,000014	16,86	16056402	3255166	45,73	1097,61
508,4	21711634,5	84,09	305,04	0,000014	15,91	18257916	3453719	48,52	1164,56
541,2	23112385,1	85,19	324,72	0,000014	14,81	19690374	3422011	48,08	1153,87
600,8	25657651,4	85,86	360,48	0,000014	14,14	22028646	3629006	50,99	1223,67

Tabela E.5 - Custos associados ao ensaio realizado na caldeira 2, com queima de fuelóleo n°4, com uma menor abertura da válvula do ventilador (18%)

m_{fuel} (kg/h)	E_{fuel} (kJ/h)	Rendimento (%)	€_{Fuel} (€/h)	$\text{€}_{\text{Energia}}$ (€/kJ)	Total de Perdas (%)	E_{usada} (kJ/h)	E_{perdida} (kJ/h)	$\text{€}_{\text{perdido}}$ (€/h)	$\text{€}_{\text{perdido}}$ (€/dia)
236,21	10087540	78,04	141,73	0,000014	21,96	7872498	2215042	31,12	746,89
311,18	13289237	80,66	186,71	0,000014	19,34	10719231	2570006	36,11	866,58
362,53	15482181	82,40	217,52	0,000014	17,60	12757900	2724281	38,28	918,60
413,88	17675124	84,03	248,33	0,000014	15,97	14852180	2822944	39,66	951,87
465,23	19868067	85,29	279,14	0,000014	14,71	16946007	2922060	41,05	985,29
514,53	21973293	86,31	308,72	0,000014	13,69	18964697	3008596	42,27	1014,47
567,93	24253954	86,70	340,76	0,000014	13,30	21028326	3225629	45,32	1087,65

Para o exemplo de cálculo dos valores presentes nas tabelas E.1 e E.2, utilizou-se o ponto do primeiro ensaio realizado na caldeira 2, com queima de fuelóleo nº4 com uma caudal de 258,8 kg/h.

Então, E_{fuel} é determinado utilizando a Equação E.1.

$$E_{fuel} = m_{fuel} * PCS \quad (E.1)$$

Substituindo tem-se:

$$E_{fuel} = 258,8 * 42705811,3 * 10^{-3} = 11052264 \frac{kJ}{h}$$

ϵ_{fuel} é calculado com recurso à Equação E.2.

$$\epsilon_{fuel} = m_{fuel} * Preço_{fuel} \quad (E.2)$$

Substituindo tem-se:

$$\epsilon_{fuel} = 258,8 * 10^{-3} * 600 = 155,28 \frac{\epsilon}{h}$$

$\epsilon_{Energia}$ é determinado com recurso à Equação E.3.

$$\epsilon_{Energia} = \frac{\epsilon_{fuel}}{E_{fuel}} \quad (E.3)$$

Substituindo tem-se:

$$\epsilon_{Energia} = \frac{155,28}{11052264} = 0,000014 \frac{\epsilon}{kJ}$$

O total de perdas de cada ensaio foi determinado com recurso à Equação E.4.

$$Perdas_{Totais} = 100 - Rendimento \quad (E.4)$$

Substituindo tem-se:

$$Perdas_{Totais} = 100 - 76,30 = 23,70\%$$

A E_{usada} foi determinada utilizando a Equação E.5.

$$E_{usada} = E_{fuel} * \frac{Rendimento}{100} \quad (E.5)$$

Substituindo tem-se:

$$E_{usada} = 11052264 * \frac{76,30}{100} = 8433150 \frac{kJ}{h}$$

$E_{perdida}$ foi determinada através da seguinte Equação E.6.

$$E_{perdida} = E_{fuel} - E_{usada} \quad (E.6)$$

Substituindo tem-se:

$$E_{perdida} = 11052264 - 8433150 = 2619114 \frac{kJ}{h}$$

O $\text{€}_{perdido h}$ foi determinado através da Equação E.7.

$$\text{€}_{perdido h} = \text{€}_{Energia} * E_{perdida} \quad (E.7)$$

Substituindo tem-se:

$$\text{€}_{perdido h} = 0,000014 * 2619114 = 36,80 \frac{\text{€}}{h}$$

Para determinar $\text{€}_{perdido d}$ foi utilizada a Equação E.8.

$$\text{€}_{perdido d} = \text{€}_{perdido h} * 24 \quad (E.8)$$

Substituindo tem-se:

$$\text{€}_{perdido d} = 36,80 * 24 = 883,14 \frac{\text{€}}{\text{dia}}$$