

# Avaliação e Otimização Energética das Fornalhas da Fábrica de Aromáticos

Luís Eduardo Pereira Baptista

Outubro 2013

**Orientação:** Doutora Anabela Guedes e Engenheiro João Amorim  
**Co-Orientação:** Doutora Paula Neto e Engenheiro Nuno Miranda



Dedico esta dissertação à minha família  
e à minha namorada Carina



## **Agradecimentos**

Agradeço ao Eng.º João Amorim e ao Eng.º Nuno Miranda pela orientação e pela disponibilidade demonstrada para as minhas dúvidas durante o estágio.

Gostaria de agradecer à Eng.ª Cláudia Silva e ao Eng.º Fernando Borges pelo companheirismo e pelo conhecimento partilhado.

Ao Sr.º Amaral pelas visitas guiadas que me proporcionou à refinaria e pelo conhecimento partilhado e a todas as pessoas da Refinaria de Matosinhos que não estando aqui mencionadas me proporcionaram as melhores condições para a realização desta dissertação.

Às minhas orientadoras, Doutora Paula Neto e Doutora Anabela Guedes um profundo agradecimento pela disponibilidade e apoio dado com muitas horas despendidas para correções e dúvidas que surgiram com a realização deste estudo.



## Sumário

O consumo energético verificado nas refinarias petrolíferas é muito elevado, sendo as fornalhas os equipamentos que mais contribuem para esse consumo. Neste estudo foi efetuada uma avaliação e otimização energética às fornalhas da Fábrica de Aromáticos da Refinaria de Matosinhos.

Numa primeira fase foi efetuado um levantamento exaustivo de dados de todas as correntes de entrada e saída dos equipamentos para posteriormente efetuar os balanços de massa e energia a cada uma das fornalhas. Os dados relativos ao levantamento compreenderam dois períodos de funcionamento distintos da unidade fabril, o período de funcionamento normal e o período relativo ao arranque. O período de funcionamento normal foi relativo ao ano de 2012 entre os meses de janeiro a setembro, por sua vez o período de arranque foi de dezembro de 2012 a março de 2013.

Na segunda fase foram realizados os balanços de massa e energia quantificando todas as correntes de entrada e saída das fornalhas em termos mássicos e energéticos permitindo o cálculo do rendimento térmico das fornalhas para avaliar a sua performance.

A avaliação energética permitiu concluir que existe um consumo maior de energia proveniente da combustão do Fuel Gás do que do Fuel Óleo, tanto no período de funcionamento normal como no arranque. As fornalhas H0101, H0301 e a H0471 possuem os consumos mais elevados, sendo responsáveis por mais de 70% do consumo da Fábrica de Aromáticos.

Na terceira fase foram enunciadas duas medidas para a otimização energética das três fornalhas mais consumidoras de energia, a limpeza mensal e o uso exclusivo de Fuel Gás como combustível. As poupanças energéticas obtidas para uma limpeza mensal foram de 0,3% na fornalha H0101, 0,7% na fornalha H0301 e uma poupança de 0,9 % na fornalha H0471. Para o uso exclusivo de Fuel Gás obteve-se uma poupança de 0,9% na fornalha H0101 e uma poupança de 1,3% nas fornalhas H0301 e H0471.

A análise económica efetuada à sugestão de alteração do combustível mostra que os custos de operação sofrerão um aumento anual de 621 679 €. Apesar do aumento dos custos, a redução na emissão de 24% de dióxido de carbono, poderá justificar este aumento na despesa.

### **Palavras-Chave:**

Consumo energético, Fornalhas, Otimização, Rendimento térmico, Análise económica.



## **Abstract**

The energy consumption in oil refineries is very high and the fired heaters are the equipment that contribute most to this consumption. This report was carried out to evaluate and optimize the fired heaters of the aromatics plant oil refinery in Matosinhos.

Initially, an exhaustive evaluation of all of the equipments input and output streams, performed. This data was used to calculate the mass and energy balance for each of the fired heaters. The data for the evaluation comprised two distinct periods of operation of the plant, the normal run period and the startup period. The normal run period was from January to September 2012 and the startup period was from December 2012 to March 2013.

In the second phase, mass and energy balances were determined to quantify all input and output streams, in order to calculate the efficiency of the fired heaters and evaluate their thermal performance.

From the energetic evaluation it was possible to conclude that there is a greater consumption of energy from the combustion of fuel gas than fuel oil for both periods. The fired heaters H0101, H0301 and H0471 showed the highest consumption, together accounting for over 70% of energy consumption in the aromatics plant.

In the third phase, two measures were suggested in order to reduce energy consumption of the three fired heaters with higher energetic consumption: to perform a monthly cleaning and use only fuel gas as fuel. The energy savings obtained were 0.3 % in the fired heater H0101, 0.7% in the fired heater H0301 and 0.9 % in the fired heaters H0471 for the performing of a monthly cleaning. Using only Fuel Gás bring an energy saving of 0.9 % in the fired heater H0101 and a saving of 1.3% in the fired heaters H0301 and H0471.

The economic analysis based on the suggestion of the fuel change shows that the annual operational cost increases € 621 679. Despite the increasing operational on costs, the reduction of 24% in carbon dioxide emissions, may justify this increase.

### **Keywords:**

Energy consumption, Fired heaters, Optimize, Thermal performance, Economic analysis.



# Índice

<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 A Refinaria de Matosinhos (Galp Energia, 2013) .....	1
1.2 A Fábrica de Aromáticos .....	3
1.3 Objetivos do trabalho.....	6
1.4 Organização da dissertação .....	7
<b>2. A refinação do petróleo</b> .....	<b>9</b>
2.1 Tipos de fornalhas .....	9
2.2 Eficiência energética de fornalhas .....	13
<b>3. Levantamento energético das fornalhas da FAR</b> .....	<b>15</b>
3.1 Dados Experimentais .....	15
3.1.1 Características dos combustíveis.....	16
3.1.2 Consumos de energia .....	20
3.2 Análise dos dados experimentais .....	28
3.2.1 Temperatura do ar ambiente .....	28
3.2.2 Humidade relativa do ar .....	30
3.2.3 Temperatura de entrada dos combustíveis .....	32
3.2.4 Temperatura dos gases de combustão na entrada da zona de convecção .....	35
3.2.5 Temperatura de saída dos gases de combustão da fornalha .....	36
3.2.6 Percentagem de oxigénio nos gases de combustão à saída da fornalha .....	37
3.2.7 Composição das correntes processuais em cada fornalha.....	39
3.2.8 Temperaturas de entrada e saída das correntes processuais .....	41
3.2.9 Caudal das correntes processuais que circulam nas fornalhas .....	42
3.2.10 Consumos de FO e FG nas diferentes fornalhas .....	44
<b>4. Análise energética das fornalhas</b> .....	<b>47</b>
4.1 Balanços de massa .....	47
4.2 Balanços de energia .....	49

4.3	Avaliação do rendimento das fornalhas .....	53
<b>5.</b>	<b>Otimização energética das fornalhas .....</b>	<b>59</b>
5.1	Fatores que influenciam o rendimento das fornalhas .....	59
5.2	Sugestões de melhoria energética das fornalhas .....	63
5.2.1	Limpezas químicas à zona de convecção .....	63
5.2.2	Mudança do combustível - utilização exclusiva de FG .....	65
5.2.3	Análise económica .....	67
<b>6.</b>	<b>Conclusões e propostas para trabalhos futuros .....</b>	<b>69</b>
	<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>71</b>
	<b>Anexo A- Exemplos de cálculo dos balanços de massa às fornalhas .....</b>	<b>75</b>
	<b>Anexo B- Dados experimentais .....</b>	<b>105</b>
	<b>Anexo C- Exemplos de cálculo dos balanços de energia às fornalhas .....</b>	<b>123</b>
	<b>Anexo D- Resultados Calculados .....</b>	<b>141</b>
	<b>Anexo E- Dados e resultados da otimização energética .....</b>	<b>147</b>
	<b>Anexo F- Dados e resultados das sugestões de melhoria energética .....</b>	<b>153</b>

## Índice de figuras

Figura 1.1- Vista aérea da Refinaria de Matosinhos (Galp Energia, 2013). .....	2
Figura 1.2- Fábrica de Aromáticos da Refinaria de Matosinhos (Galp Energia, 2013). .....	3
Figura 1.3- Esquema simplificado do processo produtivo da FAR (Galp Energia, 2013). .....	4
Figura 2.1- Esquema do conceito de fornalha (Mullinger e Jenkins, 2008). .....	10
Figura 2.2- Exemplo de uma fornalha cilíndrica vertical (esquerda) e de uma fornalha retangular longa (direita) (Mullinger e Jenkins, 2008). .....	11
Figura 2.3- Esquema de uma fornalha vertical (Zetaet al, 2000). .....	12
Figura 3.1- Esquema simplificado do circuito de Fuel Gás da FAR. ....	17
Figura 3.2- Consumo de Fuel Óleo e Fuel Gás durante o funcionamento normal.....	21
Figura 3.3- Distribuição da energia consumida nas fornalhas por combustível durante funcionamento normal. ....	21
Figura 3.4- Consumos energéticos das fornalhas da FAR durante o funcionamento normal. ....	22
Figura 3.5- Distribuição dos consumos energéticos diários pelas fornalhas da FAR em funcionamento normal. ....	23
Figura 3.6- Consumo de Fuel Óleo e Fuel Gás durante o arranque. ....	24
Figura 3.7- Distribuição da energia consumida nas fornalhas por combustível durante o arranque. ....	24
Figura 3.8- Consumos energéticos das fornalhas da FAR durante período de arranque. ....	25
Figura 3.9- Distribuição dos consumos energéticos diários pelas fornalhas da FAR durante o arranque. ....	27
Figura 3.10- Temperatura do ar ambiente para o período de funcionamento normal. ....	29
Figura 3.11- Temperatura do ar ambiente para o período de arranque. ....	29
Figura 3.12- Humidade relativa do ar para o período de funcionamento normal. ....	31
Figura 3.13- Humidade relativa do ar para o período de arranque. ....	32
Figura 3.14- Temperatura dos gases de combustão à entrada da zona de convecção das diferentes fornalhas para os dois períodos de funcionamento. ....	35
Figura 3.15- Temperatura de saída dos gases de combustão das diferentes fornalhas para os dois períodos de funcionamento. ....	37
Figura 3.16- Percentagem de oxigénio nos gases de combustão à saída das diferentes fornalhas para os dois períodos de funcionamento. ....	38
Figura 3.17- Temperaturas da corrente processual à entrada e à saída para o funcionamento normal. ....	41
Figura 3.18- Temperaturas da corrente processual à entrada e à saída no arranque. ....	42

Figura 3.19- Caudais das correntes processuais das diferentes fornalhas. ....	43
Figura 3.20- Consumo de FO nas diferentes fornalhas. ....	44
Figura 3.21- Consumo de FG nas diversas fornalhas. ....	45
Figura 4.1- Esquema simplificado do balanço mássico realizado a cada uma das fornalhas. .....	48
Figura 4.2- Esquema do balanço de energia realizado às fornalhas.....	50
Figura 4.3- Valores dos rendimentos térmicos calculados e os rendimentos dados pelo simulador durante o período de funcionamento normal. ....	54
Figura 4.4- Valores dos rendimentos térmicos calculados e os rendimentos dados pelo simulador durante o arranque. ....	55
Figura 4.5- Variação dos rendimentos calculados de todas as fornalhas após a paragem. ..	56
Figura 4.6- Rendimento da zona de radiação de cada fornalha para os dois períodos de funcionamento. ....	57
Figura 4.7- Percentagem de vaporização da corrente processual à saída de cada uma das fornalhas. ....	58
Figura 5.1- Temperatura dos gases de combustão à saída da fornalha H0101. ....	60
Figura 5.2- Rendimento térmico da fornalha H0101 durante o funcionamento normal. ....	60
Figura 5.3- Coeficiente de excesso de ar da fornalha H0301 durante o funcionamento normal. ....	61
Figura 5.4- Rendimento térmico da fornalha H0301 durante o funcionamento normal. ....	62
Figura 5.5- Temperatura dos gases de combustão à saída da fornalha H0471. ....	63
Figura 5.6- Rendimento térmico da fornalha H0471 durante o funcionamento normal. ....	64

## Índice de tabelas

Tabela 3.1- Composição do FG que alimenta as fornalhas nos dois períodos de funcionamento analisados. ....	18
Tabela 3.2-Parâmetros e indicadores do Fuel Gás. ....	18
Tabela 3.3- Composição do FO que alimenta as fornalhas durante os dois períodos de funcionamento analisados. ....	19
Tabela 3.4– Parâmetros e indicadores do Fuel Óleo. ....	20
Tabela 3.5- Temperaturas de entrada do Fuel Óleo nas fornalhas para o período de funcionamento normal. ....	33
Tabela 3.6- Temperaturas de entrada do Fuel Óleo nas fornalhas para o período de arranque. ....	33
Tabela 3.7- Temperaturas de entrada do Fuel Gás nas fornalhas para o período de funcionamento normal. ....	34
Tabela 3.8- Temperaturas de entrada do Fuel Óleo nas fornalhas para o período de arranque. ....	34
Tabela 3.9- Composições das correntes processuais das fornalhas da FAR. ....	40
Tabela 5.1- Comparação dos rendimentos térmicos das fornalhas com e sem a sugestão de melhoria. ....	65
Tabela 5.2- Percentagem da poupança de energia registada após a sugestão de melhoria energética. ....	65
Tabela 5.3- Rendimentos térmicos da fornalha H0101 para os diferentes funcionamentos atendendo o combustível consumido. ....	66
Tabela 5.4- Percentagem da poupança de energia registada após a sugestão de melhoria energética. ....	66
Tabela 5.5- Parâmetros económicos e energéticos para a realização da análise económica. ....	67
Tabela 5.6- Consumos de combustível e o gasto de operação do antes e depois da medida de melhoria energética. ....	68



## Lista de Siglas

FAR	Fábrica de Aromáticos
FCO	Fábrica de Combustíveis
FG	Fuel Gás
FLU	Fábrica de Lubrificantes
FO	Fuel Óleo
FOB	Fábrica de Óleos Base
FUT	Fábrica de Utilidades

## Nomenclatura

Símbolo	Descrição	Unidade
	Calor específico do componente i	/.
	Metano	-
	Etano	-
	Propano	-
	Hexano	-
C/H	Rácio entre a massa de carbono e a massa de hidrogénio	-
	Coeficiente de ar	-
	Energia fornecida à fornalha	/
	Energia das perdas por radiação e convecção	/
	Energia do calor sensível	/
ú	Energia útil fornecida à corrente processual	/
	Energia responsável pela vaporização	/
	Fuel Gás proveniente do topo da coluna T-0401	/
	Fuel Gás alimentado às fornalhas	/
	Fuel Gás de reciclo	/
	Fuel Gás de serviço da refinaria	/
	Energia libertada na combustão do componente i	/

	Entalpia da corrente processual	/	
	Entalpia de entrada do componente i	/	
	Entalpia de saída do componente i	/	
	Iso-Butano		-
	Iso-Pentano	/	-
	Caudal do componente i consumida na combustão	/	
	Caudal do componente i à entrada da fornalha	/	
	Caudal da corrente processual	/	
	Caudal do componente i gerada na combustão	/	
	Caudal do componente i	/	
	Massa molar do componente i	/	
	Caudal do componente i à saída da fornalha	/	
	Caudal de vapor da corrente processual		
	Butano		-
	Pentano		-
	Pressão atmosférica	/	
PCI	Poder calorífico inferior		
	Pressão de saturação do componente i		
	Pressão de vapor do componente i		o
	Temperatura do ar ambiente		
	Temperatura crítica do componente i		
	Temperatura de entrada		
	Temperatura de ebulição normal do componente i		o
é	Temperatura média		o
	Temperatura de referência		
	Temperatura de saída		o
	Temperatura de saída dos gases de combustão		
	Fração mássica do componente i	/	-
	Humidade específica		%
	Humidade relativa		

## Letras gregas

$\Delta$	Entalpia de vaporização do componente i	/
	Rendimento térmico médio com limpezas mensais	%
	Rendimento térmico da fornalha	%
	Rendimento da zona de convecção da fornalha	%
	Rendimento da zona de radiação da fornalha	%
	Ângulo do triângulo de Ostwald	°



# 1. Introdução

Esta dissertação está inserida no âmbito da disciplina de Tese/Dissertação, tendo como finalidade aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo do curso, através de um trabalho com grande componente técnica e teórica realizado em meio industrial, para a obtenção do grau de mestre. Este trabalho tem como objetivo a avaliação energética das fornalhas na Fábrica de Aromáticos da Refinaria de Matosinhos.

## 1.1 A Refinaria de Matosinhos (Galp Energia, 2013)

A Refinaria de Matosinhos pertence ao grupo Galp Energia. A sua criação remonta ao ano de 1933 com a criação da Sonap, uma empresa de capital francês e português, que tinha como principal objetivo o desenvolvimento da atividade comercial e distribuidora de produtos petrolíferos no mercado nacional e em algumas das ex-colónias, nomeadamente Angola e Moçambique. Nos anos que se seguiram e com o aparecimento de novas fontes de energia surgiram também várias empresas - a CRGE, a Sacor, a Cidla, a SPP e a Petrosul - que traçaram os destinos do setor energético em Portugal e que mais tarde deram origem à Galp Energia.

A Galp Energia foi constituída em 22 de abril de 1999 com o nome de GALP – Petróleos e Gás de Portugal, SGPS, S.A. tendo como principal objetivo explorar os negócios do petróleo e do gás. A Galp Energia agrupou a Petrogal, a única empresa refinadora e a principal distribuidora de produtos petrolíferos em Portugal, e a Gás de Portugal, empresa importadora, transportadora e distribuidora de gás natural nacional.

Atualmente, a Galp Energia é o único grupo integrado de produtos petrolíferos e gás natural de Portugal, com atividades que se estendem desde a exploração e produção de petróleo e gás natural, à refinação e distribuição de produtos petrolíferos, à distribuição e venda de gás natural e à geração e venda de energia elétrica.

O grupo empresarial Galp Energia, tem como estratégia a expansão das suas atividades não só em Portugal mas também à escala global, apostando em diversos projetos predominantemente em Espanha, Brasil, Angola, Venezuela, Moçambique, Cabo Verde, Guiné-Bissau, Suazilândia, Gâmbia, Timor-Leste, Uruguai e Guiné - Equatorial.

Localizada no concelho de Matosinhos, o complexo industrial da Refinaria de Matosinhos representada na figura 1.1, possui uma área total de cerca de 290 hectares e encontra-se ligado ao terminal de petroleiros no porto de Leixões através de uma extensa rede de oleodutos com uma extensão de aproximadamente 2 quilómetros. Possui também uma monobóia localizada ao largo oceânico facilitando desta forma o abastecimento da refinaria mesmo em condições adversas de mar, uma vez que os navios não necessitam de entrar no porto.



Figura 1.1- Vista aérea da Refinaria de Matosinhos (Galp Energia, 2013).

A Refinaria de Matosinhos iniciou a sua atividade em setembro de 1969 e atualmente emprega cerca de 600 colaboradores, sendo a refinaria mais completa da Galp Energia em termos de produtos, produzindo desde óleos base, lubrificantes, combustíveis até solventes e aromáticos com alto grau de pureza. A unidade fabril possui uma capacidade de processamento de petróleo bruto de 5,5 milhões de toneladas/ano, a refinaria conta com uma capacidade de armazenagem da ordem de 1 780 000 m<sup>3</sup>, dos quais cerca de 649 000 m<sup>3</sup> são para ramas de petróleo e 1 132 000 m<sup>3</sup> para produtos intermédios e finais. No complexo da refinaria existem também cerca de 1 250 km de tubagem, usada maioritariamente para o transporte de matéria-prima, produtos intermédios e produtos finais.

Os principais produtos com que a Refinaria de Matosinhos abastece o mercado são: propano, butano, gasolina sem chumbo, nafta química, petróleo de iluminação, petróleo carburante, jet A1, whitespirit, gasóleo, fuelóleo, óleos lubrificantes, massas lubrificantes, parafinas, ceras microcristalinas, benzeno, tolueno, ortoxileno, paraxileno, solventes aromáticos, solventes alifáticos, enxofre, betumes asfálticos e óleos base.

A refinaria é constituída por cinco fábricas distintas: Fábrica de Aromáticos (FAR), Fábrica de Combustíveis (FCO), Fábrica de Lubrificantes (FLU), Fábrica de Óleos Base (FOB), Fábrica de Utilidades (FUT). Estas fábricas são denominadas de acordo com os diferentes tipos de produtos que produzem.

## 1.2 A Fábrica de Aromáticos

Esta secção, referida à Fábrica de Aromáticos foi escrita tendo como base um documento interno da Refinaria de Matosinhos denominado, "Memória Descritiva, Fábrica de Aromáticos" do ano de 2006.

A Fábrica de Aromáticos (FAR), figura 1.2, iniciou o seu funcionamento em 1981 tendo como principal objetivo a produção de aromáticos, produzindo assim matéria-prima para a indústria química.



Figura 1.2- Fábrica de Aromáticos da Refinaria de Matosinhos (Galp Energia, 2013).

A matéria-prima da FAR é constituída essencialmente por duas correntes, ambas oriundas da Fábricas de Combustíveis. A principal corrente é denominada de reformado e permite alimentar a Unidade de Pré-destilação (U0100), sendo a segunda, uma corrente rica em benzeno que irá alimentar a Unidade Arosolvan (U0200). Além destas duas correntes a FAR recebe também diversas utilidades necessárias para o seu funcionamento tais como energia eléctrica, vapor de alta, média e baixa pressão, água de arrefecimento e serviço, ar de instrumentos e ar geral, Fuel Óleo, Fuel Gás, LPG entre outras. Estas utilidades provêm todas da Fábrica de Utilidades (FUT).

Com uma capacidade de tratamento de cerca de 850 000 t/ano de reformado, a FAR atinge uma produção total de cerca de 450 000 t/ano dos seus produtos sendo estes: o benzeno, tolueno, solventes aromáticos e alifáticos, para-xileno e orto-xileno.

O processo produtivo da FAR está dividido em várias unidades: Unidade de Pré-Destilação (U0100), Unidade de Arosolvan (U0200), Unidade de Parex (U0300), Unidade de Isomar (U0400), Unidade de Solventes (U0500), Unidade de Armazenagem (U0800) e a Unidade de Produção de Azoto (U0600).

De seguida é feita uma breve descrição do funcionamento de cada uma das unidades. O esquema simplificado do processo produtivo da FAR esta representado na figura 1.3.

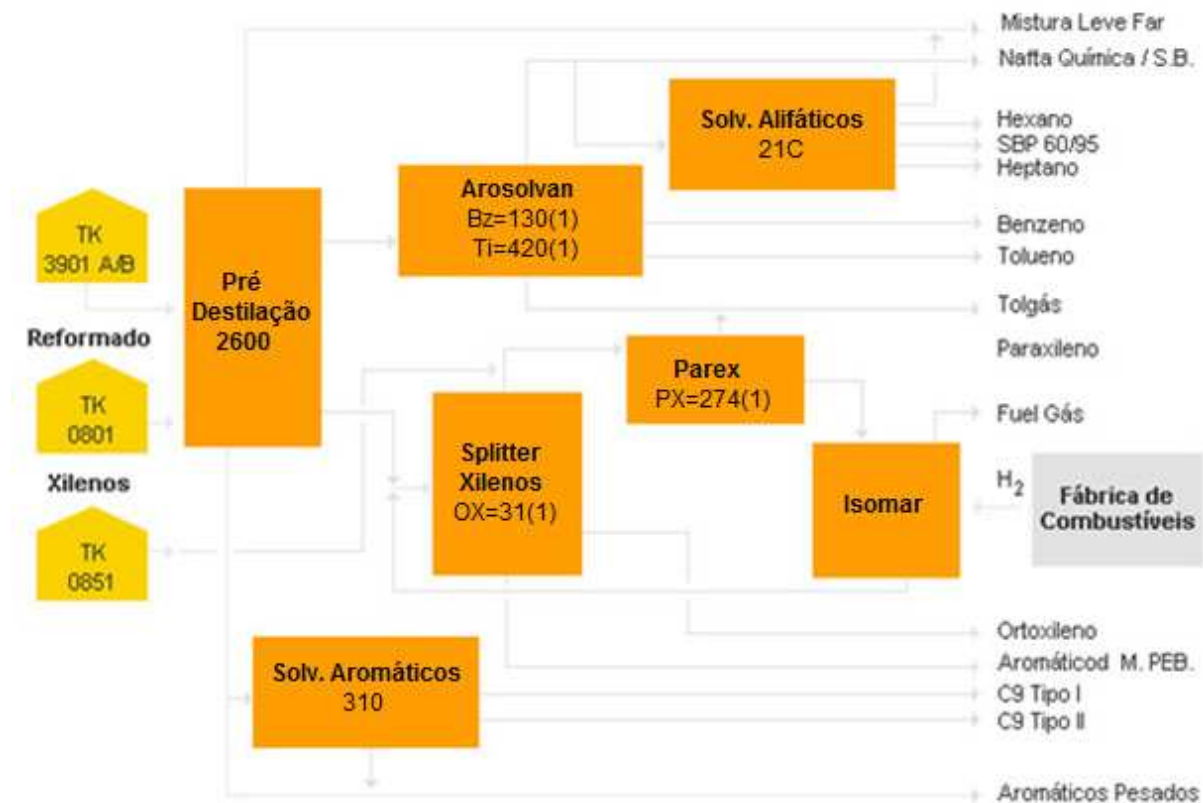


Figura 1.3- Esquema simplificado do processo produtivo da FAR (Galp Energia, 2013).

### Unidade de Pré-Destilação – U0100

A unidade U0100 separa a corrente da matéria-prima principal em três cortes que posteriormente serão usados em outras unidades.

Os produtos obtidos nesta unidade são as gasolinas leves (C5) que são encaminhadas para a produção de gasolinas, corte de C6/C7 que alimenta a U0200, o corte de C8's que é a carga para a U0300 e a U0400 e corte de C9 + que tem dois destinos possíveis a pool de gasolinas e a U0500.

### Unidade Arosolvan – U0200

Utilizando uma operação de extração líquido-líquido seguida de uma operação de destilação, esta unidade permite separar de uma corrente os aromáticos C6/C7 dos não aromáticos, obtendo como produtos benzeno e tolueno com alto grau de pureza.

### Unidade Parex – U0300

Na unidade U0300 é utilizada uma operação de extração sólido líquido numa coluna de adsorção. Esta operação tem como objetivo a adsorção seletiva do para - xileno a partir de uma carga de isômeros de xilenos. Para tal é usada uma coluna de adsorção de leito fixo sólido. A dessorção do paraxileno é feita através de lavagem da coluna com para - dietilbenzeno, que seguidamente é recuperado do extrato e do refinado por destilação. Da corrente extrato produz-se o para-xileno por destilação e a corrente de refinado é alimentada à Unidade Isomar.

### Unidade Isomar – U0400

A unidade U0400 promove a isomerização dos C8's aromáticos. A alimentação é proveniente do corte lateral do splitter de xilenos e um pequeno make up de hidrogénio. Na prática o etilbenzeno e o meta-xileno são parcialmente transformados em orto e para-xilenos até restabelecimento das proporções de equilíbrio dos C8's. O splitter de xilenos recebe a corrente de refinada da Unidade Parex e a carga fresca de xilenos provenientes da U0100. A corrente de fundo do splitter alimenta uma coluna de destilação obtendo-se orto-xileno de alta pureza.

### Unidade Solventes – U0500

A unidade U0500 produz uma vasta gama de solventes tais como hexano, heptano, solvente de estampanaria, C9+ tipo I e tipo II. Esta produção é conseguida através de quatro colunas de destilação, duas contínuas e duas descontínuas, que combinadas de diferentes formas tratam cortes alifáticos ou aromáticos.

### Unidade de Armazenagem – U0800

A FAR possui quatro tipos de armazenagem:

- \_ Produtos químicos (solventes processuais):
- \_ Alimentações intermédias;
- \_ Produtos em vias de produção (tanques testes);
- \_ Armazenagem final (tanques finais para produtos a expedir).

### Unidade Produção de Azoto – U0600

Nesta unidade é produzido azoto a partir do ar atmosférico que permite garantir a segurança das unidades de operação e também a qualidade dos produtos.

## **1.3 Objetivos do trabalho**

Os objetivos deste trabalho foram a avaliação e a otimização energética das fornalhas cilíndricas verticais da Fábrica de Aromáticos da Refinaria de Matosinhos, que usam como combustível Fuel Gás e Fuel Óleo. Esta avaliação compreendeu o período de funcionamento normal da unidade industrial e o período relativo ao arranque da fábrica, após paragem geral para manutenção, o que permitiu desenvolver um conjunto de ferramentas necessárias à otimização energéticas das fornalhas seguindo os seguintes pontos:

- Realização de um levantamento exaustivo de dados de todas as correntes/fluxos de entrada e saída dos equipamentos para posteriormente efectuar os balanços de massa e energia;

- Criação de um ficheiro no MS Excel programados com macros em Visual Basic para para cada fornalha, facilitando a caracterização das fornalhas e servindo de ferramenta para a avaliação e optimização energética;
- Caracterização das fornalhas através de diversos balanços de massa e energia, com o intuito de discriminar todas as correntes de entrada e saída das diferentes fornalhas, não só em termos mássicos mas também em termos energéticos;
- Obtenção do rendimento térmico de cada fornalha e a sua comparação com valores teóricos e do simulador processual;
- Obtenção do rendimento de cada zona de transferência de energia das fornalhas;
- Estimar a vaporização conseguida pelas fornalhas que funcionam como reebulidores;
- Enunciar medidas de optimização energética para o funcionamento das fornalhas e a sua análise económica.

## **1.4 Organização da dissertação**

Para além deste capítulo introdutório onde é descrito o local onde o trabalho foi realizado e os objectivos do trabalho, esta dissertação é composta por outros capítulos no sentido de expor todo o trabalho realizado.

No capítulo 2 é abordado o processo de refinação de petróleo mostrando qual a principal função das fornalhas neste processo. São também evidenciadas os diversos tipos de fornalhas existentes com especial ênfase para as características de construção.

O capítulo 3 diz respeito aos dados experimentais obtidos no estágio. Este capítulo é composto por duas partes principais. A primeira parte refere-se aos dados experimentais dos combustíveis e aos respetivos consumos associados à utilização das fornalhas. A segunda parte debruça-se sobre os restantes dados experimentais recolhidos, que foram também importantes para dar resposta aos objectivos previamente definidos.

No capítulo 4 são descritos os balanços de massa e energia efectuados para a obtenção do rendimento térmico das fornalhas. É também apresentada neste capítulo a avaliação energética realizada e a sua análise detalhada.

O capítulo 5 descreve as principais causas que influenciam o rendimento das fornalhas, evidenciando soluções com vista à sua optimização energética e simultaneamente é feita uma análise económica à solução com melhores resultados energéticos.

No capítulo 6 são referidas as principais conclusões do trabalho e é feita referência a propostas para futuros trabalhos a desenvolver.

## **2. A refinação do petróleo**

Na indústria petroquímica, o processo de refinação do petróleo é composto por diversas etapas que consomem grandes quantidades de energia. Neste tipo de indústria a maior parte da energia térmica necessária ao processo é fornecida através de equipamentos denominados fornalhas, sendo este tipo de equipamento o responsável pelo maior consumo energético numa refinaria, atingindo cerca de 75% do consumo total de energia (Zeta et al, 2000).

No processo de refinação do petróleo as fornalhas maioritariamente assumem a função de reebulidor das colunas de destilação. Deste modo, irão fornecer o calor necessário à corrente de fundo da coluna de destilação, para que esta opere corretamente promovendo assim a separação. Sendo que essa corrente pode atingir percentagens de vaporização que vão até 60% aquando da sua reentrada na coluna (Sinnot, 2010).

O uso de fornalhas em detrimento do uso de reebulidores típicos como o caso do reebulidor termossifão ou reebulidor de circulação forçada, é devido ao fato de existir a necessidade de transferir grandes quantidades de energia térmica promovendo a vaporização, a elevada temperatura a que a vaporização ocorre e também pelo grande caudal da corrente processual.

### **2.1 Tipos de fornalhas**

De uma forma simplificada as fornalhas são estruturas fechadas onde existe uma enorme produção de energia térmica proveniente da queima de combustível. Grande parte dessa energia térmica é transferida para um determinado produto, sendo a restante libertada com os fumos provenientes da combustão e ainda perdida pelas paredes da fornalha. (Mullinger e Jenkins, 2008). Um esquema simplificado de uma fornalha encontra-se representado na figura 2.1.

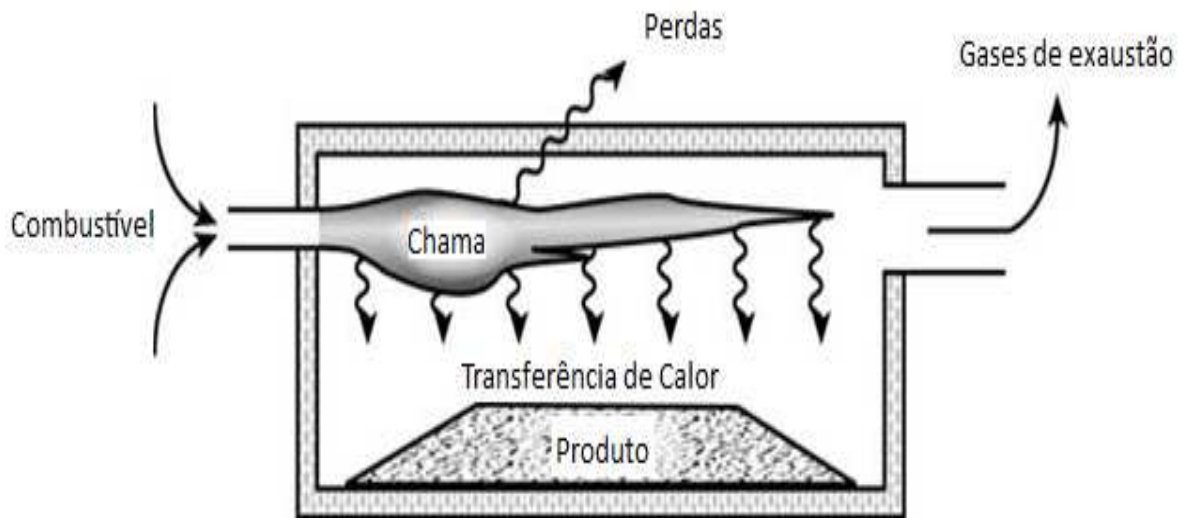


Figura 2.1- Esquema do conceito de fornalha (Mullinger e Jenkins, 2008).

Existem vários tipos de construção de fornalhas e estas podem ter diversos tipos de classificações. Essa classificação pode ter como base vários aspectos, desde o tipo de combustível que a fornalha utiliza, ao uso que tem na indústria ou até mesmo a sua geometria. Tendo como base a geometria, os dois tipos mais usuais que se podem encontrar na indústria de refinação de petróleo são:

- \_ Fornalhas retangulares longas, que possuem uma série de queimadores ao longo da base da fornalha;
- \_ Fornalhas cilíndricas verticais com um queimador central ou um anel de queimadores na base (Mullinger e Jenkins, 2008)

A Fábrica de Aromáticos possui oito fornalhas, sendo todas elas cilíndricas verticais. A figura 2.2 ilustra um exemplo de cada um dos tipos usuais de fornalhas.



Figura 2.2- Exemplo de uma fornalha cilíndrica vertical (esquerda) e de uma fornalha retangular longa (direita) (Mullinger e Jenkins, 2008).

A construção básica das fornalhas verticais consiste numa câmara em aço que dá a forma exterior da fornalha, reforçada termicamente pelo interior com tijolo refratário formando uma parede (Trinks et al, 2004). Neste tipo de fornalhas os tubos que transportam a corrente processual, entram na horizontal no corpo da fornalha por uma zona junto ao início da chaminé para que se faça um aquecimento prévio dessa corrente. De seguida os tubos saem do corpo da fornalha fazendo uma curva em direção à base da mesma, reentrando na fornalha junto às paredes internas, formando feixes horizontais ou verticais conforme o seu design. O aspeto esquemático das fornalhas da FAR pode ser visto na figura 2.3.

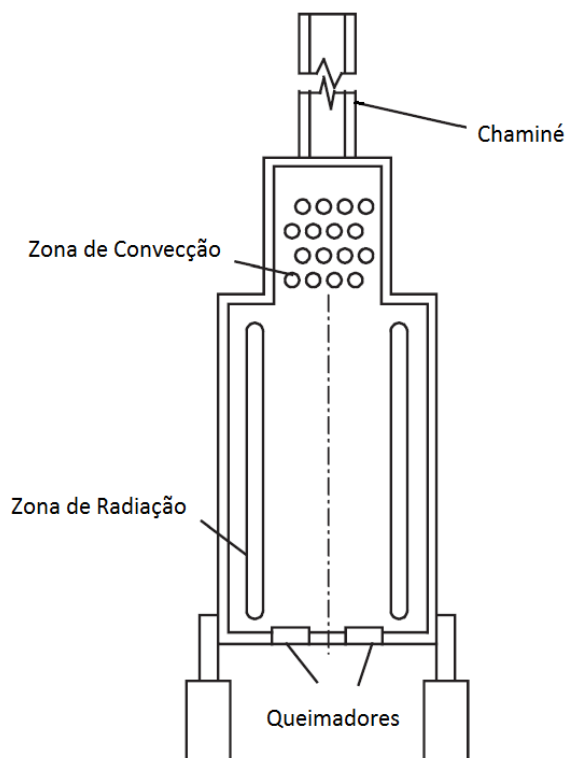


Figura 2.3– Esquema de uma fornalha vertical (Jegla et al, 2000).

As fornalhas são constituídas por três secções no que diz respeito à sua constituição, embora a transferência de calor para a corrente processual só aconteça em duas dessas zonas. A primeira zona é a zona de radiação, e tal como o nome indica o mecanismo predominante de transferência de calor é a radiação devido às altas temperaturas que aí se fazem sentir. É aqui que estão colocados os queimadores da fornalha e onde se encontra a câmara de combustão, ou seja, é aqui que se realiza a combustão e é nesta zona onde há maior quantidade de energia térmica transferida. A segunda zona denomina-se zona de convecção e o mecanismo predominante de transferência de calor é a convecção. A terceira zona é a chaminé, sendo a sua função a de conduzir os gases de combustão para fora da câmara de combustão da fornalha, não existindo qualquer transferência de calor nesta zona para a corrente processual. Existe ainda uma outra zona, que por se encontrar fora do corpo da fornalha, não foi contabilizada anteriormente. Esta é denominada de zona de crossover e é aqui que os tubos que transportam a corrente processual, fazem a passagem da zona de convecção para a zona de radiação. No caso particular da FAR existem duas fornalhas, (H0303 e a H0401), que só possuem zona de radiação para a transferência de calor. As restantes fornalhas, (H0101, H0301, H0302, H0402, H0471 e H0472), além da zona de radiação possuem também zona de convecção.

## 2.2 Eficiência energética de fornalhas

O conceito de eficiência no que diz respeito às fornalhas é definido essencialmente pela determinação do seu rendimento. No sentido de aumentar os ganhos térmicos de uma fornalha é importante analisar o valor deste indicador. O rendimento de fornalhas ( $\eta$ ) é definido como sendo o quociente entre a energia útil que se consegue aproveitar e a energia total que foi fornecida a fornalha, tal como definido na equação 2.1.

$$\eta = \frac{E_{\text{ú}}}{E_{\text{total}}} \quad (2.1)$$

Neste tipo de sistemas a energia útil ( $E_{\text{ú}}$ ), é definida como a energia que a corrente processual recebe e na prática é calculada de forma indireta como sendo a diferença entre a energia total que entrou no sistema e as respetivas perdas. Relativamente à energia fornecida ( $E_{\text{total}}$ ), é definida como sendo o somatório das entalpias de todos os componentes que entram na fornalha e o calor associado à queima do combustível assumindo esta parcela o valor de maior peso. Esta eficiência resultará sempre num valor inferior à unidade, devido às inevitáveis perdas que existem no sistema. As perdas térmicas existentes que se fazem notar neste tipo de sistemas são as perdas por radiação e convecção e as perdas associadas aos gases de combustão formados.

Para a determinação da eficiência de uma fornalha será necessário realizar balanços de massa e de energia. De forma generalizada o balanço de massa e energia em estado estacionário são definidos pelas equações 2.2 e 2.3 respetivamente.

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dots + \dot{m}_n = \dot{m}_1' + \dot{m}_2' + \dots + \dot{m}_n' \quad (2.2)$$

Onde:

- Caudal do componente i à entrada da fornalha (t/d).
- Caudal do componente i consumida na reação (t/d).

- Caudal do componente i gerada na reação (t/d).

- Caudal do componente i à saída da fornalha (t/d).

$$+ = + + \dot{u} \quad (2.3)$$

Onde:

- Entalpia do componente i à entrada da fornalha (kJ/d).

- Entalpia de combustão (kJ/d).

-Entalpia do componente i à saída da fornalha (kJ/d).

- Energia perdida associada às perdas por radiação e convecção (kJ/d).

$\dot{u}$  - Energia transferida para a corrente processual (kJ/d).

Devido ao grande consumo energético das fornalhas e ao seu elevado peso no total de energia consumida na indústria de refinação de petróleo, diversos estudos têm vindo a ser realizados tendo como objetivo a melhoria da respectiva eficiência energética. Dado o grande consumo de energia envolvido, mesmo uma pequena melhoria poderá resultar numa grande poupança.

A maior parte dos estudos realizados, tem como base o aproveitamento térmico de correntes, que anteriormente seriam completamente desprezadas. É o caso do aproveitamento energético dos gases de combustão que como possuem grande energia térmica, podem ainda ser utilizados por exemplo no pré-aquecimento do ar usado para a combustão. Este aproveitamento térmico normalmente é feito tendo como base a integração de processos através do método do Pinch (Jegla et al, 2000).

Outra abordagem seguida por Bussman e Baukal foca-se nas condições de funcionamento das fornalhas, já que a grande maioria opera no exterior, sendo o seu rendimento influenciado pelas condições ambientais (Bussman e Baukal, 2009). Esta abordagem baseia-se nas implicações que as mudanças climáticas relativamente à humidade e temperatura possam ter na quantidade do ar usado para a combustão.

### **3. Levantamento energético das fornalhas da FAR**

O trabalho desenvolvido nesta dissertação na Fábrica de Aromáticos da Refinaria de Matosinhos consistiu na realização de um estágio com a duração de 5 meses e passou por várias fases.

Na fase inicial deste trabalho foram efetuadas visitas guiadas à unidade industrial, com o intuito de se obter uma melhor perceção do processo industrial e do funcionamento das fornalhas. Paralelamente a estas visitas foi feito o estudo prévio dos diagramas do processo (P&I – Piping and instrumentation) das várias unidades para determinar quais os parâmetros que são controlados no processo e a maneira como são referenciados. Esta análise foi muito importante para saber utilizar o software de aquisição de dados.

Na segunda fase do trabalho foi feito o levantamento de dados e o seu tratamento através da realização de balanços de massa e energia. Este tratamento permitiu o cálculo do rendimento das várias fornalhas e ainda a análise de outros parâmetros importantes na avaliação do funcionamento das fornalhas. Simultaneamente foi criado para cada uma das fornalhas, um ficheiro MS Excel previamente programado com macros em Visual Basic, fornecendo todos os dados experimentais e resultados da avaliação da performance das fornalhas. Estes ficheiros tornaram o processo de obtenção dos dados experimentais e dos resultados muito expedito e simplificado.

Por fim, na terceira fase foi efetuada a análise dos resultados obtidos para a formulação de medidas, com vista à melhoria energética das fornalhas da FAR.

#### **3.1 Dados Experimentais**

Na tentativa de obter medidas para aumentar a eficiência energética, conduzindo a uma diminuição de consumos, foi feito um levantamento energético exaustivo das instalações fabris.

Nesta secção encontra-se uma análise dos combustíveis utilizados na Fábrica de Aromáticos, o levantamento de todos os dados experimentais fundamentais para os balanços de massa e energia e mais detalhadamente o levantamento energético dos consumos de todas as fornalhas que operam na Fábrica de Aromáticos. O levantamento energético e dos dados experimentais foram divididos em duas partes distintas, a primeira

parte do levantamento corresponde ao período normal de funcionamento da fábrica e a segunda parte corresponde ao período de arranque da fábrica, após manutenção. O levantamento respeitante ao período normal de funcionamento foi efectuado para o ano de 2012 entre janeiro e setembro, visto que a fábrica suspendeu a atividade no final do mês de setembro iniciando, o período de paragem para manutenção dos equipamentos das unidades. O levantamento respeitante ao arranque compreendeu o período entre o mês de dezembro de 2012 e o mês de março de 2013.

### **3.1.1 Características dos combustíveis**

A escolha do combustível a ser utilizado numa fornalha é uma decisão bastante importante a ser tomada desde o seu projeto, visto que o consumo de combustível traduz-se na maior parcela nos custos de operação de qualquer fornalha (Mullinger e Jenkins, 2008).

Normalmente a Fábrica de Aromáticos consome dois tipos distintos de combustível, o Fuel Óleo (FO) e o Fuel Gás (FG). O Fuel Gás é um combustível no estado gasoso composto maioritariamente por hidrogénio e metano, possuindo também outros hidrocarbonetos em menor quantidade que vão desde o propano até ao pentano.

O Fuel Óleo é um combustível composto por hidrocarbonetos de cadeia longa, que lhe confere uma grande viscosidade a temperaturas mais baixas, sendo necessário um aquecimento prévio para o seu transporte nas tubagens. Para transformar os combustíveis em energia térmica através da sua combustão é utilizado um equipamento denominado de queimador. Consoante o queimador existente, as fornalhas podem consumir qualquer um dos tipos de combustíveis isoladamente ou até consumir os dois combustíveis em simultâneo. Na FAR todas as fornalhas estão equipadas com queimadores que consomem Fuel Óleo e Fuel Gás, a única exceção é a fornalha H0303 que está equipada com queimadores que só operam com Fuel Gás.

Sendo os combustíveis a fonte de energia alimentada às fornalhas, tornou-se assim bastante importante efetuar uma análise detalhada aos combustíveis, focando as suas principais propriedades através dos seus parâmetros energéticos e ambientais.

## Fuel Gás

O Fuel Gás é o combustível gasoso usado para alimentar as fornalhas da FAR e caracteriza-se por ser uma mistura de três correntes de gás. É utilizado o Fuel Gás de serviço da refinaria fornecido pela Fábrica de Utilidades (FUT), juntamente com uma corrente de gás proveniente do produto de topo da coluna T-0401 e uma outra corrente de gás de reciclo proveniente da unidade processual U0400. Estas três correntes são encaminhadas para o acumulador D-0405, misturam-se e daí resulta o Fuel Gás que alimenta as fornalhas da Fábrica de Aromáticos - . Na figura 3.1 está representado o esquema simplificado circuito do Fuel Gás na Fábrica de Aromáticos.

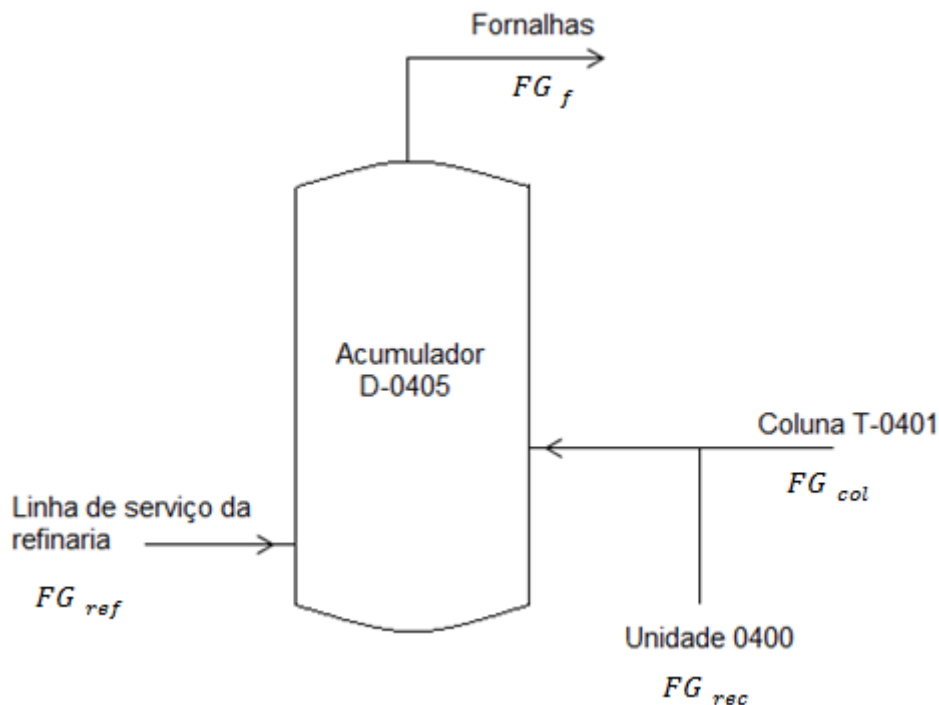


Figura 3.1- Esquema simplificado do circuito de Fuel Gás da FAR.

Na tabela 3.1 estão representadas as composições do Fuel Gás que alimenta as fornalhas nos dois períodos de funcionamento em estudo. Estas composições foram obtidas por balanço de massa ao acumulador D-0405 e os cálculos podem ser consultados no anexo A.1.

Tabela 3.1- Composição do FG que alimenta as fornalhas nos dois períodos de funcionamento analisados.

Componente	Funcionamento normal (%molar)	Arranque (%molar)
H <sub>2</sub> S	0,07	0,07
H <sub>2</sub>	31,0	30,1
C <sub>1</sub>	39,0	26,3
C <sub>2</sub>	9,4	13,3
C <sub>3</sub>	7,8	11,9
iC <sub>4</sub>	4,1	5,9
nC <sub>4</sub>	4,2	9,0
iC <sub>5</sub>	1,1	1,5
nC <sub>5</sub>	0,6	0,7
C <sub>6</sub>	0,4	0,3
N <sub>2</sub>	0,6	0,7
CO <sub>2</sub>	0,5	0,2

Pela análise da tabela 3.1 verifica-se que o Fuel Gás alimentado às fornalhas possui diversos compostos na sua composição. O hidrogénio e o metano têm a maior contribuição da composição do Fuel Gás que alimenta as fornalhas. Comparando os resultados do funcionamento normal e do arranque constata-se que no arranque a contribuição do metano desceu em relação ao período de funcionamento normal.

De seguida são apresentados na tabela 3.2 alguns parâmetros e indicadores caraterísticos do Fuel Gás que alimenta as fornalhas. Os cálculos podem ser consultados no anexo B.1.1.

Tabela 3.2-Parâmetros e indicadores do Fuel Gás.

C/H (m/m)	3,4
PCI (GJ/t)	48,9
CO <sub>2</sub> /Hc <sub>FG</sub> (kg/GJ)	55,8
Ar estequiométrico/Hc <sub>FG</sub> (kg/GJ)	412

## Fuel Óleo

O Fuel Óleo é o combustível líquido fornecido às fornalhas para a combustão, sendo alimentado diretamente da linha de serviço da refinaria abastecida pela FUT. Este combustível resulta da destilação do petróleo e pode ser dividido em diversas categorias com base na sua viscosidade. O Fuel Óleo utilizado na FAR é classificado como combustível residual (Mullinger e Jenkins, 2008), sendo assim denominado de Fuel Óleo pesado e caracteriza-se por ter um alto teor de enxofre quando comparado com o Fuel Gás. Em termos de combustão nas fornalhas, este tipo de combustível necessita de ser atomizado com vapor de água saturado. Ao atomizar o Fuel Óleo em pequenas gotículas irá ser aumentada a área de contato do combustível com o comburente resultando numa queima mais eficiente. Na tabela 3.3 estão representadas as composições do Fuel Gás nos dois períodos de funcionamento em estudo. Os valores foram fornecidos pelo laboratório da refinaria de Sines.

Tabela 3.3- Composição do FO que alimenta as fornalhas durante os dois períodos de funcionamento analisados.

Composição	Funcionamento normal (% m/m)	Arranque (% m/m)
Carbono	86,4	87,0
Hidrogénio	10,8	10,9
Azoto	0,6	0,7
Enxofre	1,7	1,7

Analisando a tabela 3.3 conclui-se que o carbono é o principal componente na composição do Fuel Óleo. Comparando os dois períodos de funcionamento verifica-se que praticamente não existem variações na composição do Fuel Óleo entre o funcionamento normal e o arranque.

Seguidamente são apresentados na tabela 3.4 alguns parâmetros e indicadores característicos do Fuel Óleo. Os cálculos podem ser consultados no anexo B.1.2.

Tabela 3.4– Parâmetros e indicadores do Fuel Óleo.

C/H (m/m)	8,0
PCI (GJ/t)	40,4
CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O/Hc <sub>FO</sub> (kg/GJ)	76,4
Ar estequiométrico/Hc <sub>FO</sub> (kg/GJ)	416

Analisando e comparando os dados representados na tabela 3.2 e 3.4 verifica-se que o coeficiente C/H do Fuel Óleo é bastante superior ao do Fuel Gás, este aspeto indica que o Fuel Óleo é o combustível com maior quantidade de carbono na sua constituição. Relativamente ao poder calorífico inferior constata-se que o Fuel Gás necessita de menos massa para libertar a mesma quantidade de energia na reacção de combustão. Os restantes dois parâmetros, tal como o poder calorífico inferior, referem-se a características da própria reacção de combustão. Deste modo verifica-se que para a mesma quantidade de energia libertada na reacção, o Fuel Gás necessita de uma menor quantidade de ar para uma combustão completa e estequiométrica e que forma uma menor massa de dióxido de carbono quando comparado com o Fuel Óleo, apresentando este último uma diferença bastante significativa.

### 3.1.2 Consumos de energia

O primeiro passo para conseguir responder aos objetivos deste trabalho foi fazer um estudo dos consumos existentes na FAR relacionados com as fornalhas. Desta forma foi possível quantificar e avaliar os consumos de combustível das fornalhas presentes na FAR e o quanto isso representa em termos energéticos. Todos os valores calculados e apresentados nesta secção podem ser consultados no anexo B.2.

#### Período de funcionamento normal

Na figura seguinte - figura 3.2 – representa-se o consumo total no ano de 2012 de combustíveis, Fuel Óleo e Fuel Gás, nas fornalhas da FAR.

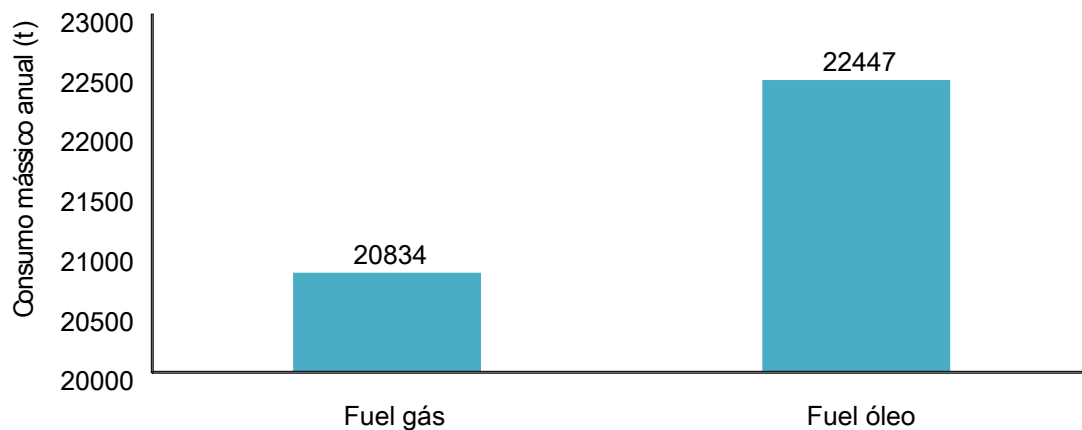


Figura 3.2- Consumo de Fuel Óleo e Fuel Gás durante o funcionamento normal.

Com os consumos mássicos de combustíveis e os respetivos poderes caloríficos facilmente se podem verificar os consumos energéticos tal como representado na figura 3.3. Esta figura traduz a distribuição da energia consumida de acordo com o combustível queimado. Os valores obtidos encontram-se no anexo B.2.

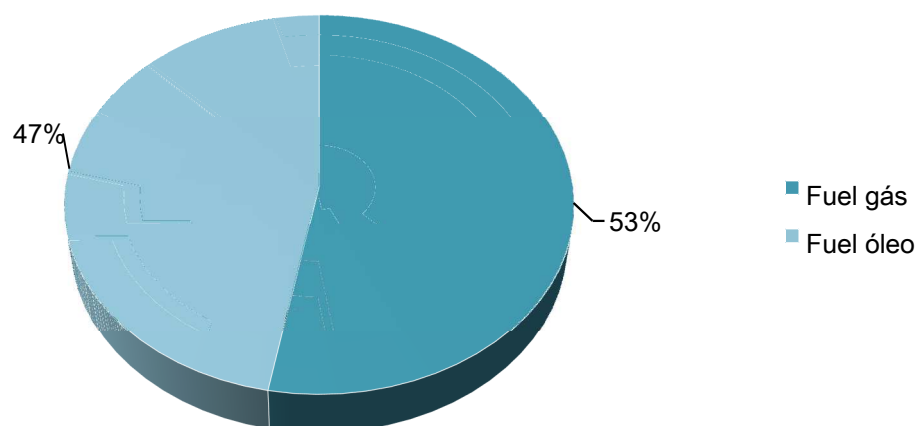


Figura 3.3- Distribuição da energia consumida nas fornalhas por combustível durante funcionamento normal.

Quanto aos consumos mássicos de combustível e a respetiva energia libertada na combustão, verificou-se existir um maior consumo de Fuel Óleo, durante o funcionamento

normal da fábrica como está evidenciado na figura 3.2. No entanto, este fator não se traduziu num maior consumo energético. Bem pelo contrário, como pode ser visualizado na figura 3.3, o maior consumo energético foi proveniente da combustão do FG.

Na figura 3.4 estão representados os consumos diários energéticos médios diários em cada mês de todas as fornalhas da FAR, durante o período de funcionamento normal.

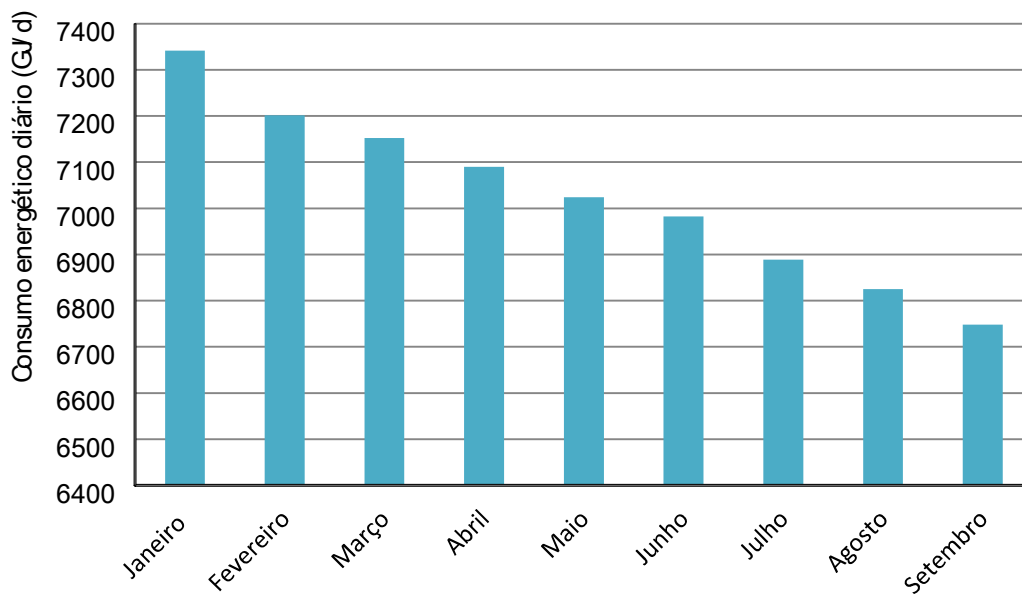


Figura 3.4- Consumos energéticos médios das fornalhas da FAR durante o funcionamento normal.

Fazendo a retrospectiva de como foi o consumo ao longo do período de funcionamento normal da FAR, verifica-se pela figura 3.4 que o consumo energético na fábrica teve sempre uma tendência decrescente ao longo dos meses, tendo como valor máximo de consumo o mês de janeiro e no final do período, em setembro, a FAR obteve o valor do consumo mais baixo.

O valor do consumo médio diário apresentado em cada mês é correspondente ao consumo energético de todas as oitos fornalhas da FAR. Sabendo qual a massa de combustível gasto em cada fornalha e através do valor do PCI foi possível calcular o consumo energético diário em cada fornalha. A partir dos consumos obtidos pode-se efetuar uma comparação mais detalhada das diversas fornalhas e apresenta-se na figura 3.5 a percentagem de cada fornalha no consumo global diário.

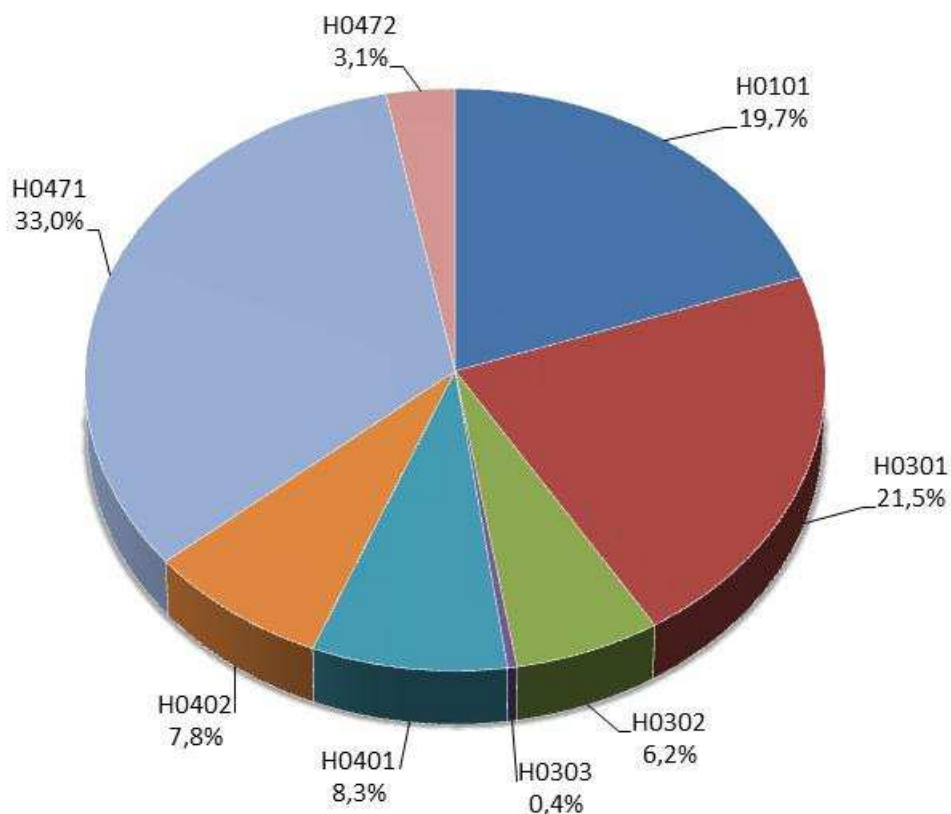


Figura 3.5- Distribuição dos consumos energéticos médios diários pelas fornalhas da FAR em funcionamento normal.

Relativamente aos consumos energéticos relativos a cada um dos equipamentos, analisando a figura 3.5 verifica-se que existe uma fornalha, a H0303, que tem um consumo quase insignificante no consumo global. Verificou-se também que existem três fornalhas (H0471, H0301 e H0101) que são claramente mais consumidoras que as outras, perfazendo as três fornalhas 74,2 % do consumo total diário da FAR. Isto implica que as oportunidades de diminuição de consumos, terão um maior efeito quando realizadas em qualquer uma destas três fornalhas. As restantes fornalhas (H0302, H0401, H0402 e H0472) têm um consumo moderado quando comparadas com as três mais consumidoras, perfazendo as quatro um total de 25,4% do consumo total diário.

### Período de arranque

Na figura 3.6 encontra-se o consumo total de combustíveis, Fuel Óleo e Fuel Gás no período de arranque (Dezembro de 2012 a Março de 2013), nas fornalhas da FAR.

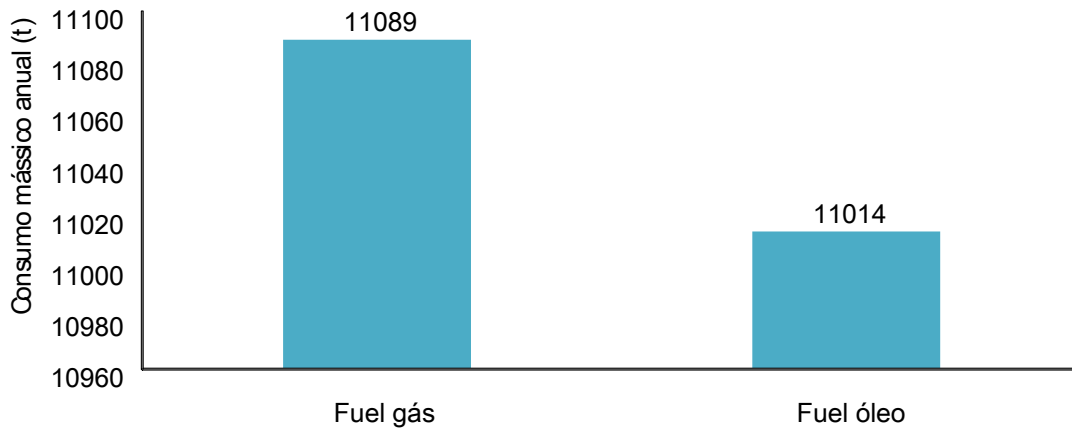


Figura 3.6– Consumo total de Fuel Óleo e Fuel Gás durante o período de arranque.

Com os consumos de combustíveis e os respetivos poderes caloríficos facilmente se pode verificar os consumos energéticos, tal como representado na figura 3.7, que traduz a distribuição da energia consumida de acordo com a sua fonte de combustível durante o período de arranque. Estes cálculos podem ser confirmados no anexo B.2.

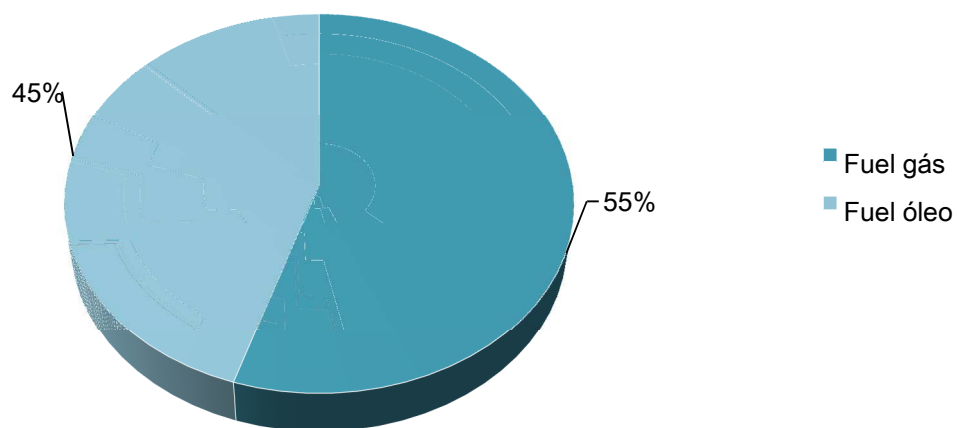


Figura 3.7- Distribuição da energia consumida nas fornalhas por combustível durante o arranque.

Analisando as figuras 3.6 e 3.7 é possível afirmar que no período de arranque, ao contrário do que aconteceu durante o funcionamento normal, existe um maior consumo mássico de Fuel Gás do que de Fuel Óleo. Relativamente ao consumo energético a maior percentagem da energia foi fornecida pela combustão do Fuel Gás e constatou-se que durante o

arranque, o consumo de energia em percentagem proveniente da combustão do Fuel Gás, foi maior do que durante o funcionamento normal, não sendo muito significativa esta diferença.

Na figura 3.8 estão representados os consumos energéticos médios diários em cada mês de todas as fornalhas da FAR durante o período de arranque.

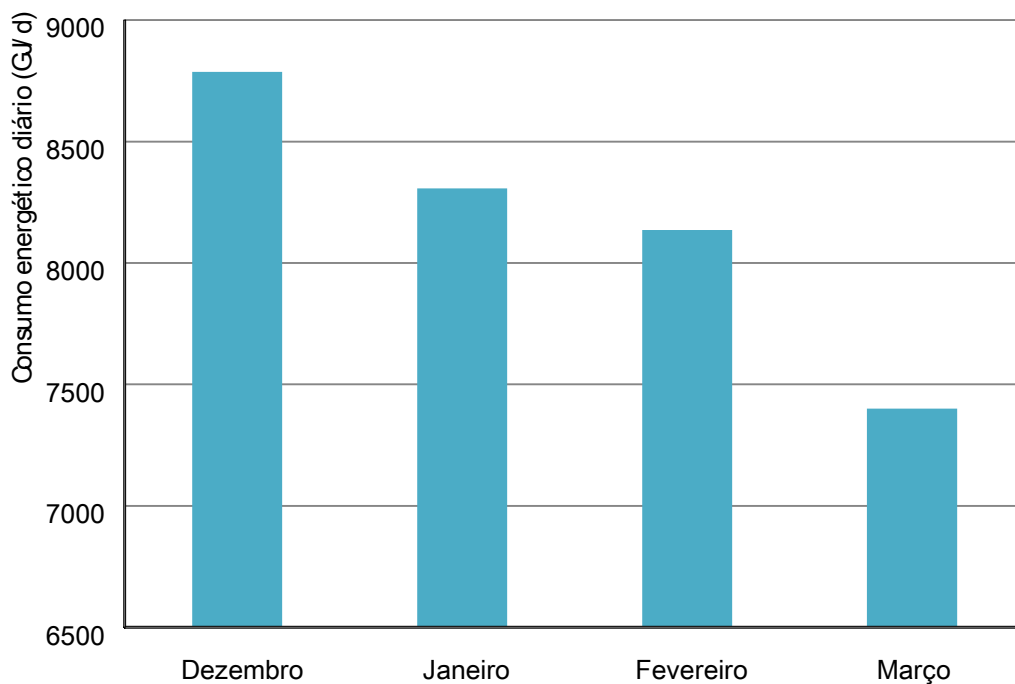


Figura 3.8-Consumos energéticos médios das fornalhas da FAR durante período de arranque.

O consumo ao longo do arranque foi diminuindo tal como demonstra a figura 3.8, mas é importante salientar que durante este período o consumo energético é bastante superior ao consumo verificado durante o funcionamento normal. Um parâmetro importante a ter em conta é o consumo energético específico médio na fase do funcionamento normal e no arranque. Este consumo específico de energia tem em conta a energia consumida e a carga às fornalhas – caudais das correntes processuais. Para o arranque obteve-se um consumo energético específico de 0,81 GJ/t e para o funcionamento normal o valor obtido foi de 0,78 GJ/t.

Estes valores foram obtidos da seguinte forma:

- Calculou-se o valor médio do consumo energético verificado em cada um dos períodos de funcionamento;
- Dividiu-se esse valor pela soma dos valores médios dos caudais das correntes processuais de todas as fornalhas.

Por exemplo, para o caso do funcionamento normal, de acordo com as tabelas B.12 e B.30 obtêm-se:

- O valor médio do consumo energético sendo este igual a 7028 GJ/d;
- O valor médio de todos os caudais das fornalhas sendo este igual a 9039t/d.

Resultando no consumo energético específico de  $7028/9039 = 0,78\text{G/t}$ .

No caso do arranque e de acordo com a tabela B.13 e B.31 obtêm-se:

- O valor médio do consumo energético sendo este igual a 8158 GJ/d;
- O valor médio de todos os caudais das fornalhas sendo este igual a 10011 t/d.

Resultando no consumo energético específico de  $8158/10011 = 0,81\text{G/t}$ .

Pela figura conclui-se também que no mês de março, último mês da análise de arranque, o consumo verificado já se encontra próximo dos consumos do período de funcionamento normal. Indicando a possibilidade da estabilização do funcionamento das fornalhas terminando assim a fase de arranque.

Depois de apresentados os consumos totais das fornalhas e para ser possível efectuar uma comparação mais detalhada segue-se na figura 3.9 a apresentação da percentagem de cada fornalha no consumo global médio diário.

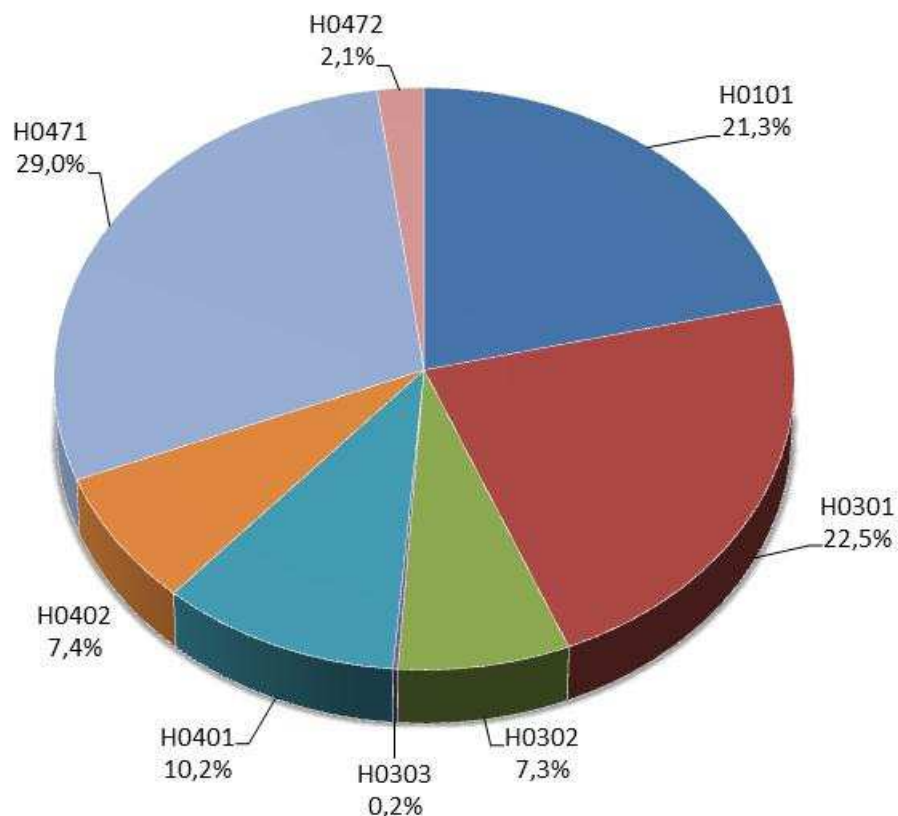


Figura 3.9- Distribuição dos consumos energéticos diários pelas fornalhas da FAR durante o arranque.

Relativamente aos consumos energéticos de cada um dos equipamentos durante o arranque, representado na figura 3.9, as fornalhas (H0471, H0301 e H0101), continuam a destacar-se das restantes pelo seu maior consumo. Embora estas três fornalhas percam algum peso no consumo global, relativamente ao período de funcionamento normal, ainda perfazem um total de 72,8 % do consumo energético total diário.

A fornalha H0303 continuou a ser a menos consumidora energeticamente.

As restantes fornalhas (H0302, H0401, H0402 e H0472), comparativamente ao anterior período, aumentaram a sua percentagem de consumo, perfazendo no arranque um total de 27,0% do consumo total diário da FAR.

## **3.2 Análise dos dados experimentais**

Após a exposição de todos os dados acerca dos combustíveis alimentados à FAR e aos consumos registados nos dois períodos em análise, neste ponto serão expostos e discutidos todos os dados experimentais necessários à realização dos balanços de massa e energia que irão conduzir aos resultados à avaliação energética das fornalhas da FAR. Serão também apresentados todos os dados que permitiram responder aos restantes objetivos deste trabalho. Os valores apresentados nesta secção podem ser consultados no anexo B.3.

### **3.2.1 Temperatura do ar ambiente**

As fornalhas presentes na FAR são de sucção natural de ar, isto significa que as fornalhas operam com pressões negativas no seu interior. Como não existe nenhum tipo de pré-aquecimento de ar, a temperatura do ar alimentado às fornalhas é a mesma da temperatura ambiente.

Esta temperatura é vital para determinar a energia associada à entrada do ar para a combustão e assim permitir a realização do balanço de energia.

Nas figuras 3.10 e 3.11 estão representadas as distribuições das temperaturas médias mensais do ar alimentado às fornalhas para o período de funcionamento normal e para o arranque respetivamente.

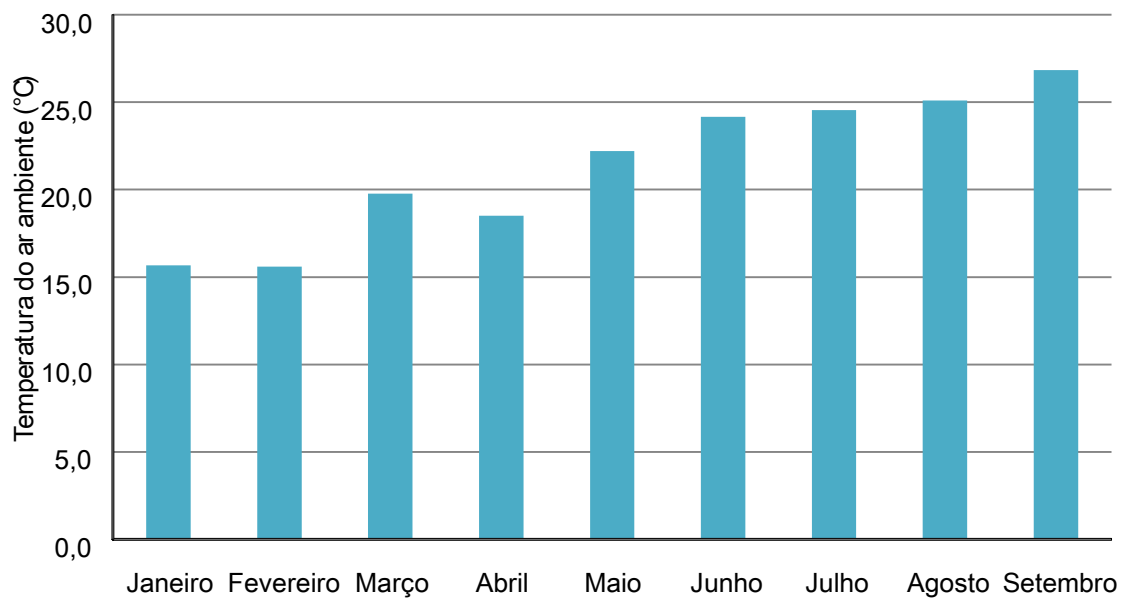


Figura 3.10- Temperatura média mensal do ar ambiente para o período de funcionamento normal.

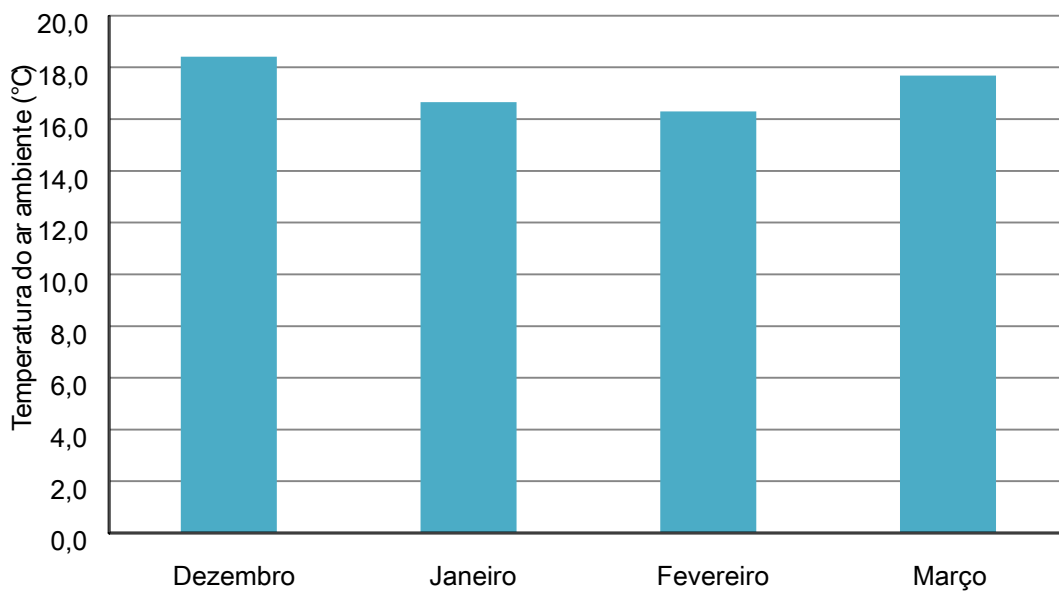


Figura 3.11- Temperatura média mensal do ar ambiente para o período de arranque.

Pela observação da figura 3.10 constata-se que durante o período do funcionamento normal da FAR a temperatura ambiente teve uma tendência crescente ao longo dos meses, em virtude das estações do ano. Janeiro e fevereiro registaram as temperaturas mais baixas,

15,7 °C e 15,6 °C respetivamente, por sua vez a temperatura mais elevada verificou-se no mês de Setembro com 26,8 °C.

Relativamente ao período de arranque, a figura 3.11 revela que a temperatura sofre pouca oscilação neste período. Os meses de janeiro e fevereiro à semelhança do período de funcionamento normal registaram as temperaturas mais baixas, todavia durante o arranque as temperaturas mantiveram-se sempre entre os 16°C e os 19°C.

### **3.2.2 Humidade relativa do ar**

Este parâmetro foi o único que não foi medido na Refinaria de Matosinhos e por isso para a obtenção das humidades relativas foi necessário recorrer a uma fonte externa à refinaria. Os dados relativos a esta propriedade foram obtidos via internet pela estação meteorológica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

A humidade no ar é um fator indesejável para o bom funcionamento das fornalhas visto que na reação de combustão, o vapor de água funciona como inerte. Saber a quantidade de água que entra com o ar alimentado às fornalhas é importante para a realização do balanço de massa. Em termos energéticos a entrada de vapor de água com o ar para a combustão irá diminuir o rendimento das fornalhas, esse vapor de água irá absorver energia libertada pela reação de combustão diminuindo assim a quantidade de energia transferida para a corrente processual.

Nas figuras 3.12 e 3.13 estão representadas as distribuições da média mensal da humidade relativa para o período do funcionamento normal da fábrica e para o período de arranque respetivamente.

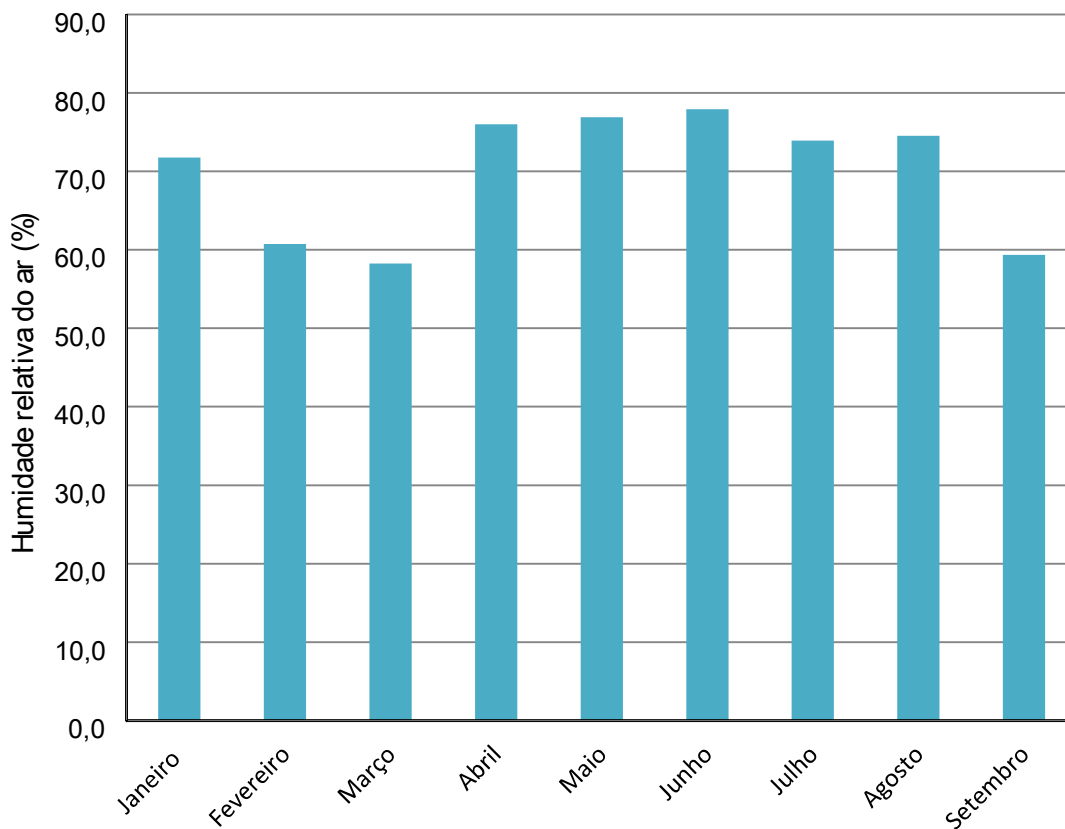


Figura 3.12- Humidade relativa média mensal do ar para o período de funcionamento normal.

Analisando a figura 3.12 verifica-se que durante o período de funcionamento normal a humidade relativa registou algumas oscilações no início mantendo seguidamente alguma regularidade. O mês com menor humidade relativa foi o mês de março com 58,3 %, de abril a agosto verificaram-se os valores mais elevados numa gama entre os 70% e os 80%.

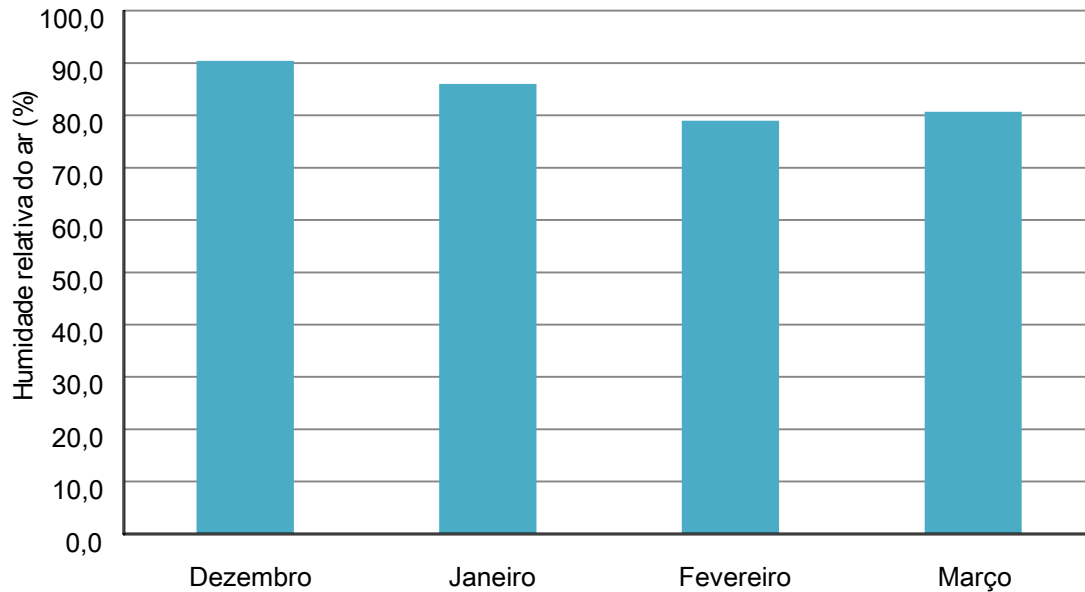


Figura 3.13- Humidade relativa do ar para o período de arranque.

Pela análise da figura 3.13 constata-se que durante o período de arranque comparativamente ao do funcionamento normal verificaram-se em todos os meses valores de humidade relativa mais elevados

### 3.2.3 Temperatura de entrada dos combustíveis

A temperatura de entrada dos combustíveis é um parâmetro bastante importante e deve ser controlada. Esta temperatura é medida e controlada antes de ser feita a distribuição de cada um dos combustíveis para as diferentes fornalhas. A sua importância neste trabalho deve-se ao fato de ser necessária para a realização do balanço energético. Mas no que diz respeito ao bom funcionamento da fornalha este parâmetro assume um importante papel, principalmente no caso do Fuel Óleo, devido à sua alta viscosidade a temperaturas baixas. Se o Fuel Óleo estiver a ser alimentado à fornalha a uma temperatura baixa, compromete não só o seu escoamento pela tubagem, mas mais importante ainda compromete a sua atomização no queimador. Uma deficiente atomização deste combustível diminui drasticamente a área de contato das gotículas formadas na atomização com o oxigénio, resultando numa combustão pouco eficiente. Nas tabelas 3.5 e 3.6 estão representados os valores médios da temperatura de entrada do Fuel Óleo nas fornalhas para os períodos de

funcionamento normal e arranque respetivamente. Os valores médios das temperaturas foram obtidos através da média aritmética dos valores diários registados pelo Aspen.

Tabela 3.5- Temperaturas médias de entrada do Fuel Óleo nas fornalhas para o período de funcionamento normal.

Meses	Temperatura de entrada do FO nas fornalhas (°C)
Janeiro	231,96
Fevereiro	232,00
Março	231,97
Abril	231,74
Maio	231,60
Junho	232,46
Julho	232,50
Agosto	232,47
Setembro	232,50

Tabela 3.6- Temperaturas médias de entrada do Fuel Óleo nas fornalhas para o período de arranque.

Meses	Temperatura de entrada do FO nas fornalhas (°C)
Dezembro	230,97
Janeiro	231,99
Fevereiro	231,83
Março	232,01

Analisando as tabelas 3.5 e 3.6, constata-se que a temperatura do Fuel Óleo pouco varia ao longo de qualquer um dos dois períodos em estudo. Embora haja algumas oscilações, estas são demasiado ténues. O Fuel Óleo é aquecido com um sistema de traçagem com vapor de média pressão a uma temperatura que deverá estar sempre muito próxima do valor de set-point definido.

O FG por sua vez é alimentado às fornalhas a uma temperatura próxima da temperatura ambiente. Nas tabelas 3.7 e 3.8 estão representados os valores da temperatura de entrada

do Fuel Gás nas fornalhas para os períodos de funcionamento normal e arranque respetivamente. Os valores médios das temperaturas foram obtidos através da média aritmética dos valores diários registados pelo Aspen.

Tabela 3.7- Temperaturas de entrada do Fuel Gás nas fornalhas para o período de funcionamento normal.

Meses	Temperatura de entrada na fornalha do FG (°C)
Janeiro	10,71
Fevereiro	10,35
Março	14,56
Abril	13,13
Maió	17,06
Junho	18,16
Julho	18,43
Agosto	19,26
Setembro	20,54

Tabela 3.8- Temperaturas de entrada do Fuel Óleo nas fornalhas para o período de arranque.

Meses	Temperatura de entrada na fornalha do FG (°C)
Dezembro	10,52
Janeiro	8,29
Fevereiro	8,04
Março	11,12

Pela análise dos resultados presentes nas tabelas 3.7 e 3.8 verifica-se que a temperatura do Fuel Gás tem uma tendência similar à temperatura do ar ambiente. A temperatura de entrada do FG nas fornalhas apresenta valores mais elevados para os meses mais quentes do ano, de Maio a Agosto. Relativamente ao arranque, as temperaturas registadas neste período são de uma forma geral mais baixas do que no período de funcionamento normal da fábrica.

### 3.2.4 Temperatura dos gases de combustão na entrada da zona de convecção

A temperatura dos gases de combustão na entrada da zona de convecção é obtida através da média aritmética dos valores lidos por dois termopares colocados no interior das fornalhas numa zona denominada de bridgewall, que é uma zona situada entre a secção de radiação e de convecção. Esta temperatura é típica das fornalhas que possuem as duas zonas de transferência de energia. Em fornalhas que na sua constituição só apresentam zona de radiação este parâmetro não existe, neste tipo de fornalhas a temperatura de saída coincide com a temperatura da zona de radiação. Esta temperatura assume uma grande importância para a avaliação energética de cada uma das zonas de transferência de calor. Na figura 3.14 estão representadas os valores médios da temperatura em cada fornalha para o período do funcionamento normal da fábrica e para o período de arranque respetivamente. Os valores apresentados correspondem a valores médios obtidos a partir de valores diários registados pelo Aspen, para cada um dos períodos de funcionamento em cada fornalha – anexo B.3.

Das oito fornalhas avaliadas apenas se referem seis, pois existem duas fornalhas (H0303 e a H0401), que não possuem zona de convecção na sua constituição.

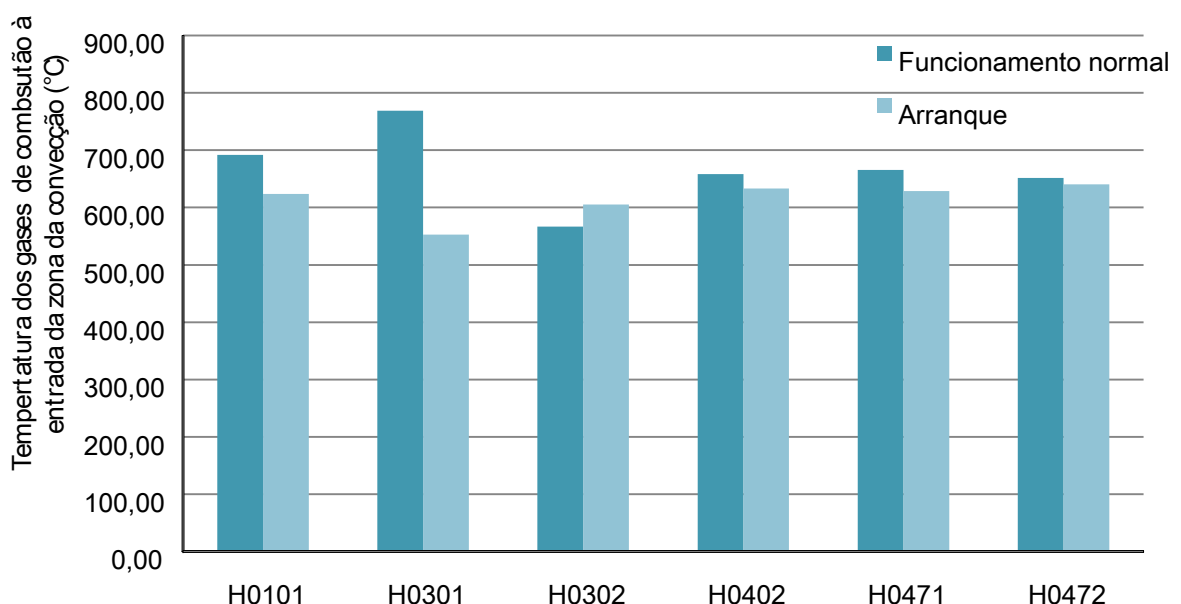


Figura 3.14- Temperatura média dos gases de combustão à entrada da zona de convecção das diferentes fornalhas para os dois períodos de funcionamento.

Analisando a figura 3.14 e pela comparação entre o período de funcionamento normal e o arranque verifica-se que a fornalha H0302 é a única que possui a temperatura em análise mais elevada no arranque do que no período de funcionamento normal. Todas as outras fornalhas apresentam comportamento oposto à H0302, temperatura dos gases de combustão à entrada da zona de convecção mais elevada durante o funcionamento normal do que no arranque. A temperatura mais elevada verifica-se na fornalha H0301 durante o funcionamento normal e a maior diferença da temperatura entre os dois períodos observa-se também nessa mesma fornalha, em que a diferença supera os 200°C.

### **3.2.5 Temperatura de saída dos gases de combustão da fornalha**

Para o cálculo do rendimento térmico das fornalhas a temperatura de saída dos gases de combustão da fornalha é um parâmetro fundamental. Esta temperatura é importante não só para a realização do balanço de energia ao permitir quantificar a energia dos gases de combustão que deixam a fornalha, mas também para controlar o funcionamento da mesma. Altas temperaturas dos gases de combustão indicam uma má transferência de energia para a corrente processual resultando em grandes perdas energéticas. Temperaturas dos gases de combustão muito baixas favorecem possíveis condensações na chaminé, que podem provocar corrosão se o combustível utilizado possuir alto teor em enxofre. Os valores médios da temperatura de saída dos gases de combustão em cada fornalha, para o período do funcionamento normal da fábrica e para o período de arranque estão representadas na figura 3.15. Os valores apresentados correspondem a valores médios obtidos, a partir de valores diários registados pelo Aspen, para cada um dos períodos de funcionamento em cada fornalha – anexo B.3.

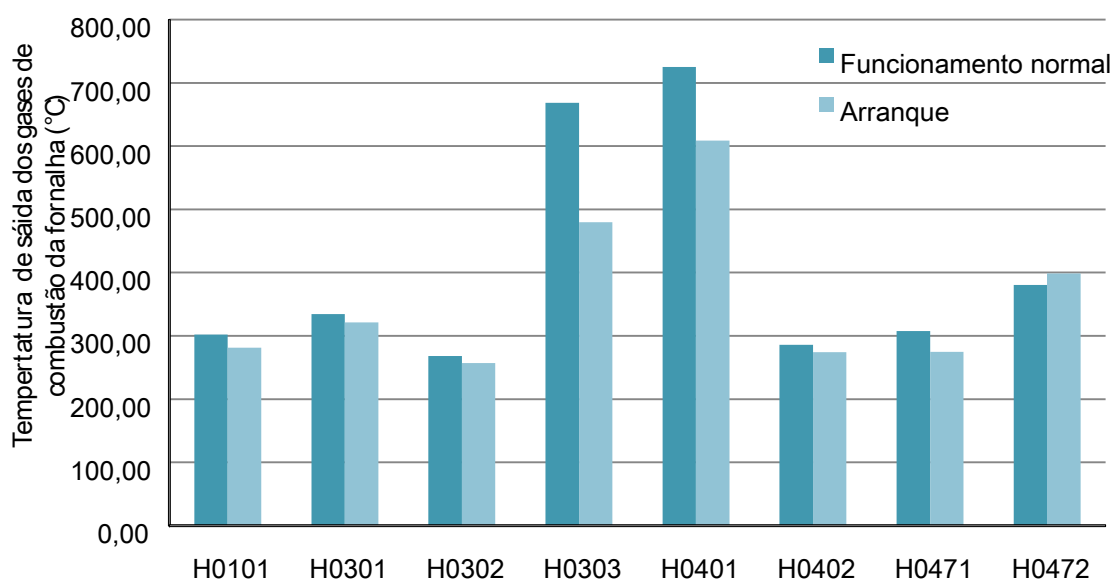


Figura 3.15- Temperatura média de saída dos gases de combustão das diferentes fornalhas para os dois períodos de funcionamento.

Pela análise da figura 3.15 é possível afirmar que as duas fornalhas que não possuem zona de convecção, a H0303 e a H0401, apresentam uma temperatura de saída dos gases de combustão muito superior em relação às restantes fornalhas da FAR.

A comparação entre os dois períodos de funcionamento para as fornalhas com zona de convecção, mostra que esta temperatura durante o arranque é ligeiramente inferior do que a temperatura registada durante o funcionamento normal, a única exceção é a fornalha H0472 que contraria este aspeto. Para as fornalhas só com zona de radiação o período de arranque mostra uma grande redução da temperatura de saída dos gases de combustão comparativamente ao funcionamento normal.

### 3.2.6 Percentagem de oxigénio nos gases de combustão à saída da fornalha

A percentagem de oxigénio nos gases de combustão é um dos parâmetros que é quantificado à saída de cada uma das fornalhas e foi obtida pelo Aspen. Esta percentagem é importante para o controlo do funcionamento das fornalhas fornecendo informações sobre

a quantidade de ar alimentada para a reação de combustão. Se a percentagem de oxigénio na chaminé for elevada indica um grande excesso de ar usado que irá absorver energia da combustão e sair pela chaminé traduzindo-se em perdas energéticas. Se a percentagem de oxigénio for baixa a reação de combustão pode tornar-se incompleta o que diminui a libertação de energia da combustão e a formação de monóxido de carbono o que irá também provocar perdas energéticas. Em termos de balanço de massa esta percentagem de  $O_2$  é fundamental para a estimativa do excesso de ar alimentado às fornalhas e consequentemente para a quantificação da corrente de ar. Na figura 3.16 está representada a distribuição deste parâmetro em cada fornalha para o período do funcionamento normal da fábrica e para o período de arranque. Os valores são apresentados no anexo B.3 e referem-se a valores médios (diários), registados pelo Aspen, para cada um dos períodos de funcionamento e para cada fornalha.

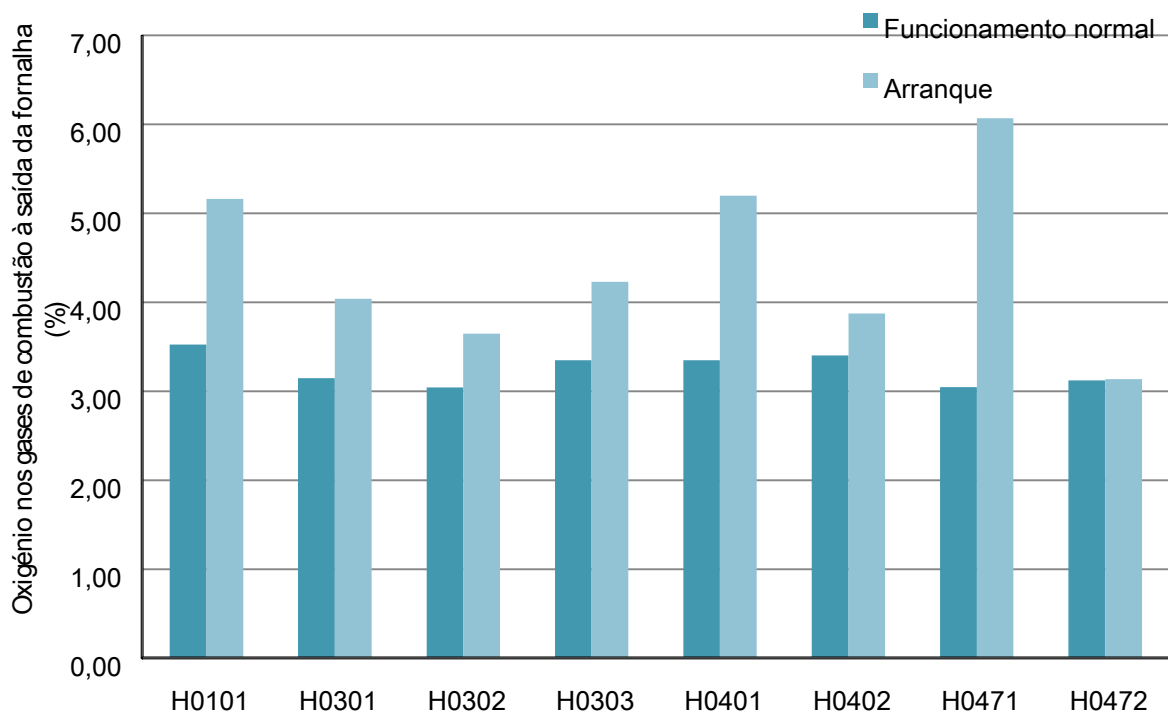


Figura 3.16- Percentagem média de oxigénio nos gases de combustão à saída das diferentes fornalhas para os dois períodos de funcionamento.

A figura 3.16 mostra que durante o período de funcionamento normal a percentagem de oxigénio nos gases de combustão à saída da fornalha não apresenta grandes oscilações entre as várias fornalhas. A percentagem neste período mantém-se na gama entre os 3,04% registado nas fornalhas H0302 e H0471 e os 3,53% da fornalha H0101.

Relativamente ao período de arranque a única fornalha que mantém a percentagem é a fornalha H0472, todas as outras apresentam percentagens de oxigénio superiores neste período. As fornalhas que apresentam uma subida mais acentuada deste parâmetro no arranque foram as fornalhas H0101, H0401 e a H0471.

### **3.2.7 Composição das correntes processuais em cada fornalha**

A percentagem de vaporização da corrente processual à saída das fornalhas é um parâmetro importante para o funcionamento das unidades processuais de que fazem parte as fornalhas e também se torna útil pelo fato de a maioria das fornalhas assumirem a função de reebulidores das colunas de destilação. Por este fato a estimativa da percentagem vaporização da corrente processual na saída das fornalhas foi incluído como um dos objetivos deste trabalho.

Para a obtenção de estimativa da vaporização foi necessário obter a composição das correntes processuais. As composições dessas correntes foram obtidas de várias maneiras:

- \_ Análises laboratoriais realizadas pelo laboratório da FAR;
- \_ Valores da sua composição fornecidos pelos responsáveis da FAR.

A composição da corrente processual da fornalha H0401 não foi incluída neste ponto por esta assumir uma função só de aquecimento da corrente, não funciona como reebulidor, não sendo portanto aplicável o cálculo da vaporização a esta fornalha.

Na tabela 3.9 encontram-se os valores das composições das correntes processuais das várias fornalhas.

Tabela 3.9- Composições das correntes processuais das fornalhas da FAR.

Fornalhas	Componentes	Funcionamento normal (%m/m)	Arranque (%m/m)
H0101	1,2,4- Trimetilbenzeno	73,0	73,0
	1-Isopropil-4-metilbenzeno	27,0	27,0
H0301	para-dietilbenzeno	99,9	100
	1-Isopropil-4-metilbenzeno	0,1	0
H0302	para-dietilbenzeno	99,9	100
	1-Isopropil-4-metilbenzeno	0,2	0
H0303	Naftaleno	39,5	27
	Para-Dietilbenzeno	60,5	73
H0402	Etilciclohexano	14,3	11,8
	Benzeno	0	0
	Tolueno	0,5	0,6
	Etilbenzeno	8,8	9,1
	Para-Xileno	17,5	18,1
	Meta-Xileno	40,4	41,8
	Orto-Xileno	17,4	17,8
	1-Isopropil-4-Metilbenzeno	0,5	0,5
H0471	Etilciclohexano	0,3	0,3
	Benzeno	0	0
	Tolueno	0	0
	Etilbenzeno	0	0
	Para-Xileno	0,2	0,1
	Meta-Xileno	0,8	0,6
	Orto-Xileno	84,9	80,7
	1-Isopropil-4-Metilbenzeno	12,5	14,3
H0472	1,2,4- Trimetilbenzeno	23,0	23,0
	1-Isopropil-4-Metilbenzeno	77,0	77,0

Analisando a tabela 3.9 verifica-se que a maioria das correntes só possui dois componentes. As duas únicas exceções são as correntes da fornalha H0402 e H0471 que possuem correntes com composições mais complexas e embora tenham os mesmos componentes, as suas composições são diferentes. Constata-se também que as correntes das fornalhas H0301 e H0302 exibem exatamente os mesmos constituintes e uma composição bastante similar.

### 3.2.8 Temperaturas de entrada e saída das correntes processuais

No cálculo do rendimento das fornalhas não foram utilizadas as temperaturas das correntes processuais, uma vez que as energias recebidas por estas correntes foram obtidas de forma indireta. Estas temperaturas serão apenas importantes para a estimativa da percentagem de vaporização dessa mesma corrente à saída das fornalhas. As distribuições das temperaturas em cada um dos períodos de funcionamento da FAR estão representadas nas figuras 3.17 e 3.18 respetivamente. Os valores médios são apresentados no anexo B.3 e foram obtidos realizando a média aritmética dos valores diários registados pelo Aspen.

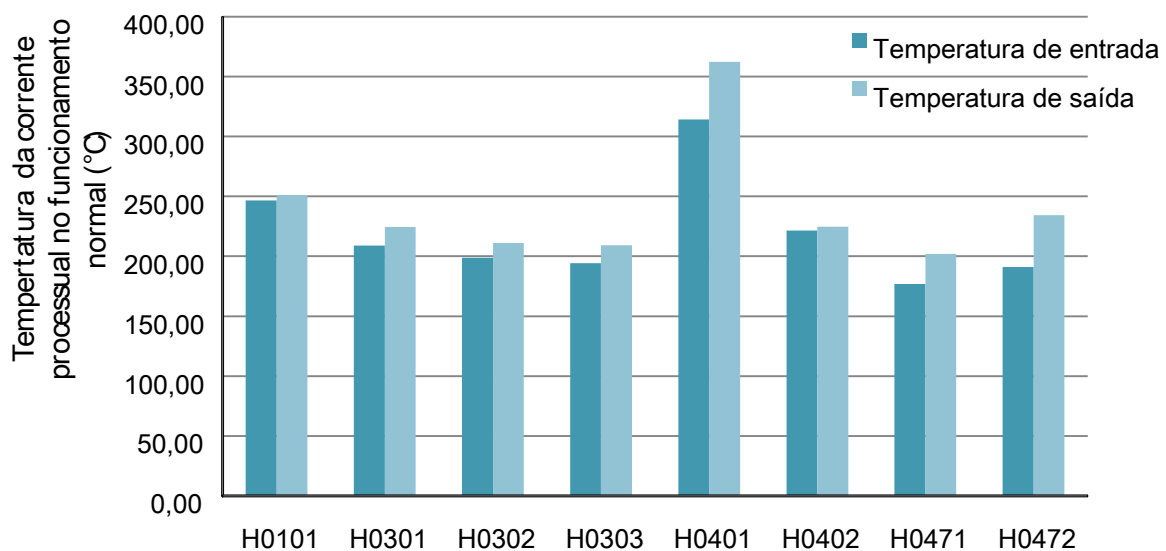


Figura 3.17- Temperaturas médias da corrente processual à entrada e à saída de cada fornalha para o funcionamento normal.

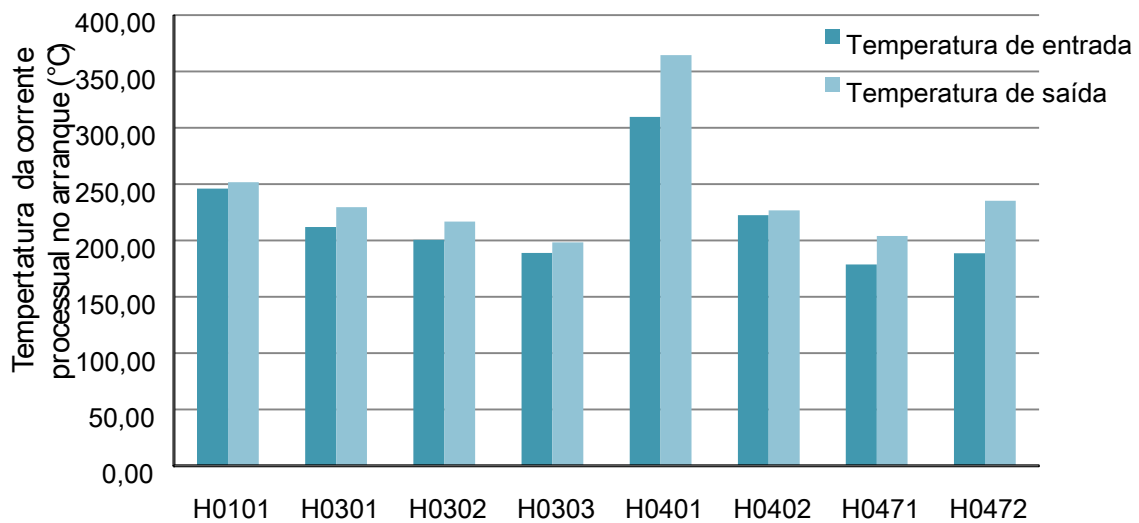


Figura 3.18- Temperaturas médias da corrente processual à entrada e à saída de cada fornalha no arranque.

Pela observação das figuras 3.17 e 3.18 verifica-se que não existem variações significativas entre os dois períodos de funcionamento estudados nas temperaturas tanto de entrada como de saída.

A fornalha H0401 é a que possui uma temperatura mais elevada da corrente processual que a atravessa e a que apresenta um maior aumento de temperatura (superior a 300°C) entre a entrada e saída, resultado esperado visto que a função desta fornalha é de aquecer a corrente processual até uma temperatura definida sendo posteriormente alimentada a uma reator.

Nas restantes fornalhas registou-se um aumento da temperatura entre a entrada e a saída. Este aumento foi bastante significativo na fornalha H0471 que apresentou um aumento de temperatura na ordem dos 25°C e principalmente na H0472 em que o aumento de temperatura foi superior a 40°C.

### 3.2.9 Caudal das correntes processuais que circulam nas fornalhas

O caudal das correntes processuais que circulam nas fornalhas é um parâmetro importante para a determinação da percentagem de vaporização dessa mesma corrente à saída das

fornalhas. Em termos de bom funcionamento das unidades adjacentes a sua importância aumenta, sendo um parâmetro preponderante para o bom funcionamento da coluna de destilação. Os caudais das várias correntes processuais foram obtidos através de medidores colocados nas unidades e os dados obtidos pelo Aspen.

Na figura 3.19 são apresentados todos os valores médios diários dos caudais das correntes processuais que atravessam as diversas fornalhas da FAR. Na figura só constam as correntes das fornalhas que funcionam como reebulidores por isso não foi representada a fornalha H0401, cuja única finalidade é aquecer a corrente processual antes de ser alimentada a um reator. Os valores médios podem ser consultados no anexo B.3 e foram obtidos realizando a média aritméticos dos valores diários registados pelo Aspen.

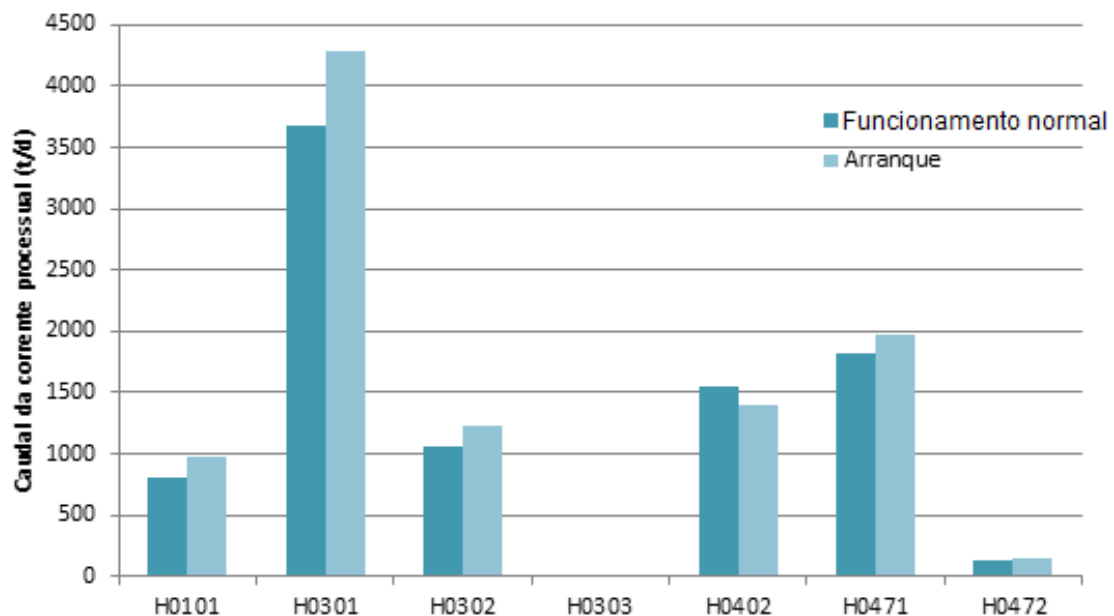


Figura 3.19- Caudais médios das correntes processuais das diferentes fornalhas.

Analisando a figura 3.19, verifica-se que a corrente processual da fornalha H0301 é a que apresenta o maior caudal. Em contrapartida a fornalha H0303 possui uma corrente processual com um caudal tão baixo (10 t/d) que não é visível em termos de escala.

Fazendo a comparação entre os dois períodos de funcionamento, verifica-se que as fornalhas H0101, H0301, H0302 e a H0472 apresentam um caudal mais elevado durante o arranque. Por sua vez a fornalha H0402 é a única que no arranque regista um caudal inferior do que durante o período de funcionamento normal. As restantes duas fornalhas,

H0303 e H0472 apresentam aproximadamente o mesmo valor do caudal da corrente processual para os dois períodos em análise.

### 3.2.10 Consumos de FO e FG nas diferentes fornalhas

A obtenção do rendimento térmico da cada uma das fornalhas foi o objetivo principal deste trabalho. A fonte principal de energia que é fornecida às fornalhas provém da combustão dos combustíveis, por isso, a quantificação desses mesmos consumos é um ponto fulcral para a determinação do rendimento das fornalhas.

Na figura 3.20 são apresentados os consumos de FO nas diversas fornalhas da FAR. Estes consumos são apresentados no anexo B.3 e foram obtidos de médias de leituras efetuadas no Aspen.

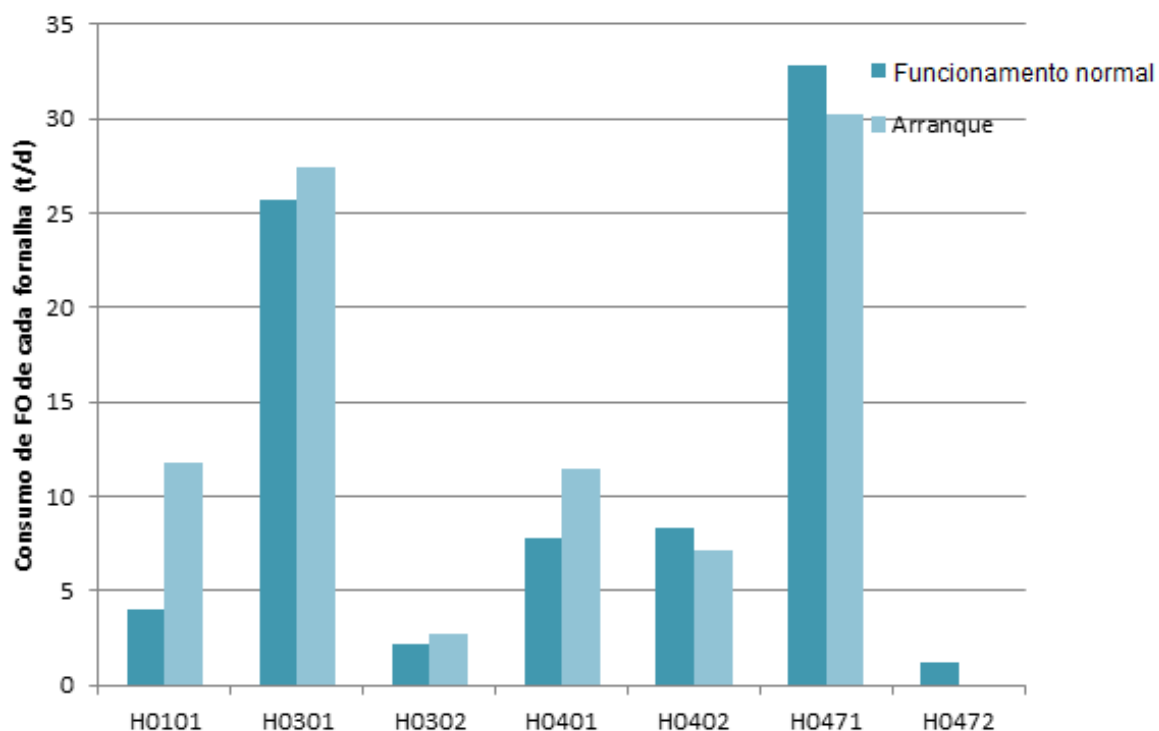


Figura 3.20- Consumo de FO nas diferentes fornalhas.

Pela observação da figura 3.20, constata-se que as fornalhas que consomem maior quantidade de FO são as fornalhas H0301 e a H0471, tanto no período de funcionamento

normal como no arranque. As fornalhas menos consumidoras de FO são as fornalhas H0101, H0302 e a H0472. De realçar a H0101 que no arranque o seu consumo em FO aumentou e H0472 que no período de arranque não consumiu FO.

Em seguida são apresentados os consumos de FG nas diversas fornalhas através da figura 3.21. Os valores são apresentados no anexo B.3.

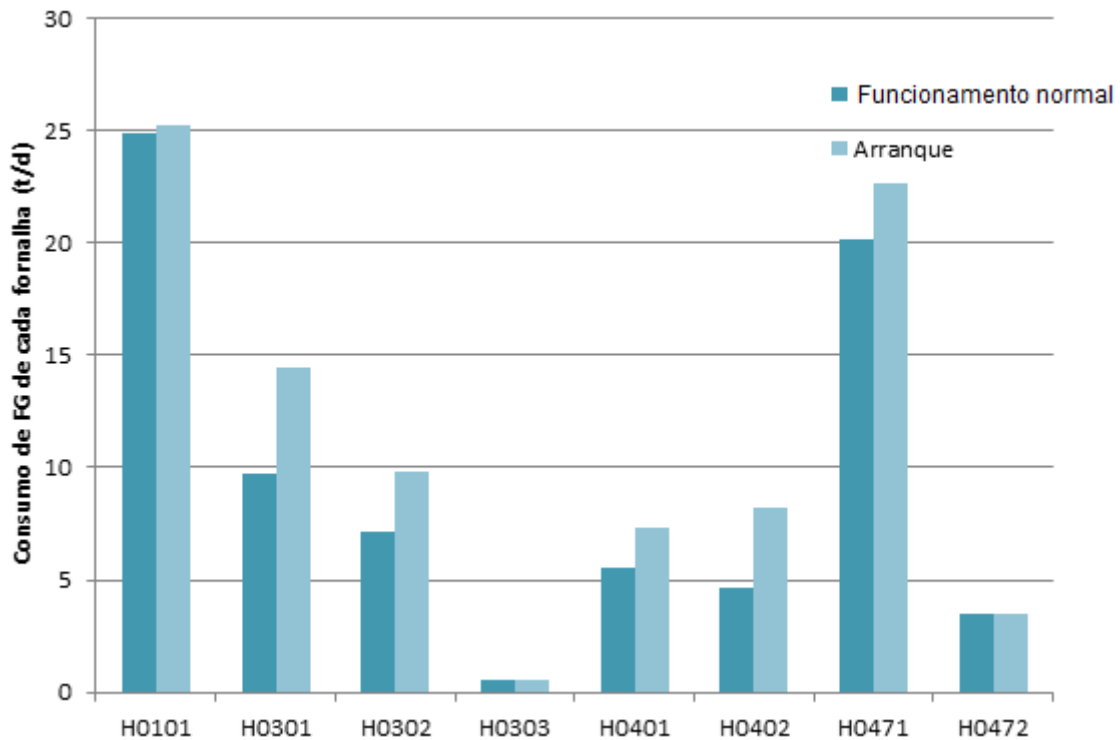


Figura 3.21- Consumo de FG nas diversas fornalhas.

Analisando a figura 3.21, verifica-se que as fornalhas H0101 e a H0471 são as fornalhas com o consumo de FG mais elevado. A H0303 apresenta um consumo muito baixo, praticamente insignificante quando comparado com as restantes fornalhas.

Comparando os dois períodos de funcionamento, constata-se que no arranque em praticamente todas as fornalhas o consumo de FG aumentou, sendo as únicas exceções as fornalhas H0303 e H0472 que mantiveram aproximadamente o mesmo consumo.



## **4. Análise energética das fornalhas**

A análise energética das fornalhas foi realizada através da avaliação do seu desempenho energético, através do cálculo do seu rendimento. Para a determinação do respetivo rendimento, terá obrigatoriamente de existir a caracterização de todas as entradas e saídas das fornalhas. A quantificação quer em termos mássicos quer em termos energéticos dessas entradas e saídas será feita por balanços de massa e energia. Nesta secção serão referidos todos os balanços de massa e energia realizados para a obtenção do rendimento das fornalhas, parâmetro necessário à análise energética das mesmas.

### **4.1 Balanços de massa**

O primeiro passo realizado no balanço de massa foi a determinação da composição real do Fuel Gás que alimentava as fornalhas. Desta forma foi realizado um balanço de massa a cada um dos componentes de cada uma das correntes que convergiam para o acumulador D-0405, representado na figura 3.1 da secção 3.1.1. Os cálculos relativos a este balanço são apresentados no anexo A.1.

O balanço de massa realizado às fornalhas não teve em conta a corrente processual que atravessa a fornalha visto que essa corrente está a ser transportada por uma tubagem, estando isolada em termos de trocas de matéria com a câmara de combustão.

Na figura 4.1 são apresentadas as várias correntes que permitiram fazer o balanço de massa às fornalhas.



Figura 4.1- Esquema simplificado do balanço mássico realizado a cada uma das fornalhas.

As principais incógnitas do sistema em estudo cingem-se sobretudo à corrente de ar que entra na câmara de combustão e à corrente dos gases de combustão. As únicas variáveis mensuráveis neste sistema eram os caudais de entrada de combustível e a percentagem de oxigénio em base seca presente nos gases de combustão.

O caudal da corrente relativa aos gases de combustão foi obtido com base nas equações de combustão dos dois combustíveis usados na queima, ver anexo A.2. Foi considerado que em qualquer uma das fornalhas alvo de estudo todas produziam uma queima completa. Desta forma a obtenção dos gases de combustão produzidos foi feita por balanços simples tendo sempre como base as equações de combustão de cada um dos componentes presentes em cada combustível. Nos anexos A.3 e A.4 estão descritos exemplos de cálculo detalhados para a combustão de Fuel Gáse para o Fuel Óleo respetivamente.

A estratégia seguida para determinar o caudal da corrente de ar que alimenta a fornalha foi a de um método gráfico, denominado de diagrama de Ostwald. Este método possibilita a determinação do excesso de ar utilizado nas reações de combustão.

Primeiramente foi calculada a quantidade de ar necessária para uma combustão completa e estequiométrica, cálculo esse apresentado no anexo A.5. Seguidamente foi aplicado o método gráfico de Ostwald que é utilizado quando não se possui toda a informação acerca dos gases de exaustão formados na reação de combustão, o que impossibilita a realização de um balanço de massa. Trata-se de um método bastante expedito e bastante utilizado na indústria para a determinação do excesso de ar utilizado na combustão. Para aplicar este método é necessário saber a composição do combustível usado e a percentagem das três composições dos gases de combustão; oxigénio, monóxido de carbono ou a mistura de dióxido de carbono e dióxido de enxofre (Borghi e Destriau, 1995).

No caso da instalação em estudo existe um analisador em contínuo de monóxido de carbono na chaminé principal, que registou sempre valores muito baixos (inferiores a 20 ppm). Então, atendendo a este fato e com o aval da direção da FAR, foi admitido que em qualquer uma das fornalhas analisadas a reação de combustão foi totalmente completa. Desta forma admitiu-se que não existe qualquer formação de inqueimados. Esta decisão foi fundamental para o progresso do projeto, uma vez que a única concentração medida na chaminé de qualquer uma das fornalhas é a percentagem de oxigénio. Desta maneira, com esta simplificação, a determinação do coeficiente de excesso de ar ( $e$ ) foi facilmente calculado através dos balanços realizados para a obtenção do diagrama de Ostwald. Assim através de relações trigonométricas e deixando de parte a obrigatoriedade da construção gráfica do diagrama de Ostwald calculou-se o referido coeficiente – ver anexo A.6.1.

Com a obtenção do coeficiente de excesso de ar, o último passo do balanço de massa foi a quantificação de todos os componentes que saem pela chaminé das fornalhas. Os cálculos podem ser consultados no anexo A.7.

## **4.2 Balanços de energia**

Após a determinação de todos os caudais mássicos de todas as entradas e saídas do sistema e com o objectivo de determinar o rendimento das fornalhas o passo seguinte será o de realizar os balanços de energia, para quantificar todas as entradas e saídas de energia das fornalhas em estudo. Na figura 4.2 está representado o balanço de energia efetuado.

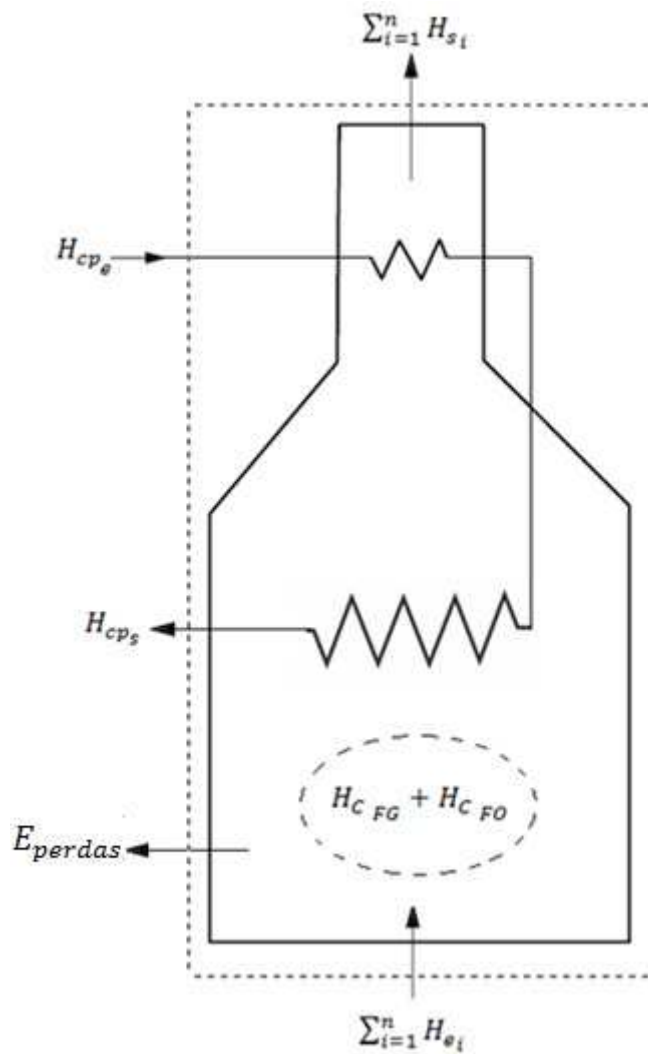


Figura 4.2- Esquema do balanço de energia realizado às fornalhas.

O objetivo do balanço de energia foi obter a quantidade de energia que se conseguia transferir para a corrente processual sendo denominada essa energia de energia útil. A estratégia seguida foi determinar a energia útil indiretamente, calculando a soma das entalpias de todas as correntes que entram na fornalha com a energia libertada pela reação de combustão e subtraindo as energias da corrente de saída pela chaminé e a energia associada às perdas, tal como representada na equação 4.1. A parcela referente às perdas por radiação e convecção foi estimada segundo a AmericanPetrolInstitute, em que refere que as perdas em sistemas similares se situam aproximadamente em 1,5% da energia libertada na reação de combustão(API, 2007). Os cálculos relativos ao balanço de energia efetuado podem ser consultados no anexo C.

$$\dot{u} = \dots - \dots = \dots + \dots - \dots + \dots \quad (4.1)$$

Para a realização deste balanço foi necessário definir um estado de referência que no caso deste projeto foi o estado de referência para uma temperatura de 25°C e posteriormente a determinação de todas as entalpias de todas as entradas e saídas da fornalha relativamente ao estado de referência.

Terminado o balanço de energia foi possível determinar o rendimento das fornalhas, através da equação 4.2 – ver anexo C.7, podendo assim analisar mais concretamente a performance energética das fornalhas da instalação industrial.

$$= \frac{\dot{u}}{\quad} \times 100 \quad (4.2)$$

Para uma melhor compreensão do sistema em estudo neste trabalho foi também calculado o rendimento de cada uma das zonas de transferência de energia, zona de radiação e zona de convecção em cada fornalha. O cálculo do rendimento em cada zona foi calculado relativamente à energia útil como está representado nas equações 4.3 e 4.4. Em cada um dos rendimentos foi incorporado um fator relativo às perdas; não conhecendo como se processava a distribuição energética das perdas nas fornalhas, foi admitido que as perdas eram equitativas entre as duas zonas constituintes das fornalhas. No anexo C.8 estão descritos exemplos de cálculo para a determinação do rendimento da zona de radiação e da zona de convecção.

$$= \frac{\quad - \quad}{\dot{u}} \times 100 \quad (4.3)$$

$$= \frac{\quad - \quad}{\dot{u}} \times 100 \quad (4.4)$$

A ebulição que ocorre nas fornalhas é um fenómeno de elevada complexidade e muito difícil de prever, não existindo equações matemáticas que descrevam este processo físico com rigor. Por este fato, a estimativa da percentagem de vaporização da corrente processual à saída das fornalhas foi feita de uma forma simplificada. As propriedades necessárias foram calculadas à temperatura média entre a entrada e saída da fornalha. Assim sendo cálculo do caudal de vapor da corrente processual à saída das fornalhas foi calculado pela equação 4.5. Os cálculos relativos à estimativa da percentagem de vaporização são apresentados no anexo C.9.

$$= \frac{\Delta}{( \text{é} )} \quad (4.5)$$

Para efeitos de cálculo foi admitido que a queda de pressão ao longo da fornalha era desprezável; assim sendo a temperatura de saturação da corrente será igual à temperatura de saída. Como à entrada da fornalha a corrente processual se encontra a uma temperatura inferior à de saturação, então é necessário fornecer-lhe energia para que se inicie a vaporização. Esta energia ( ) é posteriormente subtraída à energia útil (  $ú$  ) transferida na fornalha como apresentada na equação 4.6. Esta esta diferença é a energia responsável pela percentagem de vaporização obtida.

$$= \text{ú} - \quad (4.6)$$

Como em todas as fornalhas a corrente processual que a atravessa é uma mistura de componentes foi admitido que a mistura teria um comportamento igual ao comportamento que teriam os componentes se estes estivessem separados, ou seja, na mistura os componentes não iriam interagir. Assim sendo o calor latente de vaporização da mistura  $\Delta$  foi calculado pela equação 4.7.

$$\Delta H_{\text{vapor}} = \dot{m}_{\text{vapor}} \times \Delta H_{\text{vapor}} \quad (4.7)$$

Após a obtenção do caudal de vapor formado da corrente processual à saída de cada %  
fornalha foi possível calcular a percentagem de vaporização da corrente processual  
recorrendo à equação 4.8.

$$\% \text{ vaporização} = \frac{\dot{m}_{\text{vapor}}}{\dot{m}_{\text{processual}}} \times 100 \quad (4.8)$$

Ver as percentagens de vaporização na figura 4.7.

### 4.3 Avaliação do rendimento das fornalhas

Nesta secção são apresentados os valores dos rendimentos das fornalhas presentes na FAR. Estes valores foram comparados com os valores dados pelo software de simulação processual. Os rendimentos de cada zona que constitui as fornalhas e a percentagem de vaporização da corrente processual à saída das fornalhas são também avaliados nesta secção. Os valores podem ser consultados no anexo D. A avaliação foi feita nos dois períodos de funcionamento estudados, ou seja, o período de arranque e o funcionamento normal. Na figura 4.3 estão representados os rendimentos médios de cada uma das fornalhas obtidos durante o período de funcionamento normal da instalação industrial e os resultados obtidos pelo Aspen. Os valores médios podem ser consultados no anexo D.1.

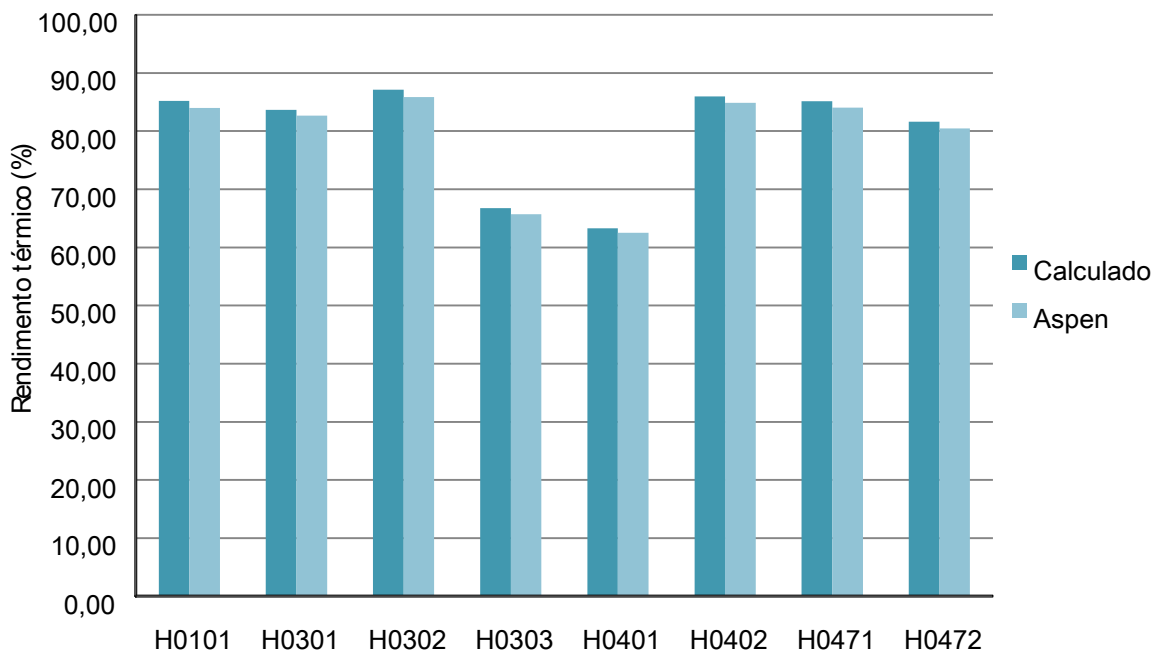


Figura 4.3- Valores dos rendimentos térmicos calculados e os rendimentos dados pelo simulador durante o período de funcionamento normal.

Pela observação da figura 4.3, verifica-se que existem duas fornalhas cujo rendimento é bastante inferior às restantes. As duas fornalhas em causa são a H0303 e a H0401, estas fornalhas são as únicas presentes na FAR que não possuem zona de convecção. O fato de não possuírem zona de convecção indica que não existe um aproveitamento tão eficaz da energia dos gases de combustão. A zona de convecção nas fornalhas, funciona quase como um economizador ou um pré-aquecimento da corrente processual, existindo uma transferência de energia bastante significativa nessa zona.

Nas restantes seis fornalhas que por sua vez já possuem as duas zonas de transferência de energia, zona de convecção e zona de radiação, o valor do rendimento é bastante mais elevado. No caso destas fornalhas os seus rendimentos situam-se aproximadamente na mesma gama entre os 80% e os 90%, o que corresponde à gama de bom funcionamento que as fornalhas normalmente devem apresentar (Sinnot, 2005). Em valores concretos a fornalha que apresentou melhor rendimento foi a H0302 que conseguiu transferir para a corrente processual 87,1% da energia que lhe foi fornecida, por outro lado a fornalha com pior desempenho foi a H0472 com um rendimento de 81,6%.

No que diz respeito à fase do arranque, a figura 4.4 mostra a mesma tendência da fase de funcionamento normal da fábrica. As duas fornalhas só possuidoras de zona de radiação continuam a apresentar os dois piores rendimentos. As restantes seis fornalhas continuam na gama de rendimento entre os 80% e 90% conferindo-lhes um bom desempenho no seu funcionamento. Os valores médios podem ser consultados no anexo D.1.

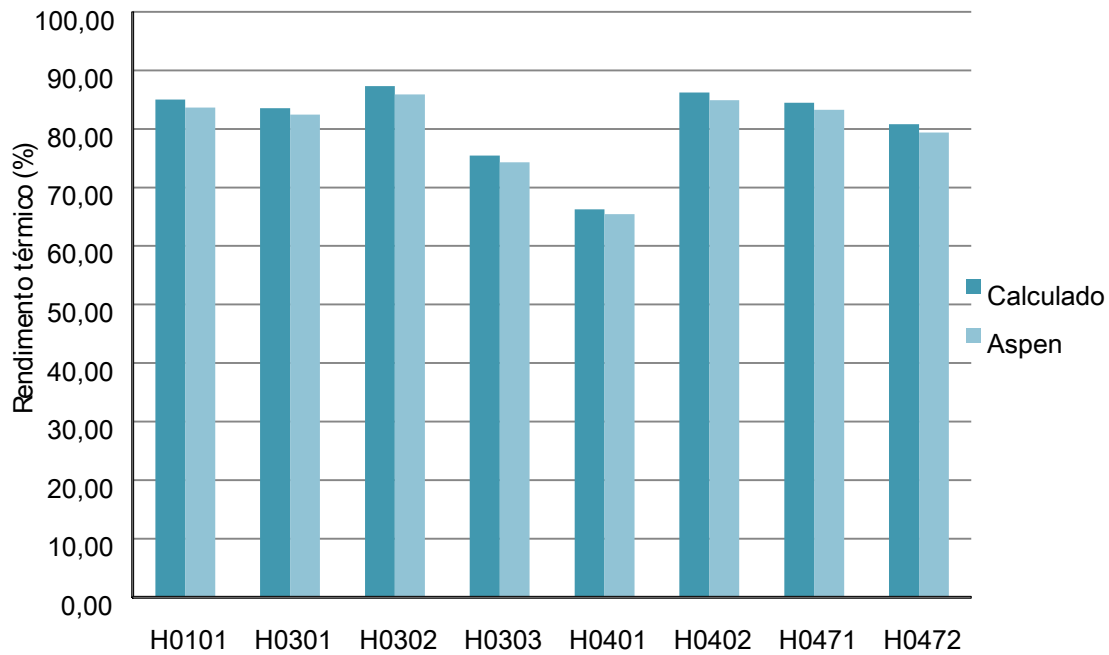


Figura 4.4- Valores dos rendimentos térmicos calculados e os rendimentos dados pelo simulador durante o arranque.

Nas figuras 4.3 e 4.4 é feita a comparação entre o rendimento calculado neste projeto e o rendimento dado pelo simulador processual Aspen. Desta comparação verifica-se que existe uma grande aproximação nos valores do rendimento, embora o simulador forneça resultados um pouco mais baixos do que os resultados obtidos pelo balanço de energia. A razão para os resultados do simulador serem um pouco inferiores, poderá residir na parcela relativa às perdas por radiação e convecção, referida no ponto 4.2, que foi estimada para os cálculos. Contudo pela proximidade entre os rendimentos calculados e os rendimentos fornecido pelo Aspen, comprova-se que o simulador fornece uma boa estimativa do rendimento das fornalhas.

Na figura 4.5, compara-se a percentagem de variação do rendimento que as fornalhas tiveram entre o arranque e o período de funcionamento normal. Os cálculos podem ser consultados no anexo D.2.

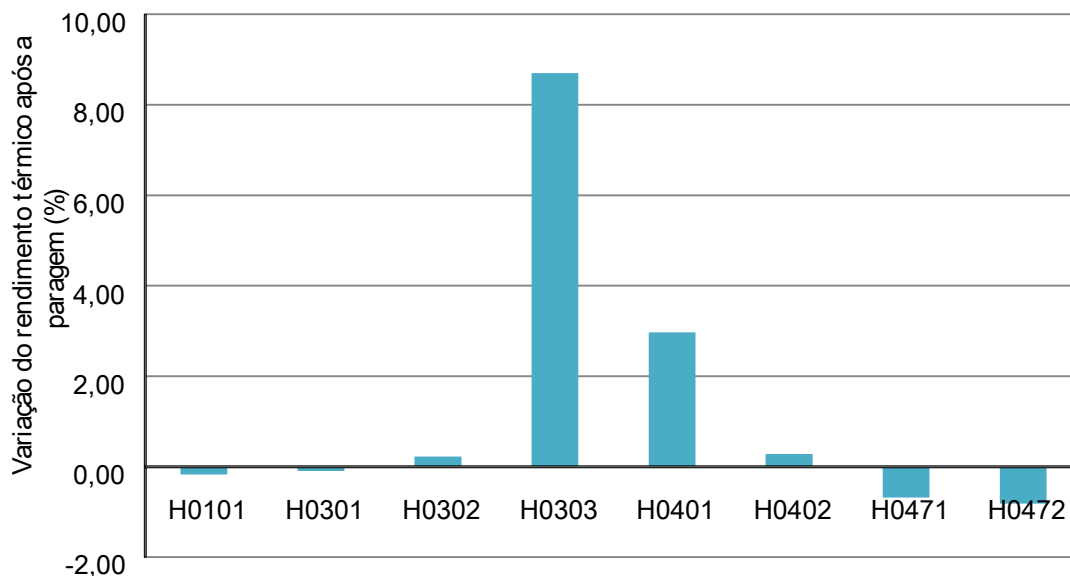


Figura 4.5- Variação dos rendimentos calculados de todas as fornalhas após a paragem.

Analisando a figura 4.5, percebe-se que na fase de arranque existem duas fornalhas que se destacam pelo ganho de rendimento que obtêm em relação ao funcionamento normal. Essas fornalhas são a H0303 e a H0401, precisamente as duas fornalhas que só possuem na sua estrutura a zona de radiação para a transferência de energia. A fornalha H0303 foi a que obteve a maior subida de rendimento, apresentou um ganho de rendimento no arranque superior a 8%. A outra fornalha que obteve um ganho no rendimento foi a H0401 com uma subida no seu rendimento superior a 2%. Em relação às restantes fornalhas praticamente não se verifica ganhos ou perdas significativos, mantiveram-se praticamente iguais no arranque, à exceção das fornalhas H0471 e H0472 em que ambas tiveram uma quebra do rendimento no arranque embora não tenha ultrapassado 1%.

Na figura 4.6 são apresentados os rendimentos da zona de radiação das diversas fornalhas. Os rendimentos relativos às fornalhas H0303 e H0401 não constam na figura porque estas fornalhas só possuem zona de radiação e por isso esses rendimentos correspondem ao

rendimento global apresentado e discutido anteriormente. Os valores médios podem ser consultados no anexo D.3.

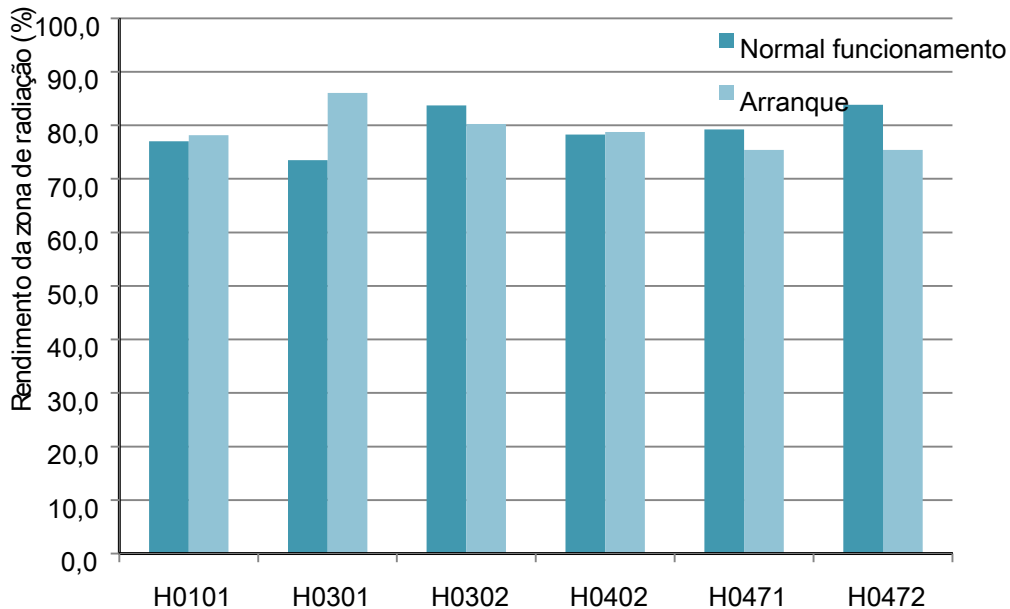


Figura 4.6- Rendimento da zona de radiação de cada fornalha para os dois períodos de funcionamento.

Analisando a figura 4.6 verifica-se que existem duas fornalhas, a H0302 e a H0472, que durante o período do funcionamento normal da FAR obtêm os maiores rendimentos da zona de radiação, 83,7% e 83,8% respetivamente. Em contrapartida a fornalha H0301 é a que apresenta o rendimento menor, 73,5%, atendendo ao mesmo período.

Comparando os resultados entre os dois períodos de funcionamento verifica-se que as fornalhas, H0302, H0471 e H0472, durante o período de arranque obtiveram um valor de rendimento desta zona inferior ao registado no período de funcionamento normal, destacando-se a fornalha H0472 com a maior descida de 8,4%. Relativamente às outras três fornalhas, H0101, H0302 e H0402, durante o período de arranque obtiveram maior rendimento do que durante o funcionamento normal. A fornalha H0301 foi a que apresentou um maior ganho de rendimento no arranque com um valor 12,5% de ganho.

O rendimento relativo à zona de convecção das fornalhas foi calculado através da equação 4.4 apresentada anteriormente.

Como seria de esperar as conclusões retiradas para a zona de radiação são também válidas para a zona de convecção.

Na figura 4.7 são apresentadas as percentagens médias de vaporização da corrente processual de cada uma das fornalhas em estudo, para cada um dos períodos de funcionamento em análise. Os valores médios podem ser consultados no anexo D.4.

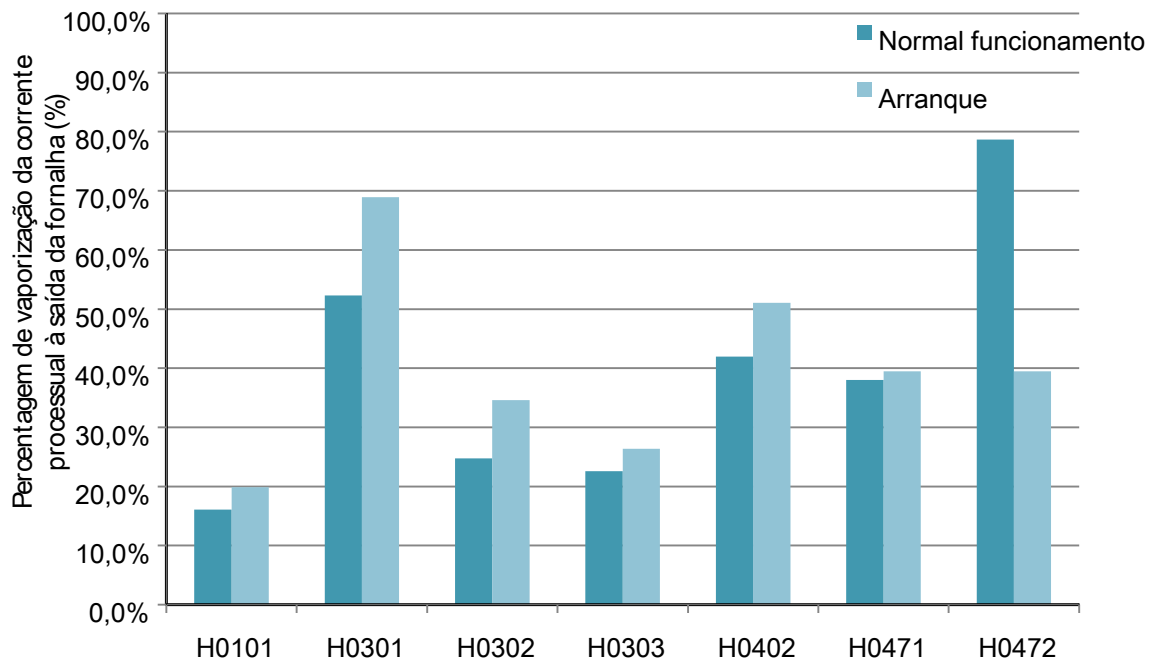


Figura 4.7- Percentagem de vaporização da corrente processual à saída de cada uma das fornalhas.

Pela observação da figura 4.7, verifica-se que as fornalhas que apresentam maior percentagem de vaporização para o período de funcionamento normal são as fornalhas H0301 e H0472. A primeira com uma percentagem de vaporização de 52,3% e a segunda de 78,7%. Por sua vez a H0101 apresenta a menor percentagem para o mesmo período com um valor de 16,1%.

Relativamente ao arranque constata-se que todas as fornalhas apresentam uma percentagem de vaporização superior do que no período de funcionamento normal. A única exceção é a fornalha H0472, que apresenta uma diminuição para quase metade do valor que apresentava no período de funcionamento normal.

## 5. Otimização energética das fornalhas

Neste capítulo são apresentados e discutidos os principais fatores que influenciam o rendimento térmico das fornalhas. Posteriormente são também apresentadas sugestões tendo em vista a melhoria energética das fornalhas e realizada uma análise económica a uma das medidas propostas. De salientar que este capítulo foi elaborado tendo somente em conta as três fornalhas com o consumo energético mais elevado da FAR, sendo essas fornalhas a H0101, H0301 e a H0471. Toda a análise realizada neste capítulo tem como base o período de funcionamento normal.

### 5.1 Fatores que influenciam o rendimento das fornalhas

Nesta secção são apresentados e analisados os fatores que mais influencia têm sobre o rendimento apresentado pelas fornalhas.

Os fatores que influenciam o rendimento das fornalhas em estudo foram obtidos pela análise dos resultados durante o período de funcionamento

#### Temperatura de saída dos gases de combustão

Tal como foi descrito no balanço efectuado à fornalha na secção 4.2 e representado na equação 4.1, quanto menor for a energia à saída da fornalha pela corrente dos gases de combustão, maior será a energia útil transferida para a corrente processual. Atendendo a este fato e à equação 4.2, facilmente se constata que maior será o rendimento térmico da fornalha quanto menor for a temperatura de saída dos gases de combustão. Essa energia dos gases de combustão à saída da fornalha está diretamente ligada à temperatura de saída. Uma menor temperatura dessa corrente resultará num maior rendimento da fornalha. Este efeito pode ser observado pelas figuras 5.1 e 5.2 em que são apresentados os resultados diários da temperatura de saída dos gases de combustão e o rendimento térmico obtido para a fornalha H0101. Os valores apresentados nas figuras podem ser consultados no anexo E.1.

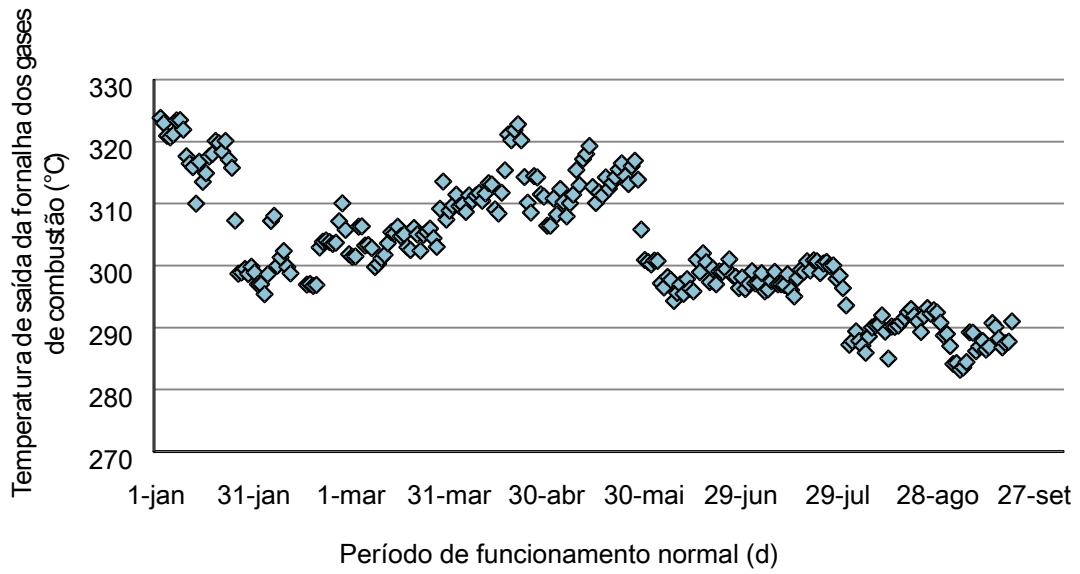


Figura 5.1- Temperatura dos gases de combustão à saída da fornalha H0101.

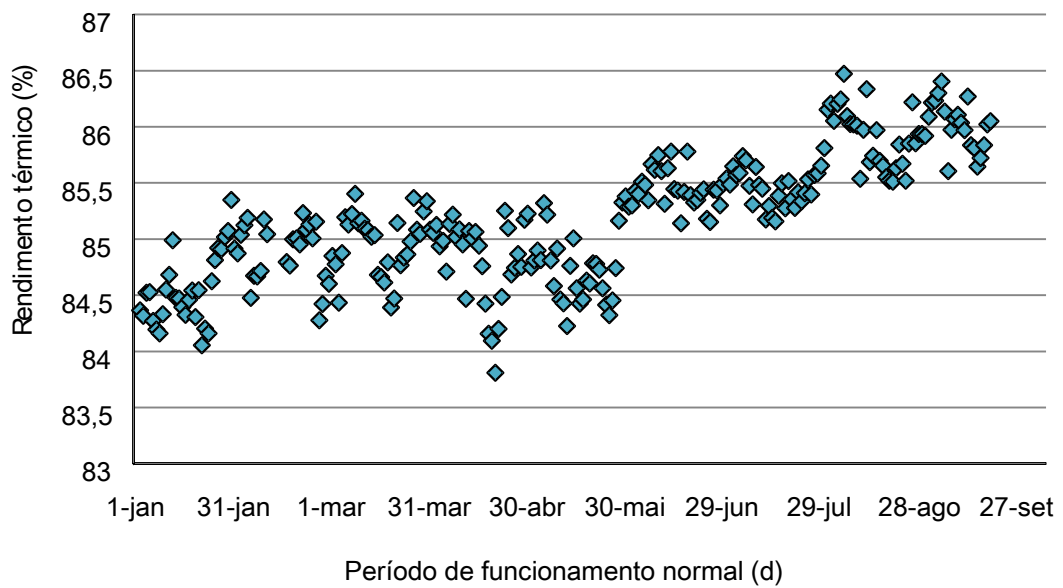


Figura 5.2- Rendimento térmico da fornalha H0101 durante o funcionamento normal.

Analisando as figuras 5.1 e 5.2 e comparando os seus resultados para os mesmos intervalos de tempo, verifica-se a tendência anteriormente descrita no início deste secção.

Do dia 1 de janeiro até sensivelmente o dia 31 do mesmo mês a temperatura dos gases sofreu uma diminuição, o que levou ao aumento do rendimento para o mesmo período.

Entre os dias 31 de janeiro e 30 de maio a tendência da temperatura dos gases de combustão foi de um aumento gradual, em termos de rendimento embora haja alguma oscilação de resultados o rendimento teve um ligeira descida.

O restante período do funcionamento normal, registou duas descidas em degrau da temperatura dos gases de combustão, verificando-se duas subidas também em degrau do rendimento durante o mesmo período.

### Excesso de ar para a combustão

O excesso de ar é dos parâmetros mais importantes a controlar para a obtenção de uma combustão energeticamente favorável. Como já foi referido anteriormente na secção 3.2.6, grande excesso de ar traduz-se em perdas energéticas.

Se a reação de combustão ocorrer com defeito de tornar-se incompleta o que diminui a libertação de energia da combustão e a formação de monóxido de carbono. Nas figuras 5.3 e 5.4 são apresentados os resultados diários do coeficiente de ar registado e o rendimento térmico obtido para a fornalha H0301. Os valores apresentados nas figuras podem ser consultados no anexo E.2.

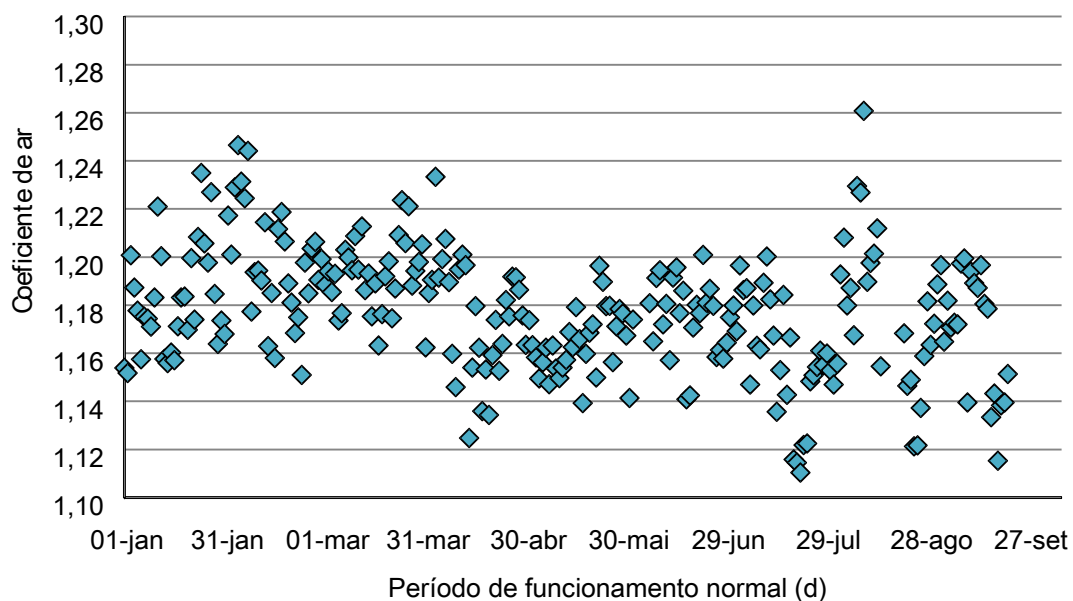


Figura 5.3- Coeficiente de ar da fornalha H0301 durante o funcionamento normal.

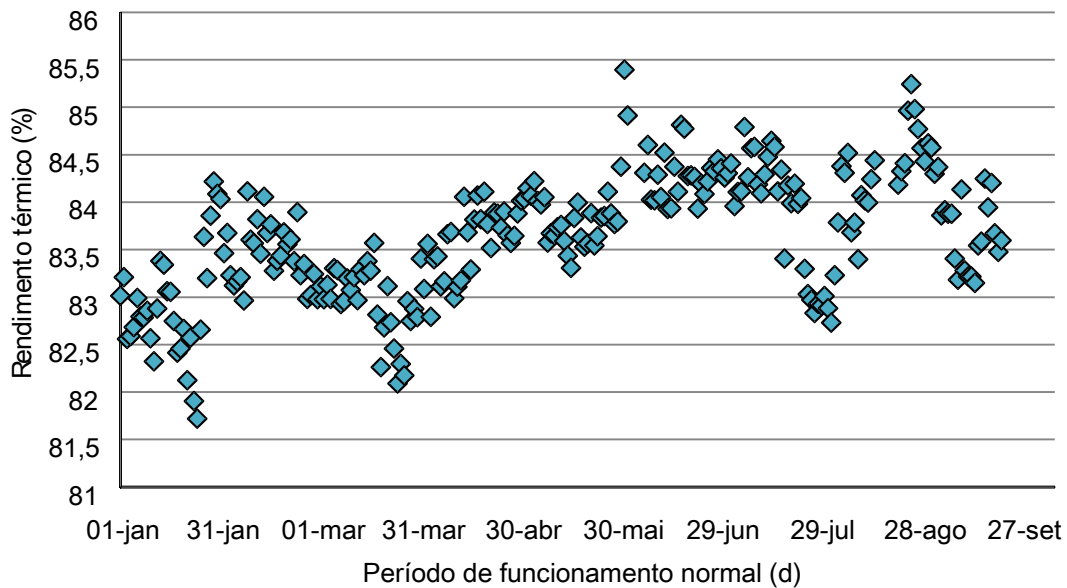


Figura 5.4- Rendimento térmico da fornalha H0301 durante o funcionamento normal.

Analisando as figuras 5.3 e 5.4, verifica-se que existem duas zonas nas figuras com gamas de valores distintos. Na figura 5.3 no período compreendido entre o dia 1 de janeiro até 31 de março o coeficiente de excesso de ar apresenta em média valores mais elevados do que no restante período em análise.

A mesma tendência também é verificada na figura 5.4, sensivelmente a partir do dia 31 de Março o rendimento da fornalha assume uma tendência de subida ao mesmo tempo em que o coeficiente de excesso de ar diminui.

Embora se verifique essas tendências, existem muitas oscilações nos resultados, que podem estar a ser provocadas por fatores indesejados. Estas oscilações podem ter sido causadas pelo oxigénio parasita que deturpa os resultados do coeficiente de excesso de ar.

A existência de oxigénio parasita deve-se ao fato de não haver um bom isolamento das fornalhas e como estas funcionam com pressão interior negativa o ar entra por zonas que não correspondem á zona de entrada de ar principal

Esta entrada de ar além de aumentar o teor de oxigénio nos gases de combustão adulterando os resultados obtidos do excesso de ar, tem um efeito arrefecedor na zona de convecção diminuindo o gradiente térmico entre os gases de combustão e os tubos diminuindo assim a transferência de energia.

## 5.2 Sugestões de melhoria energética das fornalhas

Nesta secção são apresentadas duas sugestões de melhoria energética, para as fornalhas da FAR.

### 5.2.1 Limpezas químicas à zona de convecção

A limpeza das fornalhas influencia diretamente a temperatura dos gases de combustão à saída da fornalha e consequentemente o rendimento. Esta limpeza consiste no uso de um produto químico apropriado de forma a remover da superfície dos tubos da zona de convecção, o sujamento provocado por fuligem proveniente da queima do FO. A limpeza das fornalhas é uma tarefa que a FAR realiza regularmente no entanto não é realizada em todas as fornalhas, as únicas fornalhas que são alvo de limpeza são as fornalhas H0101, H0301, H0302 e a H0471. Durante o período deste estudo as limpezas tiveram as seguintes datas: 26 de janeiro, 30 de maio e 1 de agosto. Nas figuras 5.5 e 5.6 são apresentados os resultados diários da temperatura de saída dos gases de combustão e o rendimento térmico obtido para a fornalha H0471, as datas das limpezas estão marcadas nas figuras através de linhas verticais. Os valores das figuras respeitantes a esta secção podem ser consultados no anexo F.1. Analisando estas figuras verifica-se o efeito das limpezas efetuadas. Só são apresentados dados referentes à fornalha H0741 pela melhor visualização do efeito das limpezas nessa fornalha.

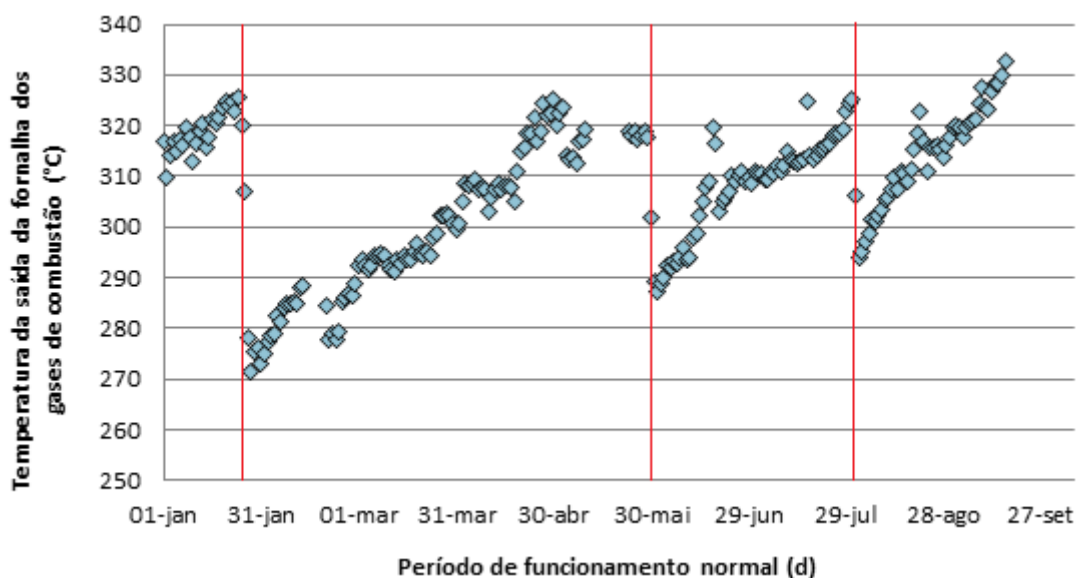


Figura 5.5- Temperatura dos gases de combustão à saída da fornalha H0471.

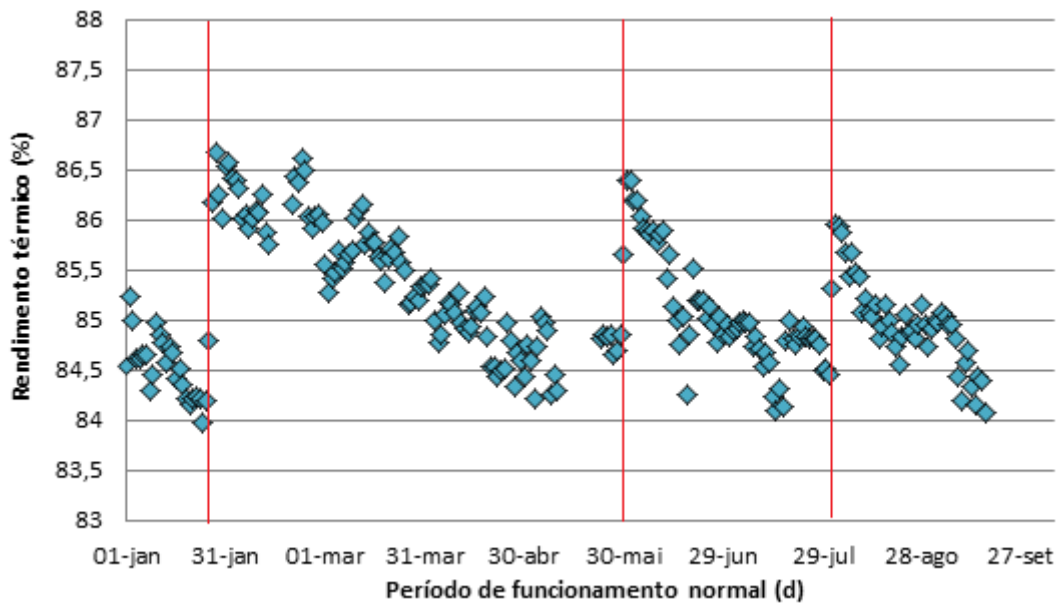


Figura 5.6- Rendimento térmico da fornalha H0471 durante o funcionamento normal.

Pela observação das figuras 5.5 e 5.6, verifica-se que as limpezas têm um impacto significativo na temperatura de saída dos gases de combustão e no rendimento das fornalhas.

Após cada limpeza verifica-se uma melhoria do rendimento térmico e seguidamente, à medida que o tempo vai passando, observa-se uma queda do rendimento e a subida da temperatura dos gases de combustão à saída da fornalha. O processo repete-se após nova limpeza.

Tendo em conta os resultados anteriormente mencionados é sugerido efectuar mensalmente a limpeza química das três fornalhas mais consumidoras da FAR.

Foi calculado o ganho médio de rendimento que se obtém ao efectuar a limpeza todos os meses em comparação com o rendimento médio que se obteve durante o período de funcionamento normal.

A análise foi realizada para as fornalhas mais consumidoras de energia, tendo em conta o período antes da sugestão e um hipotético período após a sugestão. Os resultados estão representados nas tabelas 5.1 e 5.2 respetivamente.

Tabela 5.1- Comparação dos rendimentos térmicos das fornalhas com e sem a sugestão de melhoria.

Antes da melhoria	Fornalha	H0101	H0301	H0471
	Rendimento térmico médio (%)	85,2	83,7	85,1
Após a melhoria	Fornalha	H0101	H0301	H0471
	Rendimento térmico médio (%)	85,4	84,0	85,6

Com os resultados de rendimento em ambas as situações é possível determinar a poupança de energia que advém da implementação da sugestão. Na tabela 5.3 são apresentados esses valores. Os cálculos podem ser consultados no anexo F.1.

Tabela 5.2- Percentagem da poupança de energia registada após a sugestão de melhoria energética.

Fornalhas	H0101	H0301	H0471
Poupança de energia (%)	0,3	0,7	0,9

Atendendo aos valores presentes na tabela 5.3, verifica-se que com a implementação de limpezas mensais é possível obter uma poupança de 0,7% no consumo de energia diário da fornalha H0301, 0,9% na fornalha H0471, enquanto na fornalha H0101 verifica-se uma poupança no consumo de energia diária de 0,3%. Como a percentagem de poupança obtida é um valor baixo, tem que se ter em conta que, esta poderá ser inferior ao erro experimental associados às medições efetuadas.

## 5.2.2 Mudança do combustível - utilização exclusiva de FG

Na secção 3.1.1 foram analisadas e discutidas as características dos combustíveis alimentados às fornalhas bem como alguns parâmetros indicadores da combustão dos mesmos. Tendo em conta essa informação, nesta secção é feita uma análise energética após a substituição de FO e FG por FG na fornalha H0101.

Esta alteração foi efetuada no dia 30 de Março de 2012. Verificou-se um aumento do rendimento conforme seria de esperar uma vez que:

- O FG necessita de menor quantidade de ar estequiométrico;
- A combustão com FG não provoca sujamento.

Os resultados da estimativa de rendimento são apresentados na tabela 5.3 e os cálculos podem ser consultados no anexo F.2.

Tabela 5.3- Rendimentos térmicos da fornalha H0101 para os diferentes funcionamentos atendendo o combustível consumido.

Combustível	FG e FO	FG
Rendimento térmico (%)	85,2	86,1
Ganho de rendimento (%)		0,9

Pela tabela 5.3 constata-se que o ganho obtido na fornalha H0101 é de 0,9%,

Não foi possível realizar este estudo para as fornalhas: H0301 e H0471, uma vez que no período em estudo não houve alteração de combustível. No entanto, dado o ganho obtido na fornalha H0101, seria vantajoso analisar o impacto que esta medida teria no rendimento das referidas fornalhas. Desta forma foi assumido o mesmo ganho e calculou-se as poupanças obtidas em cada fornalha (tabela 5.4).

Tabela 5.4- Percentagem da poupança de energia registada após a sugestão de melhoria energética.

Fornalhas	H0101	H0301	H0471
Poupança de energia (%)	0,9	1,3	1,3

Atendendo aos valores presentes na tabela 5.5, verifica-se que com a alteração do combustível é possível obter uma poupança de 1,3% no consumo de energia diária nas fornalhas H0301 e H0471, enquanto na fornalha H0101 verifica-se uma poupança de 0,9%.

Tal como aconteceu anteriormente com a sugestão de efetuar as limpezas mensais, as poupanças verificadas na sugestão de mudança de combustível poderão ser inferiores ao erro experimental associadas às medições efetuadas.

Após a realização de todos os cálculos relativos às duas sugestões de melhoria conclui-se que utilizando a sugestão de operar as fornalhas só com FG é mais vantajosa do ponto de vista energética, relativamente à proposta de limpeza. Desta forma, a análise económica foi feita apenas a análise económica à proposta de mudança de combustível.

### 5.2.3 Análise económica

Nesta secção é apresentada a análise económica, para a sugestão de melhoria energética de operar as fornalhas H0101, H0301 e H0471 exclusivamente a FG. A análise compreendeu os dados relativos ao período de funcionamento normal da FAR, sendo depois extrapolados para todo o ano. Esta análise económica só teve em conta os custos associados à operação das fornalhas, ou seja, com os custos de combustível alimentado às fornalhas. Na tabela 5.5 são apresentados os parâmetros económicos e energéticos necessários para a realização desta análise. Os dados e cálculos relativos à análise económica podem ser consultados no anexo F.2.

Tabela 5.5- Parâmetros económicos e energéticos para a realização da análise económica.

Custo do FG (€/t)	692,93
Custo do FO (€/t)	533,91
PCI médio do FG (kJ/g)	48,94

Pela observação da tabela 5.5, verifica-se que o custo do FG é superior ao custo do FO. De seguida será verificado se o aumento de rendimento associado à operação só com FG, consegue colmatar esta diferença de custo resultando num custo de operação das fornalhas menor.

Na tabela 5.6 são apresentados os consumos dos combustíveis e os custos de operação antes e depois da medida de melhoria energética.

Tabela 5.6- Consumos de combustível e o gasto de operação do antes e depois da medida de melhoria energética.

		Antes da melhoria	Após a melhoria
Consumos de combustível (t/ano)	FG	20003	38484
	FO	22821	-
Custos de operação (€/ano)		26045 039	25666718

Analisando a tabela 5.6, verifica-se que a alteração de combustível nas fornalhas em estudo traduz-se num custo de operação bastante mais se as fornalhas operassem exclusivamente a FG.

A operação das fornalhas só com FG traria mais encargos com a operação no valor de 621 679 € por ano. Apesar de não existir poupança a nível financeiro, a implementação desta sugestão propicia uma redução de 24% nas emissões de dióxido de carbono para a atmosfera realizado pelas três fornalhas, fator que poderá ser muito importante para cumprir possíveis metas de emissões e talvez possam compensar o grande aumento verificado com os custos de operação. O cálculo da redução das emissões de dióxido de carbono pode ser consultado no anexo F.2.

De salientar que a análise foi realizada sem estarem incluídos quaisquer custos com um possível investimento. No atual panorama da FAR não é possível alimentar as fornalhas H0101, H0301 e H0471 só a FG, por limitações na linha de abastecimento de FG. Para ser possível implementar esta alteração teria de ser realizado um investimento na linha de FG.

## 6. Conclusões e propostas para trabalhos futuros

Neste capítulo são referidas as principais conclusões sobre os resultados obtidos nos capítulos 3, 4 e 5. Para uma melhor visualização, as conclusões serão agrupadas consoante o capítulo onde os resultados aparecem.

No capítulo 3, foi apresentada uma análise aos combustíveis utilizados pelas fornalhas. Os resultados permitiram chegar às seguintes conclusões:

- O FG, comparativamente ao FO é o combustível com menor teor de carbono na sua constituição;
- Na queima dos combustíveis é o FG que produz menor massa de  $\text{CO}_2$  e o que necessita de menor quantidade de ar para um queima completa e estequiométrica;
- Existiu um maior consumo mássico de FO do que FG durante o funcionamento normal da FAR, verificando-se a situação contrária durante o arranque;
- Em ambos os períodos a combustão do FG foi a fonte de energia predominante;
- As fornalhas H0101, H0301 e a H0471 têm os consumos energéticos mais elevados, em contrapartida a fornalha H0303 tem um consumo quase insignificante, esta tendência foi observada nos dois períodos de funcionamento.

No capítulo 4 foram apresentados e discutidos os indicadores de performance das fornalhas. Os resultados apresentados do rendimento térmico das fornalhas durante os dois períodos de funcionamento permitiram concluir:

- As fornalhas com zona de convecção apresentam um rendimento entre a gama dos 80% e os 90%, indicando um bom funcionamento segundo dados bibliográficos enquanto as fornalhas só com zona de radiação apresentam um rendimento bem mais baixo na gama dos 60% - 70%;
- O período de arranque favorece as fornalhas apenas com zona de radiação: o rendimento aumenta significativamente durante este período;
- Os valores de rendimento fornecidos pelo simulador processual Aspen são bastante próximos aos obtidos pelo balanço de energia, fornecendo uma boa estimativa do rendimento das fornalhas.

No capítulo 5 foram sugeridas duas medidas de melhoria energética para serem aplicadas nas três fornalhas mais consumidoras da FAR. Os resultados permitiram concluir:

- A execução de uma limpeza química mensal nas fornalhas em estudo permite uma poupança energética diária de 0,3% para as fornalhas H0101, 0,7% para a fornalha H0301 e uma poupança de 0,9% na fornalha H0471;
- O uso exclusivo de FG como combustível traduz-se numa poupança energética diária de 1,3% nas fornalhas H0301 e H0471; e uma poupança de 0,9% na fornalha H0101;
- A análise económica realizada tendo em conta a sugestão do uso exclusivo de FG como combustível mostrou que existe um aumento de 621 679 € por ano no custo de operação das fornalhas, mas em contrapartida provoca uma redução de 24% nas emissões de CO<sub>2</sub>, das três fornalhas mais consumidoras de energia.

Como propostas de trabalho futuro propõe-se:

- Efetuar os balanços de energia às fornalhas eliminando erros associados às perdas. No balanço de energia a única parcela que foi obtida tendo em conta os dados bibliográficos foi a energia associada às perdas por convecção e radiação. Seria interessante a realização de um estudo sobre as perdas existentes nas fornalhas, calculando-as de forma rigorosa e estabelecendo uma relação com as alterações de fatores ambientais. Este trabalho permitiria que o cálculo do rendimento das fornalhas fosse mais exato e poderia evidenciar possíveis anomalias na estrutura das fornalhas;
- Analisar a incerteza experimental, associadas às medições efetuadas para a realização de todos os balanços;
- A realização de um estudo sobre a linha de abastecimento de FG determinando quais as mudanças a ser efectuadas e o investimento financeiro necessário, avaliando a sua viabilidade económica. Este estudo seria interessante uma vez que a alteração sugerida de alimentar as fornalhas H0101, H0301 e H0471 exclusivamente a FG, no atual panorama da FAR, seria impossível de realizar visto que a linha de abastecimento de FG à FAR não consegue abastecer a quantidade necessária.

## Referências bibliográficas

- API STD 560, 2007. Fired heaters for general refinery service, 4<sup>th</sup> edition. American petrol institute, Washington. 266pp
- Borghì, R e Destriau, M, 1995. Combustion and Flames – Chemical and Physical Principles . Éditions Technip, Paris. 377pp
- Bussman, WR e Baukal, CE, 2009. Ambient conditions effects on process heater efficiency. Energy 24: 1624-1635
- Estação meteorológica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. <http://experimenta.fe.up.pt/estacaometeorologica/historico.php?lang=pt> (acedido em 08 de Maio de 2013)
- Galp Energia- a sua energia positiva. 2010. <http://www.galpennergia.com/PT/Paginas/Home.aspx> (acedido em 08 de março de 2013)
- Infotherm – Thermophysical Properties Database. 2013. <http://www.fiz.chemie.de/infotherm/servlet/infothermSearch> (acedido em 10 de Maio de 2013)
- Jegla, Z, Stehlík, P e Kohoutek, J, 2000 . Plant energy saving through efficient retrofit of furnaces. Applied Thermal Engineering 20: 1545-1560
- McKay, D, Shiu, WY, Ma, KC e Lee, SC, 2006. Physical and Chemical and Properties and Environmental Fate of Organic Chemicals. Taylor & Francis, London. 4182pp
- Morris, AE, Geiger, G e Fine, HA, 2011. Handbook on Material and Energy Balance Calculations in Materials Processing, 3<sup>rd</sup> Edition. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. 616pp
- Mullinger, P e Jenkins, B, 2008. Industrial and Process Furnaces . Elsevier Butterworth Heinmann, Oxford. 524pp
- Perry, RH e Green, DW, 1999. Perry's Chemical Engineers Handbook. McGraw-Hill, New York.
- Schimdt, PF, 1986. Fuel Oil Manual, Vol.10, 4<sup>th</sup> edition. Industrial Press Inc., New York. 241pp

Sinnot, RK, 2005. Chemical Engineering Design, Vol.6, 4<sup>th</sup> edition . Elsevier Butterworth Heinmann, Oxford. 1038pp

Smith, JM, Van Ness, HC e Abbott, MM, 2005. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. McGraw-Hill, Chemical Engineering Series. 817pp

Trinks, W, Mawhinney, MH, Shannon, RA, Reed, RJ e Garvey, JR, 2004. Industrial Furnaces, 6<sup>th</sup> edition. John Wiley & Sons, Hoboken. 473pp

Turns, SR, 2000. An Introduction to Combustion Concepts and Applications . McGraw-Hill, Singapore.676pp

Yaws, CL, 1996. Handbook of Thermodynamic Diagrams. Gulf Publishing Company, Houston.

# **Anexos**



# Anexo A- Exemplos de cálculo dos balanços de massa às fornalhas

Nesta secção são apresentados os exemplos de cálculo relativos aos balanços de massa realizados às fornalhas.

Exemplo de cálculo para a fornalha H0101, relativo ao dia 3 de janeiro de 2012.

Os valores apresentados na tabela 3.1, correspondem a um valor médio obtido à custa dos valores diários.

## A.1- Composição do FG que alimenta as fornalhas

O combustível gasoso que é usado para alimentar as fornalhas da FAR é uma mistura de três correntes de gás. É utilizado o Fuel Gás de serviço da refinaria ( ), juntamente com uma corrente de gás proveniente do produto de topo da coluna T-0401 e uma outra corrente de gás de reciclo proveniente da U-0400. Estas três correntes são encaminhadas para o acumulador D-0405, misturam-se, resultando no Fuel Gás que alimenta as fornalhas .

Para a realização dos cálculos nesta secção foi utilizada a seguinte nomenclatura dos compostos presentes no combustível:

=

=

=

4 = 4 8

4 = 4 10

5 = 5 10

5 = 5 12

=

( )).

Cálculo da Massa molar de cada uma das correntes de Fuel Gás

O exemplo de cálculo que se apresenta de seguida refere-se apenas ao . As massas molares das outras correntes foram obtidas utilizando a mesma equação.

$$= \frac{\%}{\text{---}} \times \quad (A.1)$$

A composição do FG de serviço da refinaria, foi obtida através da análise realizada pelo laboratório da refinaria, encontrando-se os valores representados de seguida. Os valores da análise são relativos à % molar de cada composto presente no Fuel Gás.

Lista dos valores da percentagem molar de cada um dos constituintes do :

% =0,09

% =34,4

%<sub>1</sub> =39,1

%<sub>2</sub> =11,5

%<sub>3</sub> =7,5

%<sub>4</sub> =1,6

%<sub>4</sub> =2,7

%<sub>5</sub> =0,4<sub>0</sub>

%<sub>5</sub> =0,2<sub>0</sub>

%<sub>6</sub> =2,1

% =0,5<sub>0</sub>

% =0

$$\begin{array}{r}
 = \frac{\%}{100} \times \\
 + \frac{\%}{100} \times \\
 + \frac{\%}{100} \times \\
 + \frac{\%}{100} \times
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 + \frac{\%}{100} \times \\
 + \frac{\%}{100} \times \\
 + \frac{\%}{100} \times \\
 + \frac{\%}{100} \times
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 + \frac{\%}{100} \times \\
 + \frac{\%}{100} \times \\
 + \frac{\%}{100} \times \\
 + \frac{\%}{100} \times
 \end{array}$$

$$=18,6/$$

Para as restantes correntes de FG as composições molares (fornecidas pelo laboratório da FAR) são:

Tabela A.1- Composições do Fuel Gás da coluna T-0401 para o dia 3 de janeiro de 2012.

Fuel Gás da coluna T-0401	
Componentes	%molar
H2	27,8
C1	11,7
C2	12,8
C3	17,0
i C4	15,3
n C4	8,6
i C5	4,0
n C5	1,7
n C6	0,5

Tabela A.2- Composições do Fuel Gás de reciclo para o dia 3 de janeiro de 2012.

Fuel Gás de reciclo	
Componentes	% molar
H2	82,7
C1	12,0
C2	3,0
C 3	1,4
i C4	0,6
n C4	0,2
i C5	0,1
n C5	0,0
n C6	0,0

Para calcular as massas molares das restantes correntes de FG foi utilizada o mesmo raciocínio, resultando nos valores seguintes:

$$=5,65/$$

$$=32,2/$$

Cálculo da percentagem molar de cada componente presente no \_\_\_\_\_ :

O exemplo de cálculo que se apresenta de seguida refere-se à percentagem de Ácido sulfídrico no \_\_\_\_\_. As percentagens dos outros componentes são obtidas pela mesma equação.

Os valores dos caudais de Fuel Gás foram obtidos por medidores, colocados nas unidades processuais, que estão ligados aos painéis de controlo da fábrica. A aquisição de dados foi feita pelo software (Aspen Process Explorer).

$$=2,02/h$$

$$=0,0744/h$$

$$=1,09/h$$

$$=18,6/$$

$$=5,65/$$

$$=32,2/$$

$$\% = \frac{\% \times \underline{\hspace{2cm}}}{\underline{\hspace{2cm}}} \quad (\text{A.2})$$

Como o exemplo de cálculo é feito apenas para o H<sub>2</sub>S e este componente só está presente na corrente , então a é obtida a partir de :

$$\% = 0,09$$

$$\% = \frac{\% \times \underline{\hspace{2cm}}}{\underline{\hspace{2cm}} + \underline{\hspace{2cm}} + \underline{\hspace{2cm}}}$$

$$\% = 0,063$$

A partir deste valor diário obtido, realizou-se a média, com todos os valores obtidos para o período de funcionamento normal e arranque. A percentagem molar média obtida foi: 0,07.

Fazendo o mesmo cálculo para os restantes componentes obtêm-se as seguintes composições molares:

$$\% = 37,1$$

$$\% = 30,8$$

- % =11,1
- % =9,1
- % =4,5
- % =3,78
- % =1,16
- % =0,511
- % =1,57
- % =0,348
- % =0

Com as composições determinadas e recorrendo à equação A.1, é possível determinar a massa molar da corrente do Fuel Gás que alimenta as fornalhas, resultando no valor de:

$$=20,71$$

## A.2- Equações de queima dos combustíveis

Nesta secção são apresentadas todas as equações de queima dos combustíveis. Estas equações serviram de base para a realização do balanço de massa às fornalhas.

Equações relativas à queima do FG:

$$2 \text{ ( )} + 3 \text{ ( +3,76 )} \rightarrow 2 \text{ ( )} + 2 \text{ ( )} + 11,28$$

$$2 \text{ ( )} + \text{ ( +3,76 )} \rightarrow \text{ ( )} + 3,76 \text{ ( )}$$

$$\text{ ( )} + 2 \text{ ( +3,76 )} \rightarrow \text{ ( )} + 2 \text{ ( )} + 7,52 \text{ ( )}$$

$$2 \text{ ( )} + 7 \text{ ( +3,76 )} \rightarrow 4 \text{ ( )} + 6 \text{ ( )} + 26,32 \text{ ( )}$$

$$\text{ ( )} + 5 \text{ ( +3,76 )} \rightarrow 3 \text{ ( )} + 4 \text{ ( )} + 18,8 \text{ ( )}$$

$$2 \text{ ( )} + 13 \text{ ( +3,76 )} \rightarrow 8 \text{ ( )} + 10 \text{ ( )} + 48,88 \text{ ( )}$$

$$\text{ ( )} + 6 \text{ ( +3,76 )} \rightarrow 4 \text{ ( )} + 4 \text{ ( )} + 22,56 \text{ ( )}$$

$$\text{ ( )} + 8 \text{ ( +3,76 )} \rightarrow 5 \text{ ( )} + 6 \text{ ( )} + 30,08 \text{ ( )}$$

$$2 \text{ ( )} + 15 \text{ ( +3,76 )} \rightarrow 10 \text{ ( )} + 10 \text{ ( )} + 56,4 \text{ ( )}$$

$$2 \text{ ( )} + 19 \text{ ( +3,76 )} \rightarrow 12 \text{ ( )} + 14 \text{ ( )} + 71,44 \text{ ( )}$$

#### Equações de queima relativas ao FO:

Como a composição do FO, que foi fornecida pelo laboratório da Refinaria de Sines, vem expressão em termos da percentagem mássica dos elementos atómicos que constituem o FO, as equações de queima só têm estados físicos para o comburente e para os produtos da reação.

$$+ ( +3,76 )() \rightarrow ()+3,76 ()$$

$$2+ \frac{1}{2} ( +3,76 )() \rightarrow ()+1,88 ()$$

$$+ ( +3,76 )( ) \rightarrow ( )+3,76 ()$$

### A.3- Balanço de massa relativo à combustão do FG

A combustão completa e estequiométrica refere-se a uma combustão em que o comburente é fornecido nas proporções estequiométricas e é totalmente consumido produzindo gases de exaustão sem a presença de qualquer espécie de inqueimados. No caso em estudo o cálculo da quantidade de ar para uma combustão deste tipo foi realizado por partes, pelo simples fato de a fornalha utilizar dois combustíveis distintos. Primeiramente foi efetuado o cálculo do oxigénio necessário ao e posteriormente determinado o oxigénio necessário para a combustão do . Depois de se ter obtido a quantidade de oxigénio para a combustão dos dois combustíveis procedeu-se à determinação do azoto presente no ar.

#### A.3.1- Cálculo da massa de Oxigénio necessária à combustão do

A determinação da massa de oxigénio necessária para a combustão do foi realizada para cada um dos componentes existentes no . O exemplo de cálculo que a seguir se apresenta é relativo à combustão do ácido sulfídrico.

Cálculo da massa de oxigénio necessária para a queima completa e estequiométrica do ácido sulfídrico presente no \_\_\_\_\_ :

O valor do caudal de \_\_\_\_\_ foi obtido por um medidor colocado na linha de alimentação à fornalha, que está ligado aos painéis de controlo da fábrica. A aquisição de dados foi feita pelo software (Aspen Process Explorer).

$$=21,77/$$

$$=20,7/$$

$$2 \text{ ( )} + 3 \text{ ( +3,76 ) ( )} \rightarrow 2 \text{ ( )} + 2 \text{ ( )} \quad (\text{A.3})$$

$$= \frac{\text{---}}{\text{---}} \times \% \times \text{---} \quad (\text{A.4})$$

$$=0,032/$$

As restantes massas de oxigénio necessário para a combustão completa e estequiométrica, para os restantes componentes do \_\_\_\_\_ são calculadas da mesma forma, resultando nos valores apresentados na tabela A.3.

Tabela A.3- Quantidades de oxigénio necessárias para a queima de todos os constituintes do \_\_\_\_\_ , para o dia 3 de janeiro de 2012.

Componentes	Quantidade de oxigénio necessária (t/dia)
H2	6,29
C1	20,93
C2	13,15
C3	15,39
iC4	9,96
nC4	8,34
iC5	3,16
nC5	1,39
C6	5,07

Cálculo da massa total de oxigénio necessária para a queima completa e estequiométrica do \_\_\_\_\_ que alimenta as fornalhas:

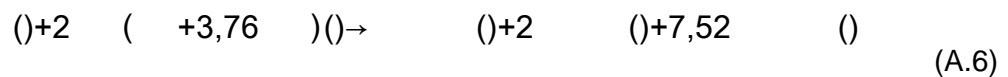
A quantidade de oxigénio necessária para a combustão do \_\_\_\_\_ foi obtida, fazendo o somatório de todas as massas de oxigénio necessárias à combustão de todos os componentes presentes no \_\_\_\_\_, a partir do valor calculado anteriormente e dos valores da tabela A.3.

$$= \text{_____} \quad (A.5)$$

$$=83,7/$$

**A.3.2 - Cálculo da massa dos produtos de combustão, resultantes da queima do \_\_\_\_\_ para a combustão completa e estequiométrica**

O exemplo de cálculo apresentado de seguida será relativo para o metano. Sendo aplicada a mesma metodologia para os restantes constituintes do \_\_\_\_\_.



Cálculo do dióxido de carbono formado pela combustão:

$$=21,77/$$

$$=20,7/$$

$$\% =30,8$$

(resultado calculado no ponto A.1)

$$= \frac{\quad}{\quad} \times \frac{\%}{\quad} \times \quad \quad \quad (A.7)$$

$$=14,3/$$

Cálculo da água formada pela combustão:

$$= \frac{\quad}{\quad} \times \frac{\%}{\quad} \times \quad \quad \quad (A.8)$$

$$=11,7/$$

Utilizando o mesmo raciocínio foram calculadas as respectivas massas dos gases formados para cada um dos constituintes do . Os valores são apresentados na tabela A.4.

Tabela A.4- Quantidades dos gases formados, sem Azoto, na queima de todos os constituintes do ,para o dia 3 de janeiro de 2012.

Constituinte do FG <sub>f</sub>	Gás formado	Quantidade (t/dia)
H <sub>2</sub> S	H <sub>2</sub> O	0,01
	SO <sub>2</sub>	0,06
H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	3,54
C1	H <sub>2</sub> O	14,4
	CO <sub>2</sub>	11,8
C2	H <sub>2</sub> O	6,54
	CO <sub>2</sub>	10,3
C3	H <sub>2</sub> O	6,92
	CO <sub>2</sub>	12,7
iC4	H <sub>2</sub> O	4,31
	CO <sub>2</sub>	8,4
nC4	H <sub>2</sub> O	3,61
	CO <sub>2</sub>	7,2
iC5	H <sub>2</sub> O	1,33
	CO <sub>2</sub>	2,8
nC5	H <sub>2</sub> O	0,59
	CO <sub>2</sub>	1,2
C6	H <sub>2</sub> O	2,10
	CO <sub>2</sub>	4,4

A massa total de CO<sub>2</sub>, formada para o dia 3 de janeiro de 2012, tendo em conta todos os constituintes do , foi de 61,4 t/dia.

## A.4- Balanço de massa relativo à combustão do FO

Nesta secção são apresentados todos os cálculos relativos aos balanços de massa da queima do FO.

### A.4.1-Cálculo da massa de oxigénio necessária para a queima completa e estequiométrica do Fuel Óleo que alimenta as fornalhas

A composição do FO foi obtida através da análise realizada pelo laboratório da refinaria de Sines. Semanalmente é enviada uma amostra do FO para o laboratório da refinaria de Sines para se proceder à sua análise. Os valores da análise são relativos à percentagem mássica de cada componente presente no FO e encontram-se na tabela A.5 e são relativos ao dia 3 de janeiro de 2012.

Tabela A. 5- Valores da análise realizada ao FO relativo à sua constituição.

Componentes:	%(m/m)
Carbono (C)	85,69
Hidrogénio (H)	11,03
Azoto (N)	0,73
Enxofre (S)	1,78

O valor do caudal de FO foi obtido por um medidor, colocado na linha de alimentação à fornalha, que está ligado aos painéis de controlo da fábrica. A aquisição de dados foi feita pelo software (Aspen Process Explorer).

$$=11,73/$$

(valor do dia 3 de janeiro de 2012)

$$+ ( \quad +3,76 \quad ) \rightarrow \quad ( ) +3,76 \quad ( )$$

(A.9)

$$2+ \quad ( \quad +3,76 \quad ) \rightarrow \quad ( ) +1,88 \quad ( )$$

(A.10)

$$= \frac{x \cdot x\%}{-} + \frac{x \cdot x\%}{-} \times \quad (A.11)$$

$$=37,4/$$

#### A.4.2 -Cálculo da massa do vapor de atomização necessária para a combustão do FO

Determinação da massa de vapor de água de atomização do :

Na fornalha a combustão do é auxiliada por vapor de água saturado. Este vapor irá atomizar o em pequenas gotículas aumentando assim a área de contato do FO com o comburente. Como não foi possível obter o Data Sheet do queimador, a determinação da massa do vapor de atomização foi estimada tendo como base o manual API STD 560 (API, 2007). Neste manual é referido um valor típico de consumos de vapor de atomização, por parte de queimadores, de 50% do consumo de .

$$=11,73/$$

$$=0,5 \times$$

(A.12)

$$=5,87/$$

#### A.4.3 - Cálculo da massa dos produtos de combustão, resultantes da queima do para a combustão completa e estequiométrica

Este cálculo foi realizado para uma combustão completa e estequiométrica utilizando ar.

$$=11,73/$$

Cálculo do dióxido de carbono formado pela combustão:

$$+ \quad ( \quad +3,76 \quad )( \quad ) \rightarrow \quad ( \quad ) +3,76 \quad ( \quad ) \quad (A.13)$$

$$= \frac{ \quad \times \quad \times \% \quad }{ \quad } \times \quad (A.14)$$

$$=36,8/$$

Cálculo da água formada pela combustão:

$$=11,73/$$

$$2+ \quad ( \quad +3,76 \quad )( \quad ) \rightarrow \quad ( \quad ) +1,88 \quad ( \quad ) \quad (A.15)$$

$$= \frac{ \quad \times \quad \times \% \quad }{ \quad } \times \quad (A.16)$$

$$=11,6/$$

Cálculo do Dióxido de enxofre formado pela combustão:

$$=11,73/$$

$$+ \quad ( \quad +3,76 \quad )( \quad ) \rightarrow \quad ( \quad ) +3,76 \quad ( \quad ) \quad (A.17)$$

$$= \frac{x \times x\%}{x} \quad (A.18)$$

$$=0,420/$$

A massa total de H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>, formada para o dia 3 de janeiro de 2012, tendo em conta todos os constituintes do FO, foi de 48,8 t/dia.

## A.5- Ar necessário para a queima completa e estequiométrica

Cálculo da massa de oxigénio necessária fornecer à fornalha para a queima completa e estequiométrica:

Depois de determinadas as quantidades estequiométricas de oxigénio para a combustão de cada um dos combustíveis, a quantidade total a fornecer à fornalha foi obtida pela soma apresentada na equação A.19.

Os valores a usar na equação A.19 foram calculados nas secções A.3.1 e A.4.1.

$$=37,4/ \quad (\text{valor calculado no ponto A.4.1})$$

$$=83,7/ \quad (\text{valor calculado no ponto A.3.1})$$

$$= \quad + \quad (A.19)$$

$$=121/$$

### A.5.1-Cálculo da massa de azoto presente no ar necessário para a queima completa e estequiométrica:

O comburente utilizado para a combustão é o ar, e a quantidade de oxigénio a fornecer está relacionado com a quantidade de azoto que entra com este oxigénio. A quantidade de azoto que entra na fornalha, foi calculada pela equação A.20, tendo em conta que as percentagens molares do ar utilizadas para o cálculo foram de 79% para o azoto e 21% para o oxigénio.

$$=121/$$

$$= \frac{\%}{\%} \times \quad \times \quad \quad \quad (A.20)$$

$$=399/$$

### A.6- Obtenção do coeficiente de ar e da massa de ar alimentada às fornalhas

A quantidade de ar que alimenta as fornalhas, para uma combustão completa, apresenta sempre um valor superior à quantidade estequiométrica. O ar é alimentado às fornalhas em excesso garantindo assim que todo o combustível encontra oxigénio para a sua combustão minimizando a possível presença de inqueimados nos gases de combustão.

#### A.6.1-Construção do diagrama de Ostwald e determinação do coeficiente de ar:

Na FAR as fornalhas não possuem individualmente uma chaminé que canaliza os gases de combustão para a atmosfera, em vez disso, existe uma chaminé principal, que recebe todos os gases de combustão de todas as fornalhas da fábrica através de condutas próprias para o efeito. Na chaminé principal a análise de fumos é feita de forma contínua, com o intuito de controlar as emissões gasosas da fábrica. O único parâmetro analisado nos fumos da

chaminé de cada fornalha é o teor de oxigénio. Então devido à ausência de dados de análise detalhados dos fumos de cada fornalha, a determinação do excesso de ar utilizado na combustão foi realizada através de um método gráfico, o diagrama de Ostwald representado pela figura A.1. Para a construção deste diagrama foi admitido que nos gases de combustão o teor de monóxido de carbono é muito baixo e por isso desprezável.

Cálculo da percentagem molar máxima de dióxido de carbono e de dióxido de enxofre resultante dos gases de combustão da fornalha, para uma queima completa e estequiométrica:

Pelas massas de cada um dos componentes calculados anteriormente e a sua respetiva massa molar calculou-se o número de moles de cada constituinte.

$$=0,84/$$

$$=0,0075/$$

$$=1,392/$$

$$=0/$$

$$=14,25/$$

$$=0,01/$$

$$=0,004/$$

$$\%(\quad + \quad) = \frac{\quad}{\quad} \times 100 \quad (A.21)$$

$$\%(\quad + \quad) = 13,6$$

Construção do Diagrama de Ostwald:

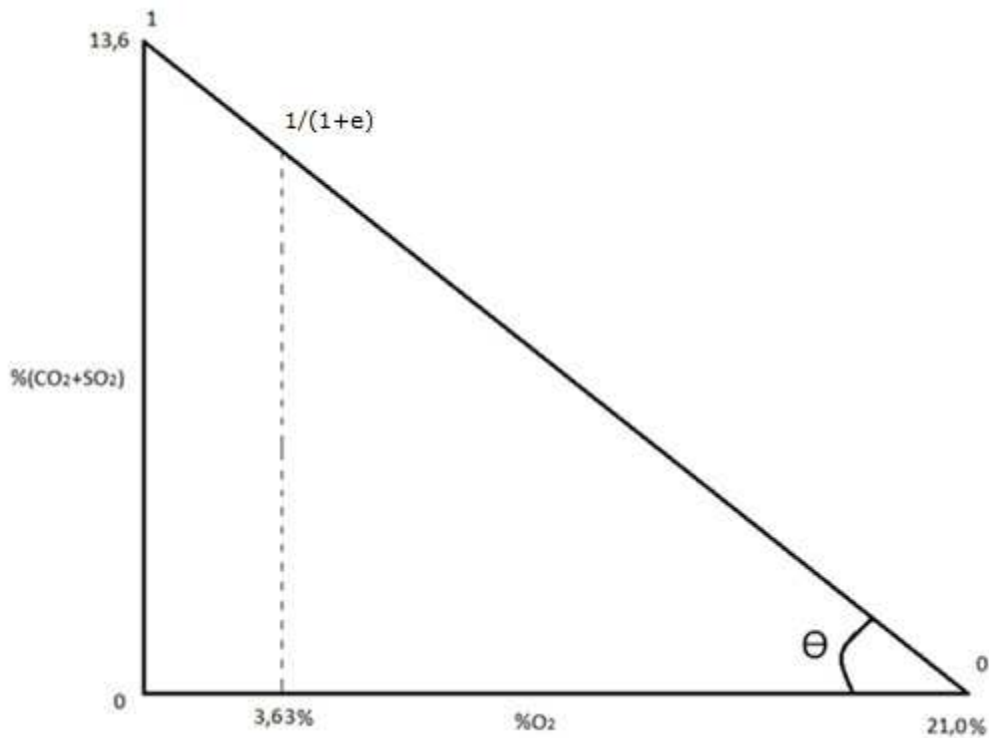


Figura A. 1- Diagrama de Ostwald da queima do etano e do acetileno.

Depois de construído o Diagrama de Ostwald, obtém-se o ângulo do triângulo ( $\theta$ ) e posteriormente através de relações trigonométricas obtém-se o coeficiente de ar.

Determinação do ângulo  $\theta$  do Diagrama de Ostwald:

$\% \text{ O}_2 = 21$   
(percentagem de oxigénio no ar atmosférico)

$\%(\text{CO}_2 + \text{SO}_2) = 13,6$

$$\tan \theta = \frac{\%(\text{CO}_2 + \text{SO}_2)}{\% \text{ O}_2} \times 100 \quad \text{---(A.22)}$$

$\theta = 32,9^\circ$

Determinação do coeficiente de ar ( ) :

$$\% = 3,63$$

(percentagem de oxigénio na corrente de saída da fornalha em base seca

para o dia 3 de janeiro de 2012, obtida pelo Aspen)

$$1 + = \frac{\frac{\% \cdot \%}{\%}}{\%} \quad (A.23)$$

$$= 0,21$$

### A.6.2-Determinação do ar para a combustão:

Depois de calculado o coeficiente de ar, foi possível determinar a massa de ar que entra na fornalha.

Determinação do azoto do ar para a combustão:

$$= 399/$$

(calculado no ponto A.5.1)

$$= 121/$$

(calculado no ponto A.5)

$$\% = 79$$

(percentagem de azoto no ar atmosférico)

$$= \frac{\quad \times (1 +) \times \quad \% \quad \times}{\quad} \quad (A.24)$$

$$= 482/$$



### A.6.3- Determinação da água no ar para a combustão:

O ar usado para a combustão nas fornalhas é ar atmosférico sem qualquer tipo de tratamento. Este ar possui uma humidade associada, que provoca a entrada de vapor de água na fornalha. Para a sua determinação foram necessários vários parâmetros ambientais, tais como a temperatura ambiente e a humidade relativa do ar.

#### Determinação da pressão de saturação da água ( ) do ar ambiente:

A pressão de saturação da água foi obtida com o recurso à equação de Antoine e à temperatura ambiente obtida por um medidor existente na refinaria. As constantes a utilizar na equação de Antoine foram consultadas em bibliografia (Perry e Green, 1999). A temperatura ambiente foi obtida com auxílio de um medidor existente na refinaria, a importação dos dados foi feita pelo Aspen Process Explorer.

$$=17,85^{\circ}$$

(temperatura ambiente referente ao dia 3 de janeiro de 2012)

$$=8,07$$

$$=1730,63$$

$$=233,43$$

$$=10 \quad ( )$$

(A.27)

$$=15,2$$

#### Determinação da pressão de vapor de água ( ) no ar ambiente:

Para a determinação da pressão de vapor de água no ar, foram necessários os dados da humidade relativa. Esses dados, foram obtidos a partir da estação meteorológica da

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), tendo sido calculada a humidade relativa média diária (Estação Meteorológica FEUP, 2013).

$$=81,00$$

% (valor relativo ao dia 3 de janeiro de 2012)

$$=15,2$$

$$= \quad \times \quad \text{---} \quad (A.28)$$

$$=12,3$$

Determinação da humidade específica ( ) do ar ambiente:

Como a Refinaria de Matosinhos se encontra muito próximo do mar e que a diferença de cotas é desprezável, considerou-se que a pressão atmosférica na local da fornalha seria a mesma que ao nível do mar.

$$=760$$

$$=12,3$$

$$= \quad \times \quad \text{---} \quad (A.29)$$

$$=1,02 \times 10 \quad /$$

Cálculo da massa de água que entra com o ar para a combustão:

Depois de determinada a humidade específica facilmente se obtém a massa de água presente no ar necessário alimentar as fornalhas.

$$=482/$$

$$=146/$$

$$= \quad + \quad \times$$

(A.30)

$$=6,41/$$

## **A.7- Determinação da massa dos gases de combustão**

A determinação da massa dos compostos que saem pela chaminé das fornalhas é obtida pela soma das quantidades já anteriormente calculadas pelos balanços de massa.

Cálculo do Dióxido de Carbono presente nos fumos à saída da chaminé:

O dióxido de carbono que sai da chaminé possui duas componentes, uma proveniente da combustão e a outra relativa a uma pequena quantidade de dióxido de carbono presente no e neste caso, no dia 3 de janeiro de 2012 a % foi igual a 0 resultando que a seja igual a 0.

$$=14,3+10,3+12,7+8,4+7,2+2,8+1,2+4,4+36,8/$$

(os valores

referentes à foram calculados nos pontos A.3.2 e A.4.3 referem-se à queima de todos os constituintes do FG<sub>r</sub> e do FO.)

$$\text{é} = + \quad (A.31)$$

$$\text{é} = 98,1/$$

Cálculo da água presente nos fumos à saída da chaminé:

Relativamente ao vapor de água presente nos gases de combustão este possui três origens. A componente principal devido à formação de água pela reação de combustão e duas outras componentes, uma relativa à humidade do ar e outra ao vapor de água de atomização do

$$= 6,41/$$

$$= 5,87/$$

$$= 11,7 + 0,01 + 3,54 + 6,54 + 6,92 + 4,31 + 3,61 + 1,33 + 0,59 + 2,1 +$$

11,6/

(os valores referentes à foram calculados nos pontos A.3.2 e

A.4.3, referem-se à queima de todos os constituintes do FG e do FO.)

$$\text{é} = + + \quad (A.32)$$

$$\text{é} = 64,5/$$

Cálculo do dióxido de enxofre presente nos fumos à saída da chaminé:

O dióxido de enxofre presente nos gases de combustão é devido ao teor de enxofre que os combustíveis apresentam na sua composição. Na reação de combustão esse enxofre formou o dióxido de enxofre, tendo sido quantificado pela equação A.33.

$$=0,06/$$

(valor referente à combustão do ácido sulfídrico presente no

FG<sub>f</sub> e o valor está apresentado na tabela A.2.

$$=0,420/$$

$$\text{é} = \text{+} \tag{A.33}$$

$$=0,480/$$

é

Cálculo do azoto presente nos fumos à saída da chaminé:

O azoto nos fumos tem três origens, a componente que entra com o ar de combustão, uma pequena parte presente no e outra que entra com o FO. A componente de azoto que entra com o ar de combustão foi calculada anteriormente no ponto A.6.2.

$$=482/$$

(calculado no ponto A.6.2)

A componente relativa ao azoto que entra com o foi realizada para a fornalha H0101 e para o dia 3 de janeiro de 2012 e foi calculada da seguinte forma :

$$=21,77/$$

$$=20,7/$$

$$\% =0,348$$

$$= \frac{\quad}{\quad} \times \frac{\%}{\quad} \times \quad \tag{A.34}$$

$$=0,1/$$

A componente relativa ao azoto que entra com o      foi realizada para a fornalha H0101 e para o dia 3 de janeiro de 2012 e foi calculada da seguinte forma:

$$=11,73/$$

%      =0,73  
(da tabela A.3)

$$= \frac{\%}{100} \times \quad (A.35)$$

$$=0,09/$$

Após a determinação de todas as componentes é possível calcular a quantidade de azoto que sai pela chaminé da fornalha H0101.

$$=0,09/$$

$$=0,1/$$

=482/  
(calculado no ponto A.6.2)

$$\text{é} = + + \quad (A.36)$$

$$\text{é} =482/$$



Tabela A. 6- Valores síntese do balanço de massa realizado a todas as fornalhas. (Referentes ao dia 3 de janeiro de 2012).

Fornalhas	Entradas (t/dia)		Saídas (t/dia)	
H0101	N <sub>2</sub>	482	CO <sub>2</sub>	98,1
	O <sub>2</sub>	146	SO <sub>2</sub>	0,48
	H <sub>2</sub> O	12,3	O <sub>2</sub>	25
	FG	21,77	N <sub>2</sub>	482
	FO	11,73	H <sub>2</sub> O	64,5
H0301	N <sub>2</sub>	527	CO <sub>2</sub>	123
	O <sub>2</sub>	160	SO <sub>2</sub>	1,14
	H <sub>2</sub> O	7,1	O <sub>2</sub>	27
	FG	9,02	N <sub>2</sub>	527
	FO	31,14	H <sub>2</sub> O	70,3
H0302	N <sub>2</sub>	163	CO <sub>2</sub>	34,9
	O <sub>2</sub>	49,5	SO <sub>2</sub>	0,24
	H <sub>2</sub> O	2,2	O <sub>2</sub>	8,81
	FG	5,46	N <sub>2</sub>	163
	FO	6,23	H <sub>2</sub> O	21,7
H0303	N <sub>2</sub>	8,7	CO <sub>2</sub>	1,58
	O <sub>2</sub>	2,6	SO <sub>2</sub>	0
	H <sub>2</sub> O	0,12	O <sub>2</sub>	0,47
	FG	0,56	N <sub>2</sub>	8,7
	FO	-	H <sub>2</sub> O	1,16
H0401	N <sub>2</sub>	213	CO <sub>2</sub>	46
	O <sub>2</sub>	64,5	SO <sub>2</sub>	0,32
	H <sub>2</sub> O	2,85	O <sub>2</sub>	11,1
	FG	7,01	N <sub>2</sub>	213
	FO	8,38	H <sub>2</sub> O	28,4
H0402	N <sub>2</sub>	200	CO <sub>2</sub>	43,5
	O <sub>2</sub>	60,8	SO <sub>2</sub>	0,33
	H <sub>2</sub> O	2,69	O <sub>2</sub>	11,3
	FG	5,55	N <sub>2</sub>	200
	FO	8,89	H <sub>2</sub> O	26,3
H0471	N <sub>2</sub>	663	CO <sub>2</sub>	157
	O <sub>2</sub>	201	SO <sub>2</sub>	1,27
	H <sub>2</sub> O	8,9	O <sub>2</sub>	25,9
	FG	17,52	N <sub>2</sub>	663
	FO	34,16	H <sub>2</sub> O	92,5
H0472	N <sub>2</sub>	85,9	CO <sub>2</sub>	18,4
	O <sub>2</sub>	26,1	SO <sub>2</sub>	0,1
	H <sub>2</sub> O	1,15	O <sub>2</sub>	3,83
	FG	3,68	N <sub>2</sub>	85,9
	FO	2,56	H <sub>2</sub> O	11,82

Pela tabela A.6, verifica-se que as emissões de dióxido de carbono para as fornalhas H0101 , H0301 e H0471, apresentam um valor global de 378,1 t/dia.

## Anexo B- Dados experimentais

Na secção B destes anexos são apresentados todos os dados experimentais e os exemplos de cálculos relativos à caracterização dos combustíveis, aos consumos mássicos e energéticos.

### B.1- Análise dos combustíveis

#### B.1.1- FG

Exemplo de cálculo para a fornalha H0101, relativo ao dia 3 de janeiro de 2012.

Para a realização dos cálculos nesta secção foi utilizada a seguinte nomenclatura dos compostos presentes no combustível:

=

=

=

4 = 4 8

4 = 4 10

5 = 5 10

5 = 5 12

=

Rácio entre a massa de carbono e a massa de hidrogénio no \_\_\_\_\_:

O rácio C/H para o \_\_\_\_\_ foi estimado recorrendo a dados bibliográficos. (Mullinger e Jenkins, 2008). Resultando o valor de 3,4.

Cálculo do Poder calorífico inferior ( ) do Fuel Gás que alimenta as fornalhas:

Nas tabelas B.1 e B.2 estão representados respetivamente os valores do \_\_\_\_\_ de cada um dos constituintes do Fuel Gás e as percentagens molares resultantes do

Tabela B.1- Valores do poder calorífico inferior dos diversos constituintes do (Morriset al, 2011;Turns, 2000).

Composto	PCI (kJ/kg)
H <sub>2</sub> S	15186
H <sub>2</sub>	119606
C <sub>1</sub>	50016
C <sub>2</sub>	47161
C <sub>3</sub>	46357
IC <sub>4</sub>	45319
nC <sub>4</sub>	45742
IC <sub>5</sub>	45000
nC <sub>5</sub>	45355
nC <sub>6</sub>	45105
N <sub>2</sub>	-
CO <sub>2</sub>	-

Tabela B. 2- Valores das percentagens molares resultantes do , do dia 3 de janeiro de 2012.

Composto	%molar
H <sub>2</sub> S	0,063
H <sub>2</sub>	37,1
C <sub>1</sub>	30,8
C <sub>2</sub>	11,1
C <sub>3</sub>	9,1
IC <sub>4</sub>	4,5
nC <sub>4</sub>	3,78
IC <sub>5</sub>	1,16
nC <sub>5</sub>	0,511
nC <sub>6</sub>	1,57
N <sub>2</sub>	0,348
CO <sub>2</sub>	0



Para o dia 3 de janeiro de 2012 o rácio apresentado na tabela B.3, foi realizado da seguinte forma.

$$=61,4/ \quad (\text{calculado no ponto A.3.2})$$

$$=1,07 \times 10 \quad / \quad (\text{valor calculado no ponto C.1})$$

$$( \quad ) / \quad = \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad = \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad ,^x \quad (\text{B.2})$$

$$( \quad ) / \quad =57,4/$$

Os valores apresentados na tabela B.3 são os valores médios mensais obtidos a partir dos valores diários que têm em consideração a combustão de todos os constituintes do .

Tabela B.3- Indicador do rácio entre massa CO<sub>2</sub> e a energia de combustão para o FG.

Meses	(CO <sub>2</sub> )/ Hc FG (kg/GJ)
Janeiro	57,3
Fevereiro	48,6
Março	55,6
Abril	56,4
Maio	57,8
Junho	56,6
Julho	55,7
Agosto	58,0
Setembro	56,5

A partir dos valores da tabela resultou o valor médio de 55,8 kg/GJ.

Cálculo do indicador do rácio do ar necessário para uma queima estequiométrica e a energia libertada na combustão.

Exemplo de cálculo para a fornalha H0101, relativo ao dia 3 de janeiro de 2012.

O cálculo deste indicador foi realizado diariamente, fazendo posteriormente a média mensal representada na tabela B.4 e finalmente a média desses valores para um indicador anual.

$$\begin{aligned}
 &= 83,7 / \\
 &\quad \text{(valor calculado no ponto A.3.1)} \\
 &= 1,07 \times 10 \quad / \\
 &\quad \text{(valor calculado no ponto C.1)} \\
 &\quad \text{é/} \quad = \frac{\quad \times \quad \times \frac{\%}{\%}}{\quad} \quad \text{(B.3)} \\
 &\quad \text{é/} \quad = 415 /
 \end{aligned}$$

Tabela B.4- Indicador do rácio entre massa de ar estequiométrico necessário e a energia de combustão para o FG.

Meses	Massa de Ar estequiométrico/Hc FG (kg/GJ)
Janeiro	411
Fevereiro	414
Março	413
Abril	413
Maió	415
Junho	413
Julho	412
Agosto	411
Setembro	410

A partir dos valores da tabela resultou o valor médio de 412 kg/GJ.

### B.1.2- FO

#### Cálculo do rácio mássico entre o carbono e hidrogénio presente no FO:

Exemplo de cálculo para a fornalha H0101, relativo ao dia 3 de janeiro de 2012.

Com os valores médios da composição do FO fornecidos pelo laboratório, foi determinado o quociente entre a composição de carbono e a composição de hidrogénio. Na tabela B.5 é apresentada a composição do FO. O exemplo cálculo refere-se ao dia 3 de janeiro de 2012.

Tabela B.5- Composições do FO.

Componentes:	%(m/m)
Carbono (C)	86,4
Hidrogénio (H)	10,8
Azoto (N)	0,6
Enxofre (S)	1,7

$$\frac{\text{á}}{\text{—}} (l) = \frac{\%}{\%} \quad (B.4)$$

$$\frac{\text{á}}{\text{—}} (l) = \frac{86,4}{10,8} = 8,0$$

Cálculo do indicador do rácio entre a massa de CO<sub>2</sub> formado e a energia libertada na combustão.

Exemplo de cálculo para a fornalha H0101, relativo ao dia 3 de janeiro de 2012.

Da queima estequiométrica do FO resulta CO<sub>2</sub> como um dos produtos de combustão. A massa deste produtos pode ser calculada a partir das equações de combustão de cada um dos constituintes do FO.

No anexo A.4.3 apresenta-se o cálculo da massa de CO<sub>2</sub> resultantes da combustão do FO, para o dia 3 de janeiro de 2012.

Para o dia 3 de janeiro de 2012 o rácio apresentado na tabela B.7, foi realizado da seguinte forma.

$$=4,72 \times 10^3 \text{ kg} / \text{MWh} \quad (\text{valor calculado no ponto C.1})$$

$$=36,8 \text{ kg} / \text{MWh} \quad (\text{calculado no ponto A.4.3})$$

$$\frac{(4,72 \times 10^3) / \text{MWh}}{36,8 \text{ kg} / \text{MWh}} = \frac{128,0}{1} = 128,0 \quad (\text{B.5})$$

$$(128,0) / \text{MWh} = 78,0 \text{ kg} / \text{MWh}$$

Os valores apresentados na tabela B.7 são os valores médios mensais obtidos a partir dos valores diários que têm em consideração a combustão de todos os constituintes do FO.

Tabela B.2- Indicador do rácio entre massa CO<sub>2</sub> e a energia de combustão para o FO.

Meses	CO <sub>2</sub> / Hc FO (kg/GJ)
Janeiro	78,5
Fevereiro	68,3
Março	79,0
Abril	77,9
Maió	78,2
Junho	-
Julho	-
Agosto	-
Setembro	-

Só existem valores até ao mês de maio porque só existiu consumo de FO na fornalha H0101 até a esse mês.

A partir dos valores da tabela resultou o valor médio de 76,4 kg/GJ.

Cálculo do indicador do rácio do ar necessário para uma queima estequiométrica e a energia libertada na combustão.

Exemplo de cálculo para a fornalha H0101, relativo ao dia 3 de janeiro de 2012.

O cálculo deste indicador foi realizado seguindo o mesmo raciocínio indicado no anexo B.1.1.

$$=37,4/ \quad (\text{valor calculado no ponto A.4.1})$$

$$=4,72 \times 10 \quad / \quad (\text{valor calculado no ponto C.1})$$

$$\frac{\text{é/}}{\text{é/}} = \frac{\text{---} \times \text{---} \times \frac{\%}{\%}}{\text{---}} \quad (\text{B.6})$$

$$\frac{\text{é/}}{\text{é/}} = 420/$$

Tabela B.3- Indicador do rácio entre massa de ar estequiométrico necessário e a energia de combustão para o FO.

Meses	Massa de Ar estequiométrico/Hc FO (kg/GJ)
Janeiro	421
Fevereiro	415
Março	419
Abril	412
Maió	416
Junho	-
Julho	-
Agosto	-
Setembro	-

Só existiu consumo de FO na fornalha H0101 até ao mês de Maio.

A partir dos valores da tabela resultou o valor médio de 416 kg/GJ.

## B.2- Consumos mássicos e energéticos

Nas tabelas B.4 e B.5 são apresentados os consumos mássicos de combustível e os consumos energéticos da FAR durante o funcionamento normal.

### Funcionamento normal

Tabela B.4- Consumos de combustível da FAR no período de funcionamento normal.

Fuel Gás	20834	t
Fuel Óleo	22447	t

Considerando os valores de  $PCI_{FG} = 48,9 \text{ GJ/t}$  e  $PCI_{FO} = 40,4 \text{ GJ/t}$ , obtêm-se o consumo energético apresentado na tabela B.9.

Tabela B.5- Consumos energéticos da FAR no funcionamento normal e respetivas percentagens.

	Consumos	Percentagem
Fuel Gás (GJ/ano)	1018783	53%
Fuel Óleo(GJ/ano)	906859	47%
Fuel Gás + Fuel Óleo (GJ/ano)	1925642	100%

### Arranque

Nas tabelas B.6 e B.7 são apresentados os consumos de combustível e os consumos energéticos da FAR durante o arranque.

Tabela B.6- Consumos de combustível da FAR no período de arranque.

Fuel Gás	11089	t
Fuel Óleo	11014	t

Do mesmo modo que foi realizado para o funcionamento normal e usando os mesmos valores do  $PCI_{FG}= 48,9 \text{ GJ/t}$  e  $PCI_{FO}=40,4 \text{ GJ/t}$  obtêm-se os consumos energéticos para o período de arranque representados na tabela B.7.

Tabela B.7- Consumos energéticos da FAR no período de arranque e as respectivas percentagens.

	Consumos	Percentagem
Fuel Gás (GJ/ano)	542252	55%
Fuel Óleo (GJ/ano)	444966	45%
Fuel Gás + Fuel Óleo (GJ/ano)	987218	100%

Nas tabelas B.8 e B.9 são apresentados os consumos energéticos médios diários em cada mês da FAR para os dois períodos de funcionamento. O valor total obtido no ano é calculado pelo somatório de cada parcela e multiplicar pelos dias correspondentes ao mês em causa.

Tabela B.8- Consumos energéticos diários da FAR no funcionamento normal.

Meses	Consumo energético diário (GJ/d)
Janeiro	7342
Fevereiro	7202
Março	7153
Abril	7090
Maio	7024
Junho	6982
Julho	6889
Agosto	6825
Setembro	6748

Consumo energético médio para o funcionamento normal é de 7028 GJ/d.

Tabela B.9- Consumos energéticos diários da FAR no arranque.

Meses	Consumo energético diário (GJ/d)
Dezembro	8787
Janeiro	8308
Fevereiro	8137
Março	7401

Consumo energético médio para o arranque é de 8158 GJ/d.

Nas tabelas B.10 e B.11 são apresentados os consumos energéticos diários de cada fornalha da FAR para os dois períodos de funcionamento.

Tabela B.10- Consumos energéticos diários de cada fornalha no funcionamento normal.

Fornalhas	Consumos diários (GJ/d)	Percentagem (%)
H0101	1380	19,7
H0301	1510	21,5
H0302	434	6,2
H0303	28,4	0,4
H0401	581	8,3
H0402	549	7,8
H0471	2320	33,0
H0472	220	3,1
Total	7022	100

Tabela B.11- Consumos energéticos diários de cada fornalha no arranque.

Fornalhas	Consumos diários (kJ/d)	Percentagem (%)
H0101	1700	21,3
H0301	1810	22,5
H0302	583	7,3
H0303	21,8	0,2
H0401	821	10,2
H0402	606	7,4
H0471	2320	29,0
H0472	172	2,1
Total	7986	100

### B.3- Dados obtidos para a realização dos balanços

Nesta secção são apresentados todos os dados experimentais recolhidos e que são necessários à realização dos balanços.

Tabela B.12- Temperatura do ar ambiente no funcionamento normal.

Temperatura do ar ambiente (°C)								
Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro
15,7	15,6	19,8	18,5	22,2	24,2	24,5	25,1	26,8

Tabela B.13- Temperatura do ar ambiente no arranque.

Temperatura do ar ambiente (°C)			
Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março
18,4	16,7	16,3	17,7

Tabela B.14- Humidade relativa do ar no funcionamento normal.

Humidade relativa do ar (%)								
Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro
71,7	60,7	58,3	76,0	76,9	77,9	73,9	74,5	59,4

Tabela B.15- Humidade relativa do ar no arranque.

Humidade relativa do ar (%)			
Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março
90,4	86,0	79,0	80,7

Tabela B.16- Temperatura dos gases de combustão na entrada da zona de convecção no funcionamento normal.

	Temperatura dos gases de combustão na entrada da zona de convecção (°C)									
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Média
H0101	707,63	678,32	696,49	738,63	730,70	687,69	681,20	654,94	650,19	691,75
H0301	769,42	753,17	776,61	781,46	778,79	752,52	772,67	746,54	786,59	768,64
H0302	573,22	555,99	581,89	597,61	600,68	549,71	552,40	546,18	541,10	566,53
H0402	642,14	591,57	657,84	656,33	677,16	682,66	691,48	666,23	660,16	658,40
H0471	667,52	597,76	642,66	677,57	690,47	661,71	686,89	664,39	700,28	665,47
H0472	671,45	675,66	675,43	667,48	659,00	646,27	631,55	626,67	611,49	651,67

Tabela B.17- Temperatura dos gases de combustão na entrada da zona de convecção no arranque.

	Temperatura dos gases de combustão na entrada da zona de convecção (°C)				
	Dez	Jan	Fev	Mar	Média
H0101	603,75	617,69	632,70	640,06	623,55
H0301	523,45	561,14	565,30	560,36	552,56
H0302	591,85	612,11	618,39	599,18	605,38
H0402	614,22	638,33	618,23	662,32	633,28
H0471	600,97	627,01	645,43	640,62	628,51
H0472	623,38	645,66	644,91	648,05	640,50

Tabela B.18- Temperatura de saída dos gases de combustão em cada fornalha no funcionamento normal.

	Temperatura de saída dos gases de combustão da fornalha (°C)									
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Média
H0101	314,93	301,46	304,28	312,88	312,26	298,33	298,21	290,24	287,17	302,20
H0301	345,87	335,60	345,23	338,23	331,98	320,93	332,44	322,93	337,25	334,50
H0302	282,51	280,01	286,80	280,30	274,91	252,82	254,63	252,90	250,18	268,34
H0303	596,02	599,85	632,85	699,04	699,58	697,05	698,48	697,65	693,78	668,26
H0401	716,77	701,00	716,38	724,84	706,22	720,06	734,46	754,44	750,89	725,01
H0402	283,83	282,80	286,22	281,63	284,03	284,24	290,40	288,78	289,63	285,73
H0471	311,49	282,90	295,51	311,83	315,36	301,98	314,93	309,40	324,03	307,49
H0472	393,60	399,76	395,08	385,11	381,07	377,40	370,35	365,85	357,39	380,63

Tabela B.19- Temperatura de saída dos gases de combustão em cada fornalha no arranque.

	Temperatura de saída dos gases de combustão da fornalha (°C)				
	Dez	Jan	Fev	Mar	Média
H0101	284,41	282,23	283,58	275,66	281,47
H0301	330,43	332,79	315,83	305,24	321,07
H0302	251,77	257,78	263,52	255,39	257,12
H0303	510,31	453,03	489,03	466,28	479,66
H0401	572,58	632,79	620,69	609,40	608,86
H0402	265,99	292,01	271,47	267,39	274,21
H0471	296,42	264,34	272,61	266,61	275,00
H0472	393,16	401,32	399,25	400,68	398,60

Tabela B.20- Percentagem de oxigénio nos gases de combustão no funcionamento normal.

	Percentagem de oxigénio nos gases de combustão à saída das fornalhas (%)									
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Média
H0101	3,56	3,91	3,68	3,31	3,31	3,37	3,49	3,45	3,65	3,53
H0301	3,22	3,47	3,39	3,12	2,96	3,12	2,86	3,17	3,02	3,15
H0302	3,49	3,23	3,28	2,89	2,76	2,82	2,99	2,96	2,97	3,04
H0303	3,50	3,45	3,56	3,29	3,20	3,14	3,39	3,16	3,45	3,35
H0401	3,46	3,42	3,31	3,21	3,44	3,44	3,26	3,17	3,42	3,35
H0402	3,39	3,81	3,55	3,06	3,23	3,22	3,21	3,52	3,63	3,40
H0471	3,14	3,37	3,20	3,13	2,92	2,97	3,04	2,87	2,76	3,04
H0472	3,04	3,25	3,07	2,62	2,64	3,03	3,36	3,32	3,77	3,12

Tabela B.21- Percentagem de oxigénio nos gases de combustão no arranque.

	Percentagem de oxigénio nos gases de combustão à saída das fornalhas (%)				
	Dez	Jan	Fev	Mar	Média
H0101	5,65	5,25	5,20	4,56	5,16
H0301	5,93	3,36	3,32	3,55	4,04
H0302	4,04	3,22	3,43	3,90	3,65
H0303	5,05	4,41	3,86	3,59	4,23
H0401	6,24	6,30	4,66	3,59	5,20
H0402	5,12	2,85	3,63	3,90	3,88
H0471	5,10	6,53	8,10	4,54	6,07
H0472	3,79	3,21	2,95	2,59	3,14

Tabela B.22- Temperatura de entrada das correntes processuais no funcionamento normal.

	Temperatura de entrada das correntes processuais nas fornalhas (°C)									
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Média
H0101	246,71	245,90	245,56	245,75	246,07	246,98	246,79	248,59	247,43	246,64
H0301	209,99	209,65	209,56	208,49	208,08	208,75	209,31	208,79	208,38	209,00
H0302	198,94	199,07	199,32	198,70	198,69	198,67	198,76	198,06	198,07	198,70
H0303	192,25	193,01	193,96	192,67	193,83	195,04	195,67	194,91	196,71	194,23
H0401	311,84	311,59	311,66	311,67	312,56	317,50	316,61	317,07	317,09	314,18
H0402	221,20	220,79	221,08	221,12	221,43	222,02	221,65	221,55	221,58	221,38
H0471	175,64	175,89	177,24	177,03	177,20	-	-	177,56	177,71	176,90
H0472	189,44	193,42	193,48	192,37	192,11	-	-	-	185,11	190,99

Tabela B.23- Temperatura de entrada das correntes processuais no arranque.

	Temperatura de entrada das correntes processuais nas fornalhas (°C)				
	Dez	Jan	Fev	Mar	Média
H0101	246,61	245,66	245,85	245,99	246,03
H0301	210,92	213,76	211,30	211,37	211,84
H0302	200,43	201,26	201,05	199,74	200,62
H0303	182,25	188,23	191,78	193,58	188,96
H0401	309,72	307,58	310,63	310,66	309,65
H0402	222,82	222,76	222,12	221,92	222,41
H0471	179,19	178,82	178,52	178,04	178,64
H0472	185,11	190,36	190,65	188,78	188,73

Tabela B.24- Temperatura de saída das correntes processuais no funcionamento normal.

	Temperatura de saída das correntes processuais nas fornalhas (°C)									
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Média
H0101	251,85	250,89	250,33	250,63	250,16	251,76	250,80	252,86	252,22	251,28
H0301	225,60	225,14	225,11	223,95	223,48	224,23	224,82	224,36	224,13	224,53
H0302	211,47	212,16	212,05	210,96	210,77	210,57	210,78	210,48	210,08	211,04
H0303	206,68	207,92	208,48	207,31	208,58	209,92	211,01	210,61	212,63	209,24
H0401	361,43	359,71	360,32	359,78	360,90	365,22	364,46	364,77	364,67	362,36
H0402	224,79	224,38	224,62	224,58	224,81	225,30	225,10	224,88	224,86	224,81
H0471	200,83	200,84	202,05	202,03	202,21	202,52	202,49	202,50	202,69	202,02
H0472	236,18	241,36	240,91	239,20	233,43	231,24	231,60	230,87	224,18	234,33

Tabela B.25- Temperatura de saída das correntes processuais no arranque.

	Temperatura de saída das correntes processuais nas fornalhas (°C)				
	Dez	Jan	Fev	Mar	Média
H0101	252,35	251,37	251,68	251,47	251,72
H0301	229,03	231,80	229,58	228,03	229,61
H0302	216,30	217,92	217,28	215,60	216,77
H0303	190,15	196,87	201,39	204,52	198,23
H0401	362,05	365,47	365,32	365,37	364,55
H0402	227,00	227,13	226,30	225,91	226,58
H0471	205,08	203,86	203,61	203,06	203,90
H0472	230,56	237,37	237,26	235,96	235,29

Tabela B.26- Caudais das correntes processuais no funcionamento normal.

	Caudais das correntes processuais de cada fornalha (t/d)									
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Média
H0101	815,2	747,4	756,9	830,9	805,9	810,3	766,0	905,5	799,2	804,1
H0301	3752,3	3616,4	3722,4	3648,0	3657,8	3530,8	3794,1	3680,5	3628,2	3670,0
H0302	1091,0	1045,9	1078,1	1048,4	1051,8	1022,1	1099,3	1064,3	1053,5	1061,6
H0303	9,5	9,0	9,3	9,4	9,4	9,5	9,6	9,2	9,8	9,4
H0402	1552,0	1555,9	1547,6	1552,0	1543,6	1547,5	1556,8	1544,3	1547,8	1549,7
H0471	1812,0	1817,8	1855,1	1806,6	1782,2	1821,5	1821,3	1812,5	1792,4	1813,5
H0472	135,9	135,2	133,8	130,6	130,4	133,3	128,0	128,3	121,9	130,8
Total	9167,9	8927,7	9103,2	9025,9	8981,0	8874,9	9175,1	9144,6	8952,8	9039,2

Tabela B.27- Caudais das correntes processuais no arranque.

	Caudais das correntes processuais de cada fornalha (t/d)				
	Dez	Jan	Fev	Mar	Média
H0101	1027,5	1030,7	1006,4	852,0	979,1
H0301	4160,6	4758,8	4338,8	3890,7	4287,2
H0302	1202,3	1370,5	1250,4	1113,1	1234,1
H0303	9,1	9,8	9,9	10,4	9,8
H0402	1382,7	1387,9	1399,9	1399,6	1392,5
H0471	1976,1	2215,7	1946,3	1732,8	1967,7
H0472	130,5	147,9	139,0	143,9	140,3
Total	9888,8	10921,2	10090,6	9142,5	10010,8

Tabela B.28- Consumos de FO no funcionamento normal.

	Consumos de FO (t/d)									
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Média
H0101	11,44	12,43	12,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,02
H0301	30,24	26,17	24,37	24,77	24,73	25,77	25,74	23,85	25,31	25,66
H0302	6,09	6,33	6,33	0,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,16
H0401	7,74	7,62	7,48	7,88	7,77	7,83	7,72	7,65	7,96	7,74
H0402	7,70	8,15	8,59	8,92	8,84	8,98	7,94	7,86	8,16	8,35
H0471	30,70	32,90	31,56	40,96	32,99	29,89	32,70	30,88	32,85	32,82
H0472	2,37	2,58	2,67	2,75	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	1,23

Tabela B.29- Consumos de FO no arranque.

	Consumos de FO (t/d)				
	Dez	Jan	Fev	Mar	Média
H0101	14,31	14,52	15,20	3,20	11,81
H0301	34,92	31,71	23,01	20,09	27,43
H0302	0,00	2,95	4,08	3,75	2,70
H0401	20,21	9,46	8,08	7,93	11,42
H0402	8,87	9,14	8,62	2,13	7,19
H0471	36,57	27,98	24,62	32,04	30,30
H0472	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela B.30- Consumos de FG no funcionamento normal.

	Consumos de FG (t/d)									
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Média
H0101	20,48	19,09	18,27	28,71	28,54	28,24	26,98	27,15	26,05	24,83
H0301	8,36	10,54	11,74	9,82	9,14	8,89	9,53	10,38	9,09	9,72
H0302	4,69	4,82	4,55	8,49	8,88	8,50	8,20	8,11	7,72	7,11
H0303	0,55	0,56	0,56	0,63	0,62	0,61	0,60	0,56	0,54	0,58
H0401	6,24	5,34	5,31	5,07	5,39	5,66	5,67	5,66	5,19	5,50
H0402	5,74	5,35	4,43	3,87	4,19	4,08	4,99	4,68	4,33	4,63
H0471	20,85	18,38	20,72	13,85	21,33	23,43	20,42	21,82	20,71	20,17
H0472	3,68	3,76	3,61	3,49	3,59	3,51	3,28	3,18	3,00	3,46

Tabela B.31- Consumos de FG no arranque.

	Consumos de FG (t/d)				
	Dez	Jan	Fev	Mar	Média
H0101	23,45	23,98	25,35	28,30	25,27
H0301	12,11	12,72	16,47	16,54	14,46
H0302	11,39	9,83	9,37	8,74	9,83
H0303	0,50	0,49	0,52	0,53	0,51
H0401	6,31	9,04	7,96	5,97	7,32
H0402	6,65	8,05	7,13	11,15	8,25
H0471	20,99	23,23	26,98	19,34	22,64
H0472	3,41	3,43	3,53	3,64	3,50

## Anexo C- Exemplos de cálculo dos balanços de energia às fornalhas

Exemplo de cálculo para a fornalha H0101, relativos ao dia 3 de janeiro de 2012.

Depois de realizados todos os balanços de massa necessários e determinadas as massas de todas as correntes do sistema em estudo, serão neste capítulo realizados os balanços de energia.

Na tabela C.1, estão representados todos os coeficientes necessários para a determinação do calor específico de cada um dos componentes que aparecem neste capítulo. O calor específico é determinado com a tabela e a equação C.1. O calor específico será vital para a determinação da entalpia de cada um dos componentes.

Tabela C.1 – Coeficientes para a determinação da expressão do calor específico de cada um dos componentes (Kobe et al, 1954).

Composto	a	b x10 <sup>-2</sup>	c x10 <sup>-6</sup>	d
C1	4,750	1,2	3,03	-2,63E-09
C2	1,648	4,124	-15,3	1,74E-09
C3	-0,966	7,279	-37,55	7,58E-09
iC4	-1,890	9,936	-54,95	1,19E-08
iC5	-2,273	12,434	-70,97	1,59E-08
nC5	1,618	10,85	-53,65	1,01E-08
C6	1,657	13,19	-68,44	1,38E-08
H <sub>2</sub> S	7,070	0,3128	1,36	-7,87E-10
H <sub>2</sub>	6,952	-0,04576	0,956	-2,08E-10
H <sub>2</sub> O (v)	7,700	0,04594	2,521	-8,59E-10
SO <sub>2</sub>	6,157	1,384	-9,103	2,06E-09
O <sub>2</sub>	6,085	0,3631	-1,709	3,13E-10
N <sub>2</sub>	6,903	-0,03753	1,93	-6,86E-10
CO <sub>2</sub>	5,316	1,4285	-8,362	1,78E-09
nC4	0,945	8,873	-43,8	8,36E-09

=++

+

—

(C.1)

## C.1-Cálculo da entalpia de combustão:

De acordo com o valor apresentado no ponto B1.1 em que se encontra o valor obtido para o poder calorífico inferior do e com o valor do caudal de gasto, ( obtido pelo Aspen) é possível calcular a entalpia de combustão. Seguindo-se exatamente o mesmo raciocínio para o , o seu caudal foi obtido pelo Aspen tal como o seu PCI. Os dados são relativos ao dia 3 de janeiro de 2012.

—

$$=49,0/ \quad (\text{valor calculado no ponto B.1.1})$$

$$=21,77/$$

$$= \quad \times \quad (\text{C.2})$$

$$=1,07 \times 10 \quad /$$

—

$$=40,2/ \quad (\text{valor obtido pelo Aspen})$$

$$=11,73/$$

$$= \quad \times \quad (\text{C.3})$$

$$=4,72 \times 10 \quad /$$

## C.2-Cálculo da entalpia de saída de cada um dos componentes à saída da fornalha provenientes da combustão:

Para o cálculo da entalpia, a expressão para a determinação do calor específico utilizado foi consultado em bibliografia (Kobe et al, 1954) utilizando os valores presentes na tabela C.1. Em relação à temperatura de saída, esta foi obtida por um termopar colocado na unidade processual, esse medidor está ligado aos painéis de controlo da fábrica. A aquisição de dados foi feita pelo software (Aspen Process Explorer). A temperatura de referência usada foi de 25°C.

O exemplo de cálculo seguinte foi realizado para o dióxido de carbono que sai pela chaminé da fornalha, a entalpia de todos os outros componentes foram calculados da mesma maneira.

$$=5,316+1,429 \times 10^{-8,362 \times 10} + 1,78 \times 10 \quad \text{--- (C.4)}$$

$$=596,98$$

$$\text{é } =98,1/ \quad (\text{valor calculado no ponto A.7})$$

$$=298,15$$

$$= \frac{\text{é}}{\text{---}} \times 4,18 \times \quad \text{(C.5)}$$

$$=2,83 \times 10 /$$

Os valores das entalpias das restantes espécies à saída da fornalha foram:

$$=9,99 \times 10 /$$

$$=7,28 \times 10 /$$

$$=3,74 \times 10 /$$

$$=1,52 \times 10 \quad /$$

A soma de todos os valores deste ponto juntamente resulta o valor do somatório das entalpias de todas as correntes que saem da fornalha -

### **C.3-Cálculo da entalpia de entrada de cada um dos componentes que entram na fornalha:**

O calor específico utilizado foi consultado em bibliografia (Kobe et al, 1954) utilizando os valores presentes na tabela C.1. A temperatura de entrada, foi obtida por um termopar colocado na unidade processual, que está ligado aos painéis de controlo da fábrica. A aquisição de dados foi feita pelo software (Aspen Process Explorer). A temperatura de referência usada para os balanços de energia foi de 25 °C. No caso particular do FO o valor do calor específico de 2,12 kJ/Kg.°C foi obtido em bibliografia (Schimdt, 1986), usando a temperatura média entre a entrada e a temperatura de referência a temperatura de entrada do FO foi de 231,84 °C.

O exemplo de cálculo seguinte foi realizado para o azoto que entra na fornalha, a entalpia de todos os outros componentes foram calculados da mesma maneira. No caso do FG a sua temperatura de entrada foi de 12,94 °C. A única exceção é a entalpia associada ao vapor de atomização do FO que foi calculada de forma diferente e apresentada no ponto C.4.

$$=6,903 - 3,753 \times 10 \quad +1,930 \times 10 \quad -6,86 \times 10 \quad \text{--- (C.6)}$$

$$=291,00$$

$$=482/$$

(Valor calculado no ponto A.6.2)

$$=298,15$$

$$= \text{---} \times 4,18 \times \text{---} \quad \text{(C.7)}$$

$$=-3,56 \times 10 \quad /$$

Os valores das entalpias das restantes espécies à saída da fornalha foram:

$$=-9,59 \times 10 \quad /$$

$$=-8,64 \times 10 \quad /$$

$$=-1,40 \times 10 \quad /$$

$$=-7,37 \times 10 \quad /$$

$$=-8,39 \times 10 \quad /$$

$$=-4,73 \times 10 \quad /$$

$$=-5,50 \times 10 \quad /$$

$$=-7,94 \times 10 \quad /$$

$$=-1,77 \times 10 \quad /$$

$$=-2,92 \times 10 \quad /$$

$$=-2,72 \times 10 \quad /$$

$$=-1,37 \times 10 \quad /$$

$$=0/$$

(neste dia não existiu dióxido de carbono no FG que alimenta as

fornalhas)

$$=-1,30 \times 10 \quad /$$

$$=5,14 \times 10 \quad /$$

A soma de todos os valores deste ponto juntamente com a soma da resulta o valor do somatório das entalpias de todas as correntes de entrada na fornalha -

## C.4-Determinação da entalpia do vapor de água de atomização

do :

Como não existe nenhum medidor de pressão na linha de vapor ligada ao queimador da fornalha, não foi possível saber o valor da pressão a que é fornecido o vapor para a atomização. Para efeitos de cálculo considerou-se o valor de pressão existente no Data Sheet da fornalha, que era igual a 7 barg, sendo assim possível obter a entalpia específica através das tabelas de vapor saturado (Smith et al, 2005).

$$\begin{aligned} & \approx 2547,3 / \\ & = 2767,1 / \\ & = 5,87 / \quad (\text{valor calculado no ponto A.4.2}) \\ & = \quad \times \quad - \quad (C.8) \\ & = 1,29 \times 10 \quad / \end{aligned}$$

## C.5-Cálculo das perdas por convecção e radiação:

O cálculo das perdas por radiação e convecção da fornalha, foi realizado tendo como base o manual API STD560 (API, 2007). Neste manual é referido que as perdas associadas à convecção e radiação em fornalhas, correspondem normalmente a valores entre 1% e 2% do calor libertado na combustão. Para o presente trabalho será utilizado um fator de 1,5%.

$$\begin{aligned} & = 1,07 \times 10 \quad / \\ & \quad (\text{valor calculado no ponto C.1}) \end{aligned}$$

$$=4,72 \times 10 \quad /$$

(valor calculado no ponto C.1)

$$=1,5\% \times \quad +$$

(C.9)

$$=2,31 \times 10 \quad /$$

### C.6- Determinação da energia fornecida à corrente processual ( $\dot{u}$ ):

Para a determinação do valor de  $\dot{u}$  foi realizado um balanço energético à fornalha definindo a própria fornalha como fronteira para o balanço. O esquema do balanço realizado com todas as entradas e saídas está representado na figura 4.2.

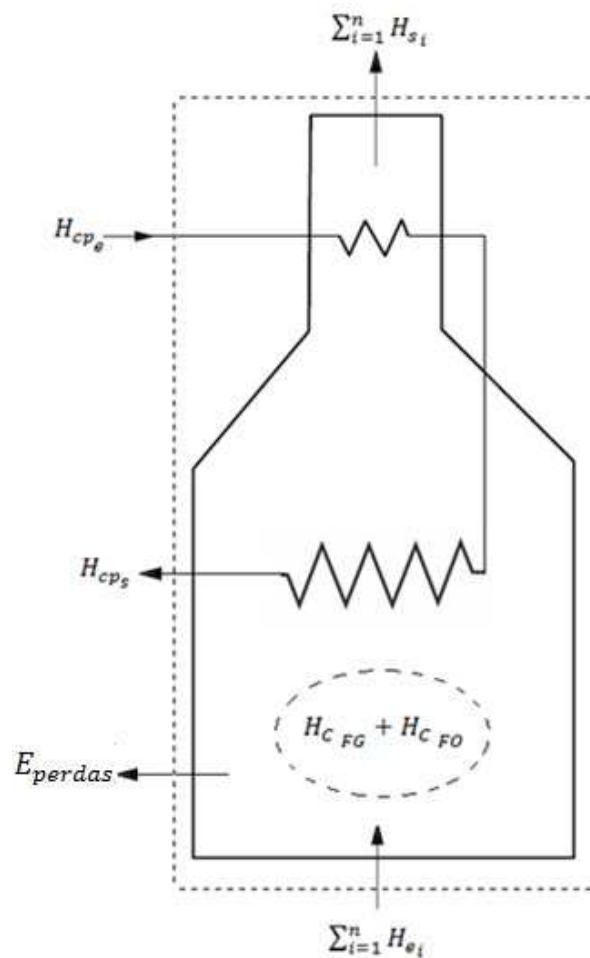


Figura 4.2- Esquema do balanço de energia realizado às fornalhas.

Utilizando a equação 4.1 de balanço e com os valores de todas as entalpias anteriormente calculadas (pontos C.1 a C.5) é possível determinar o valor da energia útil. De salientar que a entalpia do vapor de atomização conta como entalpia de entrada.

$$\dot{u} = - = + + - + \quad (4.1)$$

$$\dot{u} = 1,30 \times 10 \quad /$$

### C.7- Cálculo do rendimento térmico das fornalhas

Os parâmetros de performance da fornalha são obtidos tendo em conta as diversas energias calculadas pelos balanços que energia e visam dar a perceber o quão eficiente será o funcionamento da fornalha a nível energético.

Cálculo do rendimento térmico da fornalha ( ):

O rendimento térmico da fornalha tem em conta a energia de todas as correntes para a fornalha. Para este cálculo utilizou-se a energia útil calculada no ponto C.6 e as entalpias calculadas nos pontos C.1, C.3 e C.4.

$$= \frac{\dot{u}}{\quad} \times 100 \quad (4.2)$$

$$= 84,2\%$$

### C.8- Cálculo do rendimento da zona de convecção e zona de radiação das diversas fornalhas

Para o cálculo do rendimento das zonas de convecção e radiação da fornalha, decidiu-se ter em conta neste rendimento as perdas por radiação e convecção, para tal admitiu-se que a fornalha perde a mesma quantidade de energia nas duas zonas. Este rendimento da zona

de radiação foi calculado em relação à energia fornecida à corrente processual. As entalpias dos vários constituintes à saída da zona de radiação foram calculadas da mesma maneira que as entalpias à saída das fornalhas (ponto C.2), mas neste caso a temperatura de saída da corrente dos fumos à saída da zona de radiação foi de 712,57 °C. Para este cálculo utilizou-se a energia útil calculada no ponto C.6 e as entalpias calculadas nos pontos C.1, C.3, C.4 e C.5.

Os valores das entalpias das várias espécies à saída da zona de radiação foram:

$$=7,26 \times 10 \quad /$$

$$=2,51 \times 10 \quad /$$

$$=1,76 \times 10 \quad /$$

$$=9,12 \times 10 \quad /$$

$$=3,61 \times 10 \quad /$$

A soma de todos os valores deste ponto resulta no valor do somatório das entalpias de todas as correntes à saída da zona de radiação da fornalha - .

$$= \frac{\quad - \quad}{\quad} \times 100 \quad (4.3)$$

$$=76,1\%$$

Cálculo do rendimento da zona de convecção da fornalha em relação à energia fornecida à corrente processual:

Para este cálculo utilizou-se a energia útil calculada no ponto C.6 e as entalpias calculadas nos pontos C.1, C.2, C.5 e as entalpias referidas no ponto C.8.

$$= \frac{\quad - \quad}{\quad} \times 100 \quad (4.4)$$

$$= 23,5\%$$

### C.9- Cálculo da percentagem de vaporização da corrente processual à saída as fornalhas

A percentagem de vaporização foi calculada tendo em conta o calor latente de vaporização da corrente processual. Como a corrente processual consiste numa mistura de hidrocarbonetos, o calor latente foi estimado pelos calores latentes individuais de cada componente da mistura e a sua respectiva fracção molar. Estes cálculos foram todos efectuados para a temperatura média da corrente processual entre a entrada e a saída. O exemplo de cálculo seguinte refere-se à fornalha H0101 e para o dia 3 de janeiro de 2012.

#### Cálculo da temperatura média de passagem da carga pela fornalha:

As temperaturas de entrada e saída da corrente processual da fornalha foram obtidas por termopares colocados na unidade processual, que estão ligados aos painéis de controlo da fábrica. A aquisição de dados foi feita pelo software (Aspen Process Explorer).

=246,24°C

=251,49°C

$$é = \frac{\quad}{\quad} \quad (C.10)$$

$$é = 248,87^\circ = 522,02$$

Para a determinação da % de vaporização, saber a constituição da corrente em causa é fundamental. A composição da corrente foi fornecida pela empresa.

Cálculo do calor latente de vaporização de cada um dos constituintes da carga à fornalha à temperatura média da passagem:

Pelo fato de nas referências bibliográficas pesquisadas só existirem valores do calor latente de vaporização dos componentes à temperatura normal de ebulição, através da relação de Watson foi possível calcular o calor latente de cada componente à temperatura desejada (Smith et al, 2005).

$$\Delta H_{v,T} = \Delta H_{v,T_b} \times \left( \frac{T_b}{T} \right)^{0,38} \quad (C.11)$$

Os pontos de ebulição e os calores latentes à temperatura de ebulição foram consultados em bibliografia (Yaws, 1996; McKay et al 2006), por sua vez as temperaturas críticas foram obtidas em bibliografia (Perry e Green, 1999 ). Considerando a composição da corrente processual correspondente para a fornalha H0101 de  $x_m = 73\%$  (m/m) de 1,2,4-Trimetilbenzeno e  $x_m = 27\%$  (m/m) de 1-Isopropil-4-metilbenzeno (p-cimeno) obteve-se:

$$\begin{aligned} \Delta H_{v,100} &= 39,25 / \\ &= 442,53 \\ &= 649,13 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_{v,100} &= 38,16 / \\ &= 450,25 \\ &= 653,15 \end{aligned}$$

$$\Delta H_{v,100} = 522,02$$

$$\Delta H_{v,100} = 32,63 /$$

Usando o mesmo raciocínio através da equação C.10 mas desta vez para o para-cimeno:

$$\Delta \left( \frac{\text{é}}{\text{é}} \right) = 32,33/$$

Cálculo do calor latente de vaporização ponderado da carga à temperatura média de passagem pela fornalha:

Depois de obtidos os calores latentes correspondentes à temperatura desejada, estimou-se a calor latente de vaporização da mistura através de uma soma ponderada do produto de cada um dos seus calores latentes de vaporização com a sua respetiva fracção mássica.

$$= 0,75 \text{ (fracção molar)}$$

$$= 0,25 \text{ (fracção molar)}$$

$$\Delta \left( \frac{\text{é}}{\text{é}} \right) = 32,63/$$

$$\Delta \left( \frac{\text{é}}{\text{é}} \right) = 32,33/$$

$$\Delta \left( \frac{\text{é}}{\text{é}} \right) = \dots \times \Delta \left( \frac{\text{é}}{\text{é}} \right) \quad (4.7)$$

$$\Delta \left( \frac{\text{é}}{\text{é}} \right) = 32,56/$$

### Determinação do calor sensível fornecido à corrente processual até à sua saturação:

Atendendo que a temperatura da corrente processual à saída da fornalha é mais elevada que à entrada conclui-se que esta corrente entra como líquido comprimido, podendo sair da fornalha parcialmente vaporizada ou totalmente vaporizada. Então para efeitos de cálculo foi admitido que a queda de pressão ao longo da fornalha é desprezável, assim sendo a temperatura de saturação da corrente não irá variar e admite-se que será igual ao valor da temperatura de saída. Como à entrada da fornalha a corrente (encontra-se a uma temperatura inferior à saturação é necessário fornecer energia ( , ) até atingir a saturação. Esta energia é posteriormente subtraída à energia útil ( ú ), sendo esta diferença a energia responsável pela mudança de fase. Para estimar o calor específico da corrente processual foi utilizado uma soma ponderada do produto de cada um dos seus calores específicos com a sua respectiva fração mássica.

Para o cálculo do calor específico ponderado os calores específicos para o 1,2,4 - Trimetilbenzeno e para o para-cimeno foram consultados em dados bibliográficos (Perry e Green, 1999; [Infotherm, 2013](#)). O caudal da corrente processual da fornalha foi obtida por um medidor colocado na unidade processual, este medidor está ligado ao painel de controlo da fábrica. A aquisição de dados foi feita pelo software (Aspen Process Explorer).

$$=1,9 \times 10 \quad -1,28 \times 10 \quad +0,837 \quad \text{———} \quad (\text{C.12})$$

No problema em causa o para-cimeno irá estar no estado líquido, sendo assim a determinação do seu calor específico foi obtida fazendo uma regressão linear dos valores a seguir dispostos na tabela C.1.

Tabela C. 2- Vários valores do calor específico do para-cimeno a diversas temperaturas (Infotherm, 2013).

Cp (J/kg.K)	T(K)
1699	273,15
1784	303,15
1872	333,15
1964	363,15
2061	393,15
2162	423,15
2267	453,15
2376	483,15
2489	513,15
2609	543,15
2738	573,15

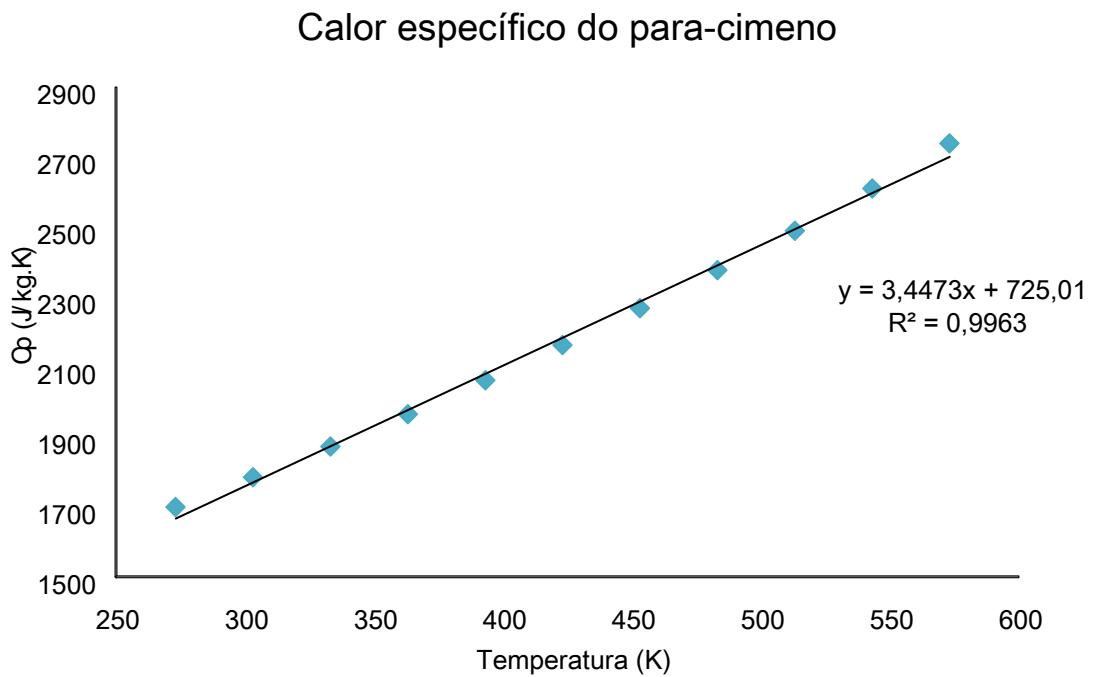


Figura C. 1- Correlação do calor específico do para-cimeno com a temperatura.

$$=3,4473+725,01 \quad \text{---} \quad \text{(C.13)}$$

Os valores do calor específico para cada uma dos componentes foram calculados à temperatura média de 522,02K.

$$=2525/$$

$$=351268/$$

$$=21723/$$

$$=0,23$$

(fracção mássica)

$$=0,77$$

(fracção mássica)

$$=120,19/$$

$$=246,24^{\circ}\text{C}$$

$$=251,49^{\circ}\text{C}$$

$$= \quad \times \quad \times \quad + \quad \frac{\quad \times \quad \times}{\quad} \quad - \quad \text{(C.14)}$$

$$=3,23 \times 10 \quad /$$

Calores específicos dos restantes constituintes das correntes processuais de todas as fornalhas:

Para a determinação da vaporização nas restantes fornalhas é necessário a determinação do calor específico de todos os componentes de todas as correntes processuais das fornalhas. O calor específico do para-dietilbenzeno, (p-deb), foi obtido através de uma correlação linear (equação C.14) a partir de valores tabelados (Infotherm, 2013). Para os restantes componentes foi utilizada a equação generalizada C.15, com os parâmetros a utilizar nessa equação apresentados na tabela C.4 (Perry e Green, 1999).

Tabela C. 3- Vários valores do calor específico do para-dietilbenzeno a diversas temperaturas (Infotherm, 2013).

Cp (J/kg,K)	T(K)
1708,00	273,00
1795,00	303,00
1890,00	333,15
1990,00	363,15
2095,00	393,15
2204,00	423,15
2316,00	453,15
2432,00	483,15
2552,00	513,15
2678,00	543,15
2815,00	573,15

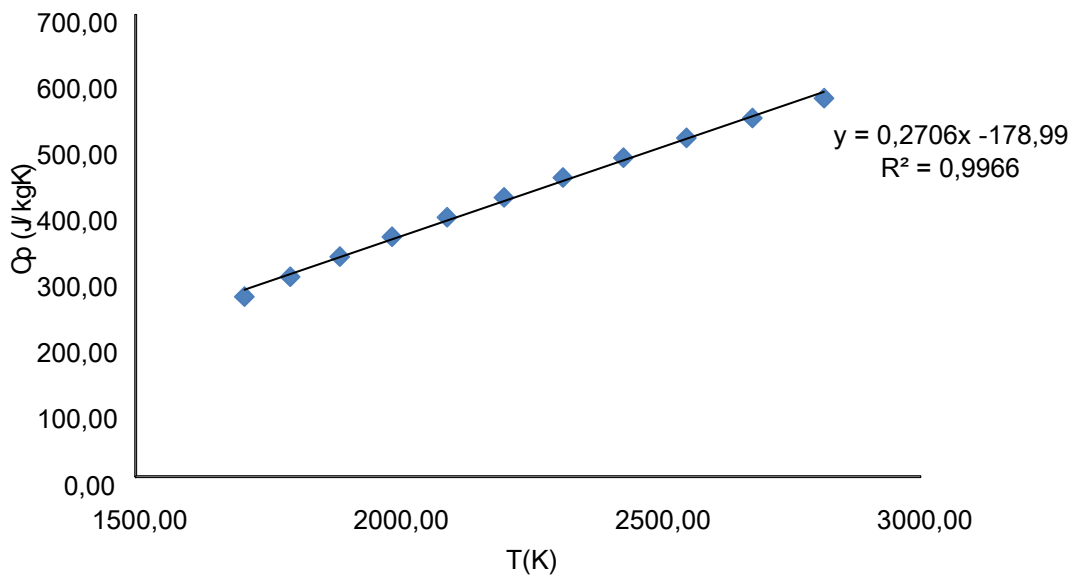


Figura C. 2- Correlação do calor específico do para-dietilbenzeno com a temperatura.

$$=0,2706-178,09 \quad \text{—} \quad (C.15)$$

Tabela C.4 - Vários valores do calor específico dos vários componentes das correntes processuais de todas as fornalhas (Perry e Green, 1999).

Compostos	C1	C2	C3	C4	C5
Benzeno	1,29E+05	-1,70E+02	6,48E-01	0	0
Tolueno	1,40E+05	-1,52E+02	6,95E-01	0	0
Etilbenzeno	1,33E+05	4,45E+01	3,96E-01	0	0
p-Xileno	-3,55E+04	1,29E+03	-2,60E+00	2,43E-03	0
m-Xileno	1,76E+05	-3,00E+02	1,09E+00	0	0
o-xileno	3,65E+04	1,02E+03	-2,63E+00	3,02E-03	0
Etilciclohexano	1,32E+05	7,27E+01	6,47E-01	0	0
Naftaleno	2,98E+04	5,28E+02	0	0	0

$$=1+2+3 \quad +4 \quad +5 \quad \text{---} \quad (C.16)$$

Determinação da vaporização da corrente processual à saída da fornalha:

Após ter sido determinado o calor latente de vaporização ponderado da corrente processual e o calor sensível da mesma corrente, foi possível determinar o caudal de vapor da corrente processual e a percentagem de vaporização à saída da fornalha. O exemplo de cálculo seguinte foi realizada para a fornalha H0101 no dia 3 de janeiro de 2012.

Cálculo do caudal de vapor na corrente processual à saída da fornalha:

$$=134,22/$$

$$=3,23 \times 10 \quad /$$

$$\dot{u} = 1,30 \times 10 \quad /$$

(calculado no ponto C.6)

$$\Delta \quad = 32,56/$$

( é )

$$= 0,23$$

(fracção mássica)

$$=0,77$$

(fracção mássica)

$$=120,19/$$

$$= \frac{\Delta \dot{u}}{x \dots x} \quad (C.17)$$

$$=3703/$$

Cálculo da percentagem de vaporização à saída da fornalha:

$$=21723/$$

$$=3703/$$

$$\% = \frac{\quad}{\quad} \times 100 \quad (4.8)$$

$$\% = 17,0\%$$

## Anexo D- Resultados Calculados

Nesta secção são apresentados todos os resultados provenientes dos balanços de massa e energia realizados às fornalhas durante os dois períodos de funcionamento estudados.

### D.1- Rendimento térmico calculados e dados pelo Aspen

#### Funcionamento Normal

Na tabela D.1 são apresentados os valores calculados do rendimento térmico para todas as fornalhas durante o período de funcionamento normal.

Tabela D. 1- Rendimento térmico calculado durante o funcionamento normal.

	Rendimento térmico (%)									
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Média
H0101	84,5	84,9	84,9	84,8	84,8	85,4	85,5	85,9	86,0	85,2
H0301	82,9	83,4	82,9	83,6	83,9	84,3	83,9	84,2	83,7	83,7
H0302	86,0	86,4	86,0	86,7	86,9	88,0	87,9	88,0	88,2	87,1
H0303	70,5	70,2	68,4	65,1	65,0	65,3	65,1	65,6	65,5	66,8
H0401	63,5	64,6	63,8	63,6	64,2	63,2	62,9	62,0	62,1	63,3
H0402	86,0	85,9	85,8	86,4	86,2	86,1	85,8	85,7	85,7	86,0
H0471	84,8	86,2	85,6	84,9	84,8	85,4	84,7	85,1	84,6	85,1
H0472	81,0	80,5	80,8	81,7	81,9	81,8	82,0	82,3	82,5	81,6

Na tabela D.2 são apresentados os valores obtidos do rendimento teórico dado pelo Aspen para todas as fornalhas durante o período de funcionamento normal.

Tabela D. 2- Rendimento térmico dado pelo Aspen durante o funcionamento normal.

	Rendimento do Aspen (%)									
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Média
H0101	83,2	83,6	83,7	83,5	83,7	84,4	84,3	84,7	84,8	84,0
H0301	82,0	82,2	81,9	82,4	83,0	83,4	83,0	83,3	82,8	82,7
H0302	84,8	85,0	84,8	85,3	85,8	86,8	86,6	86,7	86,9	85,8
H0303	69,1	68,9	67,1	63,9	64,1	64,4	63,9	64,4	-	65,7
H0401	62,6	63,5	63,0	62,6	63,4	62,7	62,2	61,3	61,2	62,5
H0402	84,8	84,5	84,7	85,1	85,0	85,1	84,8	84,8	84,7	84,8
H0471	83,7	84,8	84,4	83,6	83,7	84,4	83,7	84,2	83,6	84,0
H0472	79,8	79,3	79,7	80,5	80,9	80,8	80,8	81,2	81,3	80,5

## Arranque

Na tabela D.3 são apresentados os valores calculados do rendimento térmico para todas as fornalhas durante o arranque.

Tabela D. 3- Rendimento térmico calculado durante o arranque.

	Rendimento térmico (%)				
	Dez	Jan	Fev	Mar	Média
H0101	84,4	84,9	84,9	85,8	85,0
H0301	81,3	83,5	84,5	84,9	83,6
H0302	87,4	87,5	87,1	87,2	87,3
H0303	72,6	76,7	75,6	76,9	75,5
H0401	66,5	62,8	66,7	69,1	66,3
H0402	85,8	86,0	86,5	86,7	86,2
H0471	84,1	84,7	82,8	86,2	84,4
H0472	80,5	80,6	80,9	81,1	80,8

Na tabela D.4 são apresentados os valores obtidos do rendimento teórico dado pelo Aspen para todas as fornalhas durante o arranque e a respectiva média.

Tabela D. 4- Rendimento térmico dado pelo Aspen durante o arranque.

	Rendimento Aspen (%)				
	Dez	Jan	Fev	Mar	Média
H0101	83,1	83,6	83,5	84,4	83,7
H0301	80,4	82,4	83,2	83,6	82,4
H0302	85,9	86,1	85,7	85,8	85,9
H0303	72,1	75,4	74,1	75,6	74,3
H0401	66,0	62,0	65,7	68,2	65,5
H0402	84,6	84,7	85,2	85,3	84,9
H0471	83,0	83,5	81,6	84,9	83,2
H0472	79,1	79,2	79,5	79,8	79,4

## D.2- Variação dos rendimentos calculados nos dois períodos de funcionamento

Usando como exemplo os valores médios de rendimento térmico obtidos para a fornalha H0101 obtêm-se:

- Rendimento para o funcionamento normal = 85,2%
- Rendimento no arranque = 85,0%

A variação de rendimento é igual a  $85,0 - 85,2 = -0,2\%$

Na tabela D.5 são apresentadas as variações de rendimento entre o arranque e o funcionamento normal para todas as fornalhas.

Tabela D. 5- Variação do rendimento térmico calculado após a paragem.

Fornalhas	Variação do rendimento (%)
H0101	-0,2
H0301	-0,1
H0302	0,2
H0303	8,7
H0401	3,0
H0402	0,3
H0471	-0,7
H0472	-0,8

## D.3- Rendimento da zona de radiação

Na tabela D.6 são apresentados os valores calculados do rendimento da zona de radiação para todas as fornalhas durante o funcionamento normal e a respectiva média.

Tabela D. 6- Rendimento da zona de radiação calculado para o funcionamento normal.

	Rendimento da zona de radiação (%)									
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Média
H0101	76,4	77,3	76,5	74,9	75,1	77,3	77,7	79,1	79,2	77,0
H0301	73,6	74,3	73,1	73,1	72,9	73,9	73,5	74,4	72,9	73,5
H0302	83,3	84,6	83,2	82,6	82,2	84,2	84,1	84,4	84,7	83,7
H0402	79,2	82,0	78,0	78,7	77,2	76,7	76,6	77,7	78,2	78,3
H0471	79,1	82,0	79,9	78,6	78,2	79,2	78,1	79,6	78,4	79,2
H0472	83,2	83,0	82,9	83,4	83,7	84,1	84,5	84,6	84,9	83,8

Na tabela D.7 são apresentados os valores calculados do rendimento da zona de radiação para todas as fornalhas durante o arranque e a respectiva média.

Tabela D. 7- Rendimento da zona de radiação calculado para o arranque.

	Rendimento da zona de radiação (%)				
	Dez	Jan	Fev	Mar	Média
H0101	78,9	78,4	77,6	77,8	78,2
H0301	86,6	86,7	85,7	85,2	86,0
H0302	80,5	80,4	79,9	80,2	80,3
H0402	77,7	80,4	79,9	76,9	78,7
H0471	80,2	74,3	70,2	76,9	75,4
H0472	85,9	85,4	85,5	85,7	85,6

#### **D.4- Percentagem de vaporização da corrente processual a saída das fornalhas**

Na tabela D.8 são apresentados os valores calculados da percentagem de vaporização para todas as fornalhas durante o funcionamento normal e a respectiva média.

Tabela D. 8- Percentagem de vaporização calculada para o funcionamento normal.

	Percentagem de vaporização da corrente processual à saída das fornalhas									
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Média
H0101	17,0%	16,5%	16,2%	15,9%	16,5%	15,7%	15,9%	15,9%	15,1%	16,1%
H0301	57,3%	54,7%	54,1%	51,1%	48,1%	51,1%	52,4%	51,1%	50,8%	52,3%
H0302	27,9%	29,1%	27,8%	24,7%	24,4%	23,4%	22,5%	21,4%	21,7%	24,8%
H0303	23,6%	22,7%	22,6%	24,6%	24,5%	22,9%	22,4%	20,0%	19,8%	22,6%
H0402	44,3%	43,7%	41,9%	41,1%	41,8%	42,0%	41,9%	40,5%	40,6%	42,0%
H0471	37,1%	36,8%	38,4%	38,5%	-	-	-	-	39,2%	38,0%
H0472	77,1%	79,4%	79,9%	78,3%	-	-	-	-	-	78,7%

Na tabela D.9 são apresentados os valores calculados da percentagem de vaporização para todas as fornalhas durante o arranque e a respectiva média.

Tabela D. 9- Percentagem de vaporização calculada para o arranque.

	Percentagem de vaporização da corrente processual à saída das fornalhas				
	Dez	Jan	Fev	Mar	Média
H0101	20,0%	20,4%	21,9%	17,1%	19,9%
H0301	69,7%	68,1%	-	-	68,9%
H0302	31,8%	35,0%	37,6%	34,1%	34,6%
H0303	25,2%	26,2%	26,9%	27,2%	26,4%
H0402	51,4%	55,9%	51,2%	45,8%	51,1%
H0471	44,7%	38,2%	37,7%	37,2%	39,4%
H0472	32,4%	29,9%	33,9%	35,5%	32,9%



## **Anexo E- Dados e resultados da otimização energética**

Nesta secção são apresentados os dados e resultados obtidos diários para o funcionamento normal.

### **E.1- Dados e resultados da fornalha H0101 necessários para a otimização energética.**

Nas tabelas E.1 e E.2 são apresentados os resultados diários da temperatura dos gases de combustão e do rendimento térmico para a fornalha H0101 durante o funcionamento normal.

Tabela E. 1- Dados e resultados diários para a fornalha H0101 na primeira quinzena de

Meses	Parâmetro	Dias											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Jan	$T_{S_9}$ (°C)	-	-	323,83	322,93	320,92	320,66	321,14	323,43	323,44	321,94	311,85	
	$\eta_T$ (%)	-	-	84,0	84,4	84,3	84,5	84,5	84,3	84,2	84,2	84,2	
Fev	$T_{S_9}$ (°C)	298,89	297,01	296,98	295,4	298,59	307,21	308,02	299,98	301,31	302,37	299,98	
	$\eta_T$ (%)	85,3	84,9	84,9	85,0	85,1	85,2	84,5	84,7	84,7	84,7	85,3	
Mar	$T_{S_9}$ (°C)	301,85	301,43	301,5	306,29	306,35	303,23	303,33	302,83	299,77	300,27	301,85	
	$\eta_T$ (%)	84,7	84,6	84,8	84,8	84,4	84,9	85,2	85,1	85,2	85,4	84,7	
Abr	$T_{S_9}$ (°C)	308,85	309,66	311,45	309,59	309,86	308,67	311,35	310,5	311,26	311,68	310,85	
	$\eta_T$ (%)	85,3	85,1	85,1	85,1	84,9	85,0	84,7	85,1	85,2	85,0	85,3	
Mai	$T_{S_9}$ (°C)	306,45	306,45	310,83	308,22	312,35	310,25	307,9	310,04	311,43	315,4	310,45	
	$\eta_T$ (%)	85,2	85,2	84,7	84,8	84,9	84,8	85,3	85,2	84,8	84,6	85,2	
Jun	$T_{S_9}$ (°C)	300,59	300,17	300,79	300,73	297,14	296,46	298,19	297,69	294,28	295,61	299,59	
	$\eta_T$ (%)	85,4	85,3	85,3	85,4	85,4	85,5	85,5	85,3	85,7	85,6	85,4	
Jul	$T_{S_9}$ (°C)	296,2	297,11	299,1	297,14	297,19	298,81	295,83	296,14	297,51	299	296,2	
	$\eta_T$ (%)	85,5	85,5	85,5	85,6	85,6	85,6	85,7	85,7	85,5	85,3	85,5	
Ago	$T_{S_9}$ (°C)	293,56	287,23	287,82	289,4	287,83	287,09	285,93	288,56	290	290,38	293,56	
	$\eta_T$ (%)	85,8	86,2	86,2	86,1	86,2	86,2	86,5	86,1	86,0	86,0	85,8	
Set	$T_{S_9}$ (°C)	288,98	286,99	284,15	284,3	283,22	283,54	284,43	289,26	289,19	286,2	288,98	
	$\eta_T$ (%)	85,9	86,1	86,2	86,2	86,3	86,4	86,1	85,6	86,0	86,1	85,9	

Tabela E. 2- Dados e resultados diários para a fornalha H0101 na segunda quinzena de

Meses	Parâmetro	Dias											
		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Jan	$T_{S_9}$ (°C)	313,52	314,89	317,56	317,98	320,12	319,77	318,38	320,11	317,04	315,77	307,28	298,52
	$\eta_T$ (%)	84,5	84,4	84,3	84,5	84,5	84,3	84,5	84,1	84,2	84,2	84,6	84,5
Fev	$T_{S_9}$ (°C)	-	296,94	297,04	296,71	296,89	302,93	303,84	304,07	303,81	303,48	303,68	307,28
	$\eta_T$ (%)	-	85,2	84,8	84,8	85,0	85,0	85,0	85,2	85,1	85,1	85,0	85,0
Mar	$T_{S_9}$ (°C)	306,25	304,72	305,03	302,95	302,51	306,06	305,03	302,38	304,96	305,43	305,95	304,28
	$\eta_T$ (%)	85,0	84,7	84,7	84,6	84,8	84,4	84,5	85,1	84,8	84,8	84,9	85,0
Abr	$T_{S_9}$ (°C)	308,42	311,76	315,38	321,16	320,22	321,89	322,78	320,23	314,27	310,14	308,53	314,28
	$\eta_T$ (%)	85,1	84,9	84,8	84,4	84,2	84,1	83,8	84,2	84,5	85,3	85,1	84,5
Mai	$T_{S_9}$ (°C)	310,1	311,78	311,35	314,24	312,4	313,36	314,28	315,52	316,48	314,41	313,12	316,28
	$\eta_T$ (%)	85,0	84,6	84,4	84,5	84,6	84,6	84,8	84,8	84,7	84,6	84,4	84,5
Jun	$T_{S_9}$ (°C)	300,93	298,96	302,01	300,53	297,33	299,49	296,98	299,06	299,01	299,46	301,01	298,52
	$\eta_T$ (%)	85,4	85,4	85,1	85,4	85,8	85,4	85,3	85,3	85,4	85,4	85,2	85,0
Jul	$T_{S_9}$ (°C)	295	298,02	299,32	299,01	300,71	299,19	300,85	300,7	298,78	300,32	300,58	299,52
	$\eta_T$ (%)	85,2	85,2	85,4	85,5	85,3	85,5	85,4	85,3	85,4	85,3	85,4	85,0
Ago	$T_{S_9}$ (°C)	290,1	290,3	290,98	291,62	292,5	292,99	291,94	290,97	289,3	291,9	293,14	292,52
	$\eta_T$ (%)	85,7	86,0	85,7	85,7	85,6	85,5	85,5	85,6	85,8	85,7	85,5	85,0
Set	$T_{S_9}$ (°C)	290,12	288,26	286,8	287,46	287,76	291	-	-	-	-	-	-
	$\eta_T$ (%)	85,8	85,6	85,7	85,8	86,0	86,1	-	-	-	-	-	-

## **E.2- Dados e resultados da fornalha H0301 necessários para a otimização energética.**

Nas tabelas E.3 e E.4 são apresentados os resultados diários do coeficiente de excesso de ar e do rendimento térmico para a fornalha H0301 durante o funcionamento normal.

Tabela E. 3- Dados e resultados diários para a fornalha H0301 na primeira quinzena de

Meses	Parâmetro	Dias										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Jan	e	1,15	1,15	1,2	1,19	1,18	1,16	1,18	1,17	1,17	1,18	1,22
	$\eta_T$ (%)	83	83,2	82,6	82,6	82,7	83	82,8	82,8	82,9	82,6	82,3
Fev	e	1,22	1,2	1,23	1,25	1,23	1,22	1,24	1,18	1,19	1,19	1,19
	$\eta_T$ (%)	83,5	83,7	83,2	83,1	83,2	83,2	83	84,1	83,6	83,6	83,8
Mar	e	1,19	1,19	1,19	1,19	1,17	1,18	1,2	1,2	1,19	1,21	1,19
	$\eta_T$ (%)	83,1	83	83,1	83	83,3	83,3	82,9	83	83,2	83,1	83,2
Abr	e	1,19	1,19	1,23	1,19	1,2	1,21	1,19	1,16	1,15	1,19	1,2
	$\eta_T$ (%)	83,1	83,6	82,8	83,4	83,4	83,1	83,2	83,7	83,7	83	83,1
Mai	e	1,17	1,16	1,16	1,15	1,16	1,16	1,15	1,16	1,15	1,15	1,15
	$\eta_T$ (%)	84	84,1	84,1	84,2	84	84	84,1	83,6	83,7	83,6	83,7
Jun	e	1,17	-	-	-	-	1,18	1,16	1,19	1,19	1,17	1,18
	$\eta_T$ (%)	84,9	-	-	-	-	84,3	84,6	84	84	84,3	84,1
Jul	e	1,18	1,17	1,2	1,19	1,19	1,15	1,18	1,16	1,16	1,19	1,2
	$\eta_T$ (%)	84,3	84,4	84	84,1	84,1	84,8	84,3	84,6	84,6	84,2	84,1
Ago	e	1,16	1,19	1,21	1,18	1,19	1,17	1,23	1,23	1,26	1,19	1,2
	$\eta_T$ (%)	82,7	83,2	83,8	84,4	84,3	84,5	83,7	83,8	83,4	84,1	84
Set	e	1,2	1,16	1,18	1,17	1,17	1,17	1,2	1,2	1,14	1,19	1,19
	$\eta_T$ (%)	84,3	84,4	83,9	83,9	83,9	83,9	83,4	83,2	84,1	83,3	83,2

Tabela E. 4- Dados e resultados diários para a fornalha H0301 na segunda quinzena de

Meses	Parâmetro	Dias											
		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Jan	e	1,16	1,17	1,18	1,18	1,17	1,2	1,17	1,21	1,23	1,21	1,2	1,23
	$\eta_T$ (%)	83,1	82,7	82,4	82,5	82,7	82,1	82,6	81,9	81,7	82,7	83,6	83,2
Fev	e	1,21	1,22	1,21	1,19	1,18	1,17	1,17	1,15	1,2	1,18	1,2	1,21
	$\eta_T$ (%)	83,3	83,4	83,4	83,7	83,6	83,6	83,4	83,9	83,2	83,3	83	83
Mar	e	1,19	1,16	1,18	1,19	1,2	1,17	1,19	1,21	1,22	1,21	1,22	1,19
	$\eta_T$ (%)	83,3	83,6	82,8	82,3	82,7	83,1	82,7	82,5	82,1	82,3	82,2	83
Abr	e	1,16	1,14	1,15	1,13	1,16	1,17	1,15	1,16	1,18	1,18	1,19	1,19
	$\eta_T$ (%)	83,8	84,1	83,8	84,1	83,8	83,5	83,9	83,9	83,7	83,9	83,7	83,6
Mai	e	1,17	1,14	1,16	1,17	1,17	1,15	1,2	1,19	1,18	1,18	1,16	1,17
	$\eta_T$ (%)	83,8	84	83,6	83,5	83,6	83,9	83,5	83,6	83,8	83,9	84,1	83,9
Jun	e	1,19	1,14	1,14	1,17	1,18	1,18	1,2	1,18	1,19	1,18	1,16	1,16
	$\eta_T$ (%)	84,1	84,8	84,8	84,3	84,3	84,3	83,9	84,2	84,1	84,2	84,4	84,3
Jul	e	1,18	1,14	1,17	1,12	1,11	1,11	1,12	1,12	1,15	1,15	1,15	1,16
	$\eta_T$ (%)	84,1	84,3	83,4	84,2	84	84,2	84	84	83,3	83	83	82,8
Ago	e	-	-	-	-	-	1,17	1,15	1,15	1,12	1,12	1,14	1,16
	$\eta_T$ (%)	-	-	-	-	-	84,2	84,3	84,4	85	85,2	85	84,8
Set	e	1,13	1,14	1,12	1,14	1,14	1,15	-	-	-	-	-	-
	$\eta_T$ (%)	84,2	83,9	84,2	83,7	83,5	83,6	-	-	-	-	-	-

## **Anexo F- Dados e resultados das sugestões de melhoria energética**

### **F.1- Limpezas químicas mensais às fornalhas**

Nesta secção são apresentados os dados e resultados das fornalhas H0471, H0101 e H0301 necessários para a sugestão de melhoria energética da limpeza química mensal às fornalhas

Nas tabelas F.1 e F.2 são apresentados os resultados diários da temperatura dos gases de combustão e do rendimento térmico para a fornalha H0471 durante o funcionamento normal.

Nas tabelas F.3 e F.4 são apresentados os resultados diários calculados da energia útil recebida pela corrente processual e a energia a fornecer à fornalha H0101 durante o funcionamento normal.

Nas tabelas F.5 e F.6 são apresentados os resultados diários calculados da energia útil recebida pela corrente processual e a energia a fornecer à fornalha H0301 durante o funcionamento normal.

Nas tabelas F.7 e F.8 são apresentados os resultados diários calculados da energia útil recebida pela corrente processual e a energia a fornecer à fornalha H0471 durante o funcionamento normal.

Tabela F. 1- Dados e resultados diários para a fornalha H0471 na primeira quinzena de

Meses	Parâmetro	Dias										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Jan	$T_{s_3}$ (°C)	316,81	309,69	313,95	317,05	315,09	317,32	316,27	319,78	317,86	313,01	316,31
	$\eta_T$ (%)	84,5	85,2	85,0	84,6	84,6	84,6	84,7	84,3	84,5	85,0	84,9
Fev	$T_{s_3}$ (°C)	275,2	277,38	278,69	279,08	282,64	281,37	284,04	284,8	284,7	285,1	285
	$\eta_T$ (%)	86,6	86,4	86,4	86,3	86,0	86,0	85,9	86,0	86,1	86,1	86,3
Mar	$T_{s_3}$ (°C)	292,25	293,71	292,34	291,46	292,44	294,26	294,49	294,89	294,36	292,52	291,55
	$\eta_T$ (%)	85,6	85,3	85,4	85,5	85,7	85,5	85,6	85,6	85,7	86,0	86,1
Abr	$T_{s_3}$ (°C)	300,69	304,92	308,57	308,1	308,72	309,42	307,36	307,75	307,55	303,08	306,01
	$\eta_T$ (%)	85,3	85,4	85,0	84,8	84,8	85,1	85,2	85,1	85,1	85,3	85,0
Mai	$T_{s_3}$ (°C)	320,15	322,51	323,63	314,15	313,35	313,6	312,71	316,79	317,16	319,35	-
	$\eta_T$ (%)	84,7	84,6	84,2	84,7	85,0	85,0	84,9	84,3	84,4	84,3	-
Jun	$T_{s_3}$ (°C)	287,24	288,99	290,08	292,3	291,89	293,1	292,83	293,87	296,11	293,59	294,05
	$\eta_T$ (%)	86,4	86,2	86,2	86,0	85,9	85,9	85,9	85,9	85,8	85,9	85,9
Jul	$T_{s_3}$ (°C)	310,89	310,68	310,56	309,24	309,21	311,01	310,39	312,17	311,14	311,99	314,83
	$\eta_T$ (%)	84,8	84,9	84,9	85,0	85,0	85,0	85,0	84,7	84,8	84,7	84,5
Ago	$T_{s_3}$ (°C)	306,27	293,95	295,13	296,94	298,91	301,35	301,05	302,22	303,64	305,42	305,94
	$\eta_T$ (%)	85,3	86,0	85,9	85,9	85,7	85,4	85,7	85,5	85,4	85,1	85,2
Set	$T_{s_3}$ (°C)	319,85	319,65	317,85	319,51	320,27	320,65	321,16	324,56	327,74	323,74	323,37
	$\eta_T$ (%)	85,0	85,0	85,1	85,0	85,0	85,0	84,8	84,4	84,2	84,6	84,7



Tabela F. 3- Dados e resultados diários da energia útil e energia fornecer para a fornalha H0101 na prime

Meses	Parâmetro	Dias										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Jan	E útil(KJ/dia)	-	-	1,30E+09	1,33E+09	1,32E+09	1,30E+09	1,30E+09	1,33E+09	1,32E+09	1,33E+09	1,30E+09
	E fornecida(KJ/dia)	-	-	1,55E+09	1,58E+09	1,56E+09	1,54E+09	1,54E+09	1,58E+09	1,57E+09	1,59E+09	1,54E+09
Fev	E útil(KJ/dia)	1,26E+09	1,21E+09	1,21E+09	1,22E+09	1,21E+09	1,22E+09	1,24E+09	1,23E+09	1,23E+09	1,21E+09	1,23E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,47E+09	1,43E+09	1,43E+09	1,43E+09	1,42E+09	1,43E+09	1,47E+09	1,46E+09	1,46E+09	1,43E+09	1,44E+09
Mar	E útil(KJ/dia)	1,21E+09	1,17E+09	1,18E+09	1,21E+09	1,21E+09	1,20E+09	1,21E+09	1,16E+09	1,14E+09	1,20E+09	1,20E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,42E+09	1,39E+09	1,38E+09	1,42E+09	1,44E+09	1,42E+09	1,41E+09	1,36E+09	1,33E+09	1,40E+09	1,40E+09
Abr	E útil(KJ/dia)	1,16E+09	1,16E+09	1,17E+09	1,18E+09	1,21E+09	1,18E+09	1,16E+09	1,16E+09	1,18E+09	1,18E+09	1,24E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,36E+09	1,37E+09	1,38E+09	1,39E+09	1,43E+09	1,39E+09	1,37E+09	1,37E+09	1,39E+09	1,39E+09	1,46E+09
Mai	E útil(KJ/dia)	1,16E+09	1,17E+09	1,16E+09	1,19E+09	1,21E+09	1,18E+09	1,19E+09	1,20E+09	1,19E+09	1,15E+09	1,15E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,36E+09	1,38E+09	1,38E+09	1,40E+09	1,43E+09	1,40E+09	1,39E+09	1,41E+09	1,40E+09	1,36E+09	1,36E+09
Jun	E útil(KJ/dia)	1,18E+09	1,17E+09	1,19E+09	1,18E+09	1,16E+09	1,15E+09	1,17E+09	1,19E+09	1,15E+09	1,15E+09	1,14E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,38E+09	1,38E+09	1,39E+09	1,38E+09	1,36E+09	1,35E+09	1,37E+09	1,39E+09	1,35E+09	1,35E+09	1,33E+09
Jul	E útil(KJ/dia)	1,11E+09	1,11E+09	1,11E+09	1,12E+09	1,12E+09	1,12E+09	1,06E+09	1,07E+09	1,07E+09	1,07E+09	1,12E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,30E+09	1,30E+09	1,30E+09	1,31E+09	1,31E+09	1,31E+09	1,24E+09	1,24E+09	1,25E+09	1,25E+09	1,31E+09
Ago	E útil(KJ/dia)	1,14E+09	1,15E+09	1,15E+09	1,16E+09	1,17E+09	1,17E+09	1,19E+09	1,15E+09	1,17E+09	1,09E+09	1,11E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,32E+09	1,34E+09	1,33E+09	1,35E+09	1,36E+09	1,35E+09	1,37E+09	1,33E+09	1,36E+09	1,27E+09	1,29E+09
Set	E útil(KJ/dia)	1,16E+09	1,19E+09	1,16E+09	1,13E+09	1,13E+09	1,13E+09	1,13E+09	1,11E+09	1,14E+09	1,14E+09	1,12E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,35E+09	1,38E+09	1,34E+09	1,31E+09	1,30E+09	1,31E+09	1,31E+09	1,30E+09	1,32E+09	1,32E+09	1,30E+09

Tabela F. 4 - Dados e resultados diários da energia útil e energia fornecer para a fornalha H0101 na segu

Meses	Parâmetro	Dias											
		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
Jan	E útil(KJ/dia)	1,23E+09	1,23E+09	1,23E+09	1,24E+09	1,21E+09	1,23E+09	1,22E+09	1,18E+09	1,17E+09	1,17E+09	1,16E+09	1,1
	E fornecida(KJ/dia)	1,46E+09	1,45E+09	1,46E+09	1,47E+09	1,43E+09	1,45E+09	1,44E+09	1,40E+09	1,38E+09	1,39E+09	1,37E+09	1,3
Fev	E útil(KJ/dia)	-	1,22E+09	1,17E+09	1,12E+09	1,18E+09	1,18E+09	1,24E+09	1,24E+09	1,25E+09	1,22E+09	1,21E+09	1,2
	E fornecida(KJ/dia)	-	1,43E+09	1,37E+09	1,32E+09	1,39E+09	1,39E+09	1,46E+09	1,45E+09	1,46E+09	1,43E+09	1,42E+09	1,4
Mar	E útil(KJ/dia)	1,20E+09	1,16E+09	1,17E+09	1,19E+09	1,19E+09	1,19E+09	1,18E+09	1,19E+09	1,18E+09	1,13E+09	1,19E+09	1,1
	E fornecida(KJ/dia)	1,41E+09	1,37E+09	1,38E+09	1,41E+09	1,40E+09	1,41E+09	1,39E+09	1,39E+09	1,39E+09	1,32E+09	1,39E+09	1,3
Abr	E útil(KJ/dia)	1,19E+09	1,13E+09	1,09E+09	1,20E+09	1,20E+09	1,17E+09	1,17E+09	1,17E+09	1,22E+09	1,20E+09	1,21E+09	1,1
	E fornecida(KJ/dia)	1,41E+09	1,33E+09	1,30E+09	1,43E+09	1,43E+09	1,39E+09	1,40E+09	1,40E+09	1,45E+09	1,41E+09	1,42E+09	1,3
Mai	E útil(KJ/dia)	1,14E+09	1,07E+09	1,14E+09	1,15E+09	1,17E+09	1,17E+09	1,15E+09	1,16E+09	1,15E+09	1,18E+09	1,16E+09	1,1
	E fornecida(KJ/dia)	1,33E+09	1,27E+09	1,35E+09	1,36E+09	1,38E+09	1,39E+09	1,36E+09	1,37E+09	1,35E+09	1,40E+09	1,38E+09	1,4
Jun	E útil(KJ/dia)	1,20E+09	1,22E+09	1,21E+09	1,24E+09	1,20E+09	1,10E+09	1,11E+09	1,17E+09	1,17E+09	1,18E+09	1,15E+09	1,1
	E fornecida(KJ/dia)	1,41E+09	1,43E+09	1,42E+09	1,45E+09	1,40E+09	1,29E+09	1,31E+09	1,38E+09	1,37E+09	1,38E+09	1,35E+09	1,3
Jul	E útil(KJ/dia)	1,06E+09	1,09E+09	1,11E+09	1,22E+09	1,13E+09	1,18E+09	1,18E+09	1,17E+09	1,17E+09	1,18E+09	1,17E+09	1,1
	E fornecida(KJ/dia)	1,24E+09	1,27E+09	1,30E+09	1,43E+09	1,33E+09	1,38E+09	1,39E+09	1,37E+09	1,37E+09	1,38E+09	1,37E+09	1,3
Ago	E útil(KJ/dia)	1,11E+09	1,18E+09	1,11E+09	1,11E+09	1,10E+09	1,11E+09	1,11E+09	1,08E+09	1,14E+09	1,14E+09	1,12E+09	1,1
	E fornecida(KJ/dia)	1,29E+09	1,37E+09	1,30E+09	1,30E+09	1,29E+09	1,30E+09	1,29E+09	1,27E+09	1,33E+09	1,32E+09	1,32E+09	1,3
Set	E útil(KJ/dia)	1,12E+09	1,12E+09	1,09E+09	1,04E+09	1,07E+09	1,09E+09	-	-	-	-	-	-
	E fornecida(KJ/dia)	1,30E+09	1,31E+09	1,27E+09	1,21E+09	1,24E+09	1,27E+09	-	-	-	-	-	-

Tabela F. 5- Dados e resultados diários da energia útil e energia fornecer para a fornalha H0301 na prime

Meses	Parâmetro	Dias										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Jan	E útil(KJ/dia)	1,41E+09	1,41E+09	1,41E+09	1,42E+09	1,42E+09	1,42E+09	1,41E+09	1,41E+09	1,40E+09	1,39E+09	1,37E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,69E+09	1,68E+09	1,70E+09	1,71E+09	1,71E+09	1,70E+09	1,69E+09	1,69E+09	1,68E+09	1,68E+09	1,66E+09
Fev	E útil(KJ/dia)	1,32E+09	1,33E+09	1,35E+09	1,34E+09	1,32E+09	1,32E+09	1,31E+09	1,32E+09	1,31E+09	1,32E+09	1,33E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,57E+09	1,58E+09	1,61E+09	1,61E+09	1,59E+09	1,58E+09	1,57E+09	1,56E+09	1,56E+09	1,58E+09	1,58E+09
Mar	E útil(KJ/dia)	1,33E+09	1,33E+09	1,33E+09	1,34E+09	1,35E+09	1,34E+09	1,33E+09	1,29E+09	1,29E+09	1,32E+09	1,31E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,60E+09	1,60E+09	1,60E+09	1,60E+09	1,61E+09	1,60E+09	1,59E+09	1,55E+09	1,54E+09	1,57E+09	1,57E+09
Abr	E útil(KJ/dia)	1,24E+09	1,29E+09	1,26E+09	1,26E+09	1,27E+09	1,26E+09	1,26E+09	1,27E+09	1,26E+09	1,25E+09	1,28E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,48E+09	1,53E+09	1,52E+09	1,51E+09	1,52E+09	1,51E+09	1,51E+09	1,51E+09	1,50E+09	1,50E+09	1,53E+09
Mai	E útil(KJ/dia)	1,22E+09	1,22E+09	1,22E+09	1,22E+09	1,23E+09	1,24E+09	1,23E+09	1,23E+09	1,23E+09	1,23E+09	1,23E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,45E+09	1,44E+09	1,44E+09	1,44E+09	1,45E+09	1,46E+09	1,46E+09	1,46E+09	1,46E+09	1,46E+09	1,46E+09
Jun	E útil(KJ/dia)	1,22E+09	-	-	-	-	1,27E+09	1,29E+09	1,28E+09	1,28E+09	1,28E+09	1,26E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,42E+09	-	-	-	-	1,49E+09	1,51E+09	1,51E+09	1,52E+09	1,51E+09	1,49E+09
Jul	E útil(KJ/dia)	1,22E+09	1,22E+09	1,21E+09	1,21E+09	1,21E+09	1,22E+09	1,19E+09	1,20E+09	1,20E+09	1,19E+09	1,21E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,44E+09	1,44E+09	1,43E+09	1,43E+09	1,43E+09	1,43E+09	1,39E+09	1,41E+09	1,40E+09	1,40E+09	1,42E+09
Ago	E útil(KJ/dia)	1,37E+09	1,37E+09	1,36E+09	1,27E+09	1,22E+09	1,22E+09	1,22E+09	1,22E+09	1,22E+09	1,20E+09	1,20E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,65E+09	1,63E+09	1,61E+09	1,50E+09	1,44E+09	1,44E+09	1,45E+09	1,45E+09	1,45E+09	1,41E+09	1,42E+09
Set	E útil(KJ/dia)	1,24E+09	1,27E+09	1,25E+09	1,26E+09	1,26E+09	1,25E+09	1,25E+09	1,25E+09	1,27E+09	1,24E+09	1,25E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,46E+09	1,49E+09	1,48E+09	1,49E+09	1,49E+09	1,48E+09	1,48E+09	1,49E+09	1,50E+09	1,48E+09	1,48E+09

Tabela F. 6- Dados e resultados diários da energia útil e energia fornecer para a fornalha H0301 na segur

Meses	Parâmetro	Dias											
		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
Jan	E útil(KJ/dia)	1,34E+09	1,35E+09	1,35E+09	1,36E+09	1,35E+09	1,33E+09	1,35E+09	1,32E+09	1,30E+09	1,32E+09	1,34E+09	1,35E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,61E+09	1,62E+09	1,62E+09	1,63E+09	1,62E+09	1,61E+09	1,62E+09	1,60E+09	1,58E+09	1,59E+09	1,59E+09	1,59E+09
Fev	E útil(KJ/dia)	1,25E+09	1,27E+09	1,25E+09	1,25E+09	1,31E+09	1,32E+09	1,34E+09	1,35E+09	1,33E+09	1,33E+09	1,32E+09	1,33E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,50E+09	1,52E+09	1,49E+09	1,48E+09	1,57E+09	1,57E+09	1,60E+09	1,60E+09	1,59E+09	1,59E+09	1,59E+09	1,59E+09
Mar	E útil(KJ/dia)	1,31E+09	1,28E+09	1,27E+09	1,32E+09	1,36E+09	1,32E+09	1,30E+09	1,30E+09	1,29E+09	1,24E+09	1,28E+09	1,28E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,57E+09	1,52E+09	1,53E+09	1,60E+09	1,64E+09	1,58E+09	1,56E+09	1,56E+09	1,56E+09	1,50E+09	1,55E+09	1,55E+09
Abr	E útil(KJ/dia)	1,27E+09	1,25E+09	1,22E+09	1,26E+09	1,25E+09	1,23E+09	1,24E+09	1,23E+09	1,24E+09	1,23E+09	1,22E+09	1,22E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,51E+09	1,47E+09	1,45E+09	1,49E+09	1,48E+09	1,46E+09	1,46E+09	1,46E+09	1,47E+09	1,46E+09	1,45E+09	1,45E+09
Mai	E útil(KJ/dia)	1,21E+09	1,16E+09	1,18E+09	1,20E+09	1,20E+09	1,20E+09	1,20E+09	1,21E+09	1,21E+09	1,21E+09	1,21E+09	1,21E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,43E+09	1,37E+09	1,40E+09	1,43E+09	1,43E+09	1,42E+09	1,43E+09	1,44E+09	1,43E+09	1,44E+09	1,43E+09	1,43E+09
Jun	E útil(KJ/dia)	1,24E+09	1,25E+09	1,24E+09	1,25E+09	1,25E+09	1,23E+09	1,22E+09	1,25E+09	1,24E+09	1,24E+09	1,24E+09	1,24E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,45E+09	1,47E+09	1,45E+09	1,47E+09	1,47E+09	1,44E+09	1,44E+09	1,47E+09	1,46E+09	1,46E+09	1,45E+09	1,45E+09
Jul	E útil(KJ/dia)	1,17E+09	1,23E+09	1,23E+09	1,37E+09	1,35E+09	1,38E+09	1,37E+09	1,37E+09	1,36E+09	1,37E+09	1,38E+09	1,38E+09
	E fornecida(KJ/dia)	1,37E+09	1,44E+09	1,46E+09	1,61E+09	1,59E+09	1,62E+09	1,62E+09	1,62E+09	1,62E+09	1,64E+09	1,65E+09	1,65E+09
Ago	E útil(KJ/dia)	-	-	-	-	-	1,21E+09	1,25E+09	1,28E+09	1,29E+09	1,27E+09	1,26E+09	1,26E+09
	E fornecida(KJ/dia)	-	-	-	-	-	1,42E+09	1,47E+09	1,50E+09	1,51E+09	1,47E+09	1,47E+09	1,47E+09
Set	E útil(KJ/dia)	1,26E+09	1,25E+09	1,24E+09	1,22E+09	1,22E+09	1,22E+09	-	-	-	-	-	-
	E fornecida(KJ/dia)	1,48E+09	1,47E+09	1,46E+09	1,45E+09	1,45E+09	1,45E+09	-	-	-	-	-	-

Tabela F. 7- Dados e resultados diários da energia útil e energia fornecer para a fornalha H0471 na prime

Meses	Parâmetro	Dias										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Jan	E útil(KJ/dia)	1,92E+09	1,94E+09	1,91E+09	1,93E+09	1,95E+09	1,95E+09	1,95E+09	1,94E+09	1,96E+09	1,97E+09	1,95E+09
	Efornecida(KJ/dia)	2,26E+09	2,26E+09	2,24E+09	2,27E+09	2,29E+09	2,29E+09	2,29E+09	2,30E+09	2,32E+09	2,31E+09	2,30E+09
Fev	E útil(KJ/dia)	1,92E+09	1,90E+09	1,92E+09	1,92E+09	1,91E+09	1,91E+09	1,90E+09	1,90E+09	1,93E+09	1,92E+09	1,93E+09
	Efornecida(KJ/dia)	2,21E+09	2,20E+09	2,22E+09	2,21E+09	2,21E+09	2,21E+09	2,20E+09	2,19E+09	2,24E+09	2,23E+09	2,23E+09
Mar	E útil(KJ/dia)	1,96E+09	1,97E+09	1,97E+09	1,98E+09	1,99E+09	1,97E+09	1,99E+09	1,94E+09	1,93E+09	2,01E+09	2,00E+09
	Efornecida(KJ/dia)	2,28E+09	2,30E+09	2,29E+09	2,30E+09	2,32E+09	2,30E+09	2,32E+09	2,26E+09	2,24E+09	2,32E+09	2,30E+09
Abr	E útil(KJ/dia)	1,97E+09	2,02E+09	2,01E+09	2,00E+09	2,04E+09	2,02E+09	2,01E+09	1,99E+09	1,99E+09	2,00E+09	2,00E+09
	Efornecida(KJ/dia)	2,30E+09	2,35E+09	2,35E+09	2,34E+09	2,39E+09	2,36E+09	2,34E+09	2,32E+09	2,33E+09	2,33E+09	2,34E+09
Mai	E útil(KJ/dia)	2,04E+09	2,03E+09	2,02E+09	2,05E+09	2,06E+09	2,03E+09	2,02E+09	2,02E+09	2,01E+09	2,00E+09	-
	Efornecida(KJ/dia)	2,39E+09	2,38E+09	2,38E+09	2,41E+09	2,41E+09	2,38E+09	2,37E+09	2,38E+09	2,36E+09	2,35E+09	-
Jun	E útil(KJ/dia)	2,00E+09	1,99E+09	2,08E+09	2,11E+09	2,04E+09	1,99E+09	2,00E+09	2,02E+09	1,99E+09	2,00E+09	1,98E+09
	Efornecida(KJ/dia)	2,30E+09	2,29E+09	2,40E+09	2,44E+09	2,36E+09	2,30E+09	2,32E+09	2,33E+09	2,30E+09	2,32E+09	2,29E+09
Jul	E útil(KJ/dia)	1,97E+09	1,98E+09	1,98E+09	1,98E+09	1,98E+09	1,98E+09	1,93E+09	1,93E+09	1,94E+09	1,94E+09	1,96E+09
	Efornecida(KJ/dia)	2,30E+09	2,31E+09	2,31E+09	2,31E+09	2,31E+09	2,31E+09	2,25E+09	2,26E+09	2,27E+09	2,27E+09	2,30E+09
Ago	E útil(KJ/dia)	2,01E+09	2,01E+09	1,99E+09	2,00E+09	2,00E+09	2,00E+09	2,04E+09	1,99E+09	2,00E+09	1,94E+09	1,95E+09
	Efornecida(KJ/dia)	2,34E+09	2,32E+09	2,30E+09	2,32E+09	2,32E+09	2,33E+09	2,37E+09	2,32E+09	2,33E+09	2,26E+09	2,27E+09
Set	E útil(KJ/dia)	2,02E+09	2,04E+09	2,04E+09	2,03E+09	2,03E+09	2,03E+09	2,02E+09	2,01E+09	2,02E+09	2,04E+09	2,02E+09
	Efornecida(KJ/dia)	2,35E+09	2,38E+09	2,38E+09	2,36E+09	2,36E+09	2,36E+09	2,36E+09	2,37E+09	2,39E+09	2,40E+09	2,36E+09



### Cálculos da poupança energética

A obtenção do novo rendimento médio anual, no caso de serem feitas limpezas químicas mensais, foi realizado calculando o rendimento médio nos 30 dias após as limpezas efetuadas no período em estudo. Como para o período em estudo foram feitas três limpezas, obtiveram-se três rendimentos médios. Deste modo foi feita a média destes três valores resultando no rendimento das limpezas mensais ( ) admitindo-se que as fornalhas iriam possuir este rendimento. Como já foi dito anteriormente, durante o período deste estudo as limpezas tiveram as seguintes datas: 26 de janeiro, 30 de maio e 1 de agosto. A média do rendimento após cada limpeza é calculada com os valores presentes nas tabelas F.3 e F.4 para a fornalha H0101. Para as restantes fornalhas foram usados os valores presentes nas tabelas F.5 e F.6 para a fornalha H0301 e nas tabelas F.7 e F.8 para a fornalha H0741. O exemplo de cálculo seguinte foi realizado para a fornalha H0101. Foi admitido, (só nesta secção dos anexos) que a energia a fornecer às fornalhas provinha exclusivamente da queima dos combustíveis.

$$= \frac{\text{---} \text{---} \text{---}}{\text{---}} \quad (\text{F.1})$$

Os rendimentos médios obtidos para a fornalha H0101, para cada um dos períodos após limpezas foram:

=84,9%

=85,4%

=85,9%

Fazendo a média destes três valores resulta no rendimento médio de:

=85,4%

(para a fornalha H0101)

Para as restantes fornalhas obtiveram-se os seguintes rendimentos médios com limpezas mensais:

$$=84,0\% \quad (\text{para a fornalha H0301})$$

$$=85,6\% \quad (\text{para a fornalha H0471})$$

Tendo em conta o valor da energia útil obtida através da equação 4.1, fez-se o cálculo do valor médio desta energia durante o período de funcionamento normal usando a equação F.2. Neste exemplo de cálculo utilizou-se um valor de energia útil médio para todo período de funcionamento normal, utilizando os valores presentes nas tabelas F.3 e F.4, para a fornalha H0101, os dados para as restantes fornalhas podem ser consultados nas tabelas F.5 a F.8.

$$\eta_{\text{ú}} = \frac{E_{\text{ú}}}{E_{\text{c}}} \quad (\text{F.2})$$

Resultando num valor de energia útil médio de  $1,17 \times 10^9$  kJ/dia. (para a fornalha H0101)

Os valores da energia útil média para as restantes fornalhas foram os seguintes:

$$1,98 \times 10^9 \text{ kJ/dia (para a fornalha H0471)}$$

$$1,27 \times 10^9 \text{ kJ/dia (para a fornalha H0301)}$$

Estes dois parâmetros foram importantes para obter a energia útil em cada dia do funcionamento normal da fornalha através da equação F.3.

$$\eta_{\text{ú}} = \frac{1,17 \times 10^9}{1,37 \times 10^9} \quad (\text{para a fornalha H0101})$$

$$=85,4\% \quad (\text{para a fornalha H0101})$$

$$\eta_{\text{ú}} = \frac{E_{\text{ú}}}{E_{\text{c}}} \quad (\text{F.3})$$

$$=1,37 \times 10^9 \quad /$$

Os valores da energia necessária fornecer às restantes fornalhas existindo limpezas mensais foram os seguintes:

$2,31 \times 10^9$  kJ/dia (para a fornalha H0471)

$1,51 \times 10^9$  kJ/dia (para a fornalha H0301)

Para se obter a poupança de energia através da equação F.4, foi comparado o valor da energia a fornecer ( ), com o valor da energia obtido usando o rendimento médio verificado durante o presente estudo. Os valores dos rendimentos médios obtidos durante o estudo para todas as fornalhas encontram-se na tabela D.1. O cálculo apresentado foi realizado para a fornalha H0101, seguindo-se a mesma metodologia para as restantes fornalhas.

**=85,2%**

(para a fornalha H0101)

úé =  $1,17 \times 10^9$  /

$$= \frac{\text{úé}}{\text{—}} \quad (\text{F.4})$$

$$= 1,373 \times 10^9 /$$

Os valores da para as restantes fornalhas foram os seguintes:

$2,33 \times 10^9$  kJ/dia (para a fornalha H0471)

$1,52 \times 10^9$  kJ/dia (para a fornalha H0301)

$$\begin{aligned}
 &=1,37 \times 10 \quad / \quad \text{(para a fornalha H0101)} \\
 &=1,373 \times 10 \quad / \quad \text{(para a fornalha H0101)} \\
 \\ 
 &\zeta \quad \quad \quad (\%) = \frac{\quad \quad \quad}{\quad \quad \quad} \times 100 \quad \text{(F.5)} \\
 &\quad \quad \quad \zeta \quad \quad \quad (\%) = 0,3
 \end{aligned}$$

Para as restantes fornalhas a poupança obtida foi de:

$$\zeta \quad \quad \quad (\%) = 0,9 \quad \text{(para a fornalha H0471)}$$

$$\zeta \quad \quad \quad (\%) = 0,7 \quad \text{(para a fornalha H0301)}$$

## F.2- Consumo exclusivo de FG

### Cálculos da poupança energética

Para os cálculos da poupança de energia referente à melhoria energética relativa ao consumo exclusivo de FG, foi seguido exatamente o mesmo raciocínio usado para as limpezas mensais - ver secção F.1.A única diferença foi a obtenção do novo rendimento da fornalha.

Foi admitido, (só nesta secção dos anexos) que a energia a fornecer às fornalhas provinha exclusivamente da queima dos combustíveis.

Como a fornalha H0101 foi a única das três em que se registou um largo período onde só consumia FG, o valor do seu ganho de rendimento foi considerado igual para todas as outras. O ganho de rendimento foi calculado pela equação F.5

é  $=85,2\%$   
(valor da tabela D.1)

A parcela referente ao rendimento médio obtido quando só existe consumo de FG-  
\_\_\_\_\_, é obtido fazendo a média dos valores de rendimento apresentados nas tabelas  
F.3 e F.4, a partir do dia 30 de maio, resultando no valor de 86,1 %.

$$h'ó = \frac{\text{---}}{\text{---}} \quad \text{é} \quad \text{---} \quad \text{(F.6)}$$

$$h'ó = 86,1 - 85,2$$

$$h'ó = 0,9\%$$

Este ganho de rendimento foi somado ao rendimento das restantes fornalhas (tabela D.1)  
resultando nos seguintes valores:

$$ó = 85,1 + 0,9 = 86,0\% \quad \text{(para a fornalha H0471)}$$

$$ó = 85,2 + 0,9 = 86,1\% \quad \text{(para a fornalha H0101)}$$

$$ó = 83,7 + 0,9 = 84,6\% \quad \text{(para a fornalha H0301)}$$

Com os rendimentos obtidos e utilizando os valores de energia útil médio de  $1,17 \times 10^9$  kJ/dia. (para a fornalha H0101);  $1,98 \times 10^9$  kJ/dia (para a fornalha H0471);  $1,27 \times 10^9$  kJ/dia (para a fornalha H0301), já calculados anteriormente. É possível calcular a \_\_\_\_\_, (antes e depois da melhoria energética) em cada uma das fornalhas tal como foi feito anteriormente no ponto F.1.

Os resultados do cálculo da  $\eta_{\text{fornalha}}$  antes do consumo exclusivo de FG foram realizados no ponto F.1 e têm os seguintes resultados:

$2,33 \times 10^9$  kJ/dia (para a fornalha H0471)

$1,52 \times 10^9$  kJ/dia (para a fornalha H0301)

$1,373 \times 10^9$  kJ/dia (para a fornalha H0101)

Os resultados do cálculo da  $\eta_{\text{fornalha}}$  (após o uso exclusivo de FG) podem ser calculados através da equação F.6, utilizando os valores de  $\eta_{\text{fornalha}}$ , calculados para cada uma das fornalhas.

$$\eta_{\text{fornalha}} = 86,1\% \quad (\text{para a fornalha H0101})$$

Energia útil médio =  $1,17 \times 10^9$  kJ/dia. (para a fornalha H0101)

$$\eta_{\text{fornalha}} = \frac{\eta_{\text{útil}}}{\eta_{\text{fornalha}}} \quad (\text{F.7})$$

$$\eta_{\text{fornalha}} = 1,36 \times 10^9 \text{ / } \dots$$

Com o valor da energia fornecida e com o rácio da massa de dióxido de carbono por energia libertada na combustão é possível determinar a quantidade de dióxido de carbono que a fornalha liberta diariamente.

$$\left( \frac{\text{kg}}{\text{kJ}} \right) = 55,8/ \quad (\text{valor obtido no ponto B.1.1})$$

$$\text{Massa de CO}_2 = 1,36 \times \frac{\text{kg}}{\text{kJ}} \times \dots = 75,9/$$

O mesmo cálculo pode ser feito para as restantes fornalhas.

Os valores da  $\eta_{\text{fornalha}}$  para as restantes fornalhas foram os seguintes:

2,30x 10<sup>9</sup> kJ/dia (para a fornalha H0471)

Massa de CO<sub>2</sub> = 128 t/dia

1,50x 10<sup>9</sup> kJ/dia (para a fornalha H0301)

Massa de CO<sub>2</sub> = 83,7 t/dia

Com os novos valores das emissões de dióxido de carbono, pode-se comparar o cenário das emissões com a sugestão de melhoria com os valores obtidos durante o funcionamento normal.

Total de emissões só FG = 287,6 t/dia

Total de emissões normal funcionamento = 378,1 t/dia (valor calculado em A.7), embora este valor diga respeito ao dia 3 de janeiro de 2012 admitiu-se que seria muito semelhante à média registada durante o período do funcionamento normal.

Redução de emissão de CO<sub>2</sub> = [(378,1-287,6)/378,1] x 100 = 24%

Utilizando também a equação F.4, determinou-se a poupança energética em cada fornalha, cujos valores são apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 -Poupança energética nas fornalhas após limpezas mensais.

Fornalhas	H0101	H0301	H0471
Poupança de energia (%)	0,9	1,3	1,3

#### Cálculos da análise económica

Os cálculos da análise económica foram realizados com o intuito de obter os custos relacionados com a operação das fornalhas. O cálculo do custo de operação antes da proposta de melhoria foi calculado pelo custo dos combustíveis durante o período de funcionamento normal. Como só se têm dados de janeiro até setembro (tabela F.3), para fazer essa análise anual é necessário multiplicar o consumo real por um fator de 12/9, após a soma de cada um dos tipos do combustível para todas as fornalhas e para todos os

meses, resultando nos valores presentes na tabela F.4 em que são apresentados os consumos anuais relativos a cada um dos combustíveis.

Tabela F. 3- Consumos de combustíveis registados no funcionamento normal.

Fornalha	Comb.	Consumos de combustível (t/d)								
		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro
H0101	FG	634,9	553,5	566,3	861,4	884,6	847,1	836,3	841,8	781,4
	FO	354,6	360,4	380,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
H0301	FG	259,1	305,7	364,0	294,6	283,2	266,8	295,3	321,9	272,7
	FO	937,5	758,9	755,6	743,1	766,8	773,1	797,8	739,5	759,3
H0471	FG	646,4	533,0	642,3	415,6	661,1	702,9	632,9	676,4	621,2
	FO	951,6	954,0	978,2	1228,7	1022,6	896,7	1013,7	957,3	985,5

Tabela F. 4-Consumos de combustíveis anuais.

Consumo total anual (t)	FG	20003
	FO	22821

Dados necessários para a realização da análise económica fornecidos pela FAR.

Custo do FG (€/t) = 692,93

Custo do FO (€/t) = 533,91

PCI médio do FG (kJ/g) (valor calculado)= 48,94

$$=20003 \times 692,93 + 22821 \times 533,91$$

$$=26045039€$$

O cálculo do custo de combustível, após a proposta de melhoria foi feito recorrendo-se aos valores da energia fornecida e admitindo que esta provinha exclusivamente da combustão dos combustíveis. Com o PCI médio do FG foi possível saber a massa de FG necessária à queima, calculando-se posteriormente o respetivo custo. De seguida será feito o cálculo da energia total que é necessária fornecer as três fornalhas em estudo, através da soma de

