



Universidade do Porto
FEUP Faculdade de
Engenharia



OPTIMIZAÇÃO DOS CONSUMOS ENERGÉTICOS DOS FORNOS DA SLM - FACTORES DE CONTROLO

TESE DE MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

5º ANO, 2º SEMESTRE

Orientadores (FEUP):

Professor Doutor Carlos Silva Ribeiro
Professor Doutor Luís Filipe Malheiros

Orientadores (SLM):

Engenheiro António Aguiar
Engenheira Cláudia Pedro

Trabalho realizado por:

Filipe Alexandre Almeida

Data de entrega: Julho de 2009

CANDIDATO Filipe Alexandre Alves de Almeida **Código** 040508024

Optimização dos consumos energéticos dos fornos da SLM - Factores de controlo

DATA 21/07/2009

LOCAL Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala C603 - 14:30h

JÚRI **Presidente** Professor Doutor José Roberto Tinoco Cavalheiro - DEMM/FEUP

Arguente Professor Doutor António Alberto Caetano Monteiro - DEM/EEUM

Orientador Professor Doutor Carlos Alberto Silva Ribeiro - DEMM/FEUP

Orientador Professor Doutor Luís Filipe Malheiros de Freitas Ferreira - DEMM/FEUP

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Doutor Carlos Silva Ribeiro e ao Professor Doutor Luís Filipe Malheiros a orientação e o acompanhamento dedicados a este trabalho.

Agradeço à Schmidt Light Metal - SLM na qualidade de empresa que possibilitou a concretização deste trabalho. Agradeço ao Eng.º António Aguiar e à Eng.ª Cláudia Pedro a orientação, o acompanhamento e a disponibilidade, dedicados na realização deste trabalho.

Agradeço à família, que sempre me ajudou e apoiou. A todos os meus amigos e colegas pela moral prestada.

A todos um muito obrigado!

ABSTRACT

This thesis is assessing the second half of the Integrated Master in Metallurgical Engineering and Materials.

The work was developed in cooperation with the Schmidt Light Metal - SLM. This contact helped me to know the company, its processes and equipments. The SLM provided all the information that supports the calculations and practical work present here.

This work aims to optimize the energy consumption of the furnaces of the SLM, after the characterization of combustion, the study of the practices listed by the manufacturer of the furnaces, and the knowledge of the influence of control factors in the combustion and in the resulting emissions.

We aim to quantify a gain in thermal efficiency from the optimization of consumption recorded by the practices suggested and implemented by this work.

RESUMO

Este trabalho de Tese de Mestrado constitui avaliação ao segundo semestre do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Foi anteriormente realizado um trabalho de Seminário, "Análise teórica dos consumos energéticos dos fornos da SLM - Factores de controlo" que proporcionou uma pesquisa bibliográfica do tema, uma assimilação dos conhecimentos teóricos e bases necessárias para o cálculo do consumo teórico de gás natural para elevar a temperatura de uma tonelada de liga de alumínio da temperatura ambiente à temperatura de sobreaquecimento, bem como uma assimilação de conhecimentos relacionados com a combustão, com a mistura reactiva e produtos resultantes da combustão.

Este trabalho de Tese de Mestrado foi desenvolvido em cooperação com a Schmidt Light Metal - SLM. Este contacto permitiu conhecer a empresa, seus processos e equipamentos. A SLM disponibilizou toda a informação que sustenta os cálculos e o trabalho prático aqui presente.

A Tese de Mestrado busca uma optimização dos consumos energéticos dos fornos de fusão da SLM. Pretende-se com este trabalho prático um aumento da eficiência térmica destes fornos. A Tese de Mestrado versa sobre uma caracterização da combustão praticada, o estudo das práticas referenciadas pelo fabricante dos fornos, conhecimento da influência dos factores de controlo na combustão e nas emissões daí resultantes. O cálculo do valor teórico de consumo energético obtido no trabalho de Seminário continua

aqui referido de forma a estabelecer-se um factor de eficiência térmica entre o valor teórico, o valor que na realidade se praticava, e o valor resultante das práticas sugeridas e implementadas por este trabalho.

Os fornos com os quais a SLM trabalha são conhecidos como *fornos de soleira inclinada*. Procurou-se legendar todos os seus constituintes, especificar os seus queimadores, o seu modo de funcionamento, referir as considerações e recomendações do fabricante destes fornos, a Striko Westofen.

Índice

Agradecimentos	
Abstract	IV
Resumo	IV/V
1. Introdução	8/9
2. SLM - Schmidt Light Metal	9-15
2.1 Empresa.....	9
2.2 Forno utilizado para fusão das ligas de alumínio	9-13
2.3 Recomendações e considerações da Striko Westofen	13
2.4 Princípio de funcionamento dos fornos de soleira inclinada	13/14
2.5 Combustível utilizado pela SLM, Gás Natural	14/15
3. Combustão - Factores de controlo.....	15-22
3.1 Definição de combustão.....	16
3.2 Composição química da mistura - Estequiometria.....	16/17
3.3 Composição química da mistura - Reacções Industriais.....	17/18
3.4 Dissociação - Formulação do problema de equilíbrio	18
3.5 Combustão com excesso de ar.....	18/19
3.6 Temperatura adiabática de chama vs razão de equivalência.....	19-21
3.7 Chamas.....	21/22
4. Produtos da Combustão	22-24
4.1 Variação das emissões pelos factores de controlo da combustão	22-24
5. Cálculo do consumo teórico de gás natural	24-29
5.1 Considerações e cálculo.....	24-29
6. Optimização dos consumos energéticos do forno de fusão 7 da SLM	29-59
6.1 Registo dos actuais consumos energéticos (monitorização 1)	29-33
6.2 Considerações dos resultados da monitorização 1.....	33-35
6.3 Caracterização da combustão praticada.....	35-42
6.4 Definição do modo de como actuar para optimização destes consumos	42-50
6.5 Resultados experimentais (monitorização 2).....	50-54
6.6 Considerações dos resultados da monitorização 2.....	54-56
6.7 Resultados da optimização.....	56-59
7. Eficiência térmica.....	59-62
7.1 Aumento de eficiência térmica pela optimização dos factores de controlo .	60-62
7.2 Eficiência térmica do forno antes e depois da optimização.....	62
8. Conclusões	63

9. Recomendações para trabalhos futuros.....	63/64
10. Bibliografia	65/66

Anexo 1- Calores de formação padrão utilizados no cálculo dos calores padrão de reacção

Anexo 2 - Calores específicos dos constituintes dos produtos de combustão

Anexo 3 - Humidade em função da humidade relativa

Anexo 4 - Monitorização 1 dos consumos de Gás Natural do forno 7 da SLM

Anexo 5 - Página 3 da ficha de afinação de queimadores

Anexo 6 - Monitorização 2 dos consumos de Gás Natural do forno 7 da SLM

1. INTRODUÇÃO

A procura de recursos energéticos tem aumentado desde a revolução industrial, sendo previsível uma continuidade dessa tendência com o crescimento da indústria.

O dióxido de carbono, e algumas outras emissões, são responsáveis pelo efeito de estufa, cujas consequências no clima fazem-se sentir e podem atingir proporções exageradas, se as actuais políticas energéticas não forem reformuladas. Contudo, os processos de combustão são e continuarão a ser imprescindíveis para assegurar esta procura de energia a um ritmo idêntico ao do desenvolvimento mundial. Daí a existência da necessidade de encarar e compreender os processos de forma a atingir elevados níveis de eficiência de combustão, não descuidando a segurança, fiabilidade e o tempo de vida dos equipamentos, aliada também a um controlo das emissões dos poluentes ambientais para a atmosfera.

Quando o uso de combustível representa um gasto avultado em sistemas de fornos industriais, surge a necessidade de poupar energia nos processos de aquecimento utilizados por essas indústrias. Os custos dos combustíveis têm vindo a aumentar, ganhando cada vez mais peso na proporção do custo total de produção. A diferença entre poupança de combustível e o seu desperdício pode determinar a diferença entre lucros e prejuízos, daí a poupança energética ser necessária. Aliado à poupança de combustível, outros efeitos positivos podem surgir, como o aumento da produtividade e a redução de emissões poluentes.

No contacto com a SLM - Schmidt Light Metal foi possível aperceber os seus processos e equipamentos, e, deste modo, compreender como toda a produção se desenvolve. Dada a quantificação do consumo teórico de gás natural, respeitante a condições de queima ideais, sem considerar perdas, realizada no trabalho de Seminário, pretendeu-se agora, actuar na combustão realmente praticada pela SLM, visando uma optimização dos seus consumos energéticos, respeitando os requisitos ambientais. Foi definido um forno sobre o qual se debruçou o estudo de optimização, sendo seleccionado para o efeito o que apresentava maior potencial de optimização. Perseguido este objectivo, inicialmente efectuou-se uma caracterização da combustão, um estudo das práticas referenciadas pelo fabricante dos fornos, e da influência dos factores de controlo na combustão, posteriormente, sugeriu-se e implementou-se uma prática de optimização que visou uma alteração num dos factores de controlo (razão de equivalência). Foram efectuadas monitorizações para obtenção dos valores de consumos específicos, possibilitando uma quantificação da medida de optimização.

Após conhecimento dos consumos específicos, previa e posteriormente à implementação da medida de optimização, pretendeu-se quantificar o aumento de

eficiência térmica obtido pela optimização dos consumos específicos. Calculou-se também a eficiência térmica do forno antes e depois da optimização, aferindo o aumento da eficiência do forno obtido.

Para além deste trabalho buscar uma optimização dos consumos energéticos do forno 7 da SLM, também se pretendeu aqui definir uma prática de como actuar para optimização dos restantes fornos, análoga ao método apresentado neste trabalho.

No cálculo do consumo energético teórico, aplicaram-se os princípios da termodinâmica, conceitos e definições inerentes, que possibilitam a realização de balanços energéticos e assim o cálculo do consumo em causa. Estudaram-se os parâmetros de combustão (factores de controlo), a forma como estes influenciam a própria combustão, as emissões daí resultantes, e a temperatura adiabática de chama, para assim se poder considerar uma forma de optimização dos consumos energéticos.

2. SLM - SCHMIDT LIGHT METAL

2.1 Empresa

A Schmidt Light Metal - Componentes para Automóveis, Lda. (SLM), localiza-se na Zona Industrial de S. Tiago de Riba-Ul, Oliveira de Azeméis, desenvolvendo a sua actividade para o sector automóvel, como fornecedora de peças em ligas de alumínio moldadas por fundição injectada. [1]

A SLM foi fundada em 1989, iniciando a sua actividade com duas máquinas de injeção de alta pressão; tornou-se, através de um crescimento constante e melhorias contínuas, num dos fornecedores da indústria automóvel mundialmente reconhecidos, e num dos maiores produtores em Portugal. [1]

Em 2007, 82% da produção da SLM destinou-se ao mercado externo, como fornecedora especializada de grandes construtores mundiais, a Volkswagen, Audi, General Motors e Delphi. [1]

As ligas de alumínio de maior consumo na SLM são a EN AC-47100, seguida da EN AC-46000, e a liga EN AC-43400 que tem um consumo residual face às duas anteriores.

2.2 Forno utilizado para fusão das ligas de alumínio

A Striko Westofen é fornecedora dos fornos da SLM, conhecidos por “Shaft Furnaces”, fornos de soleira inclinada. A SLM possui sete fornos deste tipo, sendo dois deles mais recentes, e de maior capacidade de fusão e manutenção. [2]

Conforme se vê na figura1, consiste num forno vertical com um queimador na parte mais baixa e um sistema de carregamento na parte superior. O combustível utilizado pela

SLM é o gás natural. O metal é carregado pela parte superior do forno e é fundido à medida que vai descendo pela rampa de fusão. Existe a possibilidade de um controlo da relação de combustível/ar para o queimador. [2]

O forno é usado para fundir os lingotes e retornos. O metal passa por um gradiente térmico existente entre a zona de carga e os queimadores, na zona de carga, de temperatura inferior, dá-se uma queima parcial do material orgânico. Este forno permite um pré-aquecimento da carga antes de a fundir. A carga metálica desce ao longo da soleira inclinada, durante a qual é aquecida e fundida, sendo sobreaquecida no reservatório inferior junto ao queimador. [2]

Este tipo de forno é unicamente usado para a fundição de metais não ferrosos, particularmente para o alumínio. Dada a complexa construção e a dificuldade na renovação do material refractário, o forno é somente usado para materiais com baixo ponto de fusão. O período de actividade para um dado refractário varia entre 4 a 8 anos. [2]

Principais vantagens: Um longo período de pré-aquecimento permite uma secagem da carga antes do início da sua fusão, tornando o forno apropriado para o alumínio pela diminuição do risco de absorção de hidrogénio; apresenta custos de investimento e operação relativamente baixos, realizando um pré-aquecimento eficaz, um controlo automatizado e apresentando um longo período de actividade do refractário; bom controlo de temperatura e elevado rendimento em termos de metal fundido. [2]

Principal desvantagem: Não é possível uma permuta da liga sem interromper este processo de fusão contínua e proceder a uma troca do material refractário, ou seja, a troca de liga nestes fornos apresenta custos elevados. [2]

O forno pode ser equipado com um ou vários queimadores, que têm a função de fundir o metal, e também, de mantê-lo no estado líquido, de acordo com o valor nominal da temperatura do banho de fusão, que pode ser ajustado nos comandos de controlo. A chama é monitorizada com a ajuda de eléctrodos de ionização. [2]

O ar necessário para a combustão, é introduzido em cada queimador através de um ventilador de ar para combustão e de uma válvula de alimentação ajustável por um motor eléctrico. O gás é introduzido através de um regulador de equilíbrio de pressão e de uma válvula magnética de gás, o regulador de equilíbrio de pressão abre e fecha dependendo da pressão de ar localizada na sua entrada de comando. Todos os queimadores dos sistemas Striko Westofen são operados com ar forçado (sob pressão). [2]

Os queimadores presentes nos fornos da Striko Westofen possuem cabos de ignição e monitorização associados aos mesmos, chamados cabos de ionização. Apesar do ambiente de combustão ser, talvez, suficiente para uma ignição espontânea, a ignição é

forçada de forma a evitar longos tempos de espera. Recorre-se a um cabo de ionização, que possui um eléctrodo responsável por aplicar uma descarga eléctrica no gás, proporcionando a explosão térmica. [3]

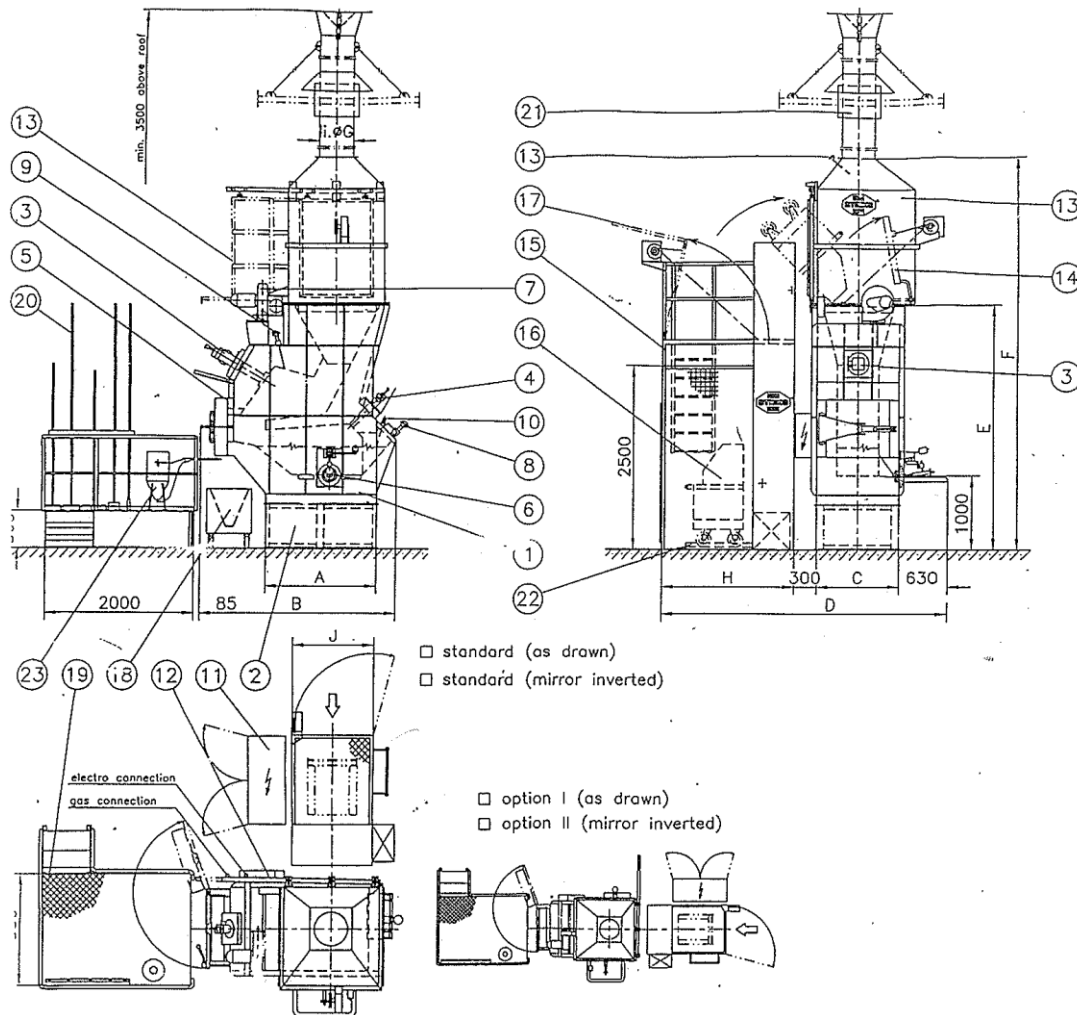


Figura 1: Esquematização dum forno de soleira inclinada (Striko Westofen). [4]

Tabela 1: Legendagem da esquematização do forno de soleira inclinada presente na figura 1. [4]

Número	Descrição	Número	Descrição
1	Corpo do forno	13	Controlador da temperatura do gás de saída
2	Base do forno	14	Tampa para evitar perdas térmicas em caso de suspensão da fusão
3	Queimador de fusão	15	Unidade de carga
4	Queimador de manutenção	16	Carro de carga
5	Porta de limpeza	17	Plataforma de trabalho
6	Zona de extracção de metal	18	Carro de escória
7	Ventilador	19	Plataforma de limpeza
8	Medidor da temperatura do banho	20	Conjunto de ferramentas de limpeza
9	Medidor de temperatura da zona de fusão	21	Chaminé
10	Indicador de controlo do nível máximo de enchimento	22	Sensor de excesso de carga
11	Painel eléctrico	23	Contentor do pó usado em operações de limpeza do banho
12	Caixa terminal		

Tabela 2: Queimadores e respectivas potências, utilizados nos sete fornos da SLM. [4]

	Queimadores de fusão	Potência dos queimadores	Queimadores de manutenção	Potência dos queimadores
Forno 1	BIO 140 RB 35/24	450 kW	BIO 100 RB 35/70	230 kW
Forno 2	BIO 140 RB 35/24	450 kW	BIO 100 RB 35/70	230 kW
Forno 3	BIO 140 RB 35/24	450 kW	BIO 100 RB 35/70	230 kW
Forno 4	BIO 140 RB 35/24	450 kW	BIO 100 RB 35/70	230 kW
Forno 5	ZIO 165 RB 100/35/17D	630 kW	BIO 100 RB 35/70/EZ	230 kW
Forno 6	ZIO 165 RB 100/35/17D	630 kW	BIO 140 RB 100/35/47E	450 kW
Forno 7	ZIO 165 RB 100/35/17D	630 kW	BIO 140 RB 100/35/47E	450 kW

Os fornos de fusão 1 a 5 estão equipados com um queimador de fusão e um queimador de manutenção. Os fornos de fusão 6 e 7 estão equipados com dois queimadores de fusão e um queimador de manutenção. [4]

Os queimadores BIO e ZIO, RB, são queimadores com tubo em aço para montagem em tijolos refractários ou em tubos de chama, utilizados para queima de gás natural e para uma chama normal. Identificação do tipo de chama: *R* - *chama normal*; *H* - *chama longa* e

branda; K - chama muito curta, chata, para tijolo refractário especial. Identificação do tipo de gás: B - gás natural; G - gás propano; D - gás de rua. [4]

2.3 Recomendações e considerações da Striko Westofen

A Striko recomenda sempre uma análise visual da chama, dado que esta possibilita uma primeira caracterização da qualidade da mistura. Desta forma, menciona que se a chama for larga, amarelo-clara e sem fumo, estamos perante uma atmosfera do forno neutra, perto da estequiométrica, um factor de excesso de ar (λ) próximo de 1,05, situação de chama preferível. Se a chama for amarelo-forte, com formação de fumo, estamos perante uma atmosfera do forno reduzida, existe um excesso de alimentação de gás, situação de chama menos preferível, imagem de chama errada. Se a chama for verde-azulada, temos uma atmosfera do forno oxidada, um excesso de alimentação de ar, situação de chama também menos preferível, imagem de chama errada. [4]

O manual da Striko Westofen refere que durante a operação de fusão, o forno deve ser mantido o mais cheio possível. Dessa forma há um aproveitamento de energia, em simultâneo com uma protecção do revestimento do poço contra danos causados por movimentação mecânica. [4]

2.4 Princípio de funcionamento dos fornos de soleira inclinada

Os fornos de soleira inclinada utilizados pela SLM estão equipados com sensores de enchimento e temperatura que controlam o seu funcionamento, fornecendo informações ao operário responsável, de que o forno precisa/pode ou não ser carregado.

Os fornos são mantidos cheios, de acordo com a recomendação do fabricante, possibilitando desta forma uma diminuição dos consumos energéticos dos mesmos.

A câmara de manutenção está dotada de sensores de enchimento, que consistem em dois eléctrodos expostos na câmara a um determinado nível, que dão sinal de uma câmara de manutenção cheia, quando o banho líquido os toca. Este sinal indica que o forno não pode ser mais carregado até que haja extracção de metal líquido desta câmara para os fornos de manutenção e doseamento, presentes nas células de injeção.

Existe um outro sensor de temperatura, também presente nesta câmara, associada a um queimador de manutenção, que permite o accionamento deste quando o banho diminui de um valor de temperatura definido, assegurando a manutenção do banho dentro de uma gama de temperaturas.

Na câmara de fusão, dada a necessidade de se saber se a carga previamente carregada se encontra fundida, ou não, existe um sensor de temperatura de gases de escape, colocado acima da zona de carregamento do forno, que controla também a

elevação automatizada da carga. Desta forma, quando a temperatura é superior a um dado valor de temperatura definido, é sinal de que a carga previamente carregada foi total ou parcialmente fundida, permitindo que a carga carregada no elevador seja carregada no forno, pelo accionamento da unidade de carga. Quando carregado, a temperatura registada pelo sensor diminui, informando o computador de que a câmara de fusão se encontra carregada, e impossibilitando a elevação de um outro carrinho com mais carga.

Existe também um sensor de temperatura da zona de fusão; quando um elevado valor de temperatura definido, na zona de fusão, é atingido, os queimadores de fusão são desactivados. Esta situação acontece quando temos uma câmara de manutenção não cheia, em que temos um accionamento contínuo dos queimadores de fusão, e por um qualquer motivo o forneiro não está a carregar carga.

Por questões de segurança, quando as portas da câmara de manutenção e fusão do forno são abertas, os respectivos queimadores dessas câmaras são automaticamente desligados (situação usual numa operação de remoção de escória).

2.5 Combustível utilizado pela SLM

A SLM usa um combustível gasoso, o gás natural. Os combustíveis gasosos deverão continuar presentes na engenharia da combustão, fundamentalmente devido à natureza mais limpa da sua combustão, relativamente ao fuel óleo e ao carvão. [3]

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos leves e pequenas quantidades de inertes, que permanece no estado gasoso à temperatura ambiente e pressão atmosférica. [3]

Tabela 3: Composição típica do gás natural %(v/v) (Tabela extraída de Borman e Ragland, 1998).

Componente	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	>C ₂ H ₆ *	CO ₂	N ₂	H ₂ O
Gás natural			80 - 90	<6	<4	<5	<5	

* Hidrocarbonetos mais pesados que C₂H₆

O gás natural é um gás inodoro e incolor, mais leve que o ar. A sua composição pode variar bastante. Os hidrocarbonetos existentes no gás natural são maioritariamente o metano e, em menores quantidades, o etano, o propano, butano e pentano. Os inertes característicos das jazidas de gás natural são o dióxido de carbono, hélio, sulfureto de hidrogénio e azoto molecular. As quantidades de água e compostos de enxofre e de azoto presentes no gás natural são desprezáveis. [3]

O gás natural, à semelhança do fuel óleo e carvão, apresenta características associadas à localização do jazigo, especialmente as percentagens volúmicas de CH₄ e N₂. [3]

A SLM é abastecida pela Galp. O gás natural distribuído pela Galp provém de duas origens diferentes, da Argélia por gasoduto, e da Nigéria, liquefeito e transportado por embarcações (esta fonte origina um gás natural de natureza mais pura). Considerando um fornecimento de 50-50% por parte de cada uma destas origens, o gás natural utilizado pela SLM deverá apresentar a seguinte composição média (v/v%):

Tabela 4: Composição do gás natural utilizado pela SLM (v/v%).

Nomenclatura	Fórmula química	% (v/v)
Metano	CH ₄	87,06
Etano	C ₂ H ₆	7,57
Propano	C ₃ H ₈	2,8
I - butano	C ₄ H ₁₀	0,42
n - butano	C ₄ H ₁₀	0,38
I - pentano	C ₅ H ₁₂	0,32
n - pentano	C ₅ H ₁₂	0,02
	C ₆ ⁺	0,02
	N ₂	1,04
	CO ₂	0,67

Tabela 5: Propriedades do gás natural utilizado pela SLM.

PCS	MJ/m ³ (n)	43,95
Densidade relativa		0,64

3. COMBUSTÃO - FACTORES DE CONTROLO

No trabalho de Seminário acima mencionado, referenciado na Bibliografia como [5], apresentaram-se os conceitos teóricos da termodinâmica aplicada à combustão e teoria relacionada com a temática da combustão. Dado que nos temos de cingir a um número limitado de páginas, e a prática deste trabalho de optimização dos consumos energéticos dos fornos da SLM se revelou bastante extensa, sugerimos a consulta desse trabalho para melhor compreender a teoria por detrás dos cálculos aqui presentes. Sendo neste capítulo

apenas referidas as temáticas mais relacionadas com os factores de controlo da combustão.

3.1 Definição de combustão

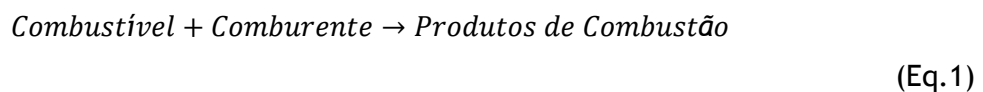
Encontramos livros de combustão em que a definição de combustão é omitida, dada a dificuldade em definir de forma sucinta o seu significado. [3]

Liñán e Williams (1993) mencionam a combustão como “a ciência das reacções químicas exotérmicas em escoamentos com transmissão de calor e massa”. [3]

Na combustão que se dá nos fornos industriais, decorrente de reacções químicas de elevada cinética, busca-se uma conversão de energia química em energia calorífica. [6]

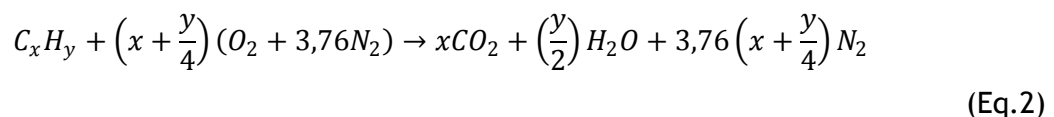
3.2 Composição química da mistura - Estequiometria

Num processo de combustão, a composição química da mistura reactiva (combustível + comburente) varia ao longo do tempo. As espécies químicas constituintes da mistura no início do processo de combustão são denominadas por reagentes, e as espécies químicas constituintes da mistura no final do processo de combustão são denominadas por produtos, o número total de átomos de cada elemento permanece constante. Abaixo descreve-se um processo de combustão: [3]



O combustível é usualmente um hidrocarboneto, de fórmula química C_xH_y . O comburente mais comum é o ar, apresentando aproximadamente uma constituição de 21% O_2 e 79% N_2 (composição volúmica), o que corresponde a $79/21 = 3,76$ moles de N_2 por cada mole de O_2 . [3]

Uma mistura reactiva é denominada estequiométrica quando a quantidade de oxidante nessa mistura é a teoricamente necessária para queimar completamente todo o combustível num processo de combustão ideal. Um processo de combustão ideal pressupõe a formação de espécies químicas completamente oxidadas nos produtos da combustão. No caso da combustão de um hidrocarboneto em ar, essas espécies químicas são o CO_2 e o H_2O . Na reacção estequiométrica: [3]



A razão estequiométrica ar/combustível para um hidrocarboneto é:

$$\left(\frac{m_{ar}}{m_{comb}}\right)_{Esteq} = \frac{\left(x + \frac{y}{4}\right)(M_{O_2} + 3,76 M_{N_2})}{M_{comb}} = 4,76 \left(x + \frac{y}{4}\right) \frac{M_{ar}}{M_{comb}} \quad (\text{Eq.3})$$

M_{ar} - Massa de ar ($M_{O_2} + M_{N_2}$); M_{comb} - Massa de combustível; Esteq - Mistura estequiométrica.

É importante realçar que, para uma mistura real de hidrocarboneto e ar, em proporções estequiométricas, não ocorre combustão completa, há formação de espécies químicas adicionais, como o CO (fenómeno de dissociação). [3]

A reacção química acima referida (Eq.2), representa um processo de combustão ideal, sendo apenas uma aproximação de um processo de combustão real. Para garantir a combustão completa do combustível, a maioria dos equipamentos de combustão opera com um excesso de ar. A proporção de comburente e combustível numa mistura arbitrária relativamente a uma mistura estequiométrica é quantificada através da razão de equivalência, \emptyset : [3]

$$\emptyset = \frac{\frac{m_{comb}}{m_{ox}}}{\left(\frac{m_{comb}}{m_{ox}}\right)_{esteq}} \quad (\text{Eq.4})$$

m_{comb} - Massa de combustível; m_{ox} - Massa de oxidante.

Assim, $\emptyset=1$ corresponde a uma mistura estequiométrica. Quando $\emptyset < 1$, a quantidade de comburente é maior do que a teoricamente necessária para queimar todo o combustível, considerando a mistura pobre. Numa situação de $\emptyset > 1$, a quantidade de comburente é inferior à requerida para queimar todo o combustível, considerando a mistura rica. A razão de equivalência também se designa por riqueza da mistura. [3]

No caso de o oxidante ser o ar, uma grandeza intimamente relacionada com a razão de equivalência é o coeficiente de excesso de ar, λ . É igual ao inverso da razão de equivalência, sendo definido como o quociente entre a massa de ar e a massa de combustível normalizado pelo mesmo quociente numa mistura estequiométrica: [3]

$$\lambda = \frac{1}{\emptyset} = \frac{\frac{m_{ar}}{m_{comb}}}{\left(\frac{m_{ar}}{m_{comb}}\right)_{esteq}} \quad (\text{Eq.5})$$

3.3 Composição química da mistura - Reacções industriais

Nas reacções de combustão praticadas pela indústria, podemos não ter os reagentes presentes em proporções estequiométricas, impossibilitando uma reacção completa, pode

haver presença de inertes, e várias reacções podem ocorrer em simultâneo. Nestas situações, a temperatura final esperada difere da que na realidade se obtém. Mesmo assim, os cálculos dos efeitos térmicos de reacções reais são baseados nos princípios teóricos aqui considerados. [7]

3.4 Dissociação - Formulação do problema de equilíbrio em sistemas com dissociação

Até temperaturas da ordem de 1250K e misturas pobres, os produtos da combustão são geralmente espécies químicas estáveis: CO_2 , H_2O , N_2 e O_2 . Nestas condições, a composição química dos produtos de combustão pode ser determinada por simples balanços de massa aplicados a cada um dos elementos químicos. No entanto, às temperaturas típicas dos processos de combustão, os produtos de combustão não são uma simples mistura de produtos estáveis, ocorrendo a dissociação dessas espécies químicas. [3]

Novas espécies químicas surgem no estado de equilíbrio, aquando da dissociação dos produtos de combustão. Desta forma, a solução de um problema de equilíbrio químico, num determinado sistema reactivo, ou do cálculo da temperatura adiabática de chama, tem de se iniciar pela definição de quais as espécies químicas presentes nesse estado de equilíbrio. As espécies químicas mais importantes terão de ser consideradas. Mediante a combustão dum hidrocarboneto em oxigénio deverão ser consideradas, pelo menos, as seguintes espécies químicas: CO_2 , H_2O , O_2 , CO , H_2 , OH , O e H . No nosso caso de combustão em ar deverão também ser considerados o H_2 , N e NO . Outras espécies, presentes em concentrações diminutas, poderão também ser consideradas, tais como HO_2 , H_2O_2 , N_2O , NO_2 , $\text{C}_{(s)}$, HCN , CH_4 ou C_2H_2 . [3]

3.5 Combustão com excesso de ar

Na indústria é impossível um ajuste exacto da taxa de ar ao combustível, desta forma, para assegurarmos uma combustão completa admitimos um excesso de ar, porque um défice de ar é sempre a causa de uma maior perda pelos fumos, ou seja, um rendimento teórico inferior ao de uma situação de um excesso de ar do mesmo valor (a perda de combustível não combustado pelos fumos é economicamente mais significativa). O valor optimizado deste excesso de ar está dependente da variação do poder calorífico do combustível, das variações do estado do gás e do ar, da natureza do combustível e do sistema de queimadores, de uma forma generalizada, da atmosfera exigida ao forno pela carga. [8]

Ao mesmo tempo que temos presente que um excesso de ar assegura uma combustão completa, sendo preferível à situação de um excesso de combustível, situação de maior perda pelos fumos, devemos ter em conta a ocorrência de oxidação do alumínio (Eq.6), dada pela presença de oxigénio proveniente do excesso de ar, na atmosfera do forno, e as perdas económicas inerentes desta situação. É necessário considerar as perdas económicas inerentes desta oxidação quando trabalhamos com um excesso de ar, uma vez que estas podem ser superiores às perdas dadas por uma combustão incompleta. [8]



Uma dada relação de combustível/ar dispensada para o queimador é adulterada pelas entradas de ar supérfluo, que tendem a aumentar o excesso de ar. [8]

Também devemos considerar que uma acumulação de CO, resultante de uma combustão incompleta, nas câmaras de fusão e manutenção, incorre em risco de explosão. Desta forma, assegurar uma combustão caracterizada por um excesso de ar é essencial. [4]

3.6 Temperatura adiabática de chama vs razão de equivalência

Designa-se por temperatura adiabática de chama, a temperatura dos produtos de combustão de um processo de combustão adiabático, em que não haja trabalho fornecido ao sistema reactivo nem cedido por este, e em que a variação de energia cinética e potencial seja desprezável. A temperatura adiabática de chama é a temperatura máxima que poderia ocorrer num processo de combustão. [9]

Na realidade existem perdas de calor por condução, convecção e radiação para o exterior do sistema reactivo, impelindo numa temperatura dos produtos de combustão inferior à temperatura adiabática de chama. [3]

A temperatura adiabática de chama, para além de ser função da temperatura dos reagentes, depende também da razão de equivalência. A temperatura adiabática de chama pode ser controlada pelo excesso de ar utilizado na combustão. [3]

Na ausência de dissociação, a temperatura adiabática de chama é máxima para uma mistura estequiométrica. [3]

Na verdade, para uma mistura rica (excesso de combustível), a energia libertada na combustão é a mesma que para uma mistura estequiométrica com a mesma massa de comburente, mas parte dessa energia é usada para aquecer o combustível não queimado; sendo então a temperatura atingida pelos produtos da mistura rica, temperatura adiabática de chama, em condições adiabáticas, inferior à de uma mistura estequiométrica. [3]

De forma análoga, no caso de uma mistura pobre (excesso de comburente), a energia libertada na reacção é a mesma que para uma mistura estequiométrica com a mesma massa de combustível, mas a energia é parcialmente usada para aquecer o ar em excesso. Logo, a temperatura adiabática de chama é menor do que no caso de uma mistura estequiométrica. [3]

Entre estas duas situações que diferem da mistura estequiométrica, a mistura rica e a mistura pobre, e uma vez que a mistura estequiométrica é dificilmente utilizada, a situação de mistura pobre (excesso de comburente, ar) é preferível pois este recurso existe em abundância e não apresenta custos para a empresa, apesar de nesta situação incorrerem em perdas de energia com o aquecimento do excesso de ar (que por si só já representa perdas energéticas/económicas significativas). [3]

Para observar melhor a influência da razão de equivalência, ϕ , na temperatura adiabática de chama, T_{ad} , recorreu-se a um programa online disponibilizado pela Universidade do Colorado (endereço electrónico presente na referência bibliográfica [10]), que permite introduzir variáveis como a pressão, a temperatura inicial, a razão de equivalência, e o tipo de combustível, e obter assim, para cada simulação, valores da temperatura adiabática de chama. [10]

Nas variáveis introduz-se a pressão e temperatura padrão ($T=298,15K$ e $P=101,325kPa$), escolhe-se o tipo de combustível (metano, CH_4 , dado que é o principal constituinte do combustível utilizado pela SLM, o gás natural), e simula-se para diferentes valores de razão de equivalência (estimados por observação do artigo [9]). A tabela 6 apresenta os resultados.

Tabela 6: Temperatura adiabática de chama em função da razão de equivalência. [10]

ϕ	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
Tad (K)	1664	1837	1996	2134	2225	2210	2136	2057	1979

Construi um gráfico (figura 2) com os valores da tabela, onde é visível que a temperatura adiabática de chama atinge um máximo na condição estequiométrica, $\phi=1$. Estes valores de temperatura tendem a diminuir quando a razão de equivalência se afasta da estequiométrica, esta diminuição é menos acentuada para a situação de mistura rica, $\phi>1$, dado o facto que quando o sistema esta suboxigenado, o calor específico dos produtos diminui e a temperatura de chama aumenta. [9]

Uma mistura rica de ar/combustível, quando exposta ao calor, caso da parte quente da chama, sofre polimerização das moléculas de combustível não combustadas, ou uma fissuração térmica das mesmas, resultando daí a formação de fuligens (moléculas sólidas e

pesadas) não desejadas. Estas partículas de fuligem luminescem perante um aquecimento, elevando a capacidade de irradiação da chama. [6]

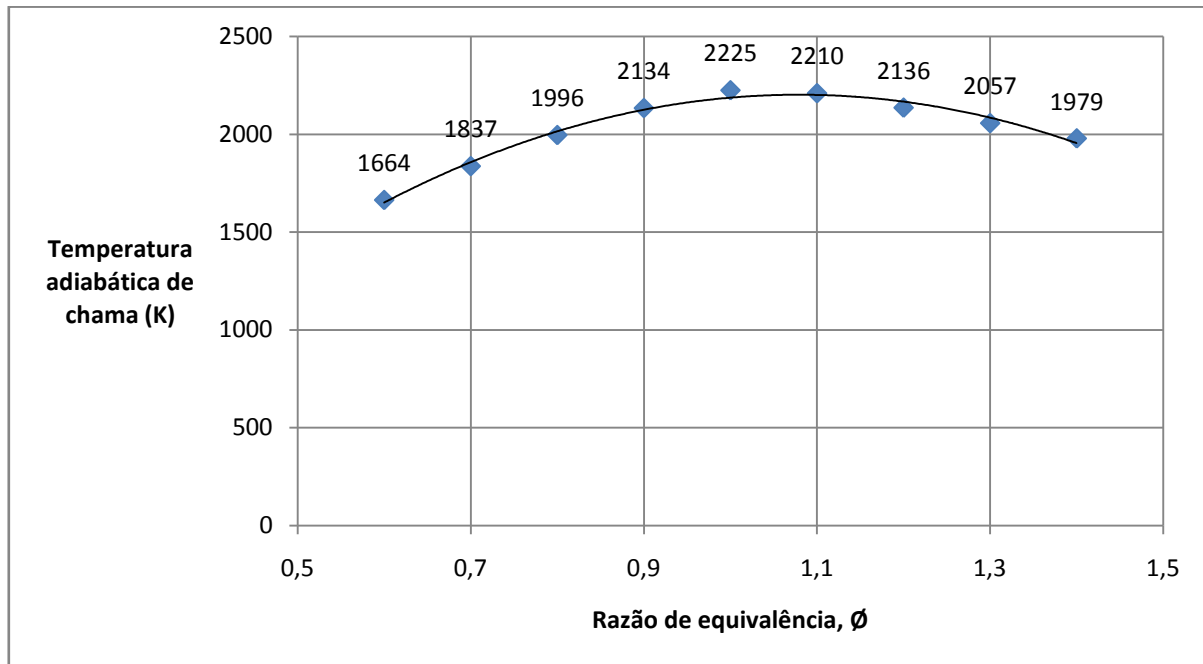


Figura 2: Temperatura adiabática de chama em função da razão de equivalência

Num forno de fusão, a produtividade depende fortemente da temperatura dos gases de combustão na atmosfera do forno. Desta forma, com o intuito de otimizar a sua eficiência, é necessário definir uma razão de equivalência e assegurar o uso da mesma. [9]

3.7 Chamas

Nos fenómenos de combustão distinguem-se dois tipos de chamas, as *chamas de pré-mistura* e *chamas de difusão*. Para além destas, podemos ter numa situação intermédia, *chamas de pré-mistura parcial*. Numa chama de pré-mistura, o combustível e o comburente são primeiramente misturados a nível molecular, e posteriormente dá-se a ignição da mistura. Numa chama de difusão, os reagentes estão inicialmente separados, a combustão dá-se na interface entre o combustível e o comburente, de maneira que a combustão e a mistura ocorrem em simultâneo. [3]

As chamas mais comuns em equipamentos de combustão, caso desta aplicação, são as **chamas de difusão**. Nestas chamas, a razão de equivalência varia desde zero, para comburente puro, até infinito, para combustível puro. Nas chamas de difusão, a frente da chama, região onde a mistura tem uma composição próxima da estequiométrica, não se propaga, daí estas chamas não serem caracterizadas por uma velocidade de chama. [3]

A velocidade de propagação da chama é influenciada pela temperatura dos reagentes, pela temperatura da chama, e pela pressão. As chamas de difusão não se propagam, nem em direcção ao comburente, devido à ausência de combustível, nem em direcção ao combustível, devido à ausência de comburente. Sendo as chamas de difusão controladas pelo processo de mistura, a taxa de reacção é determinada pela taxa de difusão e não pela cinética química. [3]

As chamas de difusão podem ser *laminares* ou *turbulentas*, mas nos equipamentos de combustão (fornos) *prevalecem os escoamentos turbulentos*. Dada a turbulência, as distribuições de velocidade, a temperatura e concentrações das espécies variam ao longo do tempo e estas flutuações podem ser muito significativas. A turbulência provoca um aumento da taxa de mistura, sendo a difusão turbulenta muito superior à difusão molecular, bem como um aumento acentuado da combustão. Desta forma, temos um aumento da taxa de libertação de energia química e a potência de um dado equipamento é muito superior à que se teria com um escoamento laminar. [3]

Uma chama é uma pequena região de rápidas reacções químicas exotérmicas. As chamas laminares apresentam uma velocidade de queima para o gás natural de 0,305 m/s, comparativamente a estas, as chamas turbulentas apresentam uma velocidade de queima duas a dez vezes superior. [6]

4. PRODUTOS DA COMBUSTÃO

Neste capítulo referente às emissões resultantes da combustão, pretendemos abordar uma temática não apresentada no anterior trabalho de Seminário. A variação das emissões resultantes da combustão dada pela alteração de factores de controlo da combustão. O controlo que se consegue obter nas emissões por manipulação dos factores de controlo é relevante dada a necessidade de cumprir com valores limite de emissão (VLE), impostos pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA).

4.1 Variação das emissões face aos factores de controlo da combustão

Existem vários factores de controlo que podem ter um impacto significativo nos produtos de combustão: a composição do comburente, a razão de equivalência, e a composição do combustível. [11]

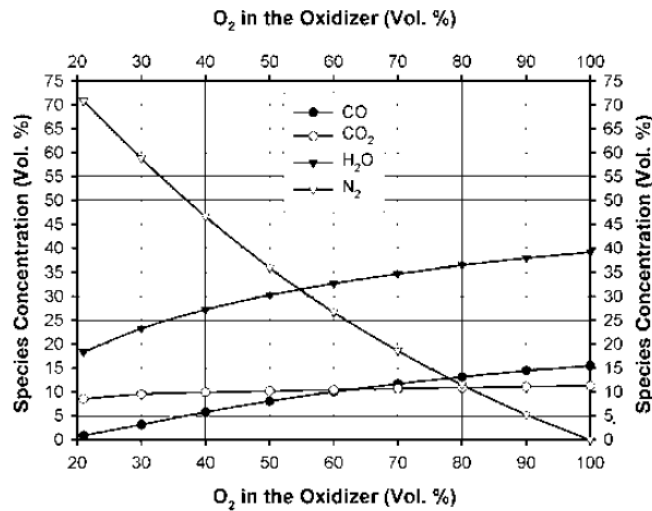


Figura 3: Concentração das espécies maioritárias em função da *composição do comburente* (O₂+N₂), para uma combustão adiabática estequiométrica de metano (CH₄). [11]

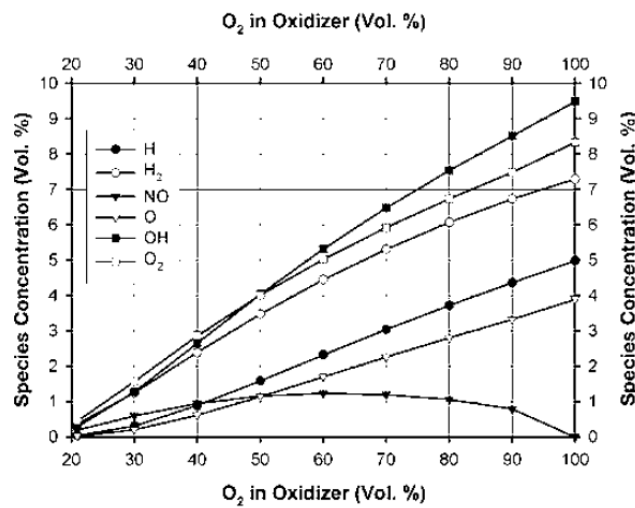


Figura 4: Concentração das espécies minoritárias em função da *composição do comburente* (O₂+N₂), para uma combustão adiabática estequiométrica de metano (CH₄). [11]

Na figura 3 são visíveis as espécies maioritárias (CO, CO₂, H₂O, N₂) na combustão adiabática em equilíbrio de metano, em função da composição do comburente. A figura 4 mostra as espécies minoritárias (H, H₂, NO, O, OH, O₂) previsíveis para as mesmas condições. É observável que as espécies vestigiais (ex: NO₂) foram excluídas da figura, as espécies radicais como H, O, e OH, aumentam com o teor de O₂ no comburente. NO aumenta inicialmente e depois diminui, após 60% O₂ no comburente, à medida que N₂ é retirado do sistema. Quando o comburente é unicamente constituído por O₂, não existe formação de NO pela inexistência de N₂. Combustível não combustado na forma de H₂, e comburente não consumido na forma de O₂, também aumentam com a concentração de O₂

no comburente. Combustível não combustado na forma de CO e H₂, e O₂, deve-se à dissociação química que ocorre a temperaturas elevadas. [11]

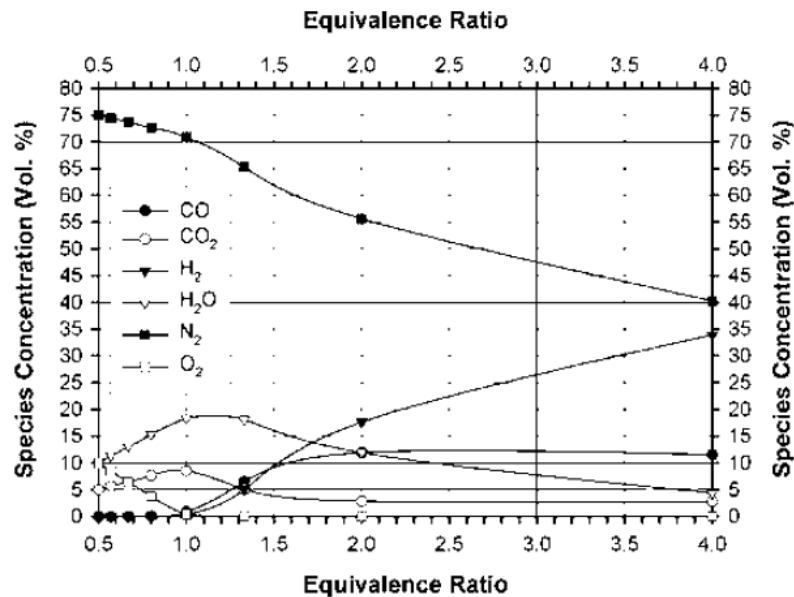


Figura 5: Composição do gás resultante da combustão, em função da *razão de equivalência* para a combustão de metano (CH₄) em ar. [11]

A figura 5 mostra a composição prevista para os gases resultantes de uma combustão adiabática de metano em ar, em função da razão de equivalência. As concentrações de O₂ e N₂ nos gases resultantes decrescem com a razão de equivalência, o O₂ deixa de existir nos gases quando Ø>1. As concentrações de H₂O e CO₂ têm um pico na condição estequiométrica (Ø=1). A concentração de espécies resultantes de combustível não combustado na forma de H₂ e CO, aumentam com a razão de equivalência. [11]

5. CÁLCULO DO CONSUMO TEÓRICO DE GÁS NATURAL

5.1 Considerações e cálculo

Pretende-se estimar o consumo teórico de gás natural para elevação da temperatura de uma tonelada de liga de Al da temperatura ambiente (298,15K) à temperatura de sobreaquecimento (988,15K), sem considerar perdas.

O ar (comburente) de que se dispõe é o ar atmosférico, considerando-o assim para o nosso balanço, com uma composição de 21% em oxigénio e 79% em azoto. O valor de humidade relativa média na região onde a SLM labora é de 75%, recorrendo ao gráfico presente no anexo 3, referente a uma pressão atmosférica (101,325 KPa), obtém-se para uma temperatura ambiente, de 25°C (temperatura de insuflação de comburente

considerada), e para a humidade relativa de 75%, um valor de humidade de 15,5g H₂O / Kg ar seco.

A temperatura considerada para o comburente e combustível é a temperatura ambiente (298,15K). O ar entrará eventualmente a uma temperatura superior dada pela proximidade com o forno, antes da insuflação do mesmo, mas os calores sensíveis daí resultantes são mínimos comparativamente aos restantes calores contabilizados no balanço energético, e essa temperatura seria difícil de estimar.

O gás utilizado pela SLM apresenta a composição presente na tabela 4. A base de cálculo considerada foi de 1m³ deste combustível.

Os calores inerentes das reacções de combustão deste combustível, estão presentes na tabela 7, que por sua vez foram calculados a partir dos valores presentes na tabela 20, no anexo 1.

Tabela 7: Reacções de oxidação e respectivos calores padrão de reacção.

Reacções de combustão	Calor de reacção padrão * ΔH_{298}° (cal/mole)	Reacções de combustão	Calor de reacção padrão * ΔH_{298}° (cal/mole)
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	$-248,570 \times 10^3$	$\text{C}_4\text{H}_{10} + \frac{9}{2}\text{O}_2 \leftrightarrow 4\text{CO} + 5\text{H}_2\text{O}$	$-417,185 \times 10^3$
$\text{CH}_4 + \frac{3}{2}\text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$	$-180,94 \times 10^3$	$\text{C}_5\text{H}_{12} + 8\text{O}_2 \leftrightarrow 5\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	$-845,050 \times 10^3$
$\text{C}_2\text{H}_6 + \frac{7}{2}\text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	$-373,015 \times 10^3$	$\text{C}_5\text{H}_{12} + \frac{11}{2}\text{O}_2 \leftrightarrow 5\text{CO} + 6\text{H}_2\text{O}$	$-506,900 \times 10^3$
$\text{C}_2\text{H}_6 + \frac{5}{2}\text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{CO} + 3\text{H}_2\text{O}$	$-237,755 \times 10^3$	$\text{C}_6^+ + 6\text{O}_2 \leftrightarrow 6\text{CO}_2$	$-564,300 \times 10^3$
$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \leftrightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	$-530,390 \times 10^3$	$\text{C}_6^+ + 3\text{O}_2 \leftrightarrow 6\text{CO}$	$-158,520 \times 10^3$
$\text{C}_3\text{H}_8 + \frac{7}{2}\text{O}_2 \leftrightarrow 3\text{CO} + 4\text{H}_2\text{O}$	$-327,500 \times 10^3$	$\text{N}_2 + 2\text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{NO}_2$	$15,820 \times 10^3$
$\text{C}_4\text{H}_{10} + \frac{13}{2}\text{O}_2 \leftrightarrow 4\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$	$-687,705 \times 10^3$	$\text{N}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{NO}$	$43,160 \times 10^3$

* Considerou-se a água, presente nos produtos de combustão, no estado líquido, de forma a atender a um poder calorífico superior.

BALANÇO DE MATERIAIS

Tabela 8: Balanço de materiais.

Entradas (mol)				Saídas (mol)			
Combustível				CO₂	47,53	NO	0,14
CH ₄	35,61	C ₅ H ₁₂	0,14	CO	0,03	NO₂	0,09
C ₂ H ₆	3,10	C ₆ ⁺	0,01	H₂O	98,34	N₂	343,43
C ₃ H ₈	1,15	N ₂	0,43				
C ₄ H ₁₀	0,33	CO ₂	0,27				
Comburente							
O ₂	91,21	N ₂	343,12				
H ₂ O	10,78						

As entradas de O₂ foram calculadas atendendo às reacções de combustão presentes na tabela 7, e às respectivas quantidades de reagentes, atendendo também ao rácio de CO₂/CO, e NO/NO₂ dos produtos de combustão. Dada a atmosfera considerada (79% N₂ e 21% O₂), o valor de N₂ que entra pelo comburente é extrapolado a partir do valor de O₂. O valor de H₂O é calculado, por uma extrapolação de valores, sabendo que se tem um valor de humidade de 15,5g H₂O / Kg ar seco.

Na determinação dos produtos de saída, consideram-se as quantidades de reagente que reagem, e a forma como reagem. Dado que cada reagente pode originar diferentes produtos, caso da formação de CO₂ e CO, e da formação de NO e NO₂ (reacção de oxidação do N₂, considerando as principais emissões NO_x, 50% NO e 50% NO₂), foi necessário estabelecer rácios molares, para assim considerar neste cálculo, qual a quantidade de cada reagente é que reage, e de que forma.

Para quantificação dos produtos de saída, recorreu-se à referência bibliográfica [12], para assim estabelecer o rácio CO₂/CO nos produtos de combustão, assim como o N₂ que reage dando origem à formação de NO e NO₂, atendendo à base de cálculo de 1m³ de combustível. Os valores retirados desta referência bibliográfica eram factores de emissão, de diferentes constituintes dos produtos, em unidades de massa por GJ de energia, referentes a emissões de combustão de gás natural em fornos de soleira inclinada. Procedeu-se ao cálculo das emissões, em massa, para a base de cálculo de 1m³ de combustível, que dado o poder calorífico do gás natural, representa $43,95 \times 10^{-3}$ GJ, transformando-se estes valores de massa em valores molares, permite-se obter o rácio destas emissões.

Após quantificação das emissões de CO, NO e NO₂, que são necessárias para quantificação do calor que se perde pelos fumos, verifica-se que estes valores são mínimos e pouco influenciáveis no valor do calor sensível dos gases perdidos pela chaminé.

BALANÇO ENERGÉTICO

Tabela 9: Calores contabilizados no balanço energético.

Entradas	Saídas
Q_1 - Calor de combustão	Q_4 - Calor sensível dos produtos finais
	Q_2 - Calor sensível do comburente
	Q_3 - Calor sensível do combustível

$Q_2 = Q_3 = 0$, pois a temperatura de insuflação do comburente e combustível considerada é de 25°C.

$Q_1 = Q_4$, obtendo-se o calor sensível dos produtos finais que permite calcular a massa de liga que podemos fundir e sobreaquecer.

O cálculo do calor de combustão (Q_1), é efectuado atendendo às quantidades de reagentes, tabela 8, e aos calores de reacção padrão, tabela 7. Atendeu-se ao rácio de CO₂/CO e NO/NO₂, dada a diferença dos valores de reacção padrão entre as reacções, tabela 7.

$$Q_1 = 10\,958 \text{ Kcal} \tag{Eq.7}$$

Para obter este mesmo valor, mas utilizando o poder calorífico superior do gás natural, acima referido, de 43,95 MJ/m³, considera-se a mesma base de cálculo de 1 m³ de combustível. Temos um valor muito próximo do acima calculado:

$$10\,504 \text{ Kcal}$$

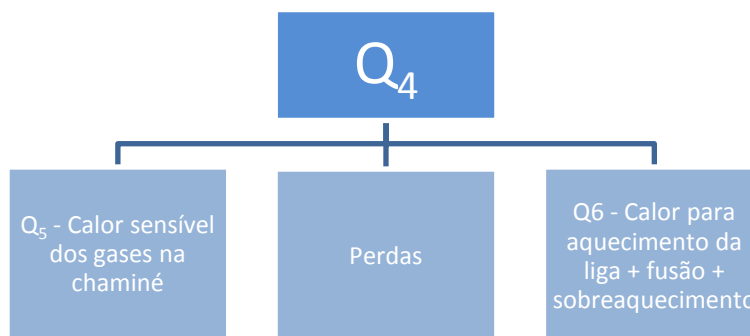


Figura 6: Distribuição do calor dispendido por Q_4

O calor sensível dos produtos finais (Q_4), é o calor que vai ser dispendido para aquecimento da liga, fusão da liga e sobreaquecimento da mesma até à temperatura de 988,15K, Q_6 , nas perdas ocorridas durante este período de produção (apresentam valor constante, mas dada a dificuldade em estimar este valor, estas não serão consideradas), e no calor sensível dos gases na chaminé, Q_5 .

Consideramos que os gases saem pela chaminé a uma temperatura igual à de sobreaquecimento da liga, 988,15K. Vamos também considerar que estamos a analisar um intervalo da produção contínua, em que o consumo energético específico é constante, não sendo o Q_4 dispendido para aquecimento inicial do forno.

Q_5 - CALOR SENSÍVEL DOS GASES NA CHAMINÉ

A partir dos dados presentes na tabela 21 do anexo 2, dos valores de calor específico dos produtos, e das quantidades dos produtos de saída, tabela 8, procedemos ao cálculo do calor sensível dos gases na chaminé. De referenciar, que o CO_2 do combustível vai estar associado ao CO_2 resultante da combustão, para este cálculo do calor sensível dos gases na chaminé.

A temperatura considerada, à qual os gases saem pela chaminé e deixam de transferir calor para a carga, é de 988,15K (temperatura de sobreaquecimento da liga).

$$Q_5 = n_{CO_2} \int_{298,15}^{988,15} C_{p, CO_2} dT + n_{CO} \int_{298,15}^{988,15} C_{p, CO} dT + n_{N_2} \int_{298,15}^{988,15} C_{p, N_2} dT + \\ + n_{H_2O} \int_{298,15}^{988,15} C_{p, H_2O} dT + n_{NO} \int_{298,15}^{988,15} C_{p, NO} dT + n_{NO_2} \int_{298,15}^{988,15} C_{p, NO_2} dT$$

$$Q_5 = 2\,704 \text{ Kcal.}$$

(Eq.8)

Q_6 - CALOR PARA AQUECIMENTO + FUSÃO + SOBREAQUECIMENTO DA LIGA

As necessidades de calor para elevar uma massa (m) da liga de maior consumo da SLM, AlSi12Cu1Fe, da temperatura ambiente, 298,15K, à temperatura de sobreaquecimento da liga, 988,15K, são dadas em função dessa massa (m).

A temperatura de fusão desta liga é de 851K, o calor latente de fusão é de 400 000 J/kg, e o calor específico do estado físico sólido e líquido é, respectivamente, de 1100 J/kg.K e 1250 J/kg.K.

$$Q_6 = (282 \times m) \text{ Kcal}$$

(Eq.9)

CÁLCULO DA MASSA DE LIGA FUNDIDA PARA O Q_4 DISPONÍVEL

Estabelecendo a equivalência que o diagrama 1 suscita, que me permite obter um valor de massa (m) para o valor de Q_4 obtido pela minha base de cálculo, temos:

$$Q_4 = Q_1 = 10\,958 \text{ Kcal}$$

$$Q_4 = Q_5 + Q_6 + C,$$

Não vamos considerar as perdas, C , pela dificuldade em estimá-las.

$$10\,958 = 2\,704 + 282 \times m$$

$$m = 29,3 \text{ Kg}$$

(EP.10)

CONSUMO ESPECÍFICO TEÓRICO

A massa de liga que podemos elevar à temperatura de sobreaquecimento (988,15K), com 1m^3 de combustível, é de 29,3 Kg. Extrapolando este valor, o consumo teórico de combustível para uma tonelada de liga, 1000Kg, é de:

$$GN(m^3) = 34,1 \text{ m}^3$$

(Eq.11)

6. OPTIMIZAÇÃO DOS CONSUMOS ENERGÉTICOS DO FORNO DE FUSÃO 7 DA SLM

O estudo dos consumos energéticos incidiu sobre o forno 7 da SLM, sendo um forno mais recente e de maior capacidade, que apresenta também valores de emissões ambientais superiores, oferecendo assim, um maior potencial de optimização dos consumos energéticos do mesmo.

A escolha deste forno também se deve ao facto de que os factores de controlo de funcionamento do forno 7, as pressões de ar e gás praticadas foram seleccionados por mera observação da chama aquando da instalação deste forno, e desta forma, o tipo de queima praticada não está qualificada. Pretende-se caracterizar o tipo de queima praticada, compará-la com as recomendações do manual deste mesmo forno e com a teoria de combustão apresentada, actuar no sentido de optimizar os consumos energéticos e emissões ambientais inerentes da combustão praticada.

6.1 Registo dos actuais consumos energéticos (monitorização 1)

A monitorização inicial (1) incidiu sobre os consumos energéticos do forno 7 da SLM, por um período de meio turno (4 horas), durante 5 dias. Em cada período de monitorização, efectuaram-se oito registos de consumo energético e carga carregada no forno de forma a estabelecer um perfil do consumo energético ao longo desse período de monitorização. Durante esse período, as cargas carregadas no forno quantificaram-se de acordo com as necessidades de produção. Aquando do primeiro e último registo, a rampa

de fusão do forno apresentava uma quantidade não quantificável de alumínio, porém reduzida.

No anexo 4 apresentam-se os valores registados respeitantes aos cinco dias de produção sobre os quais incidiram a monitorização 1. Abaixo são apresentados os gráficos que caracterizam a produção, massa de liga fundida e consumos energéticos, durante o período de monitorização em cada um desses dias.

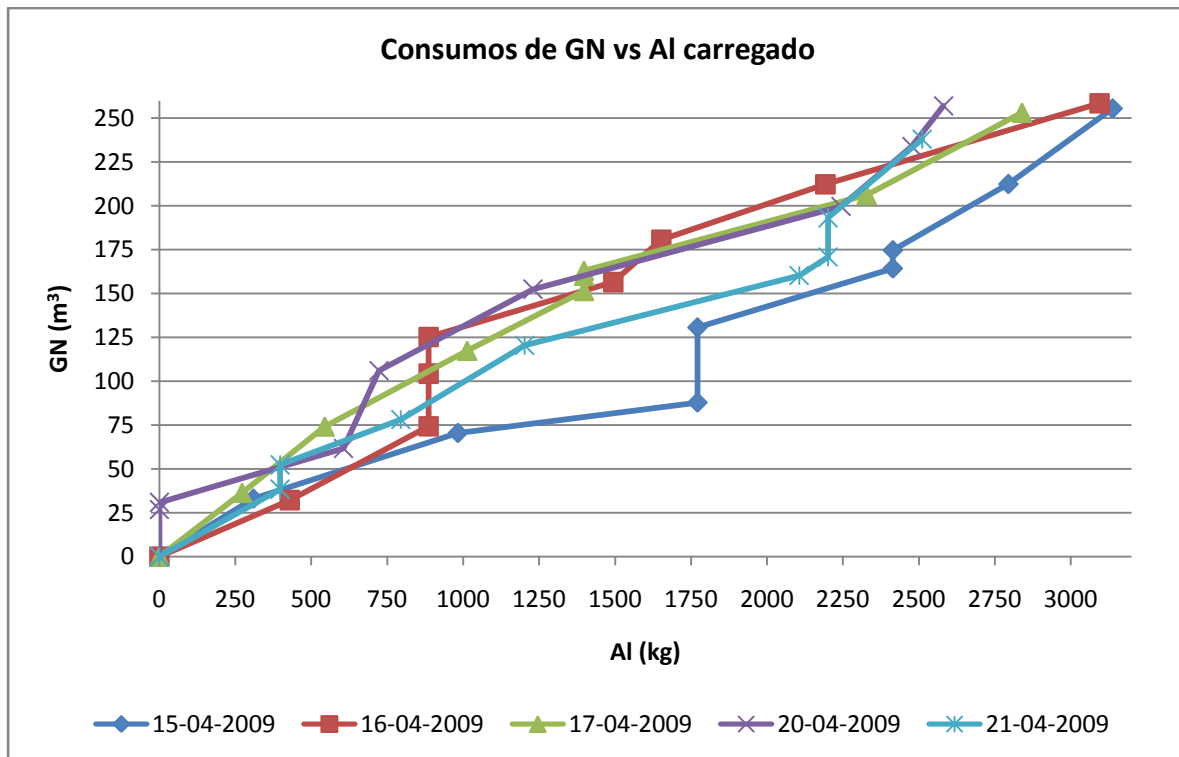


Figura 7: Consumos de Gás Natural por massa de Al carregado. Valores acumulados de 30 em 30 minutos, respeitantes a todos os 5 dias de monitorização, durante um período de monitorização de 4 horas.

A figura 7 apresenta a produção de liga e respectivos consumos, para cada um dos 5 dias que compreendem a monitorização 1. Os valores presentes de consumo energético e alumínio carregado são valores acumulados e registados de 30 em 30 minutos, por um período de 4 horas.

É notável que nos dias 15 e 16 as massas carregadas apresentam-se muito próximas, analogamente às carregadas nos dias 20 e 21. Os consumos de gás natural registados, para fundir e sobreaquecer iguais quantidades de liga, são notavelmente inferiores para o dia 15, apresentando-se este dia como aquele em que se registou um menor consumo específico.

Os gráficos abaixo apresentam consumos energéticos e de liga em intervalos de 30 minutos, durante as 4 horas de monitorização. Estes gráficos perfilam o consumo energético e a produção de liga durante o período que compreende a monitorização.

De acordo com o modo de funcionamento do forno, que controla o carregamento de liga no forno, existem intervalos em que não há consumo de liga, mas no qual se verifica um consumo de gás natural. Esse consumo de gás natural pode ser proveniente de um accionamento do queimador de manutenção, ou mesmo dos queimadores de fusão para fusão de liga carregada no intervalo anterior.

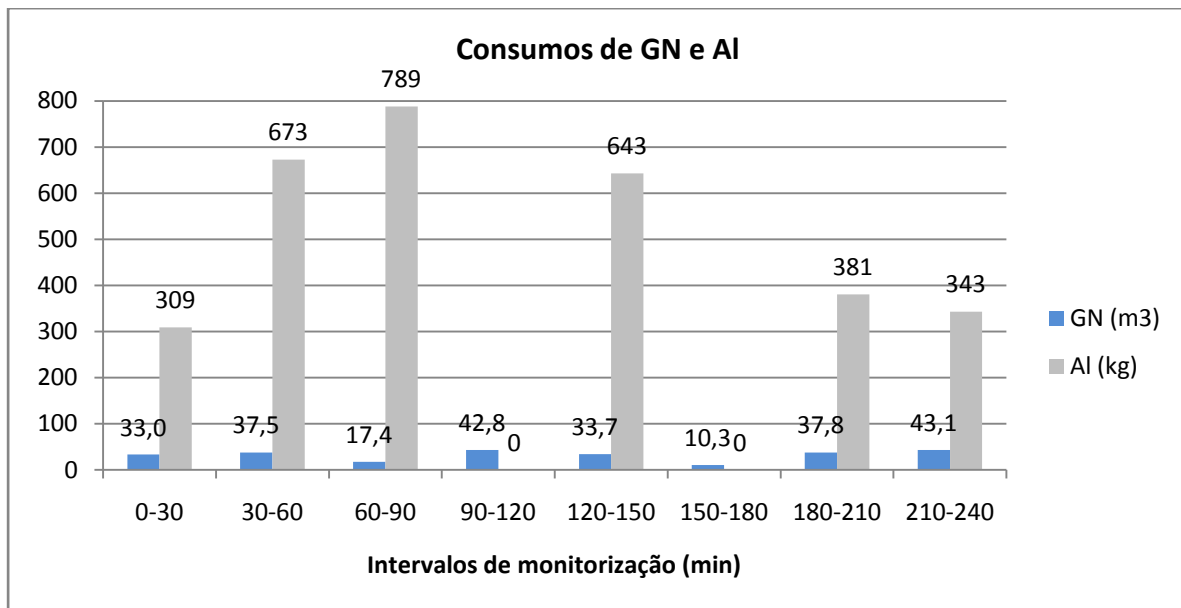


Figura 8: Produção de liga a 15/04/2009, consumos de gás natural e alumínio carregado em intervalos de 30 minutos, por um período de 4 horas.

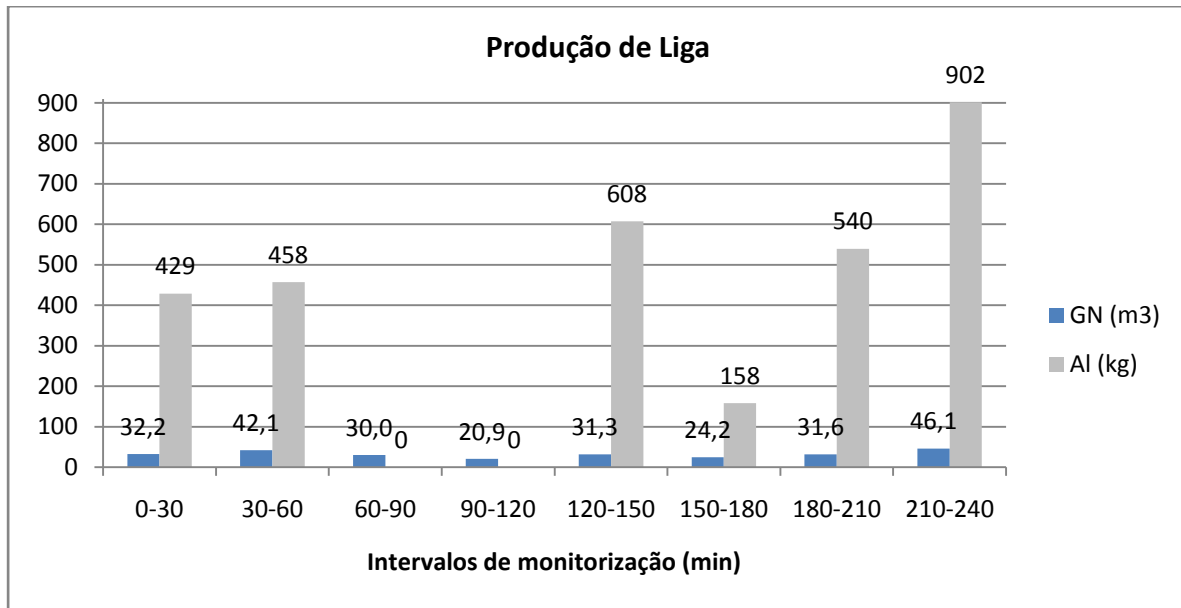


Figura 9: Produção de Liga a 16/04/2009, consumos de gás natural e alumínio carregado em intervalos de 30 minutos, por um período de 4 horas.

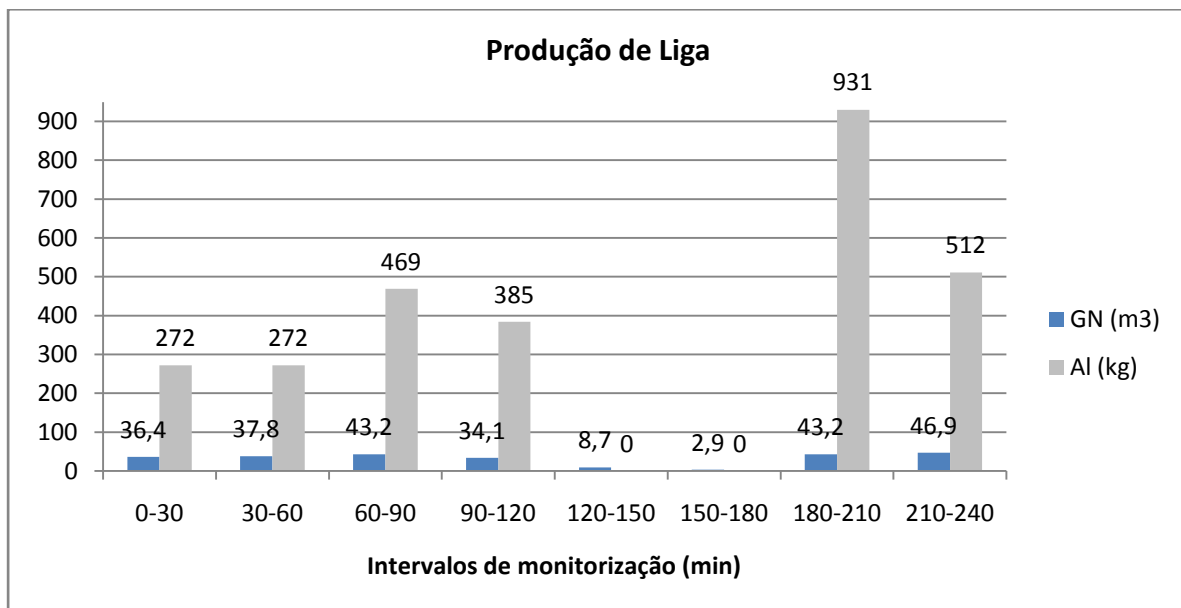


Figura 10: Produção de Liga a 17/04/2009, consumos de gás natural e alumínio carregado em intervalos de 30 minutos, por um período de 4 horas.

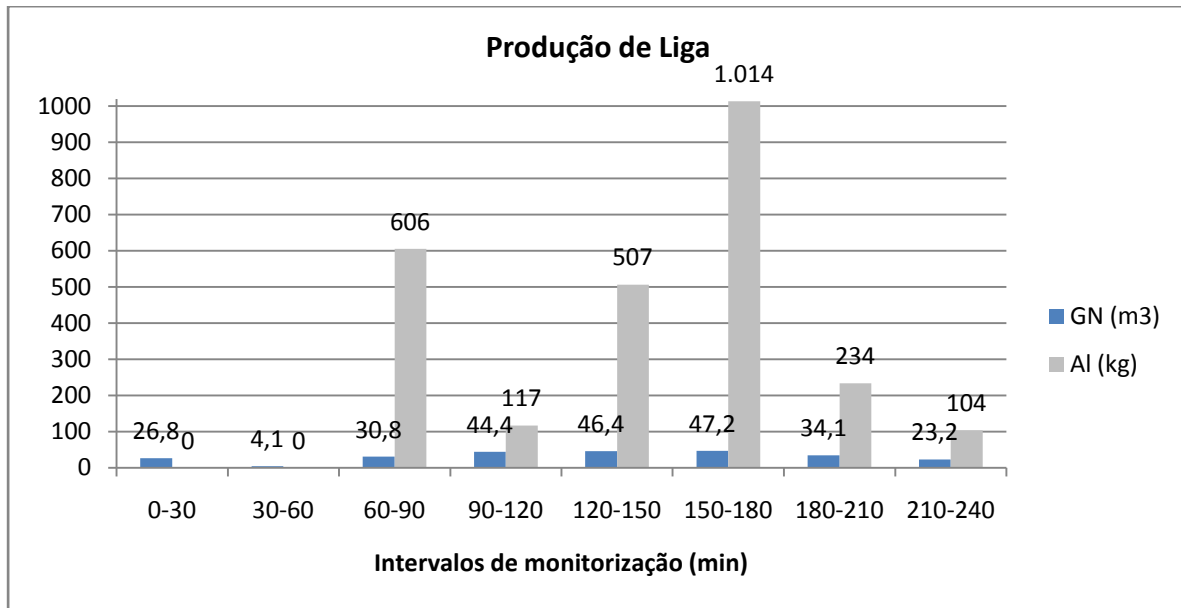


Figura 11: Produção de Liga a 20/04/2009, consumos de gás natural e alumínio carregado em intervalos de 30 minutos, por um período de 4 horas.

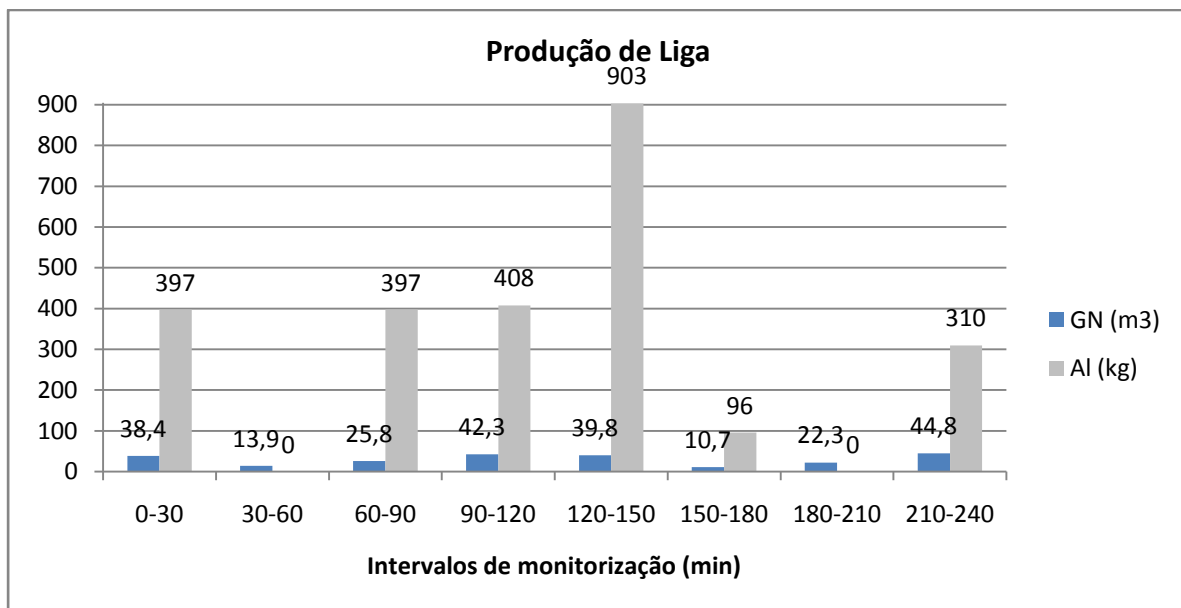


Figura 12: Produção de Liga a 21/04/2009, consumos de gás natural e alumínio carregado em intervalos de 30 minutos, por um período de 4 horas.

6.2 Considerações dos resultados da monitorização 1

Pretende-se agora estabelecer uma relação entre os consumos energéticos destes 5 dias, de forma a quantificarmos, da forma mais aproximada, um consumo específico para as actuais parametrizações de operação do forno 7.

Tabela 10: Produção de Liga e consumos dos 5 dias da monitorização 1 (M1).

	15-04-2009	16-04-2009	17-04-2009	20-04-2009	21-04-2009
Massa de Retornos fundida (kg)	1422	1260	1208	1389	922
Massa de Lingotes fundida (kg)	1716	1835	1632	1192	1589
Massa total fundida (kg)	3138	3095	2840	2581	2511
Consumo total de GN (m ³)	255,6	258,4	253,2	257,0	238,0
Consumo específico diário (m ³ /ton) – X	81,5	83,5	89,2	99,6	94,8
Consumo específico médio de M1 (m ³ /ton) – Y	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7
$\left \frac{X - Y}{Y} \right \times 100$ (%)	9,1	6,9	0,6	11,0	5,7

O valor médio do consumo específico ao longo destes 5 dias, sobre os quais incidiram a monitorização 1, é de 89,7 m³/ton.

Por observação da tabela acima, verificamos um consumo de gás natural constante ao longo dos 5 dias. As massas fundidas variam, e desta forma, originam consumos específicos diferentes.

A variação das massas fundidas dá-se pelo facto de estarmos dependentes da intensidade de produção. Avarias em máquinas de injeção, mudanças de moldes durante o período de monitorização, são factores que se reflectem nas necessidades de metal fundido.

O modo de trabalhar do operador também se reflecte nas massas fundidas, pelo facto de manter ou não a câmara de manutenção cheia, que como indica o manual, diminui os consumos energéticos do forno.

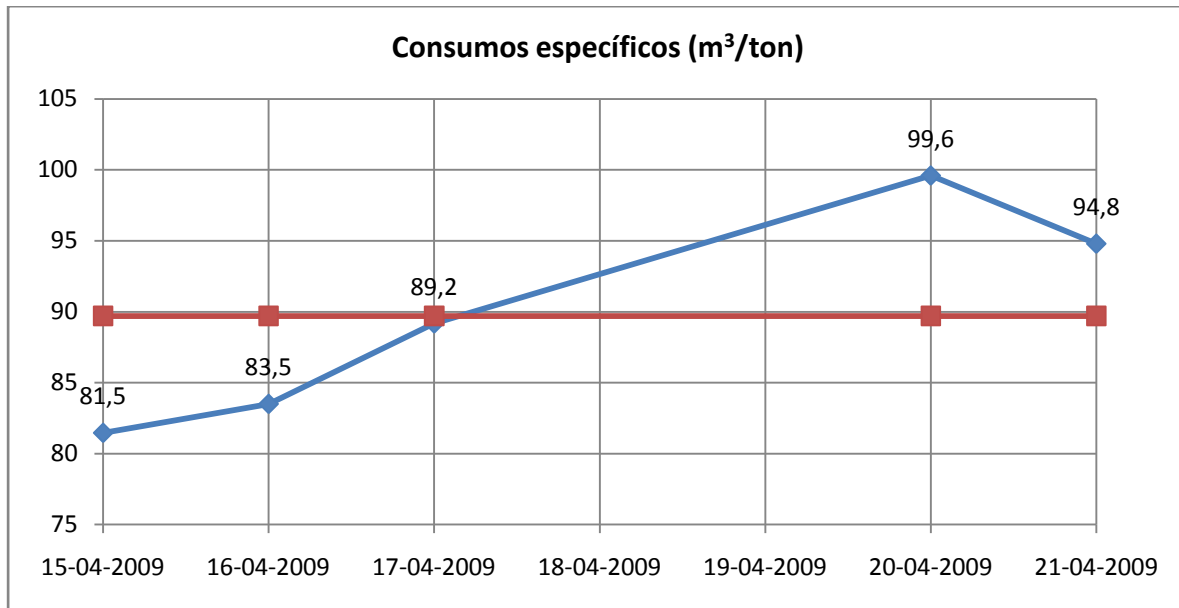


Figura 13: Consumos específicos ao longo dos 5 dias da monitorização 1, e consumo específico médio.

A figura 13 agrega os consumos específicos diários com o consumo específico médio, de 89,7 m³/ton, desses 5 dias de controlo.

A monitorização 1, apresentou no dia 15/04/2009 uma produção constituída por 45% de retornos e 55% de lingotes, a 16/04/2009 uma produção constituída por 41% de retornos e 59% de lingotes, a 17/04/2009 uma produção constituída por 43% de retornos e 57% de lingotes, a 20/04/2009 uma produção constituída por 54% de retornos e 46% de lingotes, e a 21/04/2009 uma produção constituída por 37% de retornos e 63% de lingotes. Não é observável uma variação do consumo específico com relação ao tipo de carga utilizada na produção para cada um dos dias.

A monitorização realizada foi efectuada em regime de produção, no qual existem parâmetros de produção que não podem ser controlados, apenas considerados. A falta de controlo sobre estes parâmetros de produção origina a inconsistência dos valores de consumo obtidos, em que temos uma variação máxima de consumos obtidos, relativamente ao consumo específico médio da monitorização em causa, de aproximadamente 11%.

Os parâmetros de produção, acima referidos, são considerados nos resultados da optimização, uma vez que os mesmos são análogos para as duas monitorizações compreendidas neste trabalho.

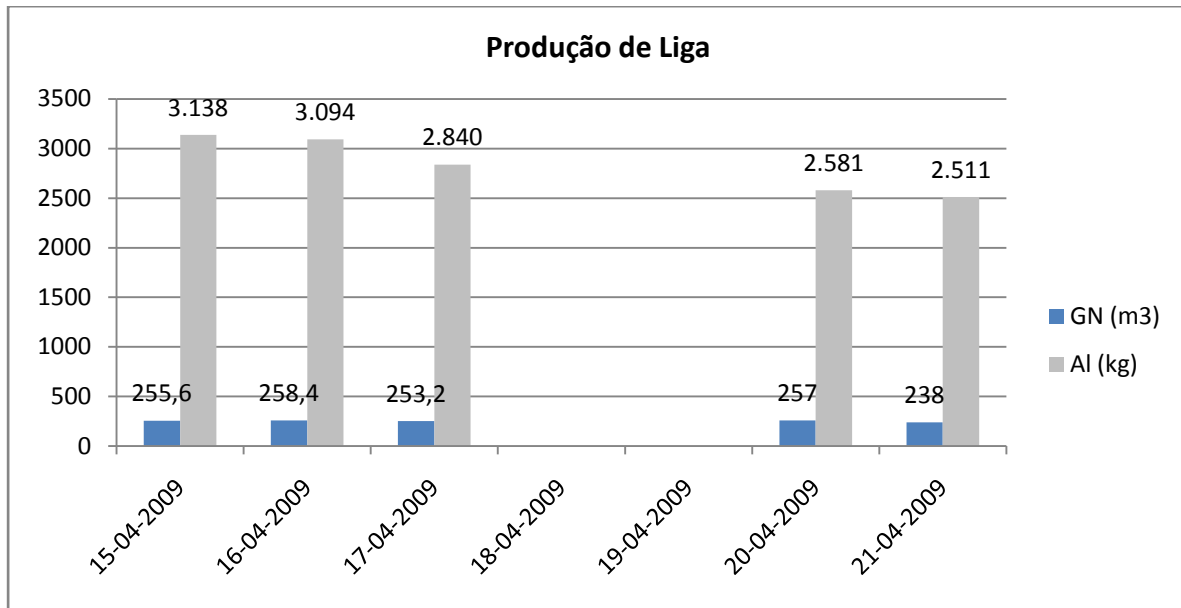


Figura 14: Produção de Liga e consumos de Gás Natural ao longo dos 5 dias da monitorização 1.

6.3 Caracterização da combustão praticada

Procedendo-se a uma caracterização da combustão que na realidade se estava a praticar no forno 7, fez-se um levantamento dos valores de pressão de ar e de gás com que cada um dos queimadores operava. Com recurso a gráficos associados a cada um dos queimadores, relacionámos estes valores de pressão com débitos e posteriormente com o valor do factor de excesso de ar (λ) que caracteriza a combustão.

Tabela 11: Valores de pressão de Ar e Gás Natural com que o forno operou durante a monitorização 1.

Valores de pressão do forno 7 (mbar)

	Valores registados na monitorização		Valores da ficha de afinação da SLM	
	Ar	Gás	Ar	Gás
Queimador de fusão 1	10,5	10,8	12 ± 2	11,3 ± 2
Queimador de fusão 2	12,5	12,8	12 ± 2	11,3 ± 2
Queimador de manutenção	2,5	3,8/4,7	3,5 ± 1	3 ± 1

Os valores de pressão de gás natural e de ar com os quais o forno 7 operou durante a monitorização 1, estão de acordo com os mencionados na ficha de afinação dos queimadores dos fornos de fusão 6 e 7 da SLM, presentes no anexo 5. De referir, que os

valores da ficha de afinação dos queimadores, foram definidos por mera análise visual, aquando da instalação do forno 7, pelo técnico de instalação da StrikoWestofen.

O queimador de manutenção apresenta valores de pressão de gás a montante e a jusante da borboleta de afinação, sendo considerado o valor a jusante.

Por observação gráfica, de gráficos associados aos queimadores com os quais o forno 7 está equipado, mencionados na tabela 2, é possível caracterizar a combustão que realmente se pratica.

CARACTERIZAÇÃO DA COMBUSTÃO PRATICADA PELO QUEIMADOR DE MANUTENÇÃO

Caracterizando a combustão que se dá no queimador de manutenção (BIO 140RB), relacionamos primeiramente os valores de pressão de ar e gás, com os quais este queimador opera, com os respectivos débitos de operação.

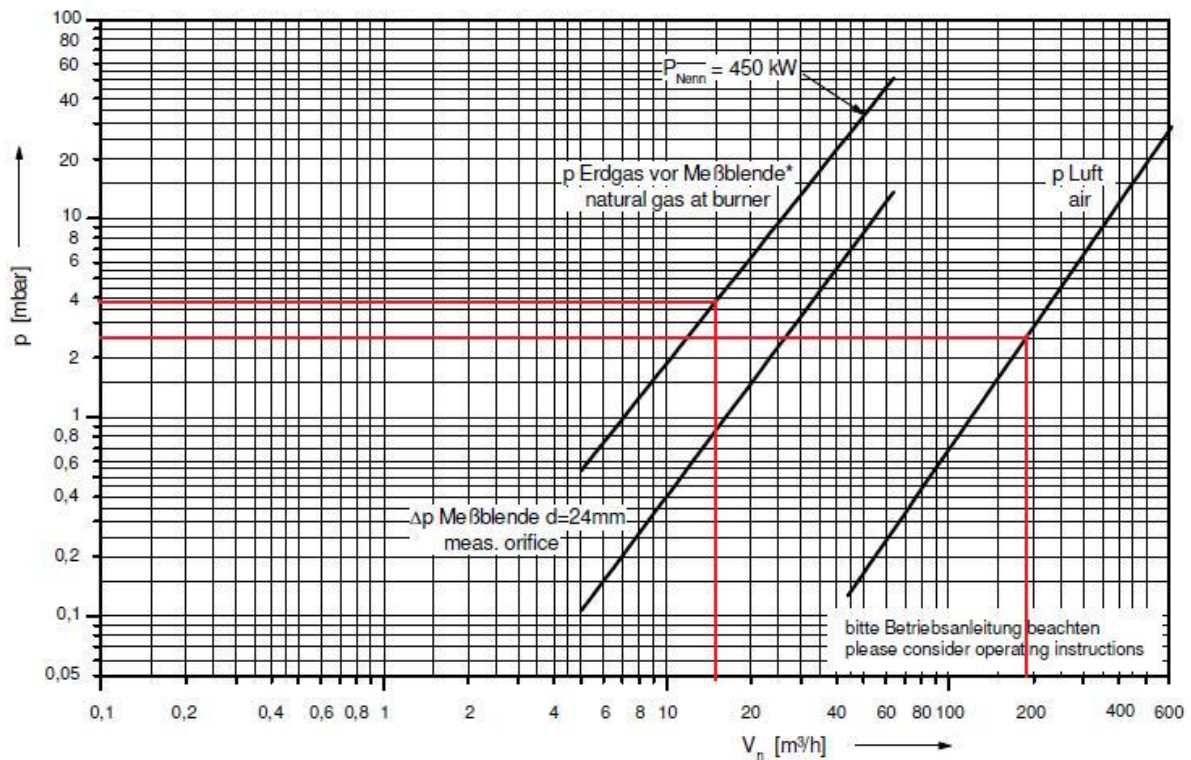


Figura 15: Relação entre a pressão (mbar) e o débito (m^3/h), para o queimador de manutenção BIO 140RB. (Gráfico disponibilizado pela Kromschroder)

Recorrendo à figura 15 obtém-se os respectivos débitos de operação do queimador de manutenção. Um débito de ar de $188,5 \text{ m}^3/\text{h}$ e um débito de gás de $15,0 \text{ m}^3/\text{h}$.

Posteriormente recorreremos à figura 16, que relaciona os débitos de ar e gás com o coeficiente de excesso de ar.

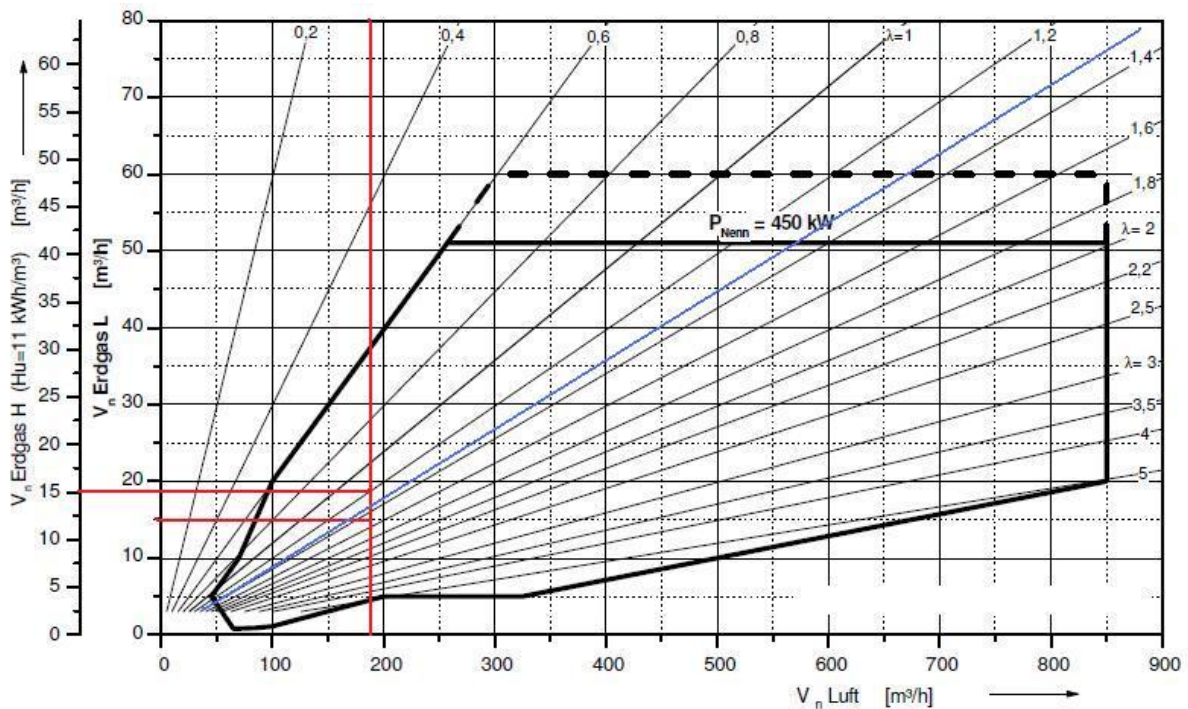


Figura 16: Relação dos débitos de ar e de gás (m^3/h) com o coeficiente de excesso de ar (λ), para o queimador de manutenção BIO 140RB. (Gráfico disponibilizado pela Kromschroder)

O gráfico presente na figura 16 apresenta duas escalas para representação do débito de gás natural, diferenciadas pela designação H (High) e L (Low), que remetem para um poder calorífico superior e inferior, respectivamente. Uma vez que é desconhecida a escala a considerar na representação gráfica, optou-se por um valor médio entre as duas escalas, de forma a caracterizar a combustão, minimizando o erro associado.

Após a análise gráfica, verificamos um coeficiente de excesso de ar (λ) de 1,33. O que significa que a combustão praticada pelo queimador de manutenção apresenta um excesso de ar de 33%.

Apesar de um excesso de ar ser uma situação preferível na indústria, este queimador equipa a câmara de manutenção do forno, em que um excesso de ar desta grandeza não é desejado por incorrer na formação de uma atmosfera oxidante na câmara de manutenção, e desta forma numa oxidação do banho metálico substancialmente maior. A sobre oxigenação da mistura química deve ser minimizada, mesmo assim, esta deve ser assegurada por questões de segurança, uma vez que numa situação de défice de ar temos presente uma maior concentração de monóxido de carbono (CO), aumentando o risco de explosão.

CARACTERIZAÇÃO DA COMBUSTÃO PRATICADA PELOS QUEIMADORES DE FUSÃO

Caracterizando agora a combustão praticada nos queimadores de fusão (ZIO 165RB), procedemos à mesma análise gráfica, mas com gráficos associados a este tipo de queimadores de fusão. Primeiramente relacionamos os valores de pressão de ar e gás, com que cada um dos queimadores de fusão operava, com os respectivos valores de débito.

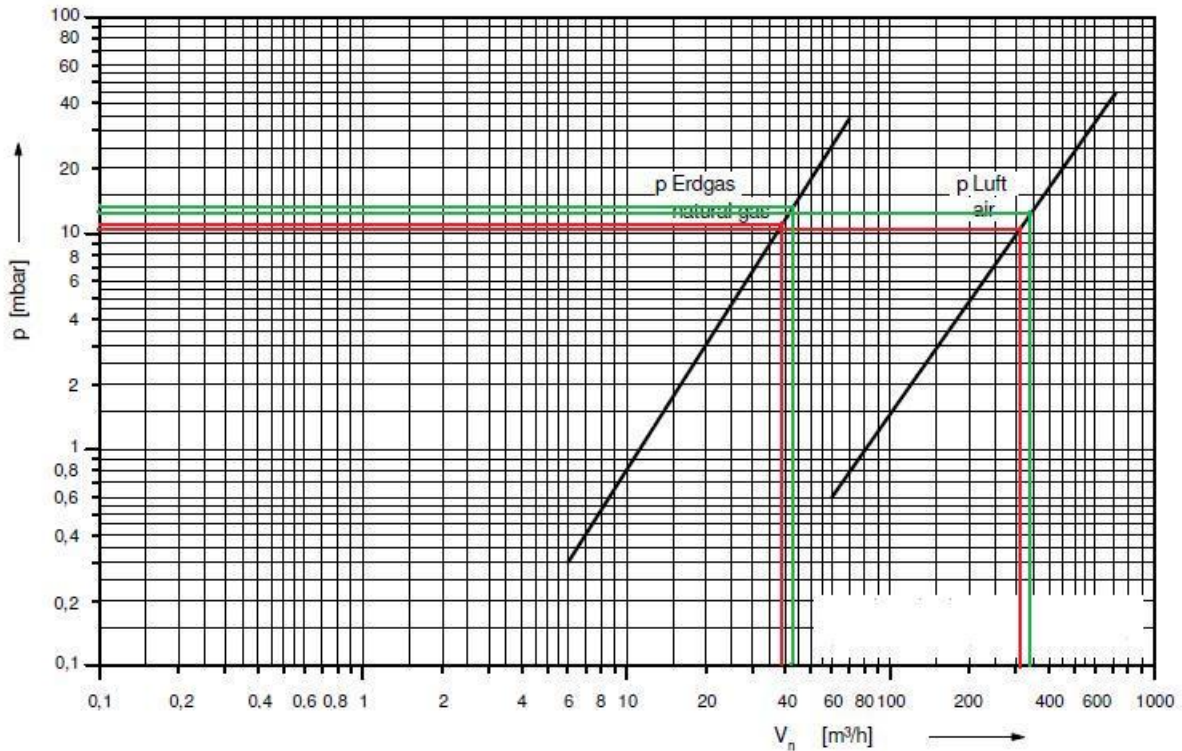


Figura 17: Relação entre a pressão (mbar) e o débito (m^3/h), para os queimadores de fusão ZIO 165RB. (Gráfico disponibilizado pela Kromschroder)

Por análise gráfica da figura 17, o queimador de fusão 1, representado no gráfico com a cor vermelha, apresenta um débito de ar de $314,3 \text{ m}^3/\text{h}$ e um débito de gás de $39,2 \text{ m}^3/\text{h}$. O queimador de fusão 2, representado no gráfico com a cor verde, apresenta um débito de ar de $335,7 \text{ m}^3/\text{h}$ e um débito de gás de $42,0 \text{ m}^3/\text{h}$.

Recorrendo agora à figura 18, que relaciona os débitos de ar e gás com o coeficiente de ar em excesso, caracterizamos a combustão.

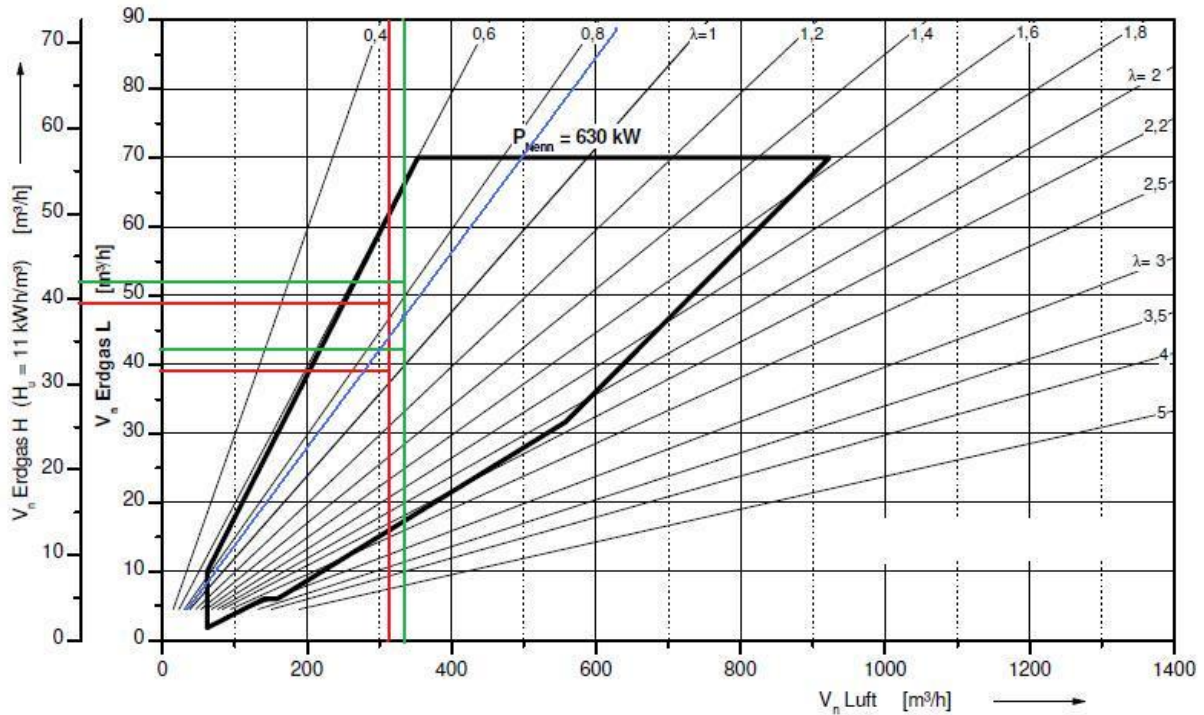


Figura 18: Relação dos débitos de ar e de gás (m^3/h) com o coeficiente de excesso de ar (λ), para o queimador de manutenção ZIO 165RB. (Gráfico disponibilizado pela Kromschroder)

O gráfico da figura 18 apresenta também duas escalas para representação do débito de gás natural, diferenciadas pela designação H (High) e L (Low), que remetem para um poder calorífico superior e inferior, respectivamente. À semelhança da situação anterior, e uma vez que é desconhecida a escala a considerar na representação gráfica, optou-se por um valor médio entre as duas escalas, de forma a caracterizar a combustão, minimizando o erro associado.

Verifica-se também que apesar dos valores de pressão e respectivos débitos de ar e de gás dos queimadores de fusão diferirem, independentemente do uso da escala de GN H ou GN L no gráfico, estes apresentam o mesmo coeficiente de excesso de ar. Praticam portanto, ambos os queimadores de fusão, uma combustão similar.

O coeficiente de excesso de ar (λ) obtido para o queimador de fusão 1 e 2 é o mesmo, sendo de 0,85. O que significa que estamos perante um défice de ar de 15%, ou seja, situação de uma mistura rica, incorrendo assim numa combustão incompleta do combustível insuflado e em perdas económicas inerentes deste desaproveitamento de combustível.

Esta situação de défice de ar não é desejável, principalmente na câmara de fusão do forno, onde se pretende extrair o máximo poder calorífico possível do combustível

insuflado. Para além de uma combustão incompleta, impossibilitando uma libertação energética plena, temos a formação de fuligens (hidrocarbonetos não combustos) que por sua vez absorvem o calor em vez de o libertarem, a energia libertada vai ser parcialmente absorvida por estas partículas que luminescem (atribuindo uma coloração amarelo forte à chama).

Esta situação não é desejada por apresentar uma certa perigosidade, numa combustão incompleta temos uma elevada formação de monóxido de carbono (CO), e desta forma, o risco de explosão.

Tabela 12: Caracterização da mistura química para os dois queimadores de fusão e queimador de manutenção.

Caracterização da mistura química			
	Coefficiente de excesso de ar (λ)	Designação da mistura	Quantificação %
Queimador de fusão 1	0,85	Rica	Défice de ar de 15%
Queimador de fusão 2	0,85	Rica	Défice de ar de 15%
Queimador de manutenção	1,33	Pobre	Excesso de ar de 33%

Por observação da tabela 12, observamos que o queimador de manutenção está a operar numa situação preferível, a de um excesso de ar, apresentando um excesso de ar de 33%. No entanto, dado o facto de que este queimador está a equipar a câmara de manutenção, surge o problema de formação de uma atmosfera oxidante nesta câmara, aumentando a oxidação do banho metálico, resultando em perdas económicas que podem ser superiores às que ocorrem numa situação de défice de ar. O excesso de ar neste queimador deve ser mantido, evitando o risco de explosão e uma combustão incompleta, mas minimizado, de forma a obter-se uma atmosfera pouco oxidante, e controlado, assegurando boas práticas de operação. Nesta situação de combustão, vai ser dispendida energia calorífica para o aquecimento deste considerável excesso de ar.

Na combustão praticada pelos dois queimadores de fusão (queimadores de maior potência) observa-se um défice de ar de 15%, constatando-se que estamos perante uma incorrecta prática de operação destes queimadores. O défice de ar, para além de incorrer num risco de explosão, impossibilita uma libertação energética em pleno do combustível utilizado, origina um desaproveitamento de gás natural, e perdas económicas para a empresa. Energia calorífica vai também ser dispendida para aquecimento do combustível não combusto. A situação de mistura estequiométrica seria a mais eficiente e aquela na qual teríamos um maior aproveitamento calorífico, mas dado que esta é de difícil obtenção

na indústria, é sempre recomendado um excesso de ar que deve ser minimizado, porque vai também ser dispendida energia calorífica aquando da combustão no aquecimento deste excesso de ar.

6.4 Definição do modo como actuar para optimização destes consumos

É necessário definir um modo de como actuar, estabelecendo uma combustão de acordo com a teoria explorada, uma combustão com um ligeiro excesso de ar que assegure uma combustão em pleno do combustível, e origine baixas taxas de monóxido de carbono (CO), diminuindo o risco de explosão, situação preferível na indústria. Para tal, é necessário intervir nos factores de controlo da combustão, pela alteração dos valores de pressão de gás e ar com os quais os queimadores de manutenção e de fusão operam, de forma a obter o tipo de combustão pretendida. [4]

Pretende-se uma optimização dos consumos energéticos, retirando o maior proveito possível do poder calorífico do gás natural combustado. Desta forma, o excesso de ar tem de ser considerado e minimizado, pois parte do calor produzido na combustão será dispendido na elevação da temperatura do ar em excesso. Por motivos de segurança, *o manual refere que a forma de funcionamento oxidante deve ser ajustada para um mínimo de 5% de excesso de ar*, isto é, lambda (λ) de 1,05, sendo este o valor de coeficiente de excesso de ar utilizado na proposta de optimização. [4]

O manual da StrikoWestofen referente ao forno7 contém informação quanto à forma de como calcular os débitos de gás e ar com os quais os seus queimadores devem operar. [4]

$$V_{gás} = P_B / H_u \quad (\text{Eq. 12})$$

$$V_{ar} = V_{gás} \cdot \lambda \cdot L_0 \quad (\text{Eq. 13})$$

$V_{gás}$ - Débito de gás (m^3/h);

P_B - Potência do queimador (kW);

H_u - Poder calorífico do gás (kWh/m^3);

V_{ar} - Débito de ar (m^3/h);

λ - Excesso de ar;

L_0 - Necessidade mínima de ar (m^3/m^3);

Tabela 13: Valores do poder calorífico do gás e necessidade mínima de ar para os dois tipos de gás natural. [4]

Tipo de gás	Hu (kWh/m ³)	Lo (m ³ /m ³)
Gás natural H	11	10,6
Gás natural L	8,9	8,6

Voltamos novamente a ter uma alusão numa das tabelas do manual referente a um gás natural H e L, que remete para um valor de poder calorífico superior (High) e inferior (Low). Apesar da diferença dos poderes caloríficos superior e inferior, as necessidades mínimas de ar dos mesmos também diferem, numa análise gráfica posterior vamos verificar que o resultado gráfico por intermédio dos dois valores é o mesmo.

PROPOSTA DE OPTIMIZAÇÃO PARA O QUEIMADOR DE MANUTENÇÃO

Desta forma, recorrendo às fórmulas acima apresentadas (Eq.12 e 13), conferindo ao queimador de manutenção uma combustão com um excesso de comburente de 5%, forma de funcionamento oxidante mínima referida pelo manual, obtemos os seguintes valores de débito de gás e ar, respeitantes à utilização dos valores de poder calorífico e necessidades mínimas de ar para o gás natural H e L (tabela 13):

Gás Natural L

$$V_{gás} = \frac{P_B}{H_u} = \frac{450}{8,9} = 50,6 \text{ m}^3/h \quad (\text{Eq. 14})$$

$$V_{ar} = V_{gás} \cdot \lambda \cdot L_0 = 50,6 \times 1,05 \times 8,6 = 456,9 \text{ m}^3/h \quad (\text{Eq. 15})$$

Gás Natural H

$$V_{gás} = \frac{P_B}{H_u} = \frac{450}{11} = 40,9 \text{ m}^3/h \quad (\text{Eq. 16})$$

$$V_{ar} = V_{gás} \cdot \lambda \cdot L_0 = 40,9 \times 1,05 \times 10,6 = 455,2 \text{ m}^3/h \quad (\text{Eq. 17})$$

Para conferir que se trata de um $\lambda = 1,05$, recorreremos à representação gráfica abaixo, onde também é notório que o resultado do factor de ar é igual para a situação de gás natural H e L.

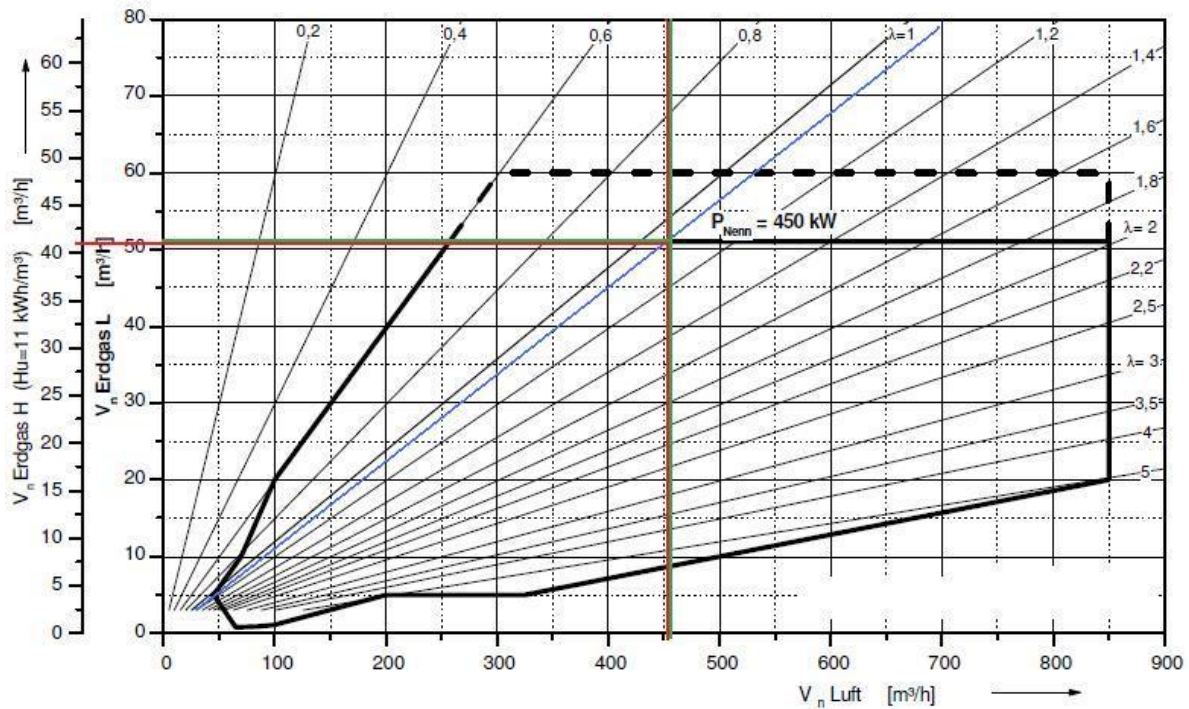


Figura 19: Relação dos débitos de ar e de gás (m^3/h) com o coeficiente de excesso de ar (λ), para o queimador de manutenção BIO 140RB. (Gráfico disponibilizado pela Kromschroder)

Afigura 19 apresenta a vermelho os valores referentes ao gás natural H e a verde os referentes ao gás natural L, acima calculados.

Uma vez assegurado que os respectivos valores de débito de ar e gás remetem para uma combustão com uma forma de funcionamento oxidante de 5% de comburente em excesso, prosseguimos com a identificação das pressões de ar e gás a utilizar que atestem esta combustão.

A tabela 14 apresenta os valores de débito de optimização de ar e gás a implementar, a partir dos quais obtemos os valores de pressão de optimização.

Tabela 14: Valores de débito de gás e ar (m^3/h), valores de operação e de sugestão de optimização, assegurando a potência de operação do queimador de manutenção utilizada.

	Ar (m^3/h)	Gás (m^3/h)
Débitos de operação	188,5	15,0
Débito de optimização (GN H)	188,5	16,9
Débito de optimização (GN L)	188,5	20,9
Débito de optimização a implementar	188,5	18,9

De forma a assegurar uma potência de operação do queimador muito próxima da anteriormente utilizada, como solicitado pelos engenheiros orientadores da SLM, utilizamos o mesmo valor de débito de ar com que o queimador estava anteriormente a operar, e regulamos apenas o débito de gás de forma a corresponder à nova proposta de combustão ($\lambda = 1,05$), assegurando a nova razão de equivalência definida. Desta forma, apenas actuámos na regulação dos valores de pressão de gás dos queimadores.

De seguida, na última linha da tabela está presente a proposta de débitos de optimização a implementar, em que o débito de gás natural a utilizar é o valor médio dos calculados por intermédio do GN H e GN L, dada a ausência no gráfico da figura 20 de uma escala de débitos para GN H e GN L.

Para relacionar os valores de débito de optimização a implementar com as respectivas pressões de ar e gás natural recorreremos à análise gráfica abaixo.

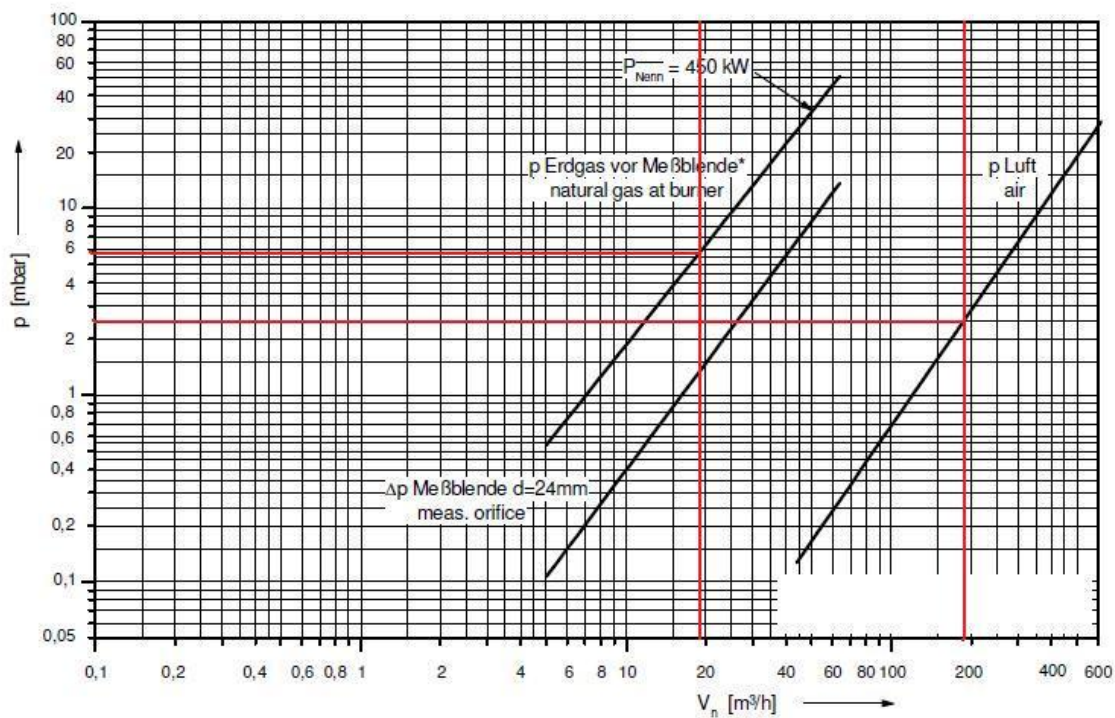


Figura 20: Relação entre a pressão (mbar) e o débito (m^3/h), para o queimador de manutenção BIO 140RB. (Gráfico disponibilizado pela Kromschroder)

Tabela 15: Valores de pressão de ar e gás natural, obtidos por análise gráfica, a utilizar no queimador de manutenção, em função do coeficiente de excesso de ar que caracteriza a combustão.

	Ar (mbar)	GN (mbar)
Combustão praticada ($\lambda=1,33$)	2,5	3,8
Proposta de optimização ($\lambda=1,05$)	2,5	5,8

A tabela 15 apresenta os valores de pressão de ar e gás com que o queimador opera e os recomendados pela proposta de optimização de consumos energéticos. Como podemos verificar, a pressão de ar mantém-se inalterada e a alteração centra-se unicamente numa nova regulação da pressão de gás natural no queimador de manutenção que vai atribuir à combustão uma forma de funcionamento oxidante minimizada ($\lambda=1,05$).

PROPOSTA DE OPTIMIZAÇÃO PARA OS QUEIMADORES DE FUSÃO

Analisando agora a situação dos queimadores de fusão, e recorrendo igualmente às fórmulas acima apresentadas (Eq.12 e 13), assegurando também nestes queimadores uma combustão com a forma de funcionamento oxidante mínima referida pelo manual, um excesso de comburente de 5%, obtemos os seguintes valores de débito de gás e ar, respeitantes à utilização dos valores de poder calorífico e necessidades mínimas de ar para o gás natural H e L (tabela 13):

Gás Natural L

$$V_{gás} = \frac{P_B}{H_u} = \frac{630}{8,9} = 70,8 \text{ m}^3/h$$

(Eq.18)

$$V_{ar} = V_{gás} \cdot \lambda \cdot L_0 = 70,8 \times 1,05 \times 8,6 = 639,3 \text{ m}^3/h$$

(Eq.19)

Gás Natural H

$$V_{gás} = \frac{P_B}{H_u} = \frac{630}{11} = 57,3 \text{ m}^3/h$$

(Eq.20)

$$V_{ar} = V_{gás} \cdot \lambda \cdot L_0 = 57,3 \times 1,05 \times 10,6 = 637,7 \text{ m}^3/h$$

(Eq.21)

Averiguando que se trata de uma combustão com um $\lambda = 1,05$, recorreremos à representação gráfica abaixo, onde volta a ser evidente que o resultado do factor de ar é igual para a situação de gás natural H e L.

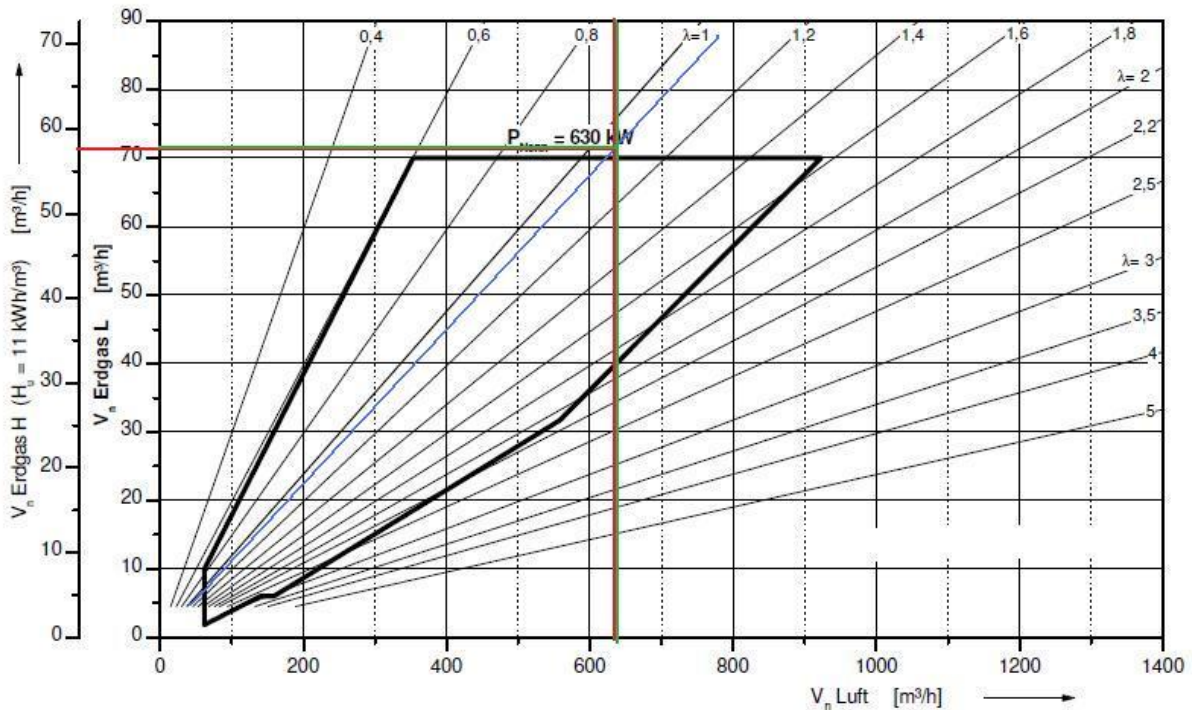


Figura 21: Relação dos débitos de ar e de gás (m^3/h) com o coeficiente de excesso de ar (λ), para o queimador de manutenção ZIO 165RB. (Gráfico disponibilizado pela Kromschroder)

A figura 21 apresenta a vermelho os valores de débito referentes ao gás natural H e a verde os referentes ao gás natural L, previamente calculados. Dado que pela análise gráfica verificamos que os respectivos débitos de ar e gás correspondem a uma combustão com uma forma de funcionamento oxidante de 5% de comburente em excesso, passamos a identificar as pressões de ar e gás a utilizar que atestam esta combustão. A tabela 16 apresenta os débitos de optimização de ar e gás a implementar, a partir dos quais devemos obter os respectivos valores de pressão.

Tabela 16: Valores de débito de gás e ar (m³/h), valores de operação e de sugestão de optimização, assegurando a potência de operação do queimador de manutenção utilizada.

	Ar (m ³ /h)	Gás (m ³ /h)
Débitos de operação (QF 1)	314,3	39,2
Débitos de operação (QF 2)	335,7	42,0
Débito de optimização (GN H)	325,0	29,2
Débito de optimização (GN L)	325,0	36,0
Débito de optimização a implementar	325,0	32,6

É assegurada uma potência de operação dos queimadores de fusão *muito próxima* (porque varia o débito de gás) da anteriormente utilizada, como solicitado pelos engenheiros orientadores da SLM, mas considerando nesta situação, dada a presença de dois queimadores de fusão a operar com débitos diferentes, um valor de débito de ar médio dos valores de débito do queimador de fusão 1 e 2 obtidos aquando da caracterização da combustão. Regula-se posteriormente o débito de gás de forma a corresponder à nova proposta de combustão ($\lambda=1,05$).

O débito de optimização de gás natural a implementar provém do valor médio dos débitos de optimização para GN H e GN L, dada a ausência no gráfico da figura 22 de uma escala de débitos para GN H e GN L.

Para relacionar os valores de débito de optimização a implementar com as respectivas pressões de ar e gás natural recorreremos à análise gráfica abaixo.

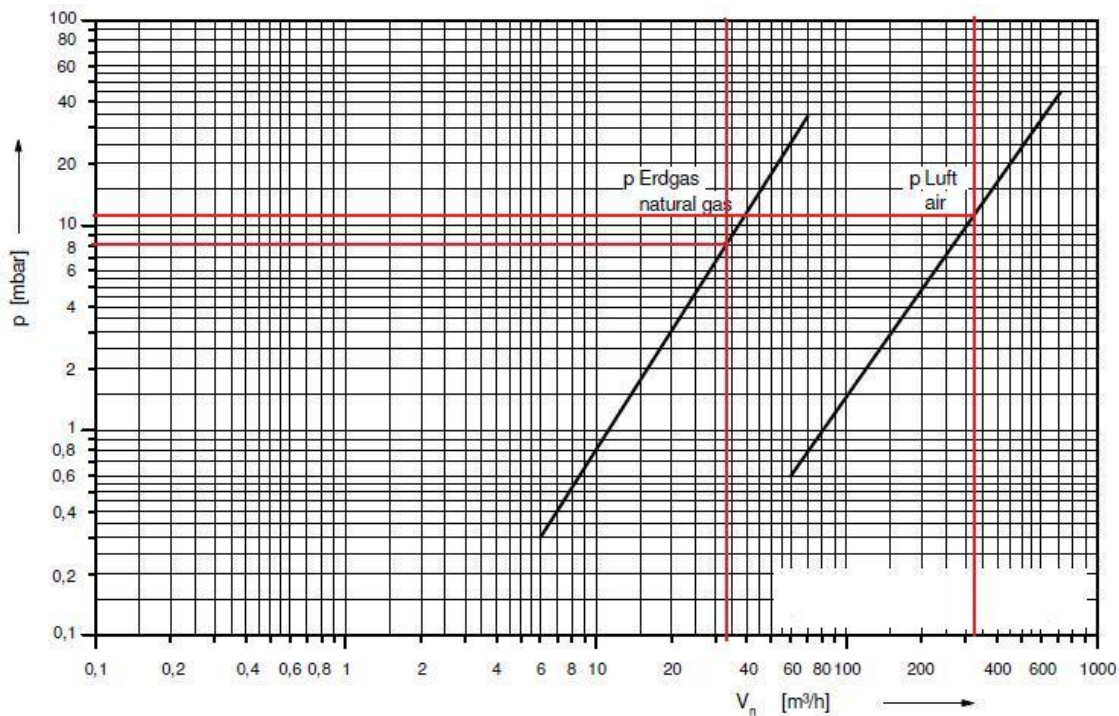


Figura 22: Relação entre a pressão (mbar) e o débito (m^3/h), para os queimadores de fusão ZIO 165RB. (Gráfico disponibilizado pela Kromschroder)

Tabela 17: Valores de pressão de ar e gás natural, obtidos por análise gráfica, a utilizar nos queimadores de fusão, em função do coeficiente de excesso de ar que caracteriza a combustão.

	Ar (mbar)	GN (mbar)
Combustão praticada ($\lambda=0,85$)	QF 1 = 10,5 e QF 2 = 12,5	QF 1 = 10,8 e QF 2 = 12,8
Proposta de optimização ($\lambda=1,05$)	11,4	8,0

A tabela 17 apresenta os valores de pressão de ar e gás com que os queimadores de fusão operavam, onde se verificava uma combustão caracterizada por um défice de ar de 15%, e os recomendados pela proposta de optimização de consumos energéticos. Como podemos verificar, a pressão de ar de optimização é praticamente a média dos valores de pressões de ar com que os queimadores de fusão 1 e 2 operavam, essa diferença deve-se ao facto de que este valor foi obtido por intermédio de um valor médio dos débitos de operação destes queimadores. A alteração centra-se numa nova regulação da pressão de gás natural e ar, em ambos os queimadores de fusão, de forma a atribuir à combustão uma forma de funcionamento oxidante de 5% ($\lambda=1,05$), solucionando assim o problema de uma combustão incompleta, e perdas económicas inerentes, e também evitando a acumulação de monóxido de carbono e risco de explosão.

A proposta de optimização reflecte-se então numa nova afinação dos queimadores para os novos valores de pressão de gás e ar definidos. Seguida de uma nova monitorização que possibilite quantificar os consumos inerentes desta nova parametrização de operação dos queimadores, concluindo assim se estamos perante uma proposta de optimização viável.

6.5 Resultados experimentais (monitorização 2)

Toda a proposta apresentada foi exposta ao orientador, responsável pela produção na SLM, que por sua vez permitiu a implementação da proposta de optimização sugerida.

Tabela 18: Valores, propostos e validados para implementação, de pressão de ar e gás para operação dos queimadores de fusão e manutenção do forno 7 da SLM ($\lambda=1,05$)

Valores de pressão do forno 7 (mbar)		
	Ar	Gás Natural
Queimador de fusão 1	11,4	8,0
Queimador de fusão 2	11,4	8,0
Queimador de manutenção	2,5	5,8

Procedeu-se à monitorização 2 dos consumos de gás natural, para igual período à da anterior (5 dias), analisando-se assim as diferenças de resultados provenientes da nova regulação dos factores de controlo, e concluindo quanto à medida de optimização, quanto a eventuais interferências mecânicas e humanas, e também quanto à forma de monitorização.

A monitorização 2 realizou-se também por um período de meio turno (4 horas). Em cada período de monitorização efectuaram-se oito registos de forma a estabelecer um perfil do consumo energético ao longo desse período de monitorização. Durante esse período, as cargas carregadas no forno quantificaram-se de acordo com as necessidades de produção. Aquando do primeiro e último registo, a rampa de fusão do forno apresenta uma quantidade não quantificável de alumínio, porém reduzida.

No anexo 6 estão presentes os registos respeitantes aos cinco dias de produção sobre os quais incidiram a monitorização 2. Os resultados obtidos durante os cinco dias da monitorização 2 são de seguida apresentados.

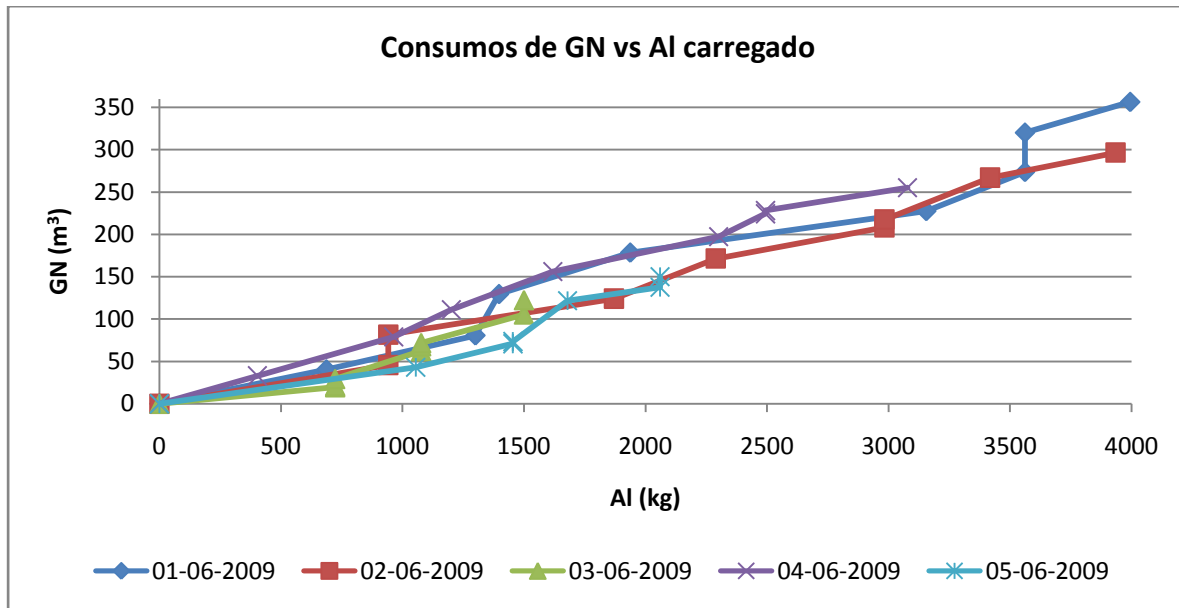


Figura 23: Consumos de Gás Natural por massa de Al carregado. Valores acumulados de 30 em 30 minutos, respeitantes a todos os 5 dias de monitorização, durante um período de monitorização de 4 horas

A figura 23 apresenta a produção de liga e respectivos consumos, para cada um dos 5 dias que compreendem a monitorização 2. Os valores presentes de consumo energético e alumínio carregado, são valores acumulados e registados de 30 em 30 minutos, por um período de 4 horas.

É notável que nos dias 1 e 2 as massas carregadas no forno, durante o período que compreendeu a monitorização, apresentaram-se muito similares, apresentando o dia 1 valores de consumo de gás natural superiores, sendo o dia que apresenta um valor de consumo específico máximo.

Os gráficos abaixo apresentados, à semelhança dos apresentados na monitorização 1, perfilam os consumos energéticos e de liga para intervalos de 30 minutos, ao longo das 4 horas da monitorização 2.

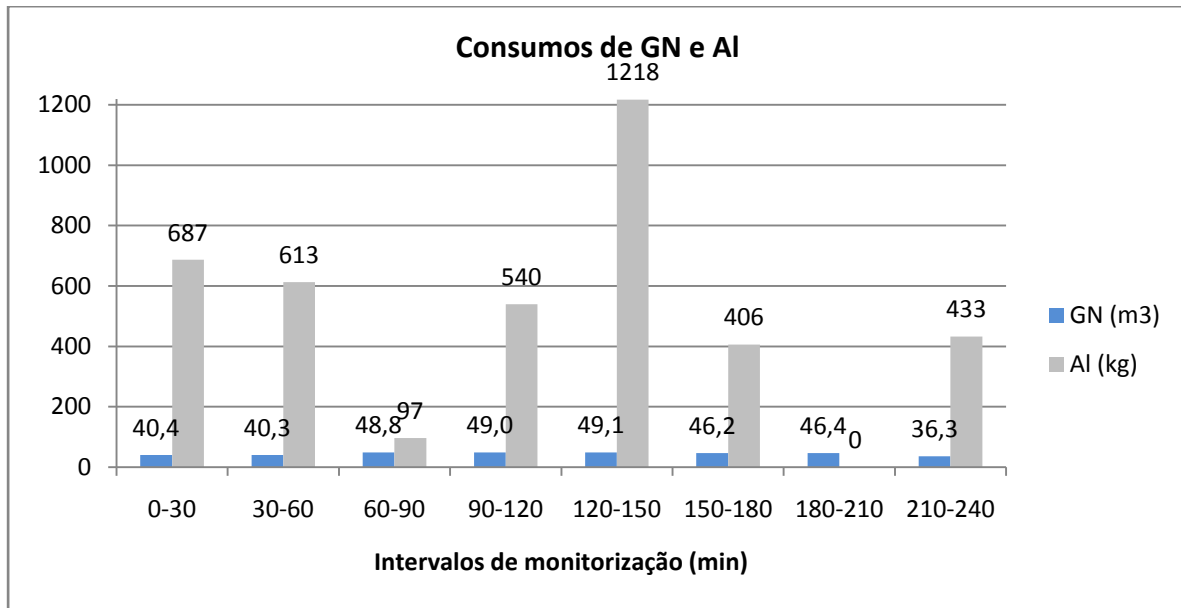


Figura 24: Produção de Liga a 01/06/2009, consumos de gás natural e alumínio carregado em intervalos de 30 minutos, por um período de 4 horas.

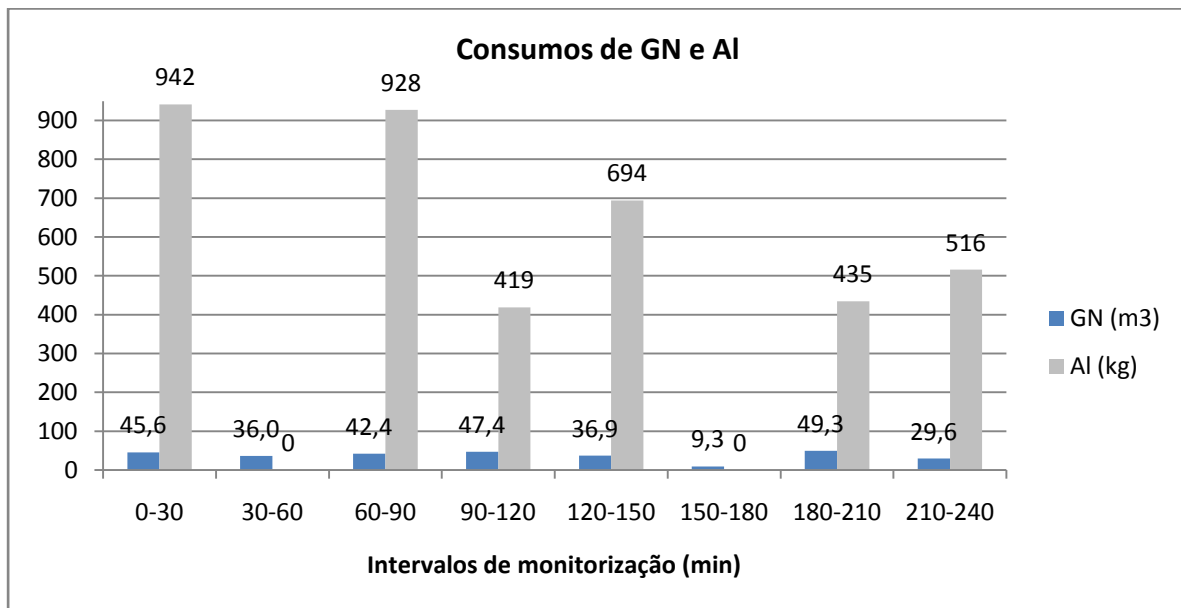


Figura 25: Produção de Liga a 02/06/2009, consumos de gás natural e alumínio carregado em intervalos de 30 minutos, por um período de 4 horas.

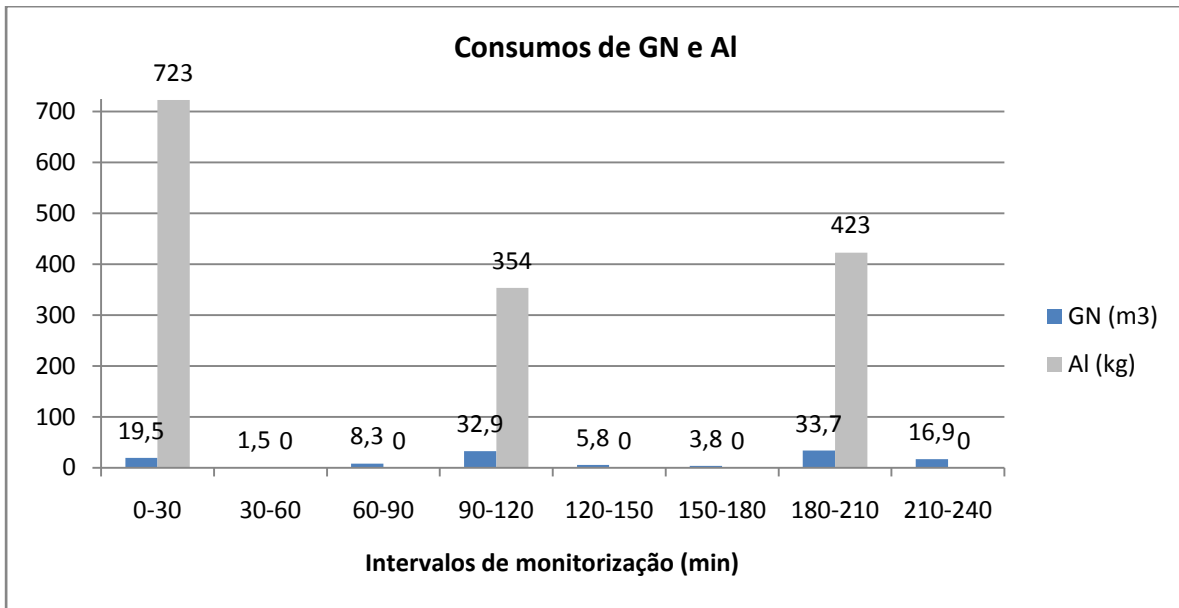


Figura 26: Produção de Liga a 03/06/2009, consumos de gás natural e alumínio carregado em intervalos de 30 minutos, por um período de 4 horas.

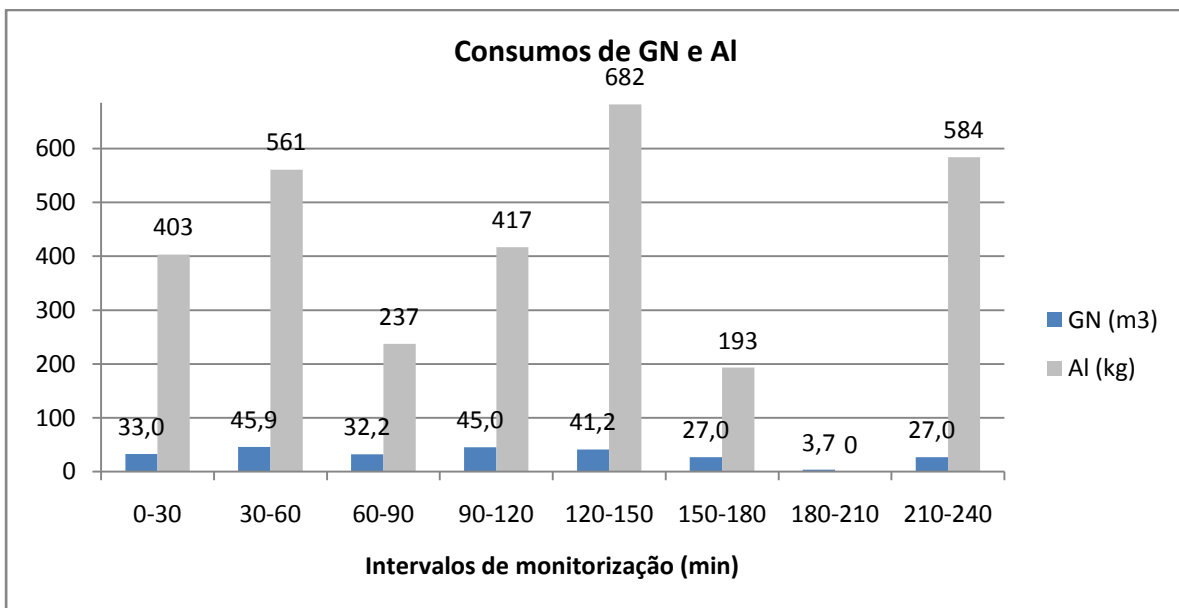


Figura 27: Produção de Liga a 04/06/2009, consumos de gás natural e alumínio carregado em intervalos de 30 minutos, por um período de 4 horas.

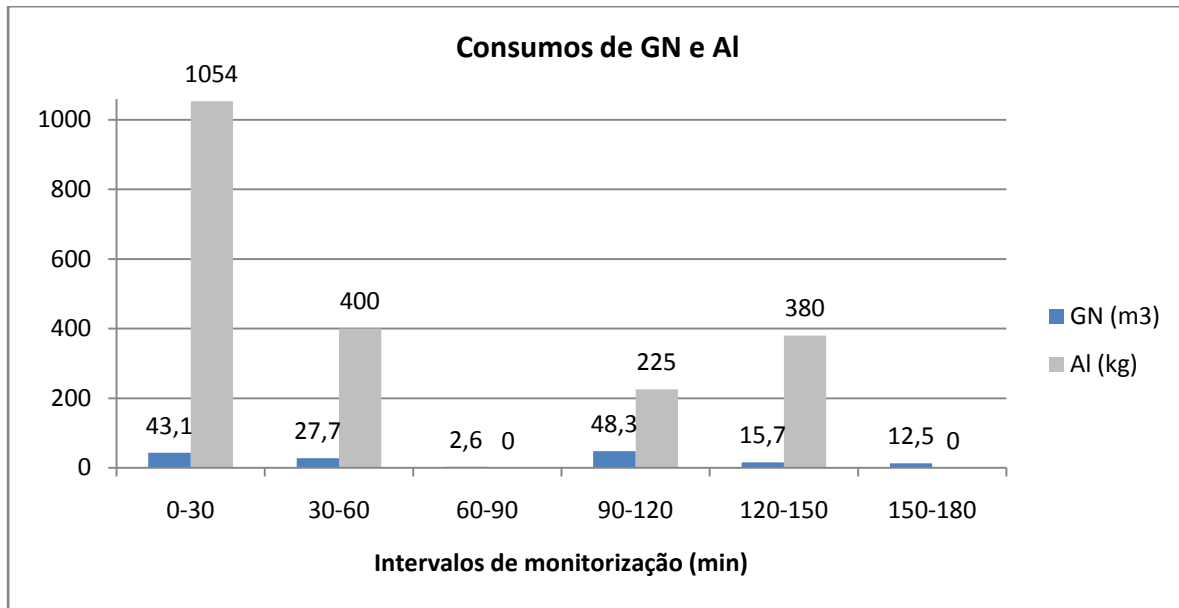


Figura 28: Produção de Liga a 05/06/2009, consumos de gás natural e alumínio carregado em intervalos de 30 minutos, por um período de 4 horas.

6.6 Considerações dos resultados da monitorização 2

À semelhança da monitorização 1, pretendemos também aqui estabelecer uma relação entre os consumos energéticos dos 5 dias, de forma a quantificarmos, da forma mais aproximada, o consumo específico da nova parametrização de operação do forno 7.

Tabela 19: Produção de Liga e consumos dos 5 dias da monitorização 2 (M2).

	01-06-2009	02-06-2009	03-06-2009	04-06-2009	05-06-2009
Massa de Retornos fundida (kg)	1277	1402	354	1329	225
Massa de Lingotes fundida (kg)	2717	2532	1146	1748	1834
Massa total fundida (kg)	3994	3934	1500	3077	2059
Consumo total de GN (m ³)	356,5	296,5	122,4	255,0	149,9
Consumo específico diário (m ³ /ton) - X	89,3	75,4	81,6	82,9	72,8
Consumo específico médio de M2 (m ³ /ton) - Y	80,4	80,4	80,4	80,4	80,4
$\left \frac{X - Y}{Y} \right \times 100$ (%)	11,1	6,2	1,5	3,1	9,5

O valor médio do consumo específico ao longo destes 5 dias, sobre os quais incidiram a monitorização 2, é de 80,4 m³/ton.

Por observação da tabela 19, em contraste com a monitorização 1, verificamos um consumo de gás natural inconstante ao longo dos 5 dias, resultado, muito provável, da

variação da intensidade de produção. As massas fundidas variam de igual forma, resultando consumos específicos diferentes, de notar que no dia 3 e 5 de Junho as massas fundidas foram muito inferiores, dadas por uma quebra na produção, consequentes de avaria e mudança de molde, respectivamente.

A forma do forneiro operar também se reflecte, pelo facto de manter ou não a câmara de manutenção cheia. Que como indica o manual, dá-se abaixamento dos consumos energéticos do forno com esta prática.

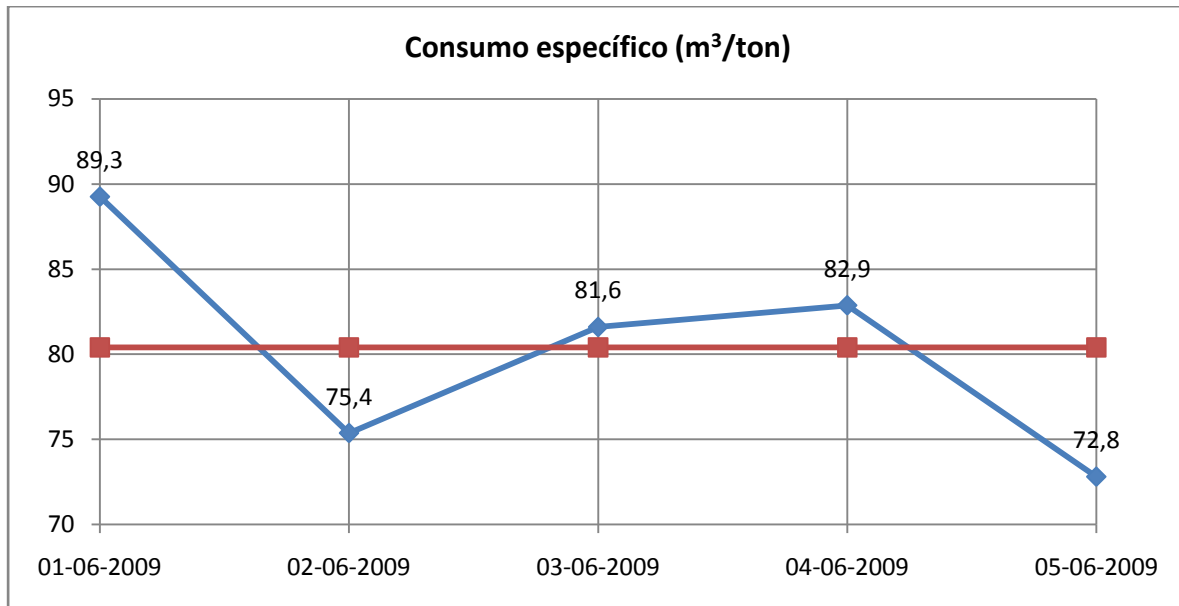


Figura 29: Consumos específicos ao longo dos 5 dias da monitorização 2.

A figura 29 agrega os consumos específicos diários com o consumo específico médio de 80,4 m³/ton, dos 5 dias de controlo.

A monitorização 2, apresenta no dia 01/06/2009 uma produção constituída por 32% de retornos e 68% de lingotes, a 02/06/2009 uma produção constituída por 36% de retornos e 64% de lingotes, a 03/06/2009 uma produção constituída por 24% de retornos e 76% de lingotes, a 04/06/2009 uma produção constituída por 43% de retornos e 57% de lingotes, e a 05/06/2009 uma produção constituída por 11% de retornos e 89% de lingotes. Não é observável uma variação do consumo específico com relação ao tipo de carga utilizada na produção para cada um dos dias.

Na monitorização 2, no dia 05/06/2009, apenas foram realizadas três horas de controlo dada a entrada em lay-off da SLM nesse mesmo dia, e a necessidade de reduzir as cargas carregadas a partir das 13h00. Deixando o controlo de estar dependente da produção, optou-se por concluir a monitorização às 13h00, assegurando uma monitorização dependente da produção como nos dias precedentes.

A falta de controlo sobre os parâmetros de produção originou também nesta monitorização uma variação máxima de consumos específicos diários, relativamente ao consumo específico médio da monitorização em causa, de aproximadamente 11%. Os parâmetros de produção estão considerados nos resultados da optimização, uma vez que os mesmos são análogos para as duas monitorizações compreendidas neste trabalho.

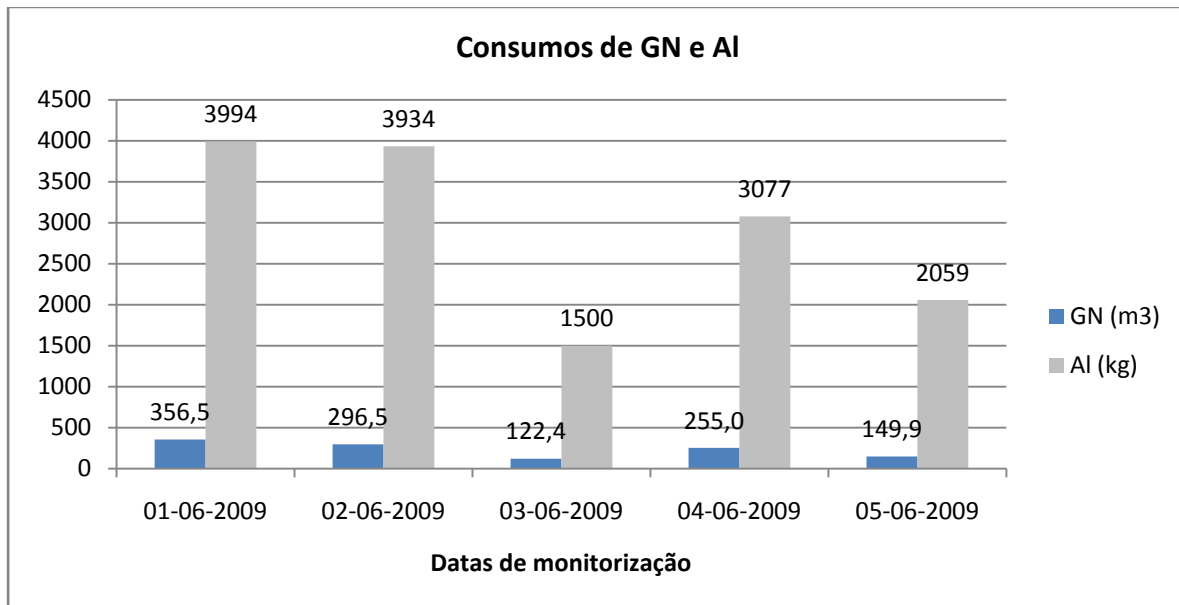


Figura 30: Produção de Liga e consumos de Gás Natural ao longo dos 5 dias da monitorização 2.

6.7 Resultados da optimização

Numa apreciação à forma como as monitorizações dos consumos foram efectuadas, verifica-se uma inconsistência nos valores dos consumos específicos obtidos ao longo dos cinco dias, para ambas as monitorizações. Desta forma, efectuou-se uma avaliação de resultados com um carácter mais generalista, procedendo-se ao cálculo de valores médios de consumo específico para ambas as monitorizações, e posteriormente, a análises pontuais, respeitantes aos intervalos de 30 minutos, que perfilam os consumos energéticos nos períodos de monitorização.

Nas monitorizações realizadas, os consumos específicos apresentados têm agregados os consumos de manutenção e fusão. Ambos os queimadores foram alvo de uma optimização de combustão. Desta forma, a optimização dos consumos surge pela diminuição de perdas energéticas associadas à queima praticada pelo queimador de manutenção e pelos queimadores de fusão.

Numa análise dos resultados da monitorização 2, comparativamente aos resultados da monitorização 1, verifica-se que os consumos específicos da monitorização 2 são todos eles, referentes aos cinco dias de controlo, inferiores ao valor médio do consumo específico obtido pela monitorização 1. A monitorização 1 apresenta valores de consumo específico, respeitantes a todos os cinco dias de controlo, superiores ao valor médio de consumo específico da monitorização 2. A figura 31 elucida estas observações, anexando os consumos específicos diários e os consumos específicos médios das monitorizações 1 e 2.

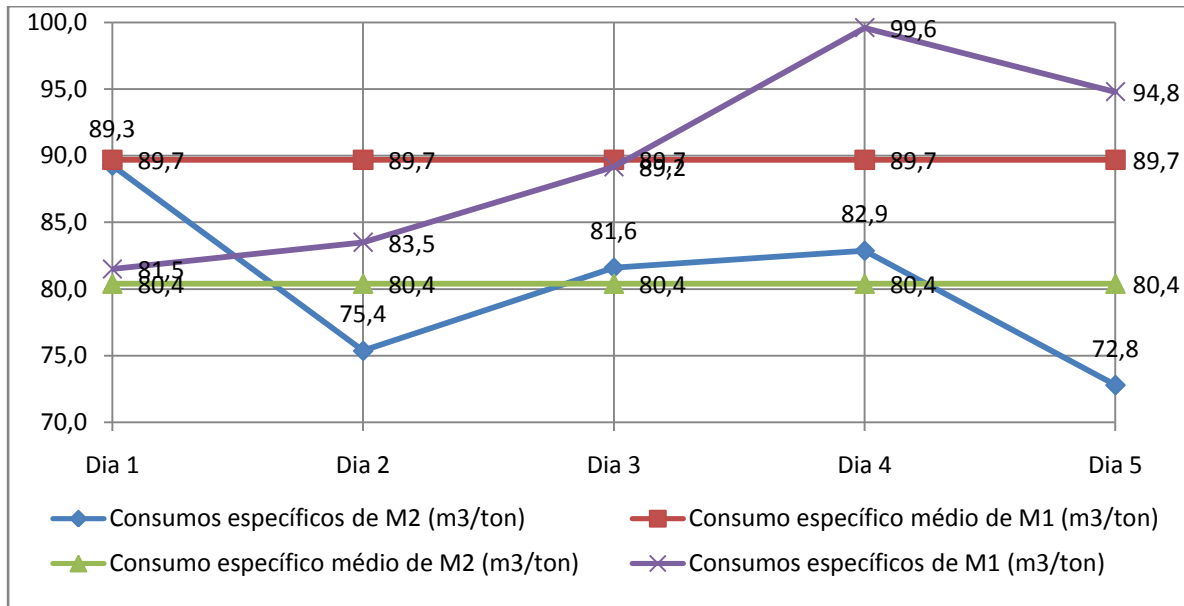


Figura 31: Consumos específicos diários e consumos específicos médios, referentes aos cinco dias de controlo, da monitorização 1 e 2

A monitorização 2, referente à optimização dos consumos energéticos, passou a apresentar consumos específicos, de todos os cinco dias de controlo, dentro do intervalo de valores 70 - 90 (m^3/ton), em contraste com o intervalo de valores nos quais se inserem os resultantes da monitorização 1, de 80 - 100 (m^3/ton). É notável em ambas as monitorizações, nos respectivos cinco dias de controlo, uma variação dos valores de consumo específico próxima de 20 unidades.

Em observação de resultados denota-se um abaixamento dos consumos específicos, que se traduz numa optimização do consumo energético em causa. Relativamente ao consumo específico médio tivemos um abaixamento de 10,4% da monitorização 1 para a monitorização 2. Desta forma, a optimização em causa quantifica-se por um decréscimo de 10,4% do consumo de gás natural.

Observando dias de igual produção, da monitorização 1 com a monitorização 2, podemos também daí retirar algumas conclusões. No dia 16/04/2009, respeitante à

monitorização 1, temos uma produção de 3094kg de Al, muito próxima da produção do dia 04/06/2009, da monitorização 2, com uma produção de 3077kg de Al. O consumo específico do dia 16/04 é de 83,5 m³/ton, superior ao resultante da optimização para um dia de produção similar (04/06), de 82,9 m³/ton. Este abaixamento de consumo específico não se quantifica de igual forma ao obtido por comparação dos valores de consumo específico médio. Apesar de existir a possibilidade de analisar os consumos pontualmente, esta não é a melhor forma de o fazer, dada a inconsistência dos valores obtidos, os mesmos estão associados de um maior erro.

A inconsistência dos valores de consumos específicos acima referida é devida à metodologia de realização das monitorizações, estando, nesta didáctica, os resultados dependentes da variação dos parâmetros de produção. Dado que o forno se encontrava em regime de produção, podemos apenas considerar estes parâmetros e a forma como os mesmos influenciam os consumos observados. Parâmetros de produção:

- Quantidade, em peso, do banho na câmara de manutenção do forno - Interfere na activação e desactivação dos queimadores de fusão, de acordo com o modo de funcionamento do forno (referido no capítulo 2).
- Cadência de remoção do banho do forno - Directamente relacionada com a intensidade de produção. Número de células de injeção em funcionamento, mudanças de molde, e avarias em máquinas de injeção, fazem variar a cadência de remoção do banho do forno.
- Cadência e proporção relativa, do carregamento de retornos, gitos e lingotes - Directamente relacionada com a intensidade de produção. A cadência de carregamento do forno relaciona-se com as necessidades de produção do momento. A proporção relativa referente ao tipo de carga varia com o tipo de peças em produção momentânea (maior ou menor massa dos gitos e retornos), e mudanças de molde (primeiras injeções constituem refugo).
- Cadência de remoção de escória do forno - Variável manipulável pelo operador do forno, consoante a realização de um maior ou menor número de operações de limpeza durante as 4 horas de monitorização. Interfere na fusão, pela desactivação dos queimadores de fusão aquando das operações de remoção de escória.
- Modo como o forneiro opera com o forno - Interfere com a quantidade/nível do banho na câmara de manutenção (câmara de manutenção totalmente ou parcialmente cheia). Faz variar a activação/desactivação dos queimadores de fusão, variando também os consumos de gás natural, de acordo com o modo de funcionamento do forno.

Não foi possível associar a queima dada pela nova parametrização com as emissões ambientais daí resultantes, pois o período de realização da Tese de Mestrado não compreendeu nenhuma operação de controlo de emissões ambientais na SLM. No entanto convém ter presente a forma como a variação dos factores de controlo influencia as emissões ambientais resultantes, segundo a teoria apresentada no capítulo 4.

POSSIBILIDADES DE MONITORIZAÇÃO ALTERNATIVAS

Entre possibilidades de monitorização alternativas, poderíamos esvaziar a câmara de manutenção e registar o consumo associado a um período fixo de accionamento contínuo do queimador, no qual a carga continuaria dependente da produção. Não seria possível quantificar a optimização pelo consumo específico, mas durante o período de accionamento do queimador, seria possível verificar um abaixamento do consumo de gás natural, dado por uma queima controlada, com um excesso de ar mínimo definido. A quantificação da optimização pelo consumo específico seria somente possível se carregássemos o forno constantemente, e sempre que o forno o permitisse segundo o seu modo de funcionamento. Este tipo de controlo não seria viável de realizar, por estar de momento na nave 2 da SLM um só forno a laborar, impossibilitando, em simultâneo com a monitorização, que a produção seja assegurada, pois o forno no seu estado de câmara de manutenção parcialmente cheia não tem capacidade para assegurar a produção.

Outra possibilidade de monitorização, seria esvaziar a rampa de fusão, carregar uma tonelada de alumínio, e esperar pela fusão de toda a carga, e proceder a um registo do respectivo consumo de gás natural. Assegurar que a fusão se dê de forma contínua, assegurando uma câmara de manutenção não cheia. A grande dificuldade nesta monitorização, é controlar o período de fusão dessa tonelada carregada, pelo facto de que as quantidades de alumínio presentes na rampa de fusão são difíceis de estimar. Considerar também o eventual accionamento do queimador de manutenção nesse período.

7. EFICIÊNCIA TÉRMICA

Uma análise da eficiência ou ineficiência de um sistema, pode ser usada para identificar de onde deriva a maior oportunidade para ganhos. Também pode ser usada para aferir o desempenho de um sistema relativamente a outro. [13]

A eficiência térmica é dada pelo quociente entre calor útil e calor dispensado, os fornos de fusão apresentam baixa eficiência térmica, tipicamente entre 5% - 35%. [13]

7.1 Aumento de eficiência térmica pela optimização dos factores de controlo

Como referido nas ponderações da optimização, denota-se na prática utilizada um abaixamento dos consumos específicos, que se traduz numa optimização do consumo energético em causa.

Procuramos aqui quantificar o aumento da eficiência térmica dado pela optimização dos factores de controlo. O aumento de eficiência manifesta-se pela diminuição das perdas associadas à combustão praticada, e pela diminuição do calor sensível dos gases na chaminé. Antes da optimização (monitorização 1), foi registado um consumo específico médio de 89,7 m³/ton, que considera um valor de perdas dadas pelo sistema (P), e um calor sensível de gases na chaminé (Q₅). Após optimização (monitorização 2), registou-se um consumo específico médio de 80,4 m³/ton, que considera um valor de perdas dadas pelo sistema (P'), e um calor sensível de gases na chaminé (Q₅'). Dado o abaixamento dos consumos específicos em 10,4%, o aumento de eficiência térmica quantifica-se de acordo com as equações:

$$\frac{P - P'}{P} \times 100 \quad e \quad \frac{Q_5 - Q_5'}{Q_5} \times 100$$

(Eq.22 e 23)

A figura 32 expõe a igualdade que permite quantificar as perdas em que o sistema incorre aquando da monitorização 1 e 2.

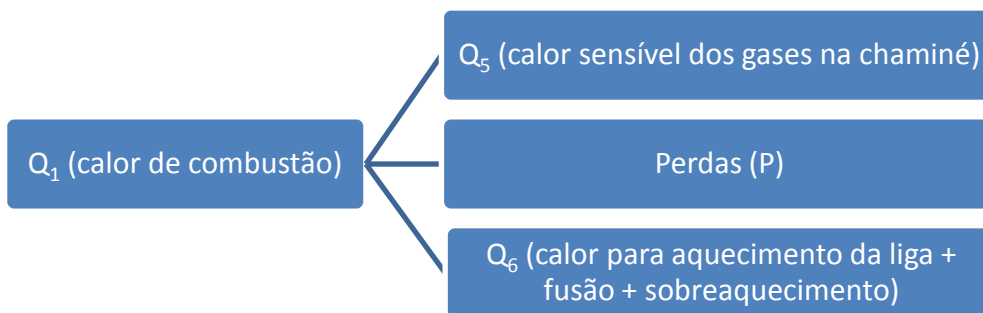


Figura 32: Diagrama da distribuição do calor de combustão.

Considerando-se a variação dos consumos específicos, o Q₆ vai manter-se constante para a fusão de uma tonelada de liga, e o Q₁ vai variar de acordo com o volume de combustível. O Q₅ varia proporcionalmente com o volume dos produtos de combustão. As perdas (P) consideram as que ocorrem continuamente pelo forno (constantes), mais as provenientes de uma manipulação da razão de equivalência.

$$Q_1 = Q_5 + Q_6 + P$$

(Eq.24)

QUANTIFICAÇÃO DAS PERDAS ANTERIORES À OPTIMIZAÇÃO

Recorreu-se a uma folha de cálculo Excel para cálculo do calor de combustão resultante de um volume de combustível considerado. Considerando-se um consumo específico anterior à optimização de 89,7 m³/ton, temos:

$$Q_1 = 982\,811 \text{ Kcal}$$

$$Q_6 = 281\,925 \text{ Kcal}$$

$$Q_5 = 242\,182 \text{ Kcal}$$

Pela aplicação da equação 24, obtém-se um valor de perdas resultantes do sistema de:

$$P = 458\,704 \text{ Kcal}$$

QUANTIFICAÇÃO DAS PERDAS POSTERIORES À OPTIMIZAÇÃO

Consideramos aqui o consumo específico posterior à optimização, de 80,4 m³/ton. Obtendo-se uma diminuição do valor do calor de combustão e do calor sensível dos gases na chaminé, dada por uma diminuição do volume de reagentes e produtos resultantes da combustão.

$$Q_1' = 880\,932 \text{ Kcal}$$

$$Q_6 = 281\,925 \text{ Kcal}$$

$$Q_5' = 217\,076 \text{ Kcal}$$

Pela aplicação da equação 24, obtém-se um valor de perdas resultantes do sistema de:

$$P = 381\,931 \text{ Kcal}$$

AUMENTO DE EFICIÊNCIA TÉRMICA

O aumento de eficiência térmica é dado pela equação 22 e 23, considerando as perdas anteriores (P) e posteriores (P') à optimização, e a diminuição do calor sensível dos gases na chaminé. O aumento de eficiência térmica é dado pelo abaixamento das perdas dadas pelo sistema em 16,7%, e pela diminuição do calor dos gases na chaminé em 10,4%.

$$\frac{P - P'}{P} \times 100 = 16,7\%$$

$$\frac{Q_5 - Q_5'}{Q_5} \times 100 = 10,4\%$$

A diminuição percentual do calor dos gases na chaminé apresenta-se igual à registada no abaixamento dos consumos específicos, sendo notável a proporcionalidade entre o volume de combustível e o calor dos produtos de combustão resultantes.

7.2 Eficiência térmica do forno antes e depois da optimização.

A eficiência térmica do forno é dada pelo quociente entre calor útil e calor dispensado. [13]

A eficiência térmica aqui calculada, não considera o calor útil dispensado no aquecimento das paredes do forno que proporciona transferência térmica para a carga por re-irradiação, vamos apenas considerar o calor útil como o utilizado para aquecimento, fusão e sobreaquecimento da liga (Q_6). O calor útil utilizado para aquecimento das paredes do forno é constante, não varia com a optimização. Desta forma, a comparação dos valores de eficiência do forno, anterior e posterior à optimização, permite uma observação do aumento de eficiência do forno.

O calor dispensado é o calor dos produtos de combustão (Q_4), resultante da combustão de um determinado volume de combustível.

Para o consumo específico verificado antes da optimização, de 89,7 m³/ton, a eficiência do forno é de:

$$\frac{Q_6}{Q_4} \times 100 = 28,7\%$$

$$Q_4 = Q_1$$

Para o consumo específico verificado depois da optimização, de 80,4 m₃/ton, a eficiência do forno é de:

$$\frac{Q_6}{Q_4} \times 100 = 32,0\%$$

$$Q_4 = Q_1$$

O forno apresenta uma eficiência de 32% após optimização. Resultante de um aumento da eficiência do forno de 11,5%, valor próximo do verificado no abaixamento dos consumos específicos médios (10,4%).

Verifica-se que antes e depois da optimização o forno apresenta valores de eficiência dentro da gama de valores referida pela bibliografia (5%-35%). Na realidade, estes valores de eficiência do forno serão inferiores, por não ter sido considerada a energia útil para aquecimento das paredes do forno.

8. CONCLUSÕES

Com a realização deste trabalho conseguimos um aumento da eficiência térmica do sistema, pela diminuição das perdas do sistema em 16,7% e do calor dos gases na chaminé em 10,4%. Obteve-se uma eficiência térmica do forno próxima de 32% após optimização da combustão, verificando-se um aumento da eficiência em 11,5%, relativamente à eficiência apresentada pelo forno antes da optimização. Estes aumentos de eficiência são consideráveis e cumprem com os objectivos propostos para a realização deste trabalho.

A proposta de optimização apresentada é então validada pelos aumentos de eficiência verificados. A proposta está fundamentada de acordo com a prática indicada pelo manual do forno, e permite agora um conhecimento da combustão que realmente se pratica, face a uma desconhecida e incorrecta combustão praticada anteriormente.

O procedimento exposto neste trabalho, de caracterização e optimização da combustão de acordo com a prática mencionada pelo manual do forno, estabelece um modo de como actuar para optimização e controlo sobre a combustão praticada por todos os restantes 6 fornos da SLM.

O facto de o forno alvo da optimização se encontrar em regime de produção, em que a monitorização é realizada mediante parâmetros de produção variáveis, está na origem das flutuações dos consumos registados. Estas flutuações indicam que estes parâmetros de produção não estão a ser suficientemente controlados.

Não foi observável uma relação entre a proporção relativa constituinte do tipo de carga com os consumos de gás natural registados. A extensão das monitorizações para um maior número de dias, juntamente com um maior controlo sobre os parâmetros de produção mencionados, poderia possibilitar uma conclusão quanto às superiores ou inferiores necessidades energéticas consoante o tipo de carga utilizada.

9. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho compreende o fenómeno de combustão, identifica os seus factores de controlo e a forma como estes caracterizam a combustão. Menciona as práticas teóricas recomendadas, como o usual excesso de ar preferido pela indústria e a definição desse excesso de ar em 5% pelo manual dos fornos da StrikoWestofen, e estabelece uma prática de como actuar para se obter a combustão desejada, posteriormente a uma caracterização da combustão com a qual o forno se encontrava a operar.

De futuro, para além da definição dos valores de pressão de ar e gás, com os quais os restantes fornos da SLM devem operar, assegurando uma combustão caracterizada por

um excesso de ar de 5% em todos os queimadores, estudos mais específicos devem ser ponderados.

Ponderar os resultados com alusão aos custos, de forma a aquilatar as vantagens económicas inerentes da optimização do sistema.

Controlo sobre o fornecimento do gás natural, funcionamento em atmosfera redutora ou oxidante pelas flutuações do poder calorífico.

A relação entre o excesso de ar com o qual o queimador de manutenção opera na câmara de manutenção, com a formação de escórias. Quantificar o impacto de uma atmosfera ligeiramente oxidante na câmara de combustão. Considerar uma atmosfera oxidante e as perdas económicas dadas pela superior formação de escórias, em oposição a um défice de ar e às perdas económicas inerentes ao combustível não combustado.

Ponderar o excesso de ar de 5% definido pelo manual como sendo a situação preferível. Ensaios de combustão com variação do factor de excesso de ar podem ser realizados, verificando a forma como este factor de controlo faz variar os consumos específicos. Pode-se também verificar a influência deste excesso de ar na formação de escórias na câmara de fusão.

Estudos das optimizações do consumo energético obtidas por um pré-aquecimento do comburente e combustível, preferivelmente dado por um recuperador de calor dos gases expelidos pela chaminé.

Estudo da sobre oxigenação do comburente como medida de optimização dos consumos energéticos.

Deve-se considerar, para quaisquer valores dos factores de controlo adoptados por uma qualquer das medidas de optimização, as emissões ambientais daí resultantes. Considerando-se a validade dessas optimizações, de acordo com os valores limite de emissão (VLE) definidos para cada forno da SLM, e não unicamente pela optimização energética que estas representam.

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] SLM; “Declaração ambiental”; 2007;
- [2] StrikoWestofen; “Functional description”; Furnace type - MH II N2000/1500 eg;
- [3] Pedro Coelho, Mário Costa; “Combustão”; Orion;
- [4] Striko Westofen; “Manual de operação do forno”;
- [5] Filipe Almeida; Trabalho de Seminário; “Análise Teórica dos Consumos Energéticos dos Fornos da SLM - Factores de Controlo”; Março de 2009;
- [6] W. Trinks, M.H. Mawhinney, R.A. Shannon, R.J. Reed, J.R. Garvey; “Industrial Furnaces”; 6th edition;
- [7] J.M. Smith, H.C. Van Ness, M.M. Abbott; “Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química”; 7^a edição; LTC
- [8] Heiligenstaedt, Werner; “Thermique Appliquée aux Fours Industriels”; Dunod; 1971;
- [9] L. Lazic, A. Varga, J. Kizek; “Analysis of combustion characteristics in a aluminium melting furnace”; Metabk 44 (3) 195-199 (2005);
- [10] http://www.engr.colostate.edu/~allan/thermo/page12/adia_flame/Flamemain.html;
acedido a 19 de Janeiro de 2009;
- [11] Charles E. Baukal, Jr.; “Heat Transfer in Industrial Combustion”; CRC Press LLC 2000;
- [12] Belmira A.F. Neto; “Mikado: A decision support tool for pollution reduction in aluminium pressure die casting”; April 2007;
- [13] Peter Mullinger, Barrie Jenkins; Principles, Design and Operation; “Industrial and Process Furnaces”; Elsevier; 2008;
- [14] F. EL- Mahallawy, S. EL- Din Habik; Combustion Fundamentals; “Fundamentals and technology of combustion”; Elsevier; 2002;
- [15] Stanley I. Sandler; “Chemical, Biochemical, and Engineering Thermodynamics”; 4th edition;

OUTRAS REFERÊNCIAS CONSULTADAS

- European Commission; Institute for Prospective Technological Studies; “Energy Efficiency Techniques”; April 2006;
- R.H. Parker M.A., A.I.M., A.M.I.M.M.; “An Introduction to Chemical Metallurgy”; W.S. Owen, D.W. Hopkins, H.M. Finniston;

Institute for prospective technological studies (Seville), European commission; “Draft Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry”; January 2004;

Tianxiang Li, Mohamed Hassan, Kazunori Kuwana, Kozo Saito, Paul King; “Performance of secondary aluminum melting: Thermodynamic analysis and plant-site experiments”; Elsevier; Science Direct; 2005;

Doru M. Stefanescu; “Science and Engineering of Casting”; Kuwer Publicashions; 2002;

T. Poinso; “Adiabatic flame temperatures”; IMF Toulouse, 31400 Toulouse CEDEX; September 2005;

Tackes, George; “Maximize furnace efficiency to temper aluminum melt costs: Controlling energy, environmental and equipment performance of aluminum melting furnaces can improve melt quality and reduce melting costs.”; Modern Casting; January 2002;

Petter Mullinger, Barrie Jenkins; Principles, Design and Operation; “Indústrial and Process Furnaces”; Elsevier 2008;

ANEXO 1 - CALORES DE FORMAÇÃO UTILIZADOS NO CÁLCULO DOS CALORES DE REACÇÃO PADRÃO.

Tabela 20: Calores de formação padrão.

Composto	ΔH_{298}° (kcal/mole)	Composto	ΔH_{298}° (kcal/mole)
CH ₄	17,89 ^{a)}	O ₂	0 ^{a)}
C ₂ H ₆	-20,03 ^{b)}	CO ₂	-94,05 ^{a)}
C ₃ H ₈	-25,02 ^{b)}	CO	-26,42 ^{a)}
C ₄ H ₁₀	-30,07 ^{b)}	H ₂ O	-68,315 ^{a)}
C ₅ H ₁₂	-35,09 ^{b)}	NO	21,58 ^{a)}
C ₆ ⁺	0 ^{a)}	NO ₂	7,91 ^{a)}
N ₂	0 ^{a)}		

a) Valores retirados da referência bibliográfica [14].

b) Valores retirados da referência bibliográfica [15].

ANEXO 2 - CALORES ESPECÍFICOS DOS PRODUTOS DE COMBUSTÃO

Tabela 21: Capacidade calorífica específica dos produtos de combustão

	Capacidade calorífica específica (cal/deg mol)	Intervalo (K)
Cp, CO ₂	$10,55 + 2,16 \times 10^{-3}T - 2,04 \times 10^5 T^{-2}$ a)	298 - 2500
Cp, CO	$6,79 + 0,98 \times 10^{-3}T - 0,11 \times 10^5 T^{-2}$ a)	298 - 2500
Cp, N ₂	$6,66 + 1,02 \times 10^{-3}T$ a)	298 - 2500
Cp, H ₂ O	$7,17 + 2,56 \times 10^{-3}T + 0,08 \times 10^5 T^{-2}$ a)	298 - 2500
Cp, NO	$6,461 + 0,236 \times 10^{-2}T - 0,077 \times 10^{-5}T^2 + 0,087 \times 10^{-9}T^3$ b)	273 - 3800
Cp, NO ₂	$5,480 + 1,365 \times 10^{-2}T - 0,841 \times 10^{-5}T^2 + 1,880 \times 10^{-9}T^3$ b)	273 - 1500

a) Valores retirados da referência bibliográfica [14].

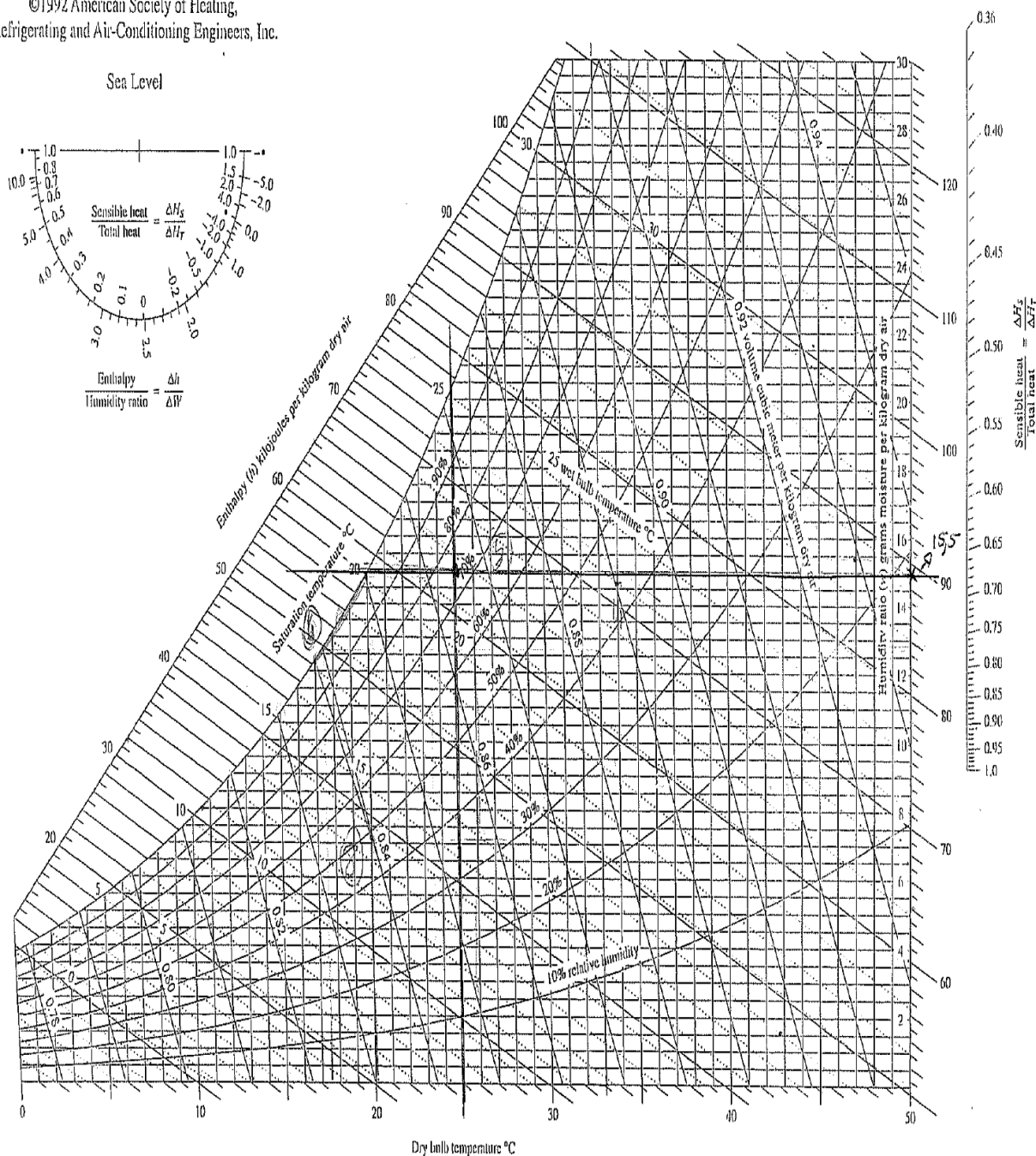
b) Valores retirados da referência bibliográfica [15].

ANEXO 3 - GRÁFICO DA HUMIDADE EM FUNÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA, E TEMPERATURA DO AR, PARA A PRESSÃO ATMOSFÉRICA (101,325 KPA)

ASHRAE Psychrometric Chart No. 1
Normal Temperature
Barometric Pressure: 101.325 kPa



©1992 American Society of Heating,
Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.



**ANEXO 4.1 - MONITORIZAÇÃO 1 DOS CONSUMOS DE GÁS NATURAL DO FORNO 7 DA SLM
 (15/04/2009)**

Hora	10h00		
Registo 1 (m³)	716937,3		
Lingotes (kg)	309	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	10h30		
Registo 2 (m³)	716970,3	Massa fundida até R2 (kg)	309
Lingotes (kg)	309	Sucata e gitos (kg)	364
Hora	11h00		
Registo 3 (m³)	717007,8	Massa fundida até R3 (kg)	982
Lingotes (kg)	789	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	11h30		
Registo 4 (m³)	717025,2	Massa fundida até R4 (kg)	1771
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	12h00		
Registo 5 (m³)	717068,0	Massa fundida até R5 (kg)	1771
Lingotes (kg)	309	Sucata e gitos (kg)	334
Hora	12h30		
Registo 6 (m³)	717101,7	Massa fundida até R6 (kg)	2414
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	13h00		
Registo 7 (m³)	717112,0	Massa fundida até R7 (kg)	2414
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	381
Hora	13h30		
Registo 8 (m³)	717149,8	Massa fundida até R8 (kg)	2795
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	343

Hora	14h00		
Registo 9 (m³)	717192,9	Massa fundida até R9 (kg)	3138

ANEXO 4.2 - MONITORIZAÇÃO 1 DOS CONSUMOS DE GÁS NATURAL DO FORNO 7 DA SLM (16/04/2009)

Hora	10h00		
Registo 1 (m³)	718594,3		
Lingotes (kg)	429	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	10h30		
Registo 2 (m³)	718626,5	Massa fundida até R2 (kg)	429
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	458
Hora	11h00		
Registo 3 (m³)	718668,6	Massa fundida até R3 (kg)	887
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	11h30		
Registo 4 (m³)	718698,6	Massa fundida até R4 (kg)	887
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	12h00		
Registo 5 (m³)	718719,5	Massa fundida até R5 (kg)	887
Lingotes (kg)	346	Sucata e gitos (kg)	262
Hora	12h30		
Registo 6 (m³)	718750,8	Massa fundida até R6 (kg)	1495
Lingotes (kg)	158	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	13h00		
Registo 7 (m³)	718775,0	Massa fundida até R7 (kg)	1653
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	540

Hora	13h30		
Registo 8 (m³)	718806,6	Massa fundida até R8 (kg)	2193
Lingotes (kg)	902	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	14h00		
Registo 9 (m³)	718852,7	Massa fundida até R9 (kg)	3095

ANEXO 4.3 - MONITORIZAÇÃO 1 DOS CONSUMOS DE GÁS NATURAL DO FORNO 7 DA SLM (17/04/2009)

Hora	10h00		
Registo 1 (m³)	720082,3		
Lingotes (kg)	272	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	10h30		
Registo 2 (m³)	720118,7	Massa fundida até R2 (kg)	272
Lingotes (kg)	272	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	11h00		
Registo 3 (m³)	720156,5	Massa fundida até R3 (kg)	544
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	469
Hora	11h30		
Registo 4 (m³)	720199,7	Massa fundida até R4 (kg)	1013
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	385
Hora	12h00		
Registo 5 (m³)	720233,8	Massa fundida até R5 (kg)	1398
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	12h30		
Registo 6 (m³)	720242,5	Massa fundida até R6 (kg)	1398
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-

Hora	13h00		
Registo 7 (m³)	720245,4	Massa fundida até R7 (kg)	1398
Lingotes (kg)	816	Sucata e gitos (kg)	115
Hora	13h30		
Registo 8 (m³)	720288,6	Massa fundida até R8 (kg)	2329
Lingotes (kg)	272	Sucata e gitos (kg)	239
Hora	14h00		
Registo 9 (m³)	720335,5	Massa fundida até R9 (kg)	2840

ANEXO 4.4 - MONITORIZAÇÃO 1 DOS CONSUMOS DE GÁS NATURAL DO FORNO 7 DA SLM (20/04/2009)

Hora	10h00		
Registo 1 (m³)	721937,1		
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	10h30		
Registo 2 (m³)	721963,9	Massa fundida até R2 (kg)	-
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	11h00		
Registo 3 (m³)	721968,0	Massa fundida até R3 (kg)	-
Lingotes (kg)	397	Sucata e gitos (kg)	209
Hora	11h30		
Registo 4 (m³)	721998,8	Massa fundida até R4 (kg)	606
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	117
Hora	12h00		
Registo 5 (m³)	722043,2	Massa fundida até R5 (kg)	723
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	507

Hora	12h30		
Registo 6 (m³)	722089,6	Massa fundida até R6 (kg)	1230
Lingotes (kg)	793	Sucata e gitos (kg)	220
Hora	13h00		
Registo 7 (m³)	722136,8	Massa fundida até R7 (kg)	2243
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	234
Hora	13h30		
Registo 8 (m³)	722170,9	Massa fundida até R8 (kg)	2477
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	104
Hora	14h00		
Registo 9 (m³)	722194,1	Massa fundida até R9 (kg)	2581

ANEXO 4.5 - MONITORIZAÇÃO 1 DOS CONSUMOS DE GÁS NATURAL DO FORNO 7 DA SLM (21/04/2009)

Hora	10h00		
Registo 1 (m³)	723384,4		
Lingotes (kg)	397	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	10h30		
Registo 2 (m³)	723422,8	Massa fundida até R2 (kg)	397
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	11h00		
Registo 3 (m³)	723436,7	Massa fundida até R3 (kg)	397
Lingotes (kg)	397	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	11h30		
Registo 4 (m³)	723462,5	Massa fundida até R4 (kg)	794
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	408

Hora	12h00		
Registo 5 (m³)	723504,8	Massa fundida até R5 (kg)	1202
Lingotes (kg)	795	Sucata e gitos (kg)	109
Hora	12h30		
Registo 6 (m³)	723544,6	Massa fundida até R6 (kg)	2106
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	96
Hora	13h00		
Registo 7 (m³)	723555,3	Massa fundida até R7 (kg)	2202
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	13h30		
Registo 8 (m³)	723577,6	Massa fundida até R8 (kg)	2202
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	309
Hora	14h00		
Registo 9 (m³)	723622,4	Massa fundida até R9 (kg)	2511

ANEXO 5 - FICHA DE AFINAÇÃO DE QUEIMADORES (PÁG. 3)

4.2 Afinação

- 1 - Abrir o ponto de medição de ar e o ponto de medição de gás
- 2 - Colocar a ponta do tubo do manómetro de pressão calibrado PIC 440 nos pontos de medição de ar e de gás e ler os valores de combustão ar / gás
- 3 - Os valores devem ser
 - no queimador de manutenção dos fornos de fusão 1 a 5 :
 - ar : 18 mbar + / - 4 mbar
 - gás : 20 mbar + / - 4 mbar
 - no queimador de fusão dos fornos de fusão 1 a 5 :
 - ar : 19 mbar + / - 4 mbar
 - gás : 22 mbar + / - 4 mbar
 - no queimador de manutenção dos fornos de fusão 6 e 7 :
 - ar : 3.5 mbar + / - 1 mbar
 - gás : 3 mbar + / - 1 mbar
 - no queimador de fusão dos fornos de fusão 6 e 7 :
 - ar : 12 mbar + / - 2 mbar
 - gás : 11.3 mbar + / - 2 mbar
- 4 - Se os valores não corresponderem, afinar a borboleta do ar para obter esses valores
- 5 - Depois de ter esses valores, ver a chama :
 - se ela está muito azul, é que o queimador está com muito ar ou pouco gás
 - se a chama está muito amarela, é que o queimador está com muito gás ou pouco ar
- 6 - Tirar fora o tubo do aparelho do ponto de medição
- 7 - Fechar os pontos de medição de ar e de gás.

Departamentos Receptores

DMI, DQ, DT

**ANEXO 6.1 - MONITORIZAÇÃO 2 DOS CONSUMOS DE GÁS NATURAL DO FORNO 7 DA SLM
(01/06/2009)**

Hora	10h00		
Registo 1 (m³)	753620,0		
Lingotes (kg)	687	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	10h30		
Registo 2 (m³)	753660,4	Massa fundida até R2 (kg)	687
Lingotes (kg)	406	Sucata e gitos (kg)	207
Hora	11h00		
Registo 3 (m³)	753700,7	Massa fundida até R3 (kg)	1300
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	97
Hora	11h30		
Registo 4 (m³)	753749,5	Massa fundida até R4 (kg)	1397
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	540
Hora	12h00		
Registo 5 (m³)	753798,5	Massa fundida até R5 (kg)	1937
Lingotes (kg)	1218	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	12h30		
Registo 6 (m³)	753847,6	Massa fundida até R6 (kg)	3155
Lingotes (kg)	406	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	13h00		
Registo 7 (m³)	753893,8	Massa fundida até R7 (kg)	3561
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	13h30		
Registo 8 (m³)	753940,2	Massa fundida até R8 (kg)	3561
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	433

Hora	14h00		
Registo 9 (m³)	753976,5	Massa fundida até R9 (kg)	3994

ANEXO 6.2 - MONITORIZAÇÃO 2 DOS CONSUMOS DE GÁS NATURAL DO FORNO 7 DA SLM (02/06/2009)

Hora	10h00		
Registo 1 (m³)	755261,2		
Lingotes (kg)	842	Sucata e gitos (kg)	100
Hora	10h30		
Registo 2 (m³)	755306,8	Massa fundida até R2 (kg)	942
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	11h00		
Registo 3 (m³)	755342,8	Massa fundida até R3 (kg)	942
Lingotes (kg)	424	Sucata e gitos (kg)	504
Hora	11h30		
Registo 4 (m³)	755385,2	Massa fundida até R4 (kg)	1870
Lingotes (kg)	419	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	12h00		
Registo 5 (m³)	755432,6	Massa fundida até R5 (kg)	2289
Lingotes (kg)	412	Sucata e gitos (kg)	282
Hora	12h30		
Registo 6 (m³)	755469,5	Massa fundida até R6 (kg)	2983
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	13h00		
Registo 7 (m³)	755478,8	Massa fundida até R7 (kg)	2983
Lingotes (kg)	435	Sucata e gitos (kg)	-

Hora	13h30		
Registo 8 (m³)	755528,1	Massa fundida até R8 (kg)	3418
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	516
Hora	14h00		
Registo 9 (m³)	755557,7	Massa fundida até R9 (kg)	3934

ANEXO 6.3 - MONITORIZAÇÃO 2 DOS CONSUMOS DE GÁS NATURAL DO FORNO 7 DA SLM (03/06/2009)

Hora	10h00		
Registo 1 (m³)	756874,3		
Lingotes (kg)	723	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	10h30		
Registo 2 (m³)	756893,8	Massa fundida até R2 (kg)	723
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	11h00		
Registo 3 (m³)	756895,3	Massa fundida até R3 (kg)	723
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	11h30		
Registo 4 (m³)	756903,6	Massa fundida até R4 (kg)	723
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	354
Hora	12h00		
Registo 5 (m³)	756936,5	Massa fundida até R5 (kg)	1077
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	12h30		
Registo 6 (m³)	756942,3	Massa fundida até R6 (kg)	1077
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-

Hora	13h00		
Registo 7 (m³)	756946,1	Massa fundida até R7 (kg)	1077
Lingotes (kg)	423	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	13h30		
Registo 8 (m³)	756979,8	Massa fundida até R8 (kg)	1500
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	14h00		
Registo 9 (m³)	756996,7	Massa fundida até R9 (kg)	1500

ANEXO 6.4 - MONITORIZAÇÃO 2 DOS CONSUMOS DE GÁS NATURAL DO FORNO 7 DA SLM (04/06/2009)

Hora	10h00		
Registo 1 (m³)	758294,2		
Lingotes (kg)	216	Sucata e gitos (kg)	187
Hora	10h30		
Registo 2 (m³)	758327,2	Massa fundida até R2 (kg)	403
Lingotes (kg)	355	Sucata e gitos (kg)	206
Hora	11h00		
Registo 3 (m³)	758373,1	Massa fundida até R3 (kg)	964
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	237
Hora	11h30		
Registo 4 (m³)	758405,3	Massa fundida até R4 (kg)	1201
Lingotes (kg)	417	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	12h00		
Registo 5 (m³)	758450,3	Massa fundida até R5 (kg)	1618
Lingotes (kg)	355	Sucata e gitos (kg)	327

Hora	12h30		
Registo 6 (m³)	758491,5	Massa fundida até R6 (kg)	2300
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	193
Hora	13h00		
Registo 7 (m³)	758518,5	Massa fundida até R7 (kg)	2493
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	13h30		
Registo 8 (m³)	758522,2	Massa fundida até R8 (kg)	2493
Lingotes (kg)	405	Sucata e gitos (kg)	179
Hora	14h00		
Registo 9 (m³)	758549,2	Massa fundida até R9 (kg)	3077

ANEXO 6.5 - MONITORIZAÇÃO 2 DOS CONSUMOS DE GÁS NATURAL DO FORNO 7 DA SLM (05/06/2009)

Hora	10h00		
Registo 1 (m³)	759844,1		
Lingotes (kg)	1054	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	10h30		
Registo 2 (m³)	759887,2	Massa fundida até R2 (kg)	1054
Lingotes (kg)	400	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	11h00		
Registo 3 (m³)	759914,9	Massa fundida até R3 (kg)	1454
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	11h30		
Registo 4 (m³)	759917,5	Massa fundida até R4 (kg)	1454
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	225

Hora	12h00		
Registo 5 (m³)	759965,8	Massa fundida até R5 (kg)	1679
Lingotes (kg)	380	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	12h30		
Registo 6 (m³)	759981,5	Massa fundida até R6 (kg)	2059
Lingotes (kg)	-	Sucata e gitos (kg)	-
Hora	13h00		
Registo 7 (m³)	759994,0	Massa fundida até R7 (kg)	2059