



Avaliação Energética do Forno de Fusão AV5

ANDREIA MICAELA MAGALHÃES GUEDES

Novembro de 2017



Avaliação Energética do Forno de Fusão AV5

BA Vidro, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento: Engenharia Química

Mestrado: Energia e Biorrefinarias

Unidade Curricular: Dissertação / Estágio

Andreia Micaela Magalhães Guedes

Orientação na empresa:

Eng^o Joaquim Campos

Eng^o Ricardo Conceição

Orientação no ISEP:

Eng^a Anabela Guedes

Eng^a Paula Neto

Novembro de 2017

Agradecimentos

Começo por agradecer à Engenheira Paula Neto e à Engenheira Anabela Guedes, as minhas orientadoras do ISEP, pela ajuda na elaboração da presente dissertação e disponibilidade para esclarecimento de dúvidas.

Agradeço ao Engenheiro Joaquim Campos pela oportunidade de realizar o estágio curricular na BA Vidro e por se ter mostrado sempre disponível para me ajudar.

Agradeço ao Engenheiro Ricardo Conceição e ao Senhor Manuel Paiva por me transmitirem os seus conhecimentos, acompanharem o meu percurso diariamente na empresa e terem-me ajudado em tudo ao que estava ao seu alcance.

A toda a equipa da Divisão de Composição e Fusão, na qual estive integrada durante o estágio curricular, o meu obrigado por todo o apoio que me deram e por me terem aceite como membro da equipa.

A todos os restantes colaboradores da BA Vidro que de uma forma, ou de outra, colaboraram nesta dissertação.

Ao Samuel Vasconcelos, João Melo e Roberto Oliveira, que também realizaram o estágio curricular na BA Vidro e acompanharam o meu percurso de perto.

Agradeço a todos os meus amigos, que me acompanharam ao longo dos 6 anos que passei no Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Por último, agradeço à minha família pelo apoio e pelo esforço que fizeram para que esta etapa fosse possível.

Sumário

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito da disciplina de Dissertação/Estágio (DIEST), para a conclusão do Mestrado em Engenharia Química, no ramo de Energia e Biorrefinarias. O trabalho foi realizado na direção fabril da empresa BA Vidro, na Divisão de Composição e Fusão, em Avintes, onde é feita a produção de embalagens de vidro, nomeadamente, garrafas de vidro para a indústria alimentar.

O trabalho desenvolvido teve como objetivo a avaliação energética de um dos fornos de fusão (AV5) da empresa e a determinação do ponto ótimo entre o consumo de gás natural e eletricidade. Este forno corresponde ao maior consumidor energético do processo de produção de embalagens.

Para ser alcançado o objetivo proposto, procedeu-se inicialmente ao estudo das características de um forno de fusão. Posteriormente, foi realizada uma avaliação energética do AV5 relativa ao ano de 2016, com a realização do balanço mássico e energético. Neste, foi obtido um valor de perdas térmicas de 12 423 883 kW no total do ano. A partir do balanço de energia, determinou-se a poupança energética ao nível de gás natural, variando a quantidade de excesso de ar. No ano estudado foi utilizado um excesso de 24% com um volume de gás natural de 0,453 m³/s. Foi considerado um excesso de 20%, 15% e o ar em proporções estequiométricas. Para 20% obteve-se o menor volume de gás natural, 0,220 m³/s, ou seja, corresponde a uma poupança de 20 131 m³/dia.

De seguida, foram determinados os diferentes indicadores de fusão, o consumo específico de energia, a intensidade carbónica e o custo específico de fusão. Para o primeiro, o valor médio anual foi de 0,099 tep/ton, para o segundo obteve-se valor médio anual de 2348 kgCO₂/tep e, por último, 95,8 €/ton.

Foram analisadas as variáveis predominantes no processo de fusão, com o intuito de ser avaliada a sua influência. As diferentes variáveis analisadas foram, a produção de vidro fundido (tiragem), a percentagem de vidro reutilizado (casco) como matéria-prima, o poder calorífico do gás natural e a humidade relativa do ar. A influência destas variáveis foi analisada com base em alterações no consumo específico de energia e no custo específico de fusão. A tiragem apresenta um intervalo entre 311 e 461 toneladas diárias e a percentagem de casco um intervalo entre 55 e 70%.

Relativamente à influência da incorporação de casco, o melhor consumo específico de energia foi obtido para o intervalo 67-70% de casco, para uma tiragem de 451-456 toneladas. Foi possível também concluir que o poder calorífico inferior apresenta uma

grande influência no consumo específico de energia, contrariamente à humidade relativa do ar. Dos diferentes consumos energéticos avaliados, o gás natural e a eletricidade, o que apresenta maior variação e influência no processo é o gás natural.

Para cada percentagem de casco, foram obtidas relações entre a quantidade de gás natural e eletricidade e a tiragem de vidro fundido. Para percentagens superiores a 62% de casco, relativamente ao consumo energético, o mais vantajoso é utilizar elevadas tiragens. Até 62%, o mais vantajoso é a utilização de tiragens inferiores.

Por fim, foi utilizada a ferramenta *Solver* para a obtenção de equações da reta, que relacionam a quantidade de gás natural e de eletricidade em função da tiragem, para diferentes percentagens de vidro reutilizado.

Palavras-chave: Fusão, Energia, Eletricidade, Gás Natural, Otimização, Casco.

Abstract

This current project was developed within the scope of the Dissertation/Internship (DIEST) discipline for the conclusion of the Master in Chemical Engineering - Energy and Biorefinery. The work was carried out in the factory direction of the company BA Vidro in the Division of Composition and Fusion, located in Avintes, where the production of glass containers is made, namely glass bottles for the food industry.

The main goal of the project developed was the energy evolution of the melting furnace (AV5) of the company and the determination of the optimal point between the consumption of natural gas and the power. This furnace is the major energy consumer in the process of packaging production.

For the initial goal to be achieved the characteristics of a melting furnace were studied. Subsequently an energy evaluation of the AV5 in the year of 2016 was performed, with the determination of the mass and energy balance. In this, a value of thermal losses of 12 423 883 kW were obtained in total for the year 2016. From the energy balance, energy savings were determined at the level of natural gas, by varying the amount of excess air. In the studied year, an excess of 24% was used with a natural gas volume of 0,453 m³/s. An excess of 20%, 15% and air were considered in stoichiometric proportions. For 20% the lowest volume of natural gas was obtained, 0,220 m³/s, that is, it corresponds to a saving of 20 131 m³/day.

Next, the different melting indicators were examined, such as the specific energy consumption, the carbon intensity and the specific cost of melting. For the former, the average annual value was 0,099 tep / ton, for the latter the average annual value was 2348 kgCO₂ / tep and, lastly, 95.8€/ton.

All the different predominant variables of the melting process were analysed to avail its influence. The different analysed variables were the production of melting glass (drawing), the percentage of reused glass (hull) as raw material, the natural gas calorific power and the relative humidity of the air. The influence of these variables was analysed based on changes in the specific energy consumption and the specific cost of melting. The drawing ranges from 311 to 461 tonnes per day and the hull percentage is in the range of 55 to 70%.

Regarding the influence of the hull incorporation the best specific energy consumption obtained was 67-70% hull range for a drawing range of 451-456 tonne. It was also possible to conclude that the lower calorific value has a great influence on the specific consumption of energy opposing to the relative humidity of the air. Of the different energy

evaluation, the natural gas and the electricity, the one that represents the biggest influence and variation on the process is the natural gas.

For each percentage of hull, it was obtained a relation between the quantity of natural gas and electricity and the drawing of molten glass. For percentages exceeding 62% of hull, comparing to energy consumption, the most advantageous is to use high runs. Up to 62%, the most advantageous is the use of lower runs.

Lastly, the Solver tool was used to obtain equations with related the quantity of natural gas and electricity in function of the run, for different percentages of reused glass.

Key Words: Melting, Energy, Electricity, Natural Gas, Optimization, Cullet.

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento	1
1.2.	Tema e Objetivos.....	1
1.3.	Breve História da Empresa	2
1.4.	Produção de Vidro	3
1.4.1.	Composição do Vidro	5
1.4.2.	Fusão das Matérias-Primas	6
1.4.3.	Moldação das embalagens de vidro	7
1.4.4.	Recozimento e Tratamentos de Superfície	9
1.4.5.	Inspeção e Controlo de Qualidade.....	10
1.4.6.	Decoração	10
1.4.7.	Embalagem	10
1.5.	Organização da Dissertação.....	11
2.	Forno de Fusão AV5.....	13
2.1.	Funcionamento do forno	13
2.1.1.	Geometria.....	16
2.1.2.	Correntes de Convecção	17
2.2.	Controlo da temperatura do forno	18
2.3.	Incorporação de casco	19
2.4.	Consumos Energéticos.....	19
2.4.1.	Gás Natural	20
2.4.2.	Eletricidade.....	21
3.	Balanço Energético ao Forno AV5.....	23
3.1.	Balanço Mássico	23
3.2.	Balanço Energético.....	25
3.2.1.	Aplicação do Balanço Energético	31
4.	Indicadores de Fusão	33
4.1.	Consumo Específico de Energia.....	33
4.2.	Intensidade Carbónica.....	34
4.3.	Custo Específico de Fusão	35
5.	Análise de dados	39
5.1.	Influência da Incorporação de Casco.....	39
5.1.1.	Consumo Específico de Energia.....	39
5.1.2.	Custo Específico de Fusão.....	43
5.2.	Influência da Tiragem	45

5.2.1.	Incorporação de Casco.....	45
5.2.2.	Consumo Específico de Energia.....	46
5.2.3.	Custo Específico de Fusão.....	48
5.3.	Influência do Poder Calorífico Inferior.....	49
5.3.1.	Consumo Específico de Energia.....	49
5.4.	Influência da Humidade Relativa.....	51
5.4.1.	Consumo Específico de Energia.....	51
5.5.	Estudo de Diferentes Incorporações de Casco.....	52
6.	Ponto Ótimo.....	59
7.	Conclusões e sugestões de trabalhos futuros.....	61
	Bibliografia.....	63
	Anexos.....	65
A.	Levantamento de Dados.....	65
B.	Balanços ao Forno AV5.....	69
C.	Indicadores de Fusão.....	83
D.	Análise Estatística.....	87
E.	Análise de Dados.....	91
F.	Ponto Ótimo.....	95

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Embalagens de vidro da BA Vidro e as diferentes cores comercializadas. [9]	3
Figura 1.2 – Arranjo atómico de um componente com estrutura cristalina (a) e de um com estrutura não cristalina, o vidro (b).	4
Figura 1.3 – Esquema representativo do ciclo do vidro. [3]	4
Figura 1.4 – Máquina IS.....	8
Figura 1.5 – Representação esquemática do método de moldação soprado-soprado. [8]	8
Figura 1.6 – Representação esquemática do método de moldação prensado-soprado. [8]	9
Figura 1.7 – Diferentes tipos de decoração utilizados nas embalagens da BA Vidro. [9]	10
Figura 2.1 – Representação esquemática de um forno de fusão regenerativo. [10]....	13
Figura 2.2 – Representação esquemática das correntes de entrada e de saída do forno de fusão AV5.	15
Figura 2.3 – Representação esquemática das duas zonas observadas no forno de fus	16
Figura 2.4 – Representação esquemática da transferência de calor a partir da chama.	17
Figura 2.5 – Representação esquemática das correntes de convecção do vidro e do perfil de temperatura do forno AV5.	17
Figura 2.6 - Representação gráfica do consumo do forno de fusão AV5, em tep, para o ano de 2016.....	19
Figura 2.7 – Representação esquemática da instalação elétrica do forno AV5.	21
Figura 3.1 – Representação esquemática das correntes envolvidas no balanço de massa.	23
Figura 3.2 – Representação esquemática das correntes de entrada e de saída do forno AV5, relativas ao balanço energético.....	25
Figura 4.1 – Representação gráfica do consumo específico para cada forma de energia consumida, ao longo do ano de 2016.....	34
Figura 4.2 – Representação gráfica da intensidade carbónica para o gás natural, em 2016, para o forno AV5.	35
Figura 4.3 – Representação gráfica da evolução do custo específico de fusão ao longo dos meses de 2016.	36

Figura 5.1 – Representação gráfica da relação entre as diferentes percentagens de incorporação de casco e o consumo específico de gás natural, para diferentes intervalos de tiragem.....	40
Figura 5.2 - Representação gráfica da relação entre as diferentes percentagens de incorporação de casco e o consumo específico de eletricidade, para diferentes intervalos de tiragem.....	42
Figura 5.3 - Representação gráfica da relação entre as diferentes percentagens de incorporação de casco e o consumo específico de energia, para diferentes intervalos de tiragem.....	43
Figura 5.4 – Representação esquemática da evolução do custo específico de fusão de acordo com a percentagem média de incorporação de casco.	44
Figura 5.5 – Representação esquemática da influência da tiragem na incorporação de casco usada, ao longo dos meses de 2016.	45
Figura 5.6 – Representação esquemática da relação entre a tiragem mensal e o consumo específico de gás natural, para o ano de 2016.	46
Figura 5.7 – Representação gráfica do CEE de eletricidade, em função da tiragem mensal.....	47
Figura 5.8 – Representação gráfica da relação entre a tiragem e o custo específico de fusão, para os meses de 2016.....	48
Figura 5.9 – Representação esquemática do poder calorífico do gás natural, em função do consumo específico de energia do mesmo, ao longo dos meses de 2016.	49
Figura 5.10 – Representação gráfica da relação entre a humidade relativa atmosférica e o consumo específico de energia, para os meses de 2016.....	52
Figura 5.11 - Representação gráfica da evolução do consumo específico de energia para o gás natural e eletricidade, em função da tiragem, para 55% de casco.....	53
Figura 5.12 - Representação gráfica da evolução do consumo específico de energia para o gás natural e eletricidade, em função da tiragem, para 60% de casco.....	54
Figura 5.13 - Representação gráfica da evolução do consumo específico de energia para o gás natural e eletricidade, em função da tiragem, para 65% de casco.....	55
Figura 5.14 – Representação gráfica da evolução do consumo específico de energia para o gás natural e eletricidade, em função da tiragem, para 70% de casco.....	56
Figura 6.1 – Representação gráfica da relação entre a quantidade de cada utilidade em função da tiragem, para 60% de casco.	60
Figura 6.2 - Representação gráfica da relação entre a quantidade de cada utilidade em função da tiragem, para 65% de casco.	60
Figura E.1 - Representação gráfica da evolução do consumo específico de energia para o gás natural e eletricidade, em função da tiragem, para 61% de casco.....	93

Figura E.2 - Representação gráfica da evolução do consumo específico de energia para o gás natural e eletricidade, em função da tiragem, para 62% de casco.....	93
Figura E.3 - Representação gráfica da evolução do consumo específico de energia para o gás natural e eletricidade, em função da tiragem, para 63% de casco.....	94
Figura F.1 – Representação da folha de cálculo com o exemplo da utilização do CEF.	95
Figura F.2 – Representação da folha de cálculo com a conversão do consumo das utilidades para kcal.	96
Figura F.3 – Restrições utilizadas no Solver.	97
Figura F.4 - Representação da folha de cálculo criada para a utilização do Solver.....	97

Índice de Tabelas

Tabela 1.1 - Componentes do vidro e a sua função.	5
Tabela 1.2 – Reações ocorridas durante o processo de fusão, para diferentes componentes.	6
Tabela 3.1 – Resultados obtidos para o balanço de massa realizado aos gases envolvidos no forno AV5.	24
Tabela 3.2 – Resultados obtidos para o balanço de massa realizado à produção de vidro fundido do forno AV5.	24
Tabela 3.3 – Resultados obtidos para o balanço de energia global ao forno AV5 para o ano de 2016, considerando as correntes envolventes no processo.	30
Tabela 3.4 – Variação na quantidade de ar de combustão para diferentes percentagens de ar em excesso e para o ar estequiométrico.	31
Tabela 3.5 – Resultados obtidos para o gás natural com diferentes percentagens de ar de combustão.	31
Tabela 4.1 – Fatores envolvidos na fusão no mês de março e novembro, do ano de 2016.	36
Tabela 5.1 – Gamas utilizadas para os diferentes intervalos de tiragem.	40
Tabela 5.2 - Produção de vidro fundido total para cada mês de 2016.	50
Tabela A.1 – Valores de casco e tiragens totais, para cada mês.	65
Tabela A.2 – Dados referentes ao gás natural, para cada mês do ano de 2016.	66
Tabela A.3 – Dados referentes à eletricidade, para cada mês do ano de 2016.	66
Tabela A.4 – Dados obtidos relativos à humidade relativa do ar atmosférico, em %, para os meses do ano de 2016, e a respetiva média mensal. [16].	67
Tabela A.5 – Dados obtidos relativos à temperatura do ar atmosférico, em OC, para os meses do ano de 2016, e a respetiva média mensal. [16]	68
Tabela B.1 - Propriedades de alguns componentes utilizados no forno de fusão. [17] [18] [19] [20].	69
Tabela B.2 – Resultados obtidos para a massa de gases de combustão formados no forno AV5 ao longo do meses de 2016.	70
Tabela B.3 – Resultados obtidos para a quantidade de matéria-prima fornecida ao forno AV5 ao longo dos meses de 2016.	70
Tabela B.4 – Resultados obtidos na caracterização dos efluentes gasosos do forno AV5, relativamente ao ano de 2016.	71
Tabela B.5 - Constantes tabeladas para a determinação da capacidade calorífica dos gases de combustão. [21].	74
Tabela B.6 – Valores obtidos para a massa de ar seco mensal, em kg.	76

Tabela B.7 – Resultados obtidos para a entalpia associada ao ar de combustão, para 24% de excesso de ar (com dados diretos da empresa), 15%, 20% e para o ar estequiométrico.	77
Tabela B.8 – Resultados obtidos para a humidade específica do ar de combustão referente a cada mês de 2016.	77
Tabela B.9 – Resultados obtidos para a entalpia associada à corrente de gases de combustão, para o ano de 2016.	78
Tabela B.10 – Resultados obtidos para a entalpia associada à matéria-prima.....	78
Tabela B.11 – Resultados obtidos para a entalpia associada ao ar de refrigeração. ..	79
Tabela B.12 - Resultados obtidos para o calor de reação, para o gás natural.....	79
Tabela B.13 – Resultados obtidos para a entalpia associada à tiragem.	80
Tabela B.14 – Resultados obtidos para a entalpia associada aos gases de combustão.	81
Tabela C.1 – Resultados obtidos para o consumo específico de gás natural e de eletricidade, para o ano de 2016.....	84
Tabela C.2 – Resultados obtidos para as emissões de gases com efeito de estufa e da intensidade carbónica.	85
Tabela C.3 – Custos médios para os diferentes produtos envolvidos no processo de fusão.....	85
Tabela C.4 – Resultados obtidos para o custo específico de fusão mensal.	86
Tabela D.1 – Resultados obtidos para a variabilidade da percentagem de incorporação de casco, para cada mês de 2016.	88
Tabela D.2 - Resultados obtidos para a variabilidade da percentagem de incorporação de casco, para cada mês de 2016.	89
Tabela E.1 - Consumos específicos para cada intervalo de produtividade e incorporação de casco. Valores referentes ao ano de 2016.....	92
Tabela F.1 – Resultados obtidos para o volume de gás natural e energia elétrica, a partir do Solver, para diferentes percentagens de casco e diferentes tiragens de vidro fundido.....	98

Nomenclatura

Siglas

Variável	Descrição
AV	Avintes
AE	Ajuda elétrica (eletricidade)
BA	Barbosa e Almeida
CEE	Consumo específico de energia
CEF	Custo específico de fusão
CV	Coeficiente de variação
DCF	Divisão de Composição e Fusão
DP	Desvio padrão
GN	Gás natural
IC	Intensidade carbónica
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
MP	Matéria-prima
Tep	Tonelada equivalente de petróleo
vf	Vidro fundido

Símbolos

Variável	Descrição	Unidades
A_{rcomb}	Ar de combustão	
A_{ramb}	Ar ambiente	
$\dot{A}gua_{fria}$	Água de arrefecimento à entrada do AV5	
$\dot{A}gua_{quente}$	Água de arrefecimento à saída do AV5	
A_{rfrio}	Ar de arrefecimento à entrada do AV5	
$A_{rquente}$	Ar de arrefecimento à saída do AV5	
Casco	Vidro reciclado na matéria-prima	% (m/m)
c_p	Calor específico	$\text{kJ}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$
$c_{p\dot{A}gua}$	Calor específico da água	$\text{kJ}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$
c_{pGN}	Calor específico do gás natural	$\text{kJ}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$
$c_{pAr\ seco}$	Calor específico do ar seco	$\text{kJ}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$
$c_{pAr\ amb}$	Calor específico do ar ambiente	$\text{kJ}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$
c_{pvidro}	Calor específico do vidro	$\text{kJ}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$
$c_{pVapor\ \dot{a}gua}$	Calor específico do vapor de água	$\text{kJ}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$
E_{queima}	Energia libertada na reação de combustão	kW
$Gases_{comb}$	Gases de combustão	
Hr	Humidade relativa	

H	Entalpia	kW
He	Entalpia à entrada	kW
Hs	Entalpia à saída	kW
$H_{\text{Gases comb}}$	Entalpia dos gases de combustão	kW
\dot{m}	Caudal mássico	ton/dia, Kg/h, Kg/s
\dot{m}_{GN}	Caudal mássico do gás natural	ton/dia, Kg/h, Kg/s
$\dot{m}_{\text{Ar amb}}$	Caudal mássico do ar ambiente	ton/dia, Kg/h, Kg/s
$\dot{m}_{\text{Gases comb}}$	Caudal mássico dos gases de combustão	ton/dia, Kg/h, Kg/s
\dot{m}_{Tiragem}	Caudal mássico de vidro fundido	ton/dia, Kg/h, Kg/s
\dot{m}_{Casco}	Caudal mássico de vidro reutilizado	ton/dia, Kg/h, Kg/s
\dot{m}_{MP}	Caudal mássico de matéria-prima	ton/dia, Kg/h, Kg/s
$\dot{m}_{\text{Ar seco}}$	Caudal mássico de ar seco	ton/dia, Kg/h, Kg/s
$\dot{m}_{\text{Vapor água}}$	Caudal mássico de vapor de água	ton/dia, Kg/h, Kg/s
$\dot{m}_{\text{Água fria}}$	Caudal mássico de água de arrefecimento à entrada	ton/dia, Kg/h, Kg/s
$\dot{m}_{\text{Água quente}}$	Caudal mássico de água de arrefecimento à saída	ton/dia, Kg/h, Kg/s
$\dot{m}_{\text{Ar frio}}$	Caudal mássico de ar frio à entrada	ton/dia, Kg/h, Kg/s
M	Massa	Ton, Kg
MM	Massa Molar	g/mol, Kg/kmol
N	Número de moles	Mol
PCI	Poder calorífico inferior	Kcal/m ³
P	Pressão	KPa, atm
Q	Energia térmica	kW
$Q_{\text{Ar comb}}$	Energia térmica do ar de combustão	kW
$Q_{\text{Ar seco}}$	Energia térmica do ar seco	kW
$Q_{\text{Vapor água}}$	Energia térmica do vapor de água	kW
Q_{GN}	Energia térmica do gás natural	kW
Q_{MP}	Energia térmica da matéria-prima	kW
$Q_{\text{Ar frio}}$	Energia térmica do ar de arrefecimento	kW
$Q_{\text{Água fria}}$	Energia térmica da água de arrefecimento à entrada	kW
$Q_{\text{Água quente}}$	Energia térmica da água de arrefecimento à saída	kW
Tiragem	Vidro fundido à saída do forno AV5	
T	Temperatura	°C
T_{ref}	Temperatura de referência	°C
T_s	Temperatura à saída	°C
$T_{\text{Ar seco}}$	Temperatura do ar seco	°C
$T_{\text{Vapor água}}$	Temperatura do vapor de água	°C
T_{GN}	Temperatura do gás natural à entrada do AV5	°C
T_{MP}	Temperatura da matéria-prima à entrada do AV5	°C
$T_{\text{Água fria}}$	Temperatura da água de arrefecimento à entrada	°C

$T_{\text{Água quente}}$	Temperatura da água de arrefecimento à saída	°C
$T_{\text{Ar frio}}$	Temperatura do ar frio à entrada	°C
U	Energia interna	kJ/Kg
V	Volume	m^3
\dot{v}	Caudal volumétrico	m^3/dia , m^3/s
\dot{v}_{GN}	Caudal volumétrico de gás natural	m^3/dia , m^3/s
W	Trabalho	kW
Y_e	Humidade específica	kg vapor água/kg ar seco
Y_m	Humidade molar	moles vapor/moles ar seco

Letras Gregas

Variável	Descrição	Unidades
ρ	Massa volúmica	Kg/m^3
λ	Calor latente de vaporização	kJ/Kg
$\lambda_{\text{Água}}$	Calor latente de vaporização da água	kJ/Kg
Δ	Variação	
Σ	Somatório	

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A presente dissertação enquadra-se no âmbito da unidade curricular de Dissertação/Estágio do Mestrado de Energia e Biorrefinarias, do Departamento de Engenharia Química, no Instituto Superior de Engenharia do Porto. O estágio teve a duração de 5 meses, com início em fevereiro de 2017 e termino em julho de 2017. O trabalho foi ser desenvolvido na Divisão de Composição e Fusão (DCF) da unidade fabril da empresa BA Vidro, localizada na Avenida Vasco da Gama, na vila de Avintes, no concelho de Vila Nova de Gaia. O horário de trabalho estipulado foi de cinco dias semanais, de segunda a sexta-feira, das 8h30 às 16h30.

1.2. Tema e Objetivos

O tema central do projeto desenvolvido consiste no estudo e otimização dos consumos energéticos de um dos fornos de fusão. O principal objetivo é determinar o ponto ótimo do consumo energético, de acordo com a quantidade de vidro reciclado (casco) e a produção de vidro fundido (tiragem). O forno de fusão em causa, designado por AV5, usa como combustível o gás natural e tem um auxílio de eletricidade. Assim, tendo como objetivo a otimização energética do forno, foi necessário definir um plano de trabalho que consistiu em,

- Estudar a instalação e o modo de funcionamento, tendo em conta as variáveis envolvidas;
- Identificar as correntes envolvidas na fusão e caracteriza-las energeticamente, realizando o balanço geral de massa e de energia do forno AV5;
- Efetuar um levantamento energético do forno, verificando os consumos de energia;
- Analisar a influência das diferentes variáveis e das várias percentagens de casco utilizadas;
- Construir a curva de otimização energética, de acordo com a quantidade de casco e tiragem (ponto ótimo);
- Otimizar o consumo com base nos resultados obtidos.

1.3. Breve História da Empresa

A sociedade Barbosa e Almeida foi criada no ano de 1912, vocacionada para a venda de garrafas de vidro no Porto e em Vila Nova de Gaia. No entanto, iniciou atividade em 1930 no Porto com uma tecnologia semi-automática, sendo adotada a designação de “Fábrica de Vidros Barbosa e Almeida, Lda.”. [1]

A unidade fabril em Avintes iniciou a sua laboração em 1969 com a utilização de dois fornos regenerativos. Estes permitem a recuperação de calor, apresentando-se com uma tecnologia avançada face aos tradicionais métodos de fusão das matérias-primas. No ano de 1979, a produção passou a contar com cinco máquinas do tipo IS, sendo uma delas computadorizada. Mais tarde, em 1983, foi instalado um novo forno regenerativo e feita a reconversão de equipamentos. Com isto, foram introduzidas novas tecnologias no ramo da moldagem computadorizada e alargando a automatização do controlo e qualidade do produto de todas as linhas de produção. Ainda na década de 80, em 1988, ocorreu a construção de um novo forno regenerativo, aumentando a capacidade instalada em 40%. Assim, a unidade fabril confirmou a sua posição de liderança na produção de embalagens de vidro em Portugal. [1]

A BA Vidro expandiu o seu mercado a partir da aquisição ao Estado da empresa “CIVE – Companhia Industrial Vidreira”, situada na Marinha Grande, com três fornos de fusão, em 1993. Em 1998, realizou-se a constituição da empresa espanhola “BA – Fábrica de Envases de Vidro Barbosa & Almeida, S.A” e foi construída uma fábrica com um forno em Villafranca de los Barros (Estremadura Espanhola). Ainda nos anos 90, em 1999, foi comprada por meio de oferta pública de aquisição, 54,3% do capital social da “Vidriera Leonesa, S.A” (VILESA), empresa com uma unidade fabril em Leon (Espanha), com dois fornos. Foi realizado um aumento progressivo de participação até aos 99% do capital social da empresa. [1]

Em 2012 a BA adquiriu o grupo polaco “Warta Glass”, permitindo assim a expansão geográfica para a Europa de leste. Isto representou a internacionalização do grupo. [1]

Atualmente, a sociedade denomina-se por “BA Vidro, SA” e a empresa “mãe” por “BA Glass I – Serviços de Gestão e Investimentos SA e apresenta um grande portefólio de vendas no Mercado Europeu. A expansão para a Europa Central permitiu criar sinergias entre operações e melhorar o serviço e entendimento do mercado. Assim, fazem parte do Grupo BA doze fábricas que produzem diariamente mais de 14 milhões de unidades de garrafas, frascos e boiões, para clientes da indústria alimentar e de bebidas. Estas unidades fabris encontram-se dispersas por toda a Europa sendo elas, três em Portugal (Avintes, Marinha Grande e Venda Nova), duas em Espanha, uma na Alemanha, duas

na Polónia, uma na Roménia, uma na Grécia, uma Bulgária e uma na Hungria. Nas diferentes unidades fabris são produzidas embalagens de diferentes cores, nomeadamente, âmbar, branco, branco azulado, branco *flint*, branco UV, preto, verde-escuro, verde-esmeralda, verde UV e *georgia green* (Figura 1.1). [1]



Figura 1.1 - Embalagens de vidro da BA Vidro e as diferentes cores comercializadas. [9]

Atualmente, a unidade fabril de Avintes conta com três fornos de fusão, com um total de 11 linhas de produção, para uma produção de, aproximadamente, 3 milhões de unidades diárias.

Ao longo do percurso realizado pela BA Vidro, esta tem aperfeiçoado um modelo de negócio inspirado nos valores do grupo (**HeART** – **H**umildade, **A**mbição, **R**igor e **T**ransparência, com **emoção**), que assenta na inovação permanente e no empreendedorismo interno.

1.4. Produção de Vidro

O vidro corresponde a um produto inorgânico, homogéneo e inerte, resultante da fusão das matérias-primas. O arrefecimento rápido do vidro impede a cristalização da sua estrutura, fazendo com que este se mantenha num estado transitório entre o cristalino e o totalmente amorfo. Deste modo, o vidro encontra-se incluído no grupo de materiais vítreos, ou seja, materiais não cristalinos. Este material vidro apresenta uma estrutura comparável a um líquido à temperatura ambiente. No entanto, é classificado com um sólido, pois à temperatura ambiente a sua viscosidade é de tal modo elevada que o leva a ser comparado a um sólido. [2]

O vidro é o único produto 100% reciclável, apresentando um ciclo de vida infinito. Este pode ser reciclado continuamente e utilizado para a produção de novas embalagens, sem perder as suas características e propriedades. [2] Isto deve-se ao facto de apresentar uma estrutura não cristalina, ou seja, não organizada, ao ser fundido e novamente solidificado não perde as suas características. A sua estrutura atómica não sofre alterações. Na Figura 1.2 está presente a estrutura atómica de um componente cristalino e a estrutura atómica do vidro.

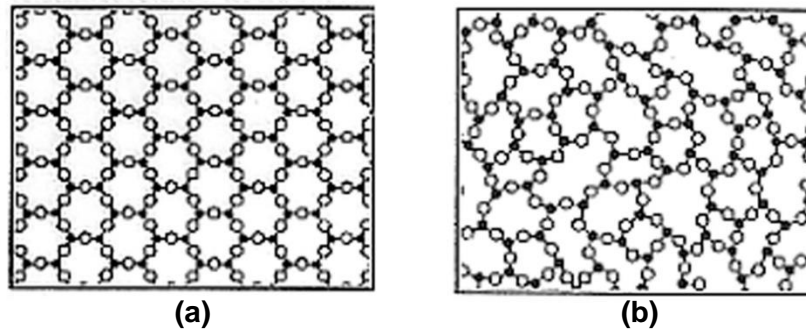


Figura 1.2 – Arranjo atómico de um componente com estrutura cristalina (a) e de um com estrutura não cristalina, o vidro (b).

O ciclo de vida do vidro apresenta encontra-se representado esquematicamente na Figura 1.3.

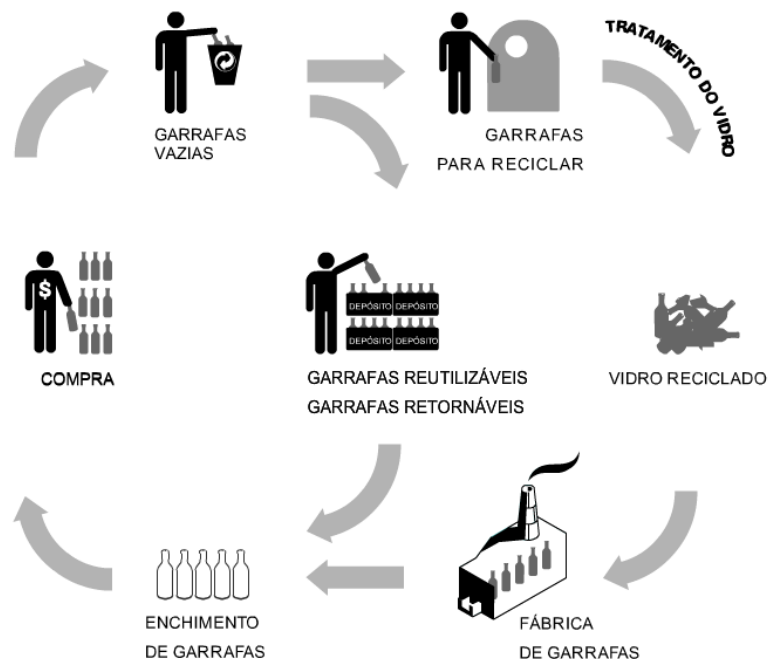


Figura 1.3 – Esquema representativo do ciclo do vidro. [3]

Uma embalagem de vidro vazia pode seguir dois percursos distintos. Caso se encontre em condições de ser utilizada, pode partir para o enchimento de produtos e ser vendida aos consumidores. Caso contrário, é direcionada para a reciclagem e utilizada como matéria-prima, numa unidade fabril, para a produção de novas

embalagens. Na unidade fabril existem diversas etapas de produção, que podem ser descritas nos pontos seguintes do presente capítulo.

1.4.1. Composição do Vidro

A composição do vidro, corresponde ao armazenamento, dosagem e mistura das diferentes matérias-primas, de acordo com a composição da massa a vitrificar. As matérias-primas, inicialmente, encontram-se armazenadas em silos e depois de misturadas seguem para os fornos, onde ocorre a fusão. [4], [5]

As principais matérias-primas utilizadas na produção de vidro são a areia, o carbonato de cálcio, o calcário e o casco de vidro. Este último, é proveniente da reciclagem de embalagens de vidro e dos resíduos de origem interna, desprezados ao longo da produção. No entanto, são utilizados outros componentes, em menores proporções, para serem obtidos, por exemplo, garrafas de vidro com cores específicas. Na Tabela 1.1 encontram-se os componentes utilizados como matérias-primas e a sua respetiva função. A quantidade destes componentes varia de acordo com o objetivo desejado para cada produção.

Tabela 1.1 - Componentes do vidro e a sua função.

Componentes	Fórmula	Função
Areia (Sílica)	SiO ₂	Vitrificante
Carbonado Sódio (Soda)	Na ₂ CO ₃	Fundente
Calcário	CaCO ₃	Fundente, Estabilizante
Dolomite	MgCaCO ₃	Estabilizante
Feldspato	Al ₂ O ₃ , SiO ₂	Estabilizante
Escórias	CaO, Al ₂ O ₃ , SiO ₃	Afinante, Estabilizante
Sulfato sódio	Na ₂ SO ₄	Afinante
Carvão	C	Agente Redutor
Óxido ferro	Fe ₂ O ₃	Corante (verdes, âmbar)
Sulfureto ferroso	FeS	Corante (verde escuro, âmbar)
Cromite	Cr ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	Corante (verdes)
Óxido cobalto	CoO	Corante Azul, Descolorante
Selénio Selénio zinco	Se SeZn	Descolorante
Casco	Vidro	Dissolvente líquido

As principais funções dos diversos componentes apresentados na Tabela 1.1, encontram-se descritas seguidamente,

- Vitrificante – componente que possui a capacidade de se transformar em vidro;

- Agente redutor – o carvão é utilizado devido à sua composição ser essencialmente constituída por carbono. Este constituinte confere ao carvão um elevado desempenho como agente redutor devido à sua grande afinidade com o oxigénio;
 - Descolorante – componentes que têm como objetivo a formação de vidro sem cor;
 - Estabilizante – utilizados para evitar a dissolução do vidro em água;
 - Afinante – utilizado com o objetivo de retirar as bolhas da massa de vidro fundido.
- [6]

O casco de vidro utilizado na produção de garrafas, sofre um pré-tratamento, com o objetivo de serem eliminadas as impurezas presentes no material reciclado. Os materiais mais frequentes são materiais orgânicos (plásticos), cerâmicos e metais. Estes podem afetar a qualidade do material vitrificado e por isso são retirados antes da mistura com os restantes componentes. São utilizados processos como a diferença de densidade e a separação granulométrica.

1.4.2. Fusão das Matérias-Primas

Nos fornos de fusão, construídos em material refratário, processa-se a fusão do material a uma temperatura 1500 e 1600 °C. O vidro liquefeito move-se ao longo do tanque e passa por uma fase de afinação. Nesta, procura-se garantir uma homogeneidade térmica de toda a massa fundida, sendo uma condição necessária para obter um produto de qualidade [5]. De seguida, o vidro fundido deixa o forno por um efeito “sifão”, sendo por isso criada uma diferença de pressão que direciona o fluxo de vidro para fora do tanque de fusão.

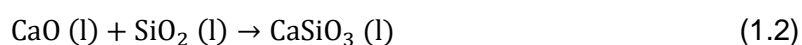
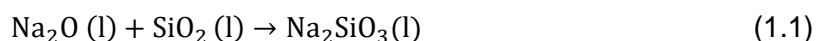
Ao longo do leito de fusão ocorrem diversas reações químicas e estas encontram-se representadas na Tabela 1.2, de acordo com os diferentes componentes da matéria-prima.

Tabela 1.2 – Reações ocorridas durante o processo de fusão, para diferentes componentes.

Componentes	Reações
Carbonato de sódio (Soda)	$\text{Na}_2\text{CO}_3 (\text{l}) \rightarrow \text{Na}_2\text{O} (\text{l}) + \text{CO}_2 (\text{g})$
Carbonato de Cálcio (Calcário)	$\text{CaCO}_3 (\text{l}) \rightarrow \text{CaO} (\text{l}) + \text{CO}_2 (\text{g})$
Dolomite	$\text{MgCaCO}_3 (\text{l}) \rightarrow \text{MgCaO} (\text{l}) + \text{CO}_2 (\text{g})$
Sulfato sódio	$\text{Na}_2\text{SO}_4 (\text{l}) \rightarrow \text{Na}_2\text{O} (\text{g}) + \text{SO}_3 (\text{g})$
Carvão	$\text{C} (\text{s}) + \text{O}_2 (\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2 (\text{g})$

As reações químicas em estado sólido desempenham um papel importante durante a fusão inicial. Cada matéria-prima funde a temperaturas elevadas, por exemplo os carbonatos fundem a 900°C, mas reações mútuas permitem a criação de líquido a temperaturas inferiores.

A reação química referente ao sulfato de sódio pode variar de acordo com as condições de temperatura ou estado da reação de oxidação-redução. Este elemento decompõe-se a 1300°C e pode libertar SO₃, SO₂ e O₂. O óxido de sódio (Na₂O) e o óxido de cálcio (CaO) são obtidos a partir da decomposição térmica, como demonstrado nas reações acima descritas. Estes combinam-se com a sílica (SiO₂) para a formação de silicatos, de acordo com as reações químicas 1.1 e 1.2.



Para além das reações descritas na Tabela 1.2, ocorrem reações de oxidação-redução para serem obtidas garrafas com determinada cor. No forno em estudo, o AV5, são produzidas garrafas de vidro de cor verde uva. Portanto, a reação de oxidação-redução mais comum é a de Fe²⁺/Fe³⁺, que influencia a cor. O catião Fe²⁺ provoca um tom azul e o catião Fe³⁺ um tom amarelo. Assim, vidro com ferro na sua composição, apresenta a cor verde devido à mistura dos dois catiões.

Após a fusão e reação das matérias-primas, a massa obtida é transformada em “gotas” de acordo com as especificações finais da garrafa como, por exemplo, o tamanho e o peso. Isto ocorre através de tesouras e da gravidade. Estas gotas de vidro podem então ser moldadas.

A presente dissertação incidiu na etapa de fusão, por esta ser a maior consumidora de energia no processo de embalagens de vidro. O forno de fusão utiliza como combustível o gás natural e a eletricidade. No Capítulo 2 irão ser apresentadas, detalhadamente, as características de um dos fornos de fusão da empresa (AV5), o maior consumidor de energia.

1.4.3. Moldação das embalagens de vidro

Após o processo de fusão, a massa fundida é introduzida nos moldes que lhe darão a forma final. A moldação de um artigo é realizada em duas fases. Na primeira, o vidro é introduzido no molde de principiar, localizado num dos lados da máquina, onde ocorre a formação da forma inicial (pré-forma). Na segunda, a pré-forma é transferida para o molde final, localizado no lado oposto da máquina, onde se dá a forma final do artigo. Os artigos, nesta etapa do processo de fabrico, encontram-se a uma temperatura de

600°C e ocorre numa máquina IS (máquina de setores individuais), apresentada na Figura 1.4. [4], [5] Com setores individuais, é possível realizar a paragem dos mesmos sem que a máquina interrompa o seu funcionamento completo, agilizando a produção e facilitando as intervenções para reparações e manutenção. Cada secção pode receber de uma a quatro gotas de vidro, produzindo assim até quatro embalagens de cada vez.

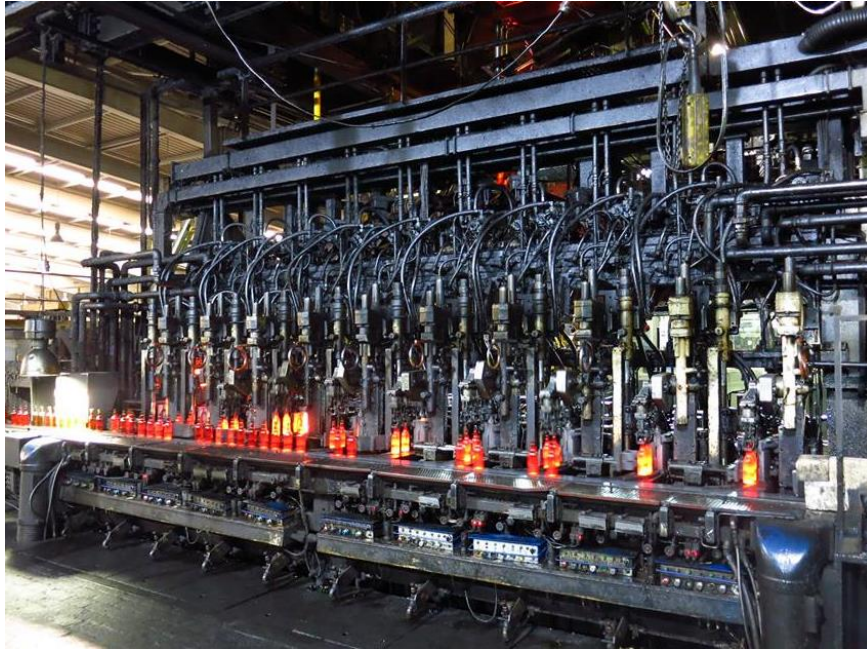


Figura 1.4 – Máquina IS.

O processo de moldação pode ocorrer por dois métodos distintos, sendo estes o soprado-soprado e o prensado-soprado. Estes encontram-se apresentados mais detalhadamente nos pontos seguintes.

- **Soprado-soprado**

Neste método, quando a massa é cortada pelas tesouras, a gota é encaminhada para um contra-molde e é assente por ação pneumática. De seguida, é originada a forma inicial do molde por ação de um sopro contrário ao primeiro. Assim, é obtida uma pré-forma da embalagem final, com a marisa formada (parte superior da garrafa). Na Figura 1.5 encontra-se representado o presente método. [7]

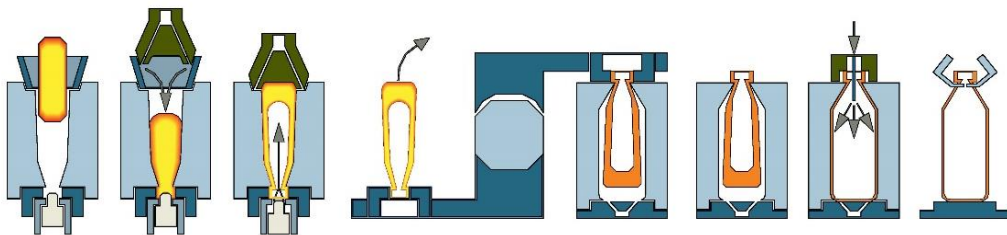


Figura 1.5 – Representação esquemática do método de moldação soprado-soprado. [8]

- **Prensado-soprado**

Contrariamente ao método soprado-soprado, no prensado-soprado, a pré-forma é obtida a partir de um punção metálico. Este empurra o vidro num contra-molde e confere-lhe a sua pré-forma. De seguida, para se obter a forma final, é obtida também por intermédio de um sopro, de ação pneumática. Este método é mais utilizado para embalagens com diâmetros superiores. Na Figura 1.6 encontra-se representado o presente método. [7]

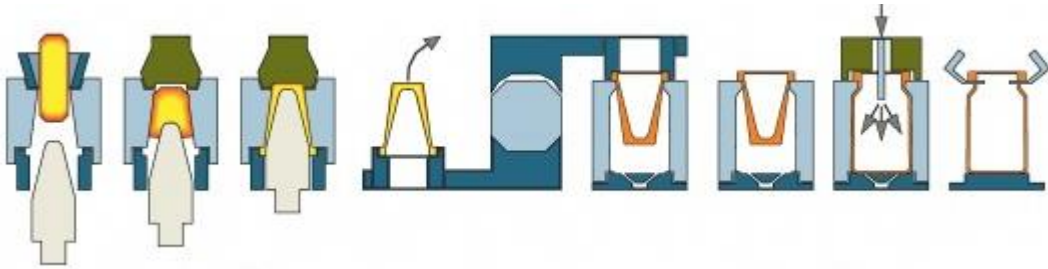


Figura 1.6 – Representação esquemática do método de moldação prensado-soprado. [8]

Após a formação das embalagens, estas são desviadas para um tapete de transporte, designado por tapete rápido, e são direcionadas para um tratamento térmico de superfície a quente.

1.4.4. Recozimento e Tratamentos de Superfície

Durante a moldação, o vidro contacta com as paredes dos moldes que se encontram a temperaturas relativamente baixas. As camadas externas dos artigos encontram-se bastante mais frias que as internas. Deste modo, é criado um diferencial de temperatura que tende a manter-se, devido à fraca condutibilidade do vidro. Assim, é efetuado um tratamento térmico, designado por recozimento, que consiste em homogeneizar termicamente toda a massa vítrea, de que resulta o desaparecimento de todas as tensões e um aumento da resistência mecânica da embalagem. Este processo ocorre a partir da aplicação de um componente vaporizado sobre a embalagem de vidro, uma película de óxido de estanho é formada na superfície da garrafa em poucos segundos. O recozimento ocorre numa arca de recozimento e a embalagem é aquecida a cerca de 550°C. De seguida, as embalagens são sujeitas a um arrefecimento controlado, para a eliminação de tensões internas criadas durante a moldagem. [4], [5]

Após a saída das embalagens da arca de recozimento, é aplicado um tratamento a frio para diminuir o atrito e evitar danos na superfície do vidro.

1.4.5. Inspeção e Controlo de Qualidade

Após a operação de recozimento, os artigos são direcionados para diversos mecanismos de inspeção de defeito. Com o objetivo de eliminar os artigos não conformes, por meios visuais, manuais e automáticos. Os artigos eliminados são novamente reaproveitados, sob a forma de casco. [4], [5]

1.4.6. Decoração

Na BA Vidro, a etapa de decoração tem uma elevada importância no processo de produção de garrafas de vidro. Esta decoração pode ser realizada ainda no momento da moldação, com gravações produzidas a partir dos moldes. Para além destas gravações, são utilizados outros processos de decoração, sendo estes,

- Fosagem – processo que retira a transparência do vidro;
- Serigrafia – processo de impressão de tintas cerâmicas;
- *Pressured Sensitive Label* (PSL) – aplicação de uma superfície transparente na embalagem sobre pressão, garantindo a aderência;
- *Sleeve* - envolvimento das embalagens com uma manga de plástico retráctil.

Na Figura 1.7, encontram-se as garrafas obtidas com os vários tipos de decoração.



Figura 1.7 – Diferentes tipos de decoração utilizados nas embalagens da BA Vidro. [9]

1.4.7. Embalagem

Para terminar, as embalagens de vidro são acondicionadas à saída das linhas de fabrico, por camadas, em paletes. Estas são cobertas com filme de plástico que se destina a proteger todas as unidades e facilitar o seu transporte. As paletes assim formadas são transportadas para o local de armazenagem. [4], [5]

1.5. Organização da Dissertação

O presente relatório está dividido em 7 capítulos. No presente capítulo, encontra-se uma introdução ao estágio e é apresentado um plano geral da produção da Empresa e da sua história.

No segundo capítulo, é feita uma descrição teórica do forno de fusão em estudo (AV5) relativamente ao seu funcionamento e formas de energia, consumo de gás natural e eletricidade.

No terceiro capítulo, é apresentada uma avaliação energética a todas as correntes envolvidas no processo de fusão e tentativas de otimização. Nesta avaliação energética encontram-se descritos o balanço mássico e o energético.

No quarto capítulo, encontra-se a determinação de indicadores envolvidos no processo. Sendo estes, o consumo específico de energia, a intensidade carbónica e o custo específico de fusão.

No quinto capítulo, é feita uma análise dos dados relativos à produção do forno AV5 em 2016, avaliando as diferentes variáveis que influenciam o processo.

No sexto capítulo, é apresentada a resolução para o objetivo proposto, a descoberta do ponto ótimo entre o consumo de gás natural e de eletricidade. Isto foi realizado com base numa ferramenta de Excel, o *Solver*, obtendo equações da reta para cada percentagem de incorporação de casco.

Por último, no sétimo capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas e sugestões para trabalho futuro.

2. Forno de Fusão AV5

A unidade fabril de Avintes conta com três fornos de fusão. No entanto, a presente dissertação tem como objetivo o estudo dos consumos energéticos do forno AV5. Este corresponde ao forno de maior área e de maior capacidade de produção de vidro fundido, com uma capacidade nominal de 370 toneladas por dia. O forno alimenta cinco linhas de produção de embalagens de vidro. A produção diária normalmente ultrapassa a sua capacidade nominal, sendo por isso importante o estudo dos seus consumos energéticos. Deste modo, ao longo do atual capítulo, são apresentadas e descritas detalhadamente as características físicas do forno AV5 bem como, as formas de energia utilizadas.

2.1. Funcionamento do forno

O forno de fusão corresponde a uma superestrutura onde ocorre uma reação de combustão, o seu interior é contruído em material refratário, para resistir ao ataque químico do vidro fundido a temperaturas elevadas. O forno em causa corresponde a um forno regenerativo de chama em U. Este encontra-se representado esquematicamente na Figura 2.1.

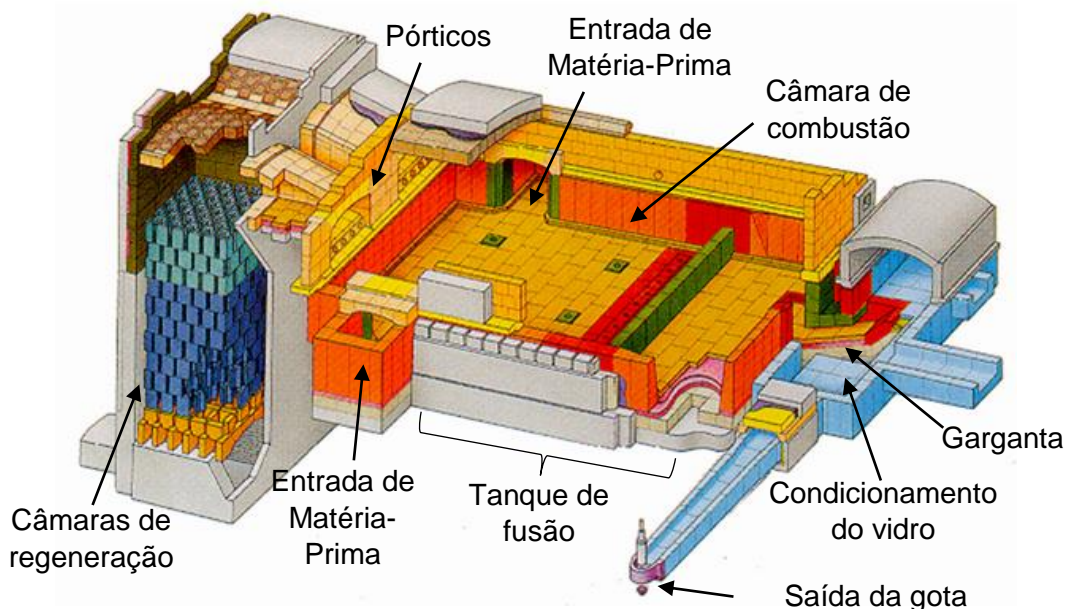


Figura 2.1 – Representação esquemática de um forno de fusão regenerativo. [10]

O forno de vidro apresentado é o centro das linhas de produção de vidro industrial. A tecnologia utilizada depende do tipo de vidro a produzir, no entanto o princípio de funcionamento é o mesmo.

Os fornos regenerativos, como o representado esquematicamente, utilizam sistemas de recuperação de calor para pré-aquecer o ar de combustão. Isto ocorre a partir de duas câmaras de regeneração, constituídas por tijolos refratários dispostos num padrão que permite o fluxo dos gases. Este sistema de regeneração armazena o calor proveniente dos gases de combustão, obtidos a partir da queima de gás natural. A utilização das duas câmaras, tem como princípio alternar as correntes de ar frio (ar ambiente) e de gases de combustão. Após a queima, os gases resultantes passam por uma das camaras, aquecendo-a. De seguida, o ar ambiente utilizado na combustão passa pela mesma e recupera o calor nela contido. Deste modo, o ar chega à camara de combustão a uma temperatura adequada, permitindo poupanças de energia e assim um menor gasto de combustível.

O processo de combustão no forno recorre a ciclos de inversões, que no forno AV5 são normalmente de 30 minutos. Em cada ciclo o ar de combustão entra numa das camaras de regeneração, sendo desse lado que irá ocorrer a queima do combustível. Em simultâneo, a outra camara é aquecida pelos gases resultantes, aquando a sua exaustão. Ao fim desse período de tempo, o processo é invertido, passando a camara, por onde foi feita a exaustão dos gases, a receber o ar de combustão.

As matérias-primas utilizadas na produção de vidro, são carregadas para o tanque de fusão, a partir de duas máquinas de enforma, localizadas na zona lateral do forno. Estas são introduzidas em fluxo contínuo e são levadas progressivamente até à temperatura de fusão, que varia entre os 1300 e 1500°C, de acordo com a composição da matéria-prima. Esta variação ocorre de acordo com a quantidade de vidro reutilizado, o casco. Quanto menor for a quantidade de casco e maior a quantidade de areia, maior será o ponto de fusão da mistura e, conseqüentemente, maior é a quantidade de combustível necessário fornecer ao forno. O processo de fusão, nunca é interrompido. Caso contrário, os resíduos de vidro iriam solidificar e destruir o próprio forno, sendo impossível liquidificar novamente o leito de vidro. Este processo é controlado e monitorizado em tempo real a partir de equipamentos especializados, no controle de temperatura, no nível do leito de vidro e na alimentação das próprias matérias-primas. O tanque de fusão corresponde à zona onde se encontra o leito de vidro.

Na câmara de combustão ocorre a reação de combustão, resultando uma chama. Esta apresenta uma forma em U, devido ao facto de inverter o sentido ao alcançar a parede frontal do forno. Para tal, o forno utiliza vários queimadores, onde o combustível é injetado na abertura da porta, sendo misturado com o ar e queimado sobre a superfície do vidro. Estes queimadores encontram-se, sob os pórticos, localizados entre as camaras de regeneração e a zona inicial do forno.

Por último, o vidro é condicionado para as diferentes linhas de produção, passando por uma zona denominada por garganta, e é transformado em gotas, para a posterior moldação. O tempo de residência do vidro no tanque de fusão varia de acordo com a dimensão do forno. No entanto, para o forno AV5 é considerado um tempo de residência de 24 horas. A quantidade de vidro fundido utilizado para a produção de embalagens, passando pela garganta, é designada por tiragem. Da matéria-prima até à tiragem, há uma perda entre 10 a 15%.

De forma a sintetizar o funcionamento do forno AV5, na Figura 2.2 encontra-se apresentado um esquema com as correntes envolvidas no processo de fusão do vidro.

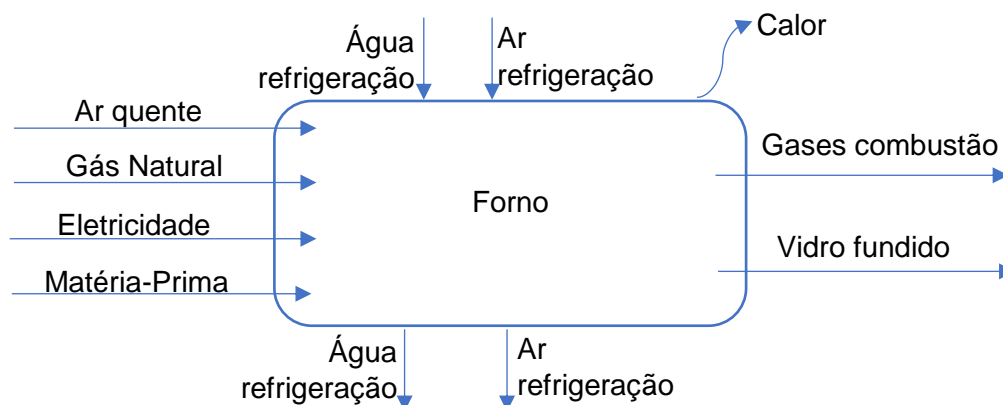


Figura 2.2 – Representação esquemática das correntes de entrada e de saída do forno de fusão AV5.

Para atingir as temperaturas necessárias a fusão da matéria-prima é necessário o fornecimento de energia, quer pela combustão de gás natural, com ar previamente aquecido, quer pela utilização de eletricidade. No forno, estão também envolvidas correntes relacionadas com o arrefecimento, sendo estas a água e o ar, que não interagem com o vidro fundido. O ar de arrefecimento é importante para evitar a degradação térmica do material constituinte do forno e encontra-se ao nível do leito de vidro, sendo aí o local onde existe um maior aquecimento das paredes do forno. Este ar de arrefecimento é também utilizado para o arrefecimento das máquinas de enforma. Relativamente à água de refrigeração, esta é usada em circuito fechado para o arrefecimento dos elétrodos, que fornecem a ajuda elétrica utilizada na fusão do vidro. Assim, no forno AV5, são considerados dois ventiladores para o ar de combustão, em que um se encontra operacional e o outro está de reserva, dois ventiladores para o ar de arrefecimento e um circuito fechado de água com um permutador de placas.

As perdas de calor nas paredes tornam a eficiência do forno mais baixa. Os fornos de vidro diferem, dos fornos de fusão utilizados em outras indústrias, principalmente pelo seu sistema de aquecimento (energia utilizada) e pela sua forma, ambos

influenciados pelas necessidades fabris. Estas diferenças têm como objetivo o menor impacto ambiental e o melhor aproveitamento de energia, já que neste processo o consumo energético é sempre muito elevado.

2.1.1. Geometria

Os fornos apresentam um formato dependendo do tipo de vidro a ser produzido. No entanto, para uma produção de embalagens de grande qualidade, é necessário um maior tempo de residência no forno. O AV5 apresenta uma área de 136 m² e o nível de vidro tem uma altura de 1,45 metros. O tamanho do forno influencia o número de queimadores necessários, tal como a sua localização.

O tanque de fusão do forno AV5 subdivide-se em duas zonas distintas, a primeira designada por zona de fusão, e a seguinte por zona de afinação (Figura 2.3).

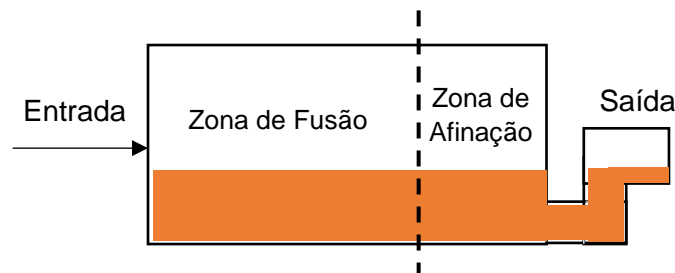


Figura 2.3 – Representação esquemática das duas zonas observadas no forno de fus

A primeira zona do forno, a zona de fusão, corresponde ao local onde ocorre a formação da massa vítrea. As matérias-primas encontram-se à superfície até fundirem e afundarem. Após a fusão, realiza-se a afinação, que visa a libertação de gases do vidro fundido (desgaseificação). Estes poderiam afetar a qualidade do produto final. É possível a libertação dos gases, nomeadamente SO₃, devido ao aumento da temperatura e, conseqüentemente, da diminuição da viscosidade do vidro. A zona de afinação, permite também a fusão de alguma massa que tenha ultrapassado a primeira zona sem fundir. É nesta fase que ocorre a formação da cor do vidro. A afinação apresenta assim uma elevada importância, pois o vidro fundido ainda não é utilizável, tem ainda de ser homogeneizado. As duas zonas são caracterizadas por correntes de convecção de vidro, criadas a partir de gradientes de temperatura, que criam fluxos de escoamento em regime laminar. Estas permitem uma maior homogeneização.

A geometria do forno apresenta uma elevada importância. O tanque do forno é projetado para que a última secção do forno, esteja pronta para o produto final. Para tal, a parte superior apresenta a forma de abóbada. Assim, a maior parte do calor transferido para o leito, a partir da combustão, ocorre por radiação. O calor produzido pela chama

irradia pelos refratários que compõem o forno e regressa para o leito de vidro, como demonstrado no esquema da Figura 2.4.

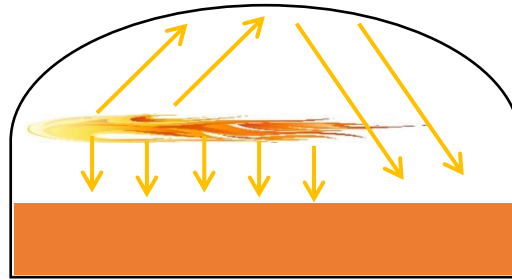


Figura 2.4 – Representação esquemática da transferência de calor a partir da chama.

2.1.2. Correntes de Convecção

No processo de fusão são criadas correntes de convecção de vidro. O objetivo destas correntes, criadas pelas altas temperaturas e liquidificação das matérias-primas, é reforçar pontos quentes. A barreira térmica impede eficazmente que o material não fundido atinga a garganta e assim o aumento do tempo mínimo de residência. A corrente de convecção imersa permite ainda manter uma circulação lenta de vidro, melhorando a transferência de calor da queima do gás natural. Com isto, consegue-se uma redução imediata no consumo de energia do impulso elétrico em aproximadamente 20%, combinada com uma redução de 60°C na temperatura do fundo. [11] Na Figura 2.5, encontram-se representadas as correntes de convecção formadas ao longo do forno, bem como o perfil de temperatura.

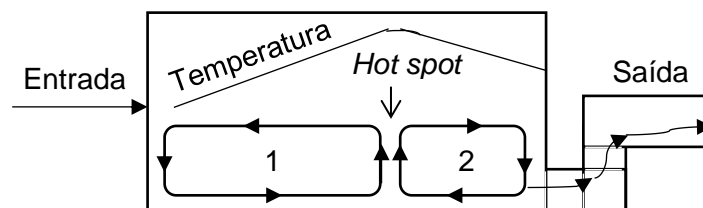


Figura 2.5 – Representação esquemática das correntes de convecção do vidro e do perfil de temperatura do forno AV5.

As correntes de convecção resultam em dois circuitos de vidro que se movem como apresentado na Figura 2.5. No primeiro circuito, o vidro recém-fundido afunda-se no leito, que ainda contém partículas sólidas. Estas têm de ser dissolvidas antes de atingirem a região onde os dois circuitos se juntam. Neste último ponto, o fluxo de vidro fundido é dirigido para cima, até à superfície, e atinge a zona de temperatura máxima (*hot spot*). Durante a ascensão, os produtos químicos decompõem-se e produzem gases de afinação. Estes subirão entre as outras bolhas de gás e de CO₂. Assim, o circuito primário, caracterizado na Figura 2.5 como 1, tem como função afundar as

matérias-primas sólidas e fundi-las, com a mistura de vidro recém-fundido. Após o tempo de residência nesta zona, ocorre o circuito secundário, caracterizado na Figura 2.5 como 2. Neste, as temperaturas são mais baixas e as bolhas de gás resultantes são dissolvidas. O vidro desce ao longo da parede final (mais fria) e alguma parte flui através da garganta, saindo do tanque de fusão para a zona de enfora, para os canais (*feeders*). A parte restante do vidro, retorna para a zona do ponto quente.[12]

Os dois circuitos desempenham um papel importante na operação do tanque de fusão, pois criam diferentes zonas, de diferente temperatura e ambiente químico. Isto é necessário para a preparação do vidro (homogeneização, purificação, acabamento e refinamento do vidro).

2.2. Controlo da temperatura do forno

Ao longo do forno de fusão é efetuado o controlo da temperatura, em diferentes pontos com diferentes termopares, de forma a ser verificado o seu bom funcionamento e fusão da matéria-prima. Das diferentes temperaturas obtidas, as que apresentam um maior destaque são a temperatura denominada por temperatura ótica e a temperatura da parede do forno.

A temperatura ótica é obtida a partir de um pirómetro e é a que melhor informa a temperatura das diferentes zonas do forno. Esta não é controlada continuamente, sendo lida durante a inversão da queima. Assim, não ocorrem interferências da chama no valor da temperatura registada.

A temperatura da parede do forno é obtida a partir de um termopar e encontra-se localizado na parede oposta às camaras de regeneração, ou seja, a zona frontal do forno, e acima do nível de vidro fundido. Esta temperatura, contrariamente à temperatura ótica, representa a temperatura na proximidade do termopar, visto estar a medir a temperatura no material refratário.

Os termopares são dispositivos elétricos utilizados na monitorização da temperatura, que ficam degradados ao longo do tempo devido ao ambiente de elevadas temperaturas. Por isso, a leitura manual da temperatura torna-se essencial para uma verificação do seu bom funcionamento.

Com a monitorização da temperatura, é possível controlar o combustível necessário a fornecer para ocorrer a fusão. No caso de as temperaturas descritas anteriormente se encontrarem muito elevadas, a energia fornecida pode ser reduzida.

2.3. Incorporação de casco

A incorporação de casco é um parâmetro importante no processo, pois influencia a temperatura necessária para a fusão. Com maiores quantidades de casco, a temperatura necessária é inferior. Isto deve-se ao facto das reações endotérmicas para formação de vidro já estarem completas e assim o ponto de fusão é inferior ao da principal matéria-prima, a areia. Esta apresenta uma temperatura de fusão de, aproximadamente 1700°C.

A incorporação de casco pode ser utilizada em diferentes percentagens. No entanto, para o forno AV5 verifica-se uma utilização de casco num intervalo de valores de 55% a 70%. Para o forno em questão, é utilizado casco de mistura, ou seja, de diferentes cores.

2.4. Consumos Energéticos

Os fornos de fusão são responsáveis por um grande consumo de energia no processo de produção de embalagens de vidro. Nesta dissertação é feito um estudo do consumo do forno de fusão AV5 da Fábrica de Avintes. Este corresponde ao forno de maior capacidade de produção e, conseqüentemente, de maior consumo energético. Para a realização do estudo, irão ser utilizados os dados relativos ao ano de 2016.

Para que ocorra a fusão de um leito de vidro, o forno utiliza duas formas de energia, o gás natural e a energia elétrica. Estas são utilizadas em proporções distintas, sendo por isso relevante determinar o ponto ótimo de consumo do forno, para ser realizada a otimização energética e económica. De forma a ser possível comparar a energia fornecida ao forno, na Figura 2.6 apresenta-se um gráfico representativo do consumo anual do forno AV5. Neste, foram considerados os consumos específicos em tonelada equivalente de petróleo (tep).

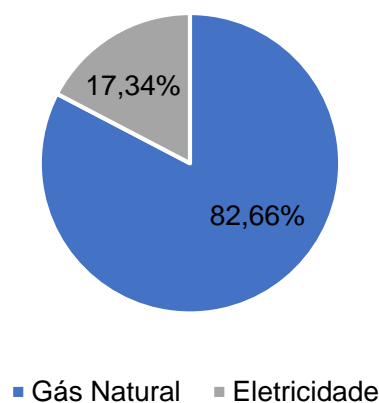


Figura 2.6 - Representação gráfica do consumo do forno de fusão AV5, em tep, para o ano de 2016.

O gás natural apresenta a maior percentagem de consumo energético relativamente ao consumo energético de eletricidade. A partir do gráfico da Figura 2.6, é possível verificar que o maior consumo de energia deriva do gás natural, com 82,6% do consumo total em toneladas equivalentes de petróleo. O consumo total em 2016 foi de 15124 tep. No Anexo B encontram-se discriminados os consumos, ao longo de cada mês, para o gás natural e para a eletricidade.

A injeção de gás natural é realizada a partir de queimadores, que se encontram localizados sob o pórtilo. O caudal de gás difere entre os queimadores, sendo distribuído de forma específica. O caudal decresce do queimador localizado mais externamente, para os queimadores mais próximos do centro do forno. Com isto, é facilitada a inversão da chama em forma de U. Este caudal é monitorizado continuamente e apresentado em m³/h ou m³/dia.

Para a comparação com o consumo da energia elétrica, é utilizada uma conversão para kcal/kg vf ou tep/kg vf.

O consumo energético é estudado de forma detalhada, para se verificar onde é possível diminuir o consumo sem afetar as propriedades necessárias para ser obtido o vidro fundido com a qualidade exigida.

Ao longo da presente dissertação irão ser avaliadas as diferentes variáveis envolvidas no processo de fusão, sendo estas:

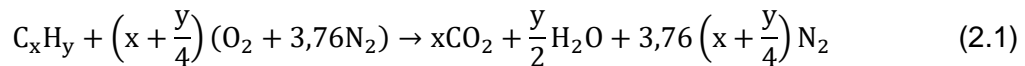
- Quantidade de vidro fundido diária (tiragem);
- Quantidade de vidro reciclado (casco);
- Poder calorífico inferior do gás natural;
- Humidade relativa do ar ambiente.

Estas serão avaliadas de acordo com o consumo específico das diferentes utilidades, o gás natural e a energia elétrica. De seguida, encontra-se uma breve descrição das duas utilidades consumidas no forno AV5.

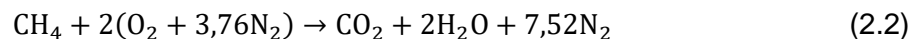
2.4.1. Gás Natural

No forno de fusão ocorre a combustão do gás natural, permitindo a formação da chama da zona superior do forno, injetado a partir de queimadores. Encontram-se instalados oito queimadores sob os pórticos, quatro em cada pórtilo. O princípio de funcionamento destes queimadores assenta numa mistura lenta entre o ar de combustão e o gás natural, mantendo-se a combustão completa e uma elevada emissividade da chama. O ar atmosférico é constituído por 21% de oxigénio e 79% de azoto.

A reação de combustão teórica entre o gás natural (combustível) e o ar ambiente (comburente) é dada pela seguinte equação 2.1.



Em que, C_xH_y representa os hidrocarbonetos presentes no gás natural. Os produtos de reação são as espécies químicas CO_2 , H_2O e N_2 (inerte), devido a ser uma reação de combustão completa. Numa reação incompleta, pode ainda ser encontrado CO . O gás natural é constituído diversos compostos, sendo maioritariamente constituído por metano, sendo a sua combustão completa representada pela equação 2.2. [13], [14]



Ao nível industrial, para ser assegurada uma combustão completa é admitido um excesso de ar, pois uma carência de ar traduz-se numa maior perda de rendimento. No entanto, ocorre a necessidade de existir um equilíbrio entre o excesso e o défice de ar. Um excesso de ar muito superior à quantidade necessária para assegurar uma combustão completa, implica um desperdício de gás natural, que acarreta maiores gastos económicos associados à fusão. Com um excesso de ar, na reação de combustão, é obtida uma chama oxidante de cor amarela. Caso contrario, com deficiência de oxigénio, seria obtida uma chama redutora de cor azul.

2.4.2. Eletricidade

Para além da combustão a partir de gás natural, o método mais eficiente de aquecimento é o uso de eléctrodos imersos no leito de vidro. Estes eléctrodos funcionam como forma de impulsionamento elétrico, existindo também fornos com a utilização apenas de eletricidade. A partir dos eléctrodos imersos, conectados a uma fonte de alimentação e a um transformador adequado, é possível transformar energia elétrica em energia térmica, sem perdas significativas no processo. Este incremento elétrico é uma forma eficiente de reduzir o consumo total de energia a fornecer aos fornos [11]. Os fornos de fusão apresentam uma importante restrição que é, a temperatura máxima que o material refratário suporta. Com a utilização de energia elétrica, é fornecida uma maior energia ao vidro sem provocar efeitos colaterais na estrutura [15].

O forno em estudo, o AV5, apresenta uma disposição dos eléctrodos característica das suas dimensões. Esta disposição encontra-se representada na Figura 2.7.

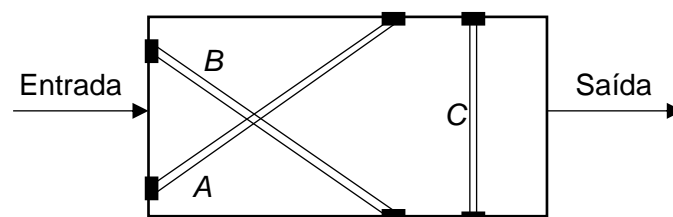


Figura 2.7 – Representação esquemática da instalação elétrica do forno AV5.

As três correntes elétricas apresentadas, *A*, *B* e *C*, apresentam diferentes capacidades nominais. A corrente *A* tem uma capacidade máxima nominal de 400 kW, a *B* de 400 kW e a *C* de 675 kW. No entanto, é importante fornecer uma maior energia elétrica na corrente iniciais, para favorecer a fusão da matéria-prima.

Uma má projeção do sistema de ajuda elétrica pode apresentar situações adversas no bom funcionamento da fusão. Pode criar correntes de convecção adversas e conflituantes, reduzindo o tempo de residência e promovendo correntes de convecção na zona frontal do forno, podendo afetar a qualidade do vidro. A utilização de um sistema bem projetado é capaz de cooperar com os efeitos desejados da queima e utilizar a libertação da energia elétrica para aumentar o tempo mínimo de residência. Com isto, é possível melhorar a qualidade do vidro em relação ao aparecimento de pedras, ou seja, componentes que se encontram na garrafa por solidificar sob a forma de pedra, e a homogeneidade. Ao ser libertada esta energia, sob a forma de impulso elétrico, é melhorada a função do disparo superior (o gás natural). [11]

Em fornos totalmente elétricos, toda a fusão é obtida a partir de eléctrodos imersos. O gás é utilizado apenas para o aquecimento inicial do forno ou como fonte de calor de emergência em caso de corte prolongado de energia. A fusão totalmente elétrica pode originar uma eficiência elétrica de até 85%, uma qualidade de vidro consistente, a diminuição da poluição ambiental e a utilização de fornos silenciosos, diminuindo o ruído. [11] Face à energia elétrica, o gás natural tem como vantagem o preço e fornecer energia ao leito vidro de forma mais rápida. A energia elétrica apresenta limitações ao nível da sua capacidade de transmitir energia e precisa de um maior período de tempo para aquecer o leito de vidro.

3. Balanço Energético ao Forno AV5

Com o intuito de serem determinados os pontos ótimos do consumo energético do forno AV5, foi importante inicialmente realizar uma avaliação energética ao mesmo. No presente capítulo é realizado o balanço mássico ao forno AV5 e de seguida o balanço energético do mesmo. Os balanços foram executados considerando todas as correntes de entrada e de saída do forno. Posteriormente, são apresentados os indicadores relativos ao consumo específico de energia, à intensidade carbónica e ao custo específico de fusão. Estes indicadores são o ponto de partida para estudos consecutivos. Os dados utilizados foram fornecidos pela empresa e correspondem ao ano de 2016. O forno AV5 tem um período de funcionamento de 24 horas por dia, 7 dias por semana, ou seja, no ano de 2016 trabalhou 365 dias.

No Anexo A estão presentes os valores necessários para a determinação do balanço mássico e energético. Estes correspondem aos dados da produção e consumos energéticos (obtidos a partir de dados fornecidos pela empresa) e dados sobre o ar ambiente (obtidos a partir de informações meteorológicas). No Anexo B encontram-se os resultados obtidos e exemplos de cálculo.

3.1. Balanço Mássico

O presente balanço tem como objetivo dar a conhecer o caudal mássico de todas as correntes envolvidas no processo de fusão do AV5, para serem utilizadas posteriormente no balanço energético. Das correntes envolvidas no forno de fusão, a única que é desconhecida é a corrente dos gases resultantes da combustão. Na Figura 3.1, está presente o esquema representativo das correntes necessárias considerar para a realização do balanço mássico.

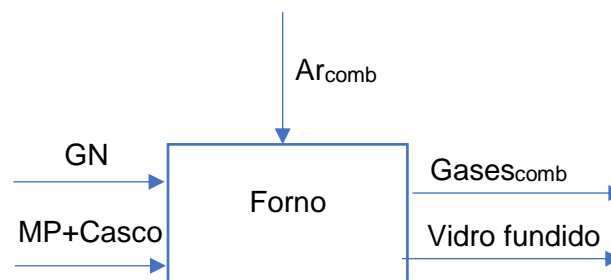


Figura 3.1 – Representação esquemática das correntes envolvidas no balanço de massa.

A partir do esquema apresentado na Figura 3.1 pode-se considerar o balanço apresentado na equação 3.1, relativamente às correntes gasosas.

$$\dot{m}_{GN} + \dot{m}_{Ar\ amb} = \dot{m}_{Gases\ comb} \quad (3.1)$$

Para além do balanço mássico aos gases deve ser considerada a quantidade de matérias-primas utilizadas para a produção de vidro.

Para a produção de vidro fundido, a tiragem, é utilizado casco e a restante matéria-prima. Em geral, são consideradas perdas de fusão de, aproximadamente, 10%. Assim, é considerada a equação 3.2.

$$\dot{m}_{\text{entrada}} = \dot{m}_{\text{tiragem}} * 1,10 \quad (3.2)$$

Após a realização do balanço de massa anual, foram obtidos os resultados da Tabela 3.1, referentes às correntes gasosas, e da Tabela 3.2, referentes às correntes de componentes sólidos.

Tabela 3.1 – Resultados obtidos para o balanço de massa realizado aos gases envolvidos no forno AV5.

Correntes	\dot{m} (kg/ano)	\dot{m} (kg/s)
Ar ambiente	10 935 694	0,346
Gás natural	11 182 028	0,354
Gases combustão	22 117 722	0,699

Na Tabela 3.2 encontram-se os resultados obtidos relativos à corrente de vidro.

Tabela 3.2 – Resultados obtidos para o balanço de massa realizado à produção de vidro fundido do forno AV5.

Correntes	\dot{m} (ton/ano)	\dot{m} (kg/s)
Entrada	168018	5,31
Saída	152744	4,83

3.2. Balanço Energético

O objetivo da presente dissertação também passou pela avaliação energética do forno de fusão AV5. Por essa razão, encontram-se discriminados no presente capítulo as diferentes formas de energia envolvidas na fusão. Após a apresentação das equações necessárias, encontram-se os principais resultados. Assim, na Figura 3.2 estão representadas todas as correntes de entrada e de saída do forno.

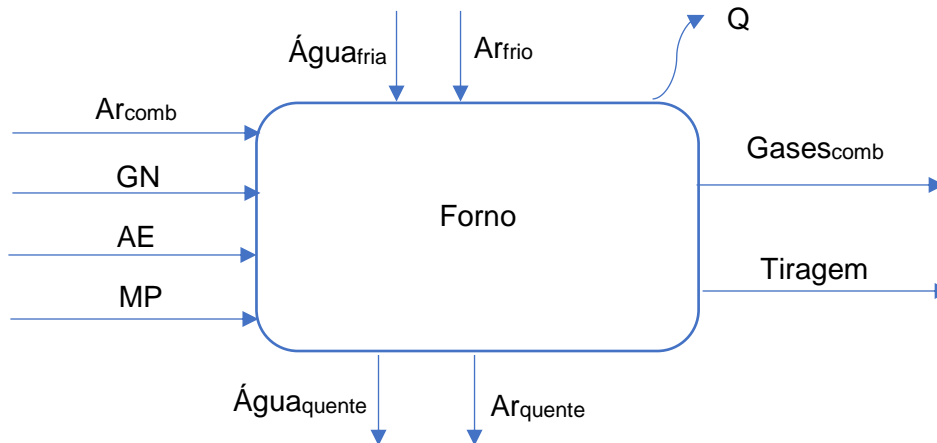


Figura 3.2 – Representação esquemática das correntes de entrada e de saída do forno AV5, relativas ao balanço energético.

A energia associada às várias correntes foi avaliada para que se pudessem estimar as perdas térmicas no forno. Para isto foi realizado o balanço que se encontra representado na equação 3.8.

$$Q + W + \sum H_e - \sum H_s = \Delta U \quad (3.8)$$

Em que, Q representa as perdas térmicas, W o trabalho realizado, H_e a entalpia à entrada de cada corrente do processo, H_s a entalpia à saída de cada corrente e ΔU a variação da energia interna do sistema.

É possível simplificar o balanço de energia global, considerando estado estacionário ($\Delta U = 0$) e o termo correspondente ao trabalho nulo (W).

O balanço de energia fica então,

$$Q = \sum H_s - \sum H_e \quad (3.9)$$

No caso de existir reação química é necessário considerar o calor colocado em jogo nessa reação. Deste modo, deve-se escrever o balanço da seguinte forma,

$$Q = \sum H_s + \Delta H_{298}^0 - \sum H_e \quad (3.10)$$

Energia à entrada (ΣH_e)

Os diferentes elementos utilizados nas correntes de entrada do forno, já apresentam uma determinada energia associada, de acordo com a sua temperatura de entrada e o seu caudal. Para as correntes de entrada, estas energias podem ser determinadas a partir dos pontos seguintes apresentados.

- Ar de combustão

Em relação ao ar de combustão utilizado na reação, tendo como estado de referência o ar seco a 0°C e água líquida a 0°C. O calor associado a esta corrente pode ser escrito sob a forma da equação 3.11 e 3.12.

$$H_{Ar\ comb} = H_{Ar\ seco} + H_{Vapor\ água} \quad (3.11)$$

$$H_{Ar\ comb} = [\dot{m}_{Ar\ seco} * c_{pAr\ seco} * (T_{Ar\ seco} - T_{ref})] + [\dot{m}_{Vapor\ água} * c_{pVapor\ água} * (T_{Vapor\ água} - T_{ref})] + [\dot{m}_{vapor\ água} * \lambda_{Água}] \quad (3.12)$$

Em que,

$\dot{m}_{Ar\ seco}$ e $\dot{m}_{vapor\ água}$ são os caudais mássicos de ar seco e vapor de água, respetivamente;

$c_{pAr\ seco}$ e $c_{pVapor\ água}$ são os calores específicos do ar seco e do vapor de água, respetivamente;

$T_{Ar\ seco}$, T_{ref} e $T_{Vapor\ água}$ são as temperaturas de ar seco, a referência e a de vapor de água, respetivamente;

$\lambda_{Água}$ é o calor latente de vaporização da água a 0°C.

A temperatura do ar seco pode ser considerada igual à temperatura do vapor de água, devido ao facto de ser uma mistura. Assim,

$$T_{Vapor\ água} = T_{Ar\ seco} \quad (3.13)$$

Relativamente ao termo correspondente ao caudal de vapor de água, este encontra-se diretamente relacionado com a humidade específica (Y_e) presente no ar atmosférico, de acordo com a equação 3.14.

$$Y_e = \frac{\dot{m}_{Vapor\ água}}{\dot{m}_{Ar\ seco}} * 100 \quad (3.14)$$

Assim, é possível simplificar a expressão referente ao calor do ar de combustão, obtendo-se a equação 3.15.

$$H_{Ar\ comb} = \dot{m}_{Ar\ seco} * [\lambda_{\acute{a}gua} * Y_e + (c_{p_{Ar\ seco}} + Y_e * c_{p_{vapor\ \acute{a}gua}}) * (T_{Ar} - T_{ref})] \quad (3.15)$$

- Gás natural

O calor associado ao caudal de gás natural à entrada do forno é dado pela equação 3.16.

$$H_{GN} = \dot{v}_{GN} * \rho_{GN} * c_{p_{GN}} * (T_{GN} - T_{ref}) \quad (3.16)$$

Em que,

\dot{v}_{GN} é o caudal volumétrico de gás natural;

ρ_{GN} é a

$c_{p_{GN}}$ é a capacidade calorífica de gás natural;

T_{GN} e T_{ref} é a temperatura de gás natural à entrada do processo.

- Eletricidade

Relativamente à eletricidade, a energia utilizada no balanço de energia corresponde aos valores fornecidos pela própria empresa. Assim, não é necessária a realização de cálculos.

- Matéria-prima

A corrente de matéria-prima, à entrada do forno, apresenta uma determinada energia, dada pela equação 3.18.

$$H_{MP} = \dot{m}_{MP} * c_{p_{vidro}} * (T_{MP} - T_{ref}) \quad (3.18)$$

Em que,

\dot{m}_{MP} é o caudal mássico da matéria-prima;

$c_{p_{vidro}}$ é a capacidade calorífica do vidro;

T_{MP} é a temperatura da matéria-prima à entrada do processo.

Em relação à capacidade calorífica da matéria-prima, pode ser considerado o valor referente ao vidro. Isto deve-se ao facto da matéria-prima ser constituída, maioritariamente, por vidro reutilizado.

- Água fria

Á água de arrefecimento à entrada do forno apresenta uma determinada energia, devido à sua temperatura. Esta é caracterizada pela equação 3.19.

$$H_{\text{Água fria}} = \dot{m}_{\text{Água fria}} * c_{p\text{Água}} * (T_{\text{Água fria}} - T_{\text{ref}}) \quad (3.19)$$

Em que,

$\dot{m}_{\text{Água fria}}$ é o caudal mássico de água de arrefecimento;

$c_{p\text{Água fria}}$ é a capacidade calorífica da água de arrefecimento;

$T_{\text{Água fria}}$ é a temperatura da água de arrefecimento.

Na determinação do balanço energético não foi considerada esta corrente por falta de dados referentes ao caudal de água.

- Ar frio

A partir das características do ventilador utilizado para o fornecimento do ar de arrefecimento é possível saber o caudal de ar utilizado tal como a sua temperatura. Assim, o ar pode também ser caracterizado pela equação 3.15, descrita anteriormente.

$$H_{\text{Ar frio}} = \dot{m}_{\text{Ar frio}} * [\lambda_{\text{Água}} * Y_e + (c_{p\text{Ar seco}} + Y_e * c_{p\text{Vapor água}}) * (T_{\text{Ar}} - T_{\text{ref}})]$$

Em que,

$\dot{m}_{\text{Ar frio}}$ é o caudal de ar de arrefecimento;

$c_{p\text{Ar frio}}$ é a capacidade calorífica do ar de arrefecimento;

$T_{\text{Ar frio}}$ é a temperatura do ar de arrefecimento.

Calor da reação (ΔH_{298}°)

Durante a reação de combustão é produzida uma determinada quantidade de energia, dependendo do poder calorífico do gás natural. Assim, a energia produzida durante a queima pode ser calculada pela equação 3.20.

$$\Delta H_{298}^{\circ} = \text{PCI} * \dot{V}_{\text{GN}} \quad (3.20)$$

Em que,

ΔH_{298}° é a energia obtida na reação de combustão;

PCI é o poder calorífico inferior do gás natural;

\dot{V}_{GN} é o volume de gás natural fornecido ao forno de fusão.

Energia à saída (ΣH_s)

Em relação as correntes de saída, por saírem do forno a elevadas temperaturas, apresentam uma elevada energia, que pode ser determinada a partir dos pontos seguintes.

- Tiragem

O calor associado à corrente de vidro fundido, utilizado na produção de embalagens, pode ser determinado a partir da equação 3.21.

$$H_{\text{Tiragem}} = \dot{m}_{\text{Tiragem}} * c_{p\text{Vidro}} * (T_{\text{Tiragem}} - T_{\text{ref}}) \quad (3.21)$$

Em que,

\dot{m}_{Tiragem} é o caudal mássico da tiragem, ou seja, de vidro fundido;

T_{Tiragem} é a temperatura do vidro fundido à saída do forno.

- Gases de combustão

A corrente de gases de combustão apresenta uma elevada importância no processo de fusão. O calor presente nesta corrente, irá ser reaproveitado para o aquecimento do ar ambiente. Devido à composição dos gases de combustão, a determinação da entalpia da corrente é determinada a partir da equação 3.22.

$$H_{\text{Gases comb}} = \int_{T_{\text{ref}}}^{T_s} (\dot{m}_{\text{Gases comb}} * c_{p\text{Gases comb}}) dT \quad (3.22)$$

Em que,

$H_{\text{Gases comb}}$ é a entalpia presente nos gases de combustão;

T_s é a temperatura à saída dos gases.

A capacidade calorífica molar dos gases de combustão é dada pelas equações 3.23.

$$c_p = a + b * T + c * T^2 + d * T^3 \left[\frac{\text{cal}}{\text{mol.K}} \right] \quad (3.23)$$

- Água quente

A corrente de água fria ao passar pelo forno, retira calor a determinadas zonas do forno, o que provoca o seu aquecimento. Deste modo, é possível determinar a energia térmica da água à saída do forno a partir da equação 3.34.

$$H_{\text{Água quente}} = \dot{m}_{\text{Água quente}} * c_{p\text{Água}} * (T_{\text{Água quente}} - T_{\text{ref}}) \quad (3.24)$$

Em que,

$\dot{m}_{\text{Água quente}}$ é o caudal mássico de água quente, ou seja, após a sua passagem à volta do forno AV5;

$T_{\text{Água quente}}$ é a temperatura à qual a água quente abandona o forno AV5.

Na determinação do balanço energético não foi considerada esta corrente por falta de dados referentes ao caudal de água.

- Ar quente

A corrente de ar frio, após ser lançada sob as paredes externas do forno, perde-se para o ar ambiente. Deste modo, não é possível quantificar o calor retirado ao forno, por não ser possível determinar a sua temperatura.

Na Tabela 3.3 encontram-se os valores resultantes do balanço de energia global ao forno AV5. Para tal, foram consideradas todas as correntes de entrada e de saída do mesmo, sendo então possível determinar as perdas térmicas do referido forno no ano de 2016.

Tabela 3.3 – Resultados obtidos para o balanço de energia global ao forno AV5 para o ano de 2016, considerando as correntes envolventes no processo.

Correntes	Entrada (kW/ano)	ΔH_{298}^0 (kW/ano)	Saída (kW/ano)
Ar combustão	50	198 683	---
Gás natural	186		---
Eletricidade	12 208 120	---	---
Matéria-prima	46	---	---
Tiragem	---	---	2 594
Gases combustão	---	---	4 885
Ar arrefecimento	24 278	---	---
Água arrefecimento	---	---	---
Total	12 232 680	- 198 683	7 480

Após a determinação da energia presente nas correntes envolvidas no processo de fusão, é possível determinar a energia perdida em 2016, a partir da equação 3.25.

$$\begin{aligned}
 Q &= \sum \text{Saída} - \Delta H_{298}^0 - \sum \text{Entrada} = 7\,480 - 198\,683 - 12\,232\,680 \\
 &= -12\,423\,883 \text{ kW/ano}
 \end{aligned}
 \tag{3.25}$$

3.2.1. Aplicação do Balanço Energético

Com a determinação do balanço energético ao forno AV5 é possível otimizar a quantidade de gás natural utilizada no processo. Para tal, é também necessário determinar o excesso de ar utilizado na combustão e a sua quantidade estequiométrica. A determinação da quantidade de ar em excesso está presente no Anexo B.3.2, tendo sido obtido 24% de excesso de ar. Deste modo, no balanço de energia, é possível obter diferentes caudais de gás natural, mantendo todas as condições utilizadas inicialmente, inclusive as perdas de calor obtidas. Isto é possível devido ao facto das condições de operação em termos de temperatura de operação do forno serem as mesmas, então é de admitir que as perdas térmicas se manteriam. Para tal, foram testadas diferentes percentagens de ar em excesso, 20% e 15%, e a quantidade de ar estequiométrico. Na Tabela 3.4 encontra-se a variação na quantidade de ar utilizado e na Tabela 3.5 os resultados obtidos para o volume de gás natural.

Tabela 3.4 – Variação na quantidade de ar de combustão para diferentes percentagens de ar em excesso e para o ar estequiométrico.

Meses	$\dot{m}_{Ar\ comb}$ (kg/s)			
	24%	20%	15%	Estequiométrico
Janeiro	0,381	0,369	0,354	0,308
Fevereiro	0,328	0,318	0,305	0,265
Março	0,353	0,342	0,327	0,285
Abril	0,329	0,318	0,305	0,265
Maiο	0,244	0,236	0,226	0,197
Junho	0,334	0,323	0,310	0,269
Julho	0,365	0,353	0,338	0,294
Agosto	0,349	0,338	0,324	0,282
Setembro	0,348	0,337	0,323	0,280
Outubro	0,347	0,336	0,322	0,280
Novembro	0,343	0,332	0,318	0,276
Dezembro	0,362	0,350	0,335	0,292

Tabela 3.5 – Resultados obtidos para o gás natural com diferentes percentagens de ar de combustão.

Meses	V_{GN} (m ³ /s)			
	24%	20%	15%	Estequiométrico
Janeiro	0,453	0,220	1,976	1,973

A partir dos resultados apresentados na Tabela 3.5, verifica-se que para uma poupança energética o ideal é ser utilizada uma percentagem de excesso de ar de 20%. Para valores a partir de 15%, o volume de gás natural utilizado passa a ser superior, para manter as mesmas condições de operação. Com uma redução de apenas 4% de ar de combustão, é obtida uma redução de 0,233 m³/s, ou seja, 20 131 m³/dia.

4. Indicadores de Fusão

Na avaliação energética é importante analisar os indicadores respetivos, que permitem obter uma ideia geral de como o processo se está a comportar e da sua estabilidade. Assim, no presente capítulo, encontram-se apresentados os resultados para o consumo específico de energia, para a intensidade carbónica e para o custo específico de fusão. Os três indicadores utilizados foram determinados mensalmente. No Anexo C encontram-se presentes os exemplos de cálculo para os indicadores de fusão.

4.1. Consumo Específico de Energia

O consumo específico representa um indicador energético, que permite relacionar o consumo de energia com a produção. Este consumo é caracterizado pela equação 4.1.

$$CEE = \frac{\text{Energia}}{\text{Produção}} \left(\frac{\text{tep}}{\text{ton}} \right) \quad (4.1)$$

A produção, em toneladas, refere-se à tiragem obtida no forno, ou seja, o vidro fundido obtido como produto final. Para a determinação do consumo específico de energia, foram considerados os valores de produção e de energia referentes ao ano de 2016, a partir do somatório dos valores mensais de produção e de energia. Estes encontram-se apresentados no Anexo A.2. Os valores obtidos para o consumo específico de energia encontram-se no Anexo C.1.

A partir dos resultados obtidos, foi feita uma análise para cada mês relativamente a cada uma das formas de energia fornecida ao forno, o gás natural e a eletricidade. Nestes relacionou-se o consumo específico de energia com a tiragem, ou seja, a produção de vidro. A Figura 4.1, relaciona o consumo específico global, com o consumo específico obtido para cada forma de energia

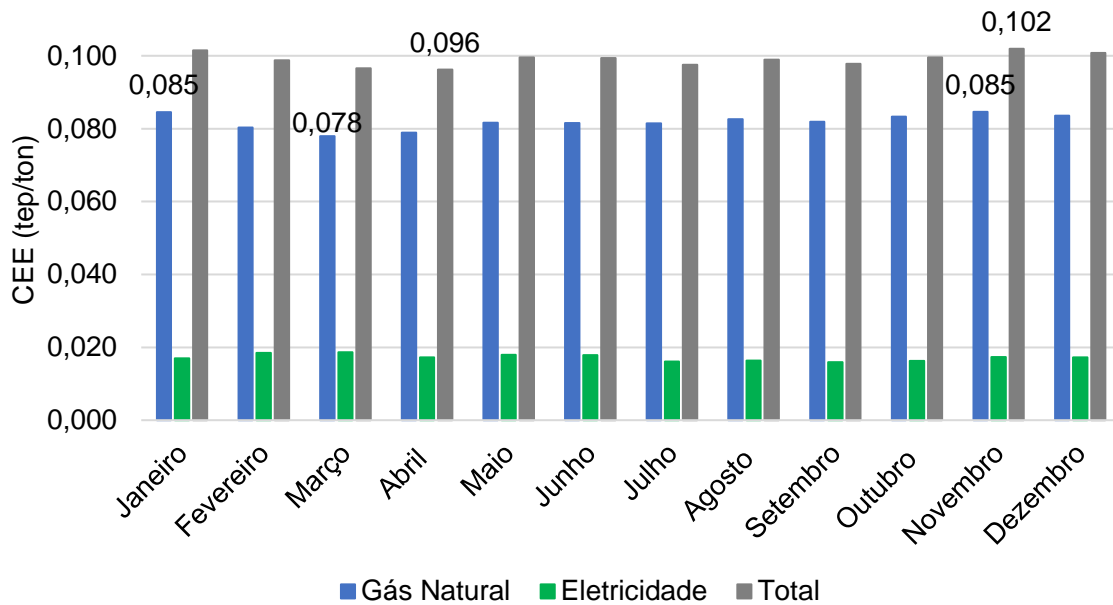


Figura 4.1 – Representação gráfica do consumo específico para cada forma de energia consumida, ao longo do ano de 2016.

Como se pode observar pela Figura 4.1, de um modo geral, o consumo específico apresenta alguma estabilidade ao longo do ano de 2016.

O gás natural é a fonte de energia com maior contribuição para o consumo específico.

O mês correspondente ao maior consumo específico global foi novembro, com um consumo específico de 0,102 tep/ton. Contrariamente, abril representa o mês com menor consumo específico global, com um valor de 0,096 tep/ton.

Novembro corresponde também ao mês em que foi utilizado um maior consumo específico de gás natural, com um valor de 0,085 tep/ton, tal como no mês de janeiro. No entanto, março corresponde ao mês com menor consumo específico de gás natural, com 0,078 tep/ton. Relativamente à eletricidade, foi utilizado um maior consumo em março, com um valor de 0,0186 tep/ton, e um menor consumo em setembro, com 0,0159 tep/ton.

4.2. Intensidade Carbónica

A intensidade carbónica corresponde a um indicador energético, que representa o quociente entre a emissão de gases com efeito de estufa (GEE) e o consumo de energia, e pode ser calculado pela equação 4.2.

$$IC = \frac{GEE}{Energia} \left(\frac{kgCO_2}{tep} \right) \quad (4.2)$$

O estudo sobre a intensidade carbónica incide apenas no gás natural, sendo o único combustível utilizado com emissão de gases com efeito de estufa. Assim, na Figura 4.2

encontra-se representada graficamente a intensidade carbónica do gás natural ao longo do ano de 2016. Os valores obtidos podem ser consultados no Anexo C.

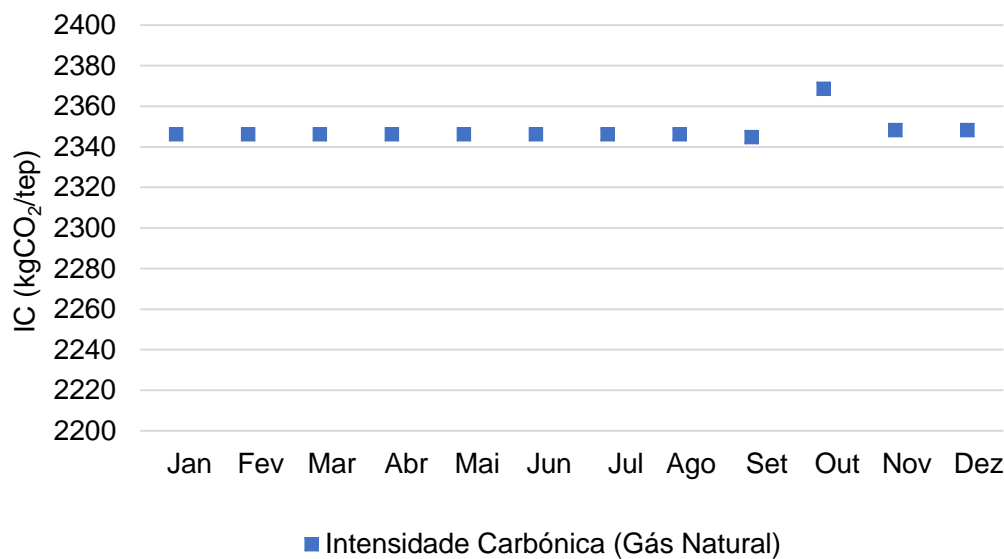


Figura 4.2 – Representação gráfica da intensidade carbónica para o gás natural, em 2016, para o forno AV5.

Como é possível verificar, a intensidade carbónica ao longo do ano de 2016 encontra-se estável, sem alterações significativas. No entanto, no mês de outubro verifica-se um maior aumento, com 2368,6 kgCO₂/tep.

Para o ano estudado, para a intensidade carbónica total é de 28180,5 kgCO₂/tep e a média anual é de 2348,4 kgCO₂/tep.

4.3. Custo Específico de Fusão

O custo específico de fusão (CEF) corresponde a um indicador económico, que permite relacionar o preço associado à produção de vidro fundido. Este indicador é dado pela equação 4.3.

$$\text{CEF} = \frac{\text{Preço casco} + \text{Preço MP} + \text{Preço GN} + \text{Preço AE}}{\text{Produção}} \left(\frac{\text{€}}{\text{ton}} \right) \quad (4.3)$$

Na determinação deste indicador foi considerado um preço médio relativo ao casco, à restante matéria-prima, ao gás natural e à eletricidade, apresentados no Anexo c, na Tabela C.3. Estes preços médios foram fornecidos pela empresa. Deste modo, não são consideradas as variações relativas ao mercado. O preço de cada elemento varia apenas de acordo com a quantidade utilizada do mesmo. A evolução deste indicador ao longo dos meses de 2016 encontra-se apresentada no gráfico da Figura 4.3. Para a construção do gráfico, procedeu-se da seguinte forma,

- Somatório do volume de gás natural, para cada mês;
- Somatório da energia elétrica por mês;
- Somatório da produção de vidro fundido por mês;
- Média da percentagem de incorporação de casco;
- Multiplicação dos valores totais mensais pelo respetivo custo e da percentagem média de casco também pelo seu custo.

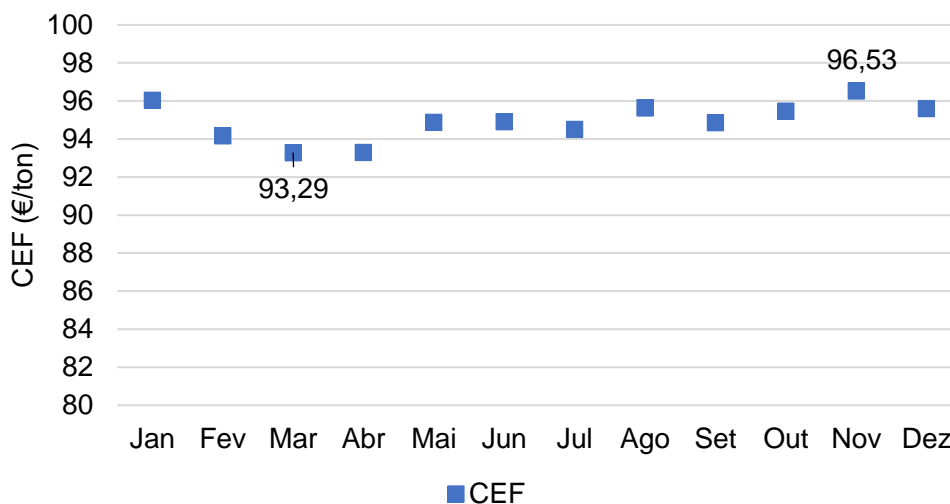


Figura 4.3 – Representação gráfica da evolução do custo específico de fusão ao longo dos meses de 2016.

A partir da Figura 4.3, é possível verificar que o custo específico de fusão não sofre alterações muito significativas ao longo dos meses. O mês com maior CEF corresponde a novembro, com 96,53 €/ton, e o mês com menor CEF é março com 93,29 €/ton. Assim, ocorreu a diferença apenas de, aproximadamente, 3 €/ton. No entanto, é crucial verificar as diferenças ocorridas ao longo destes dois meses, de forma a ser possível verificar a razão de tal diferença, mesmo que pouco significativa. Para tal, na Tabela 4.1, estão presentes os valores dos diferentes fatores envolventes na fusão relativos a março e novembro.

Tabela 4.1 – Fatores envolvidos na fusão no mês de março e novembro, do ano de 2016.

Fatores	Março	Novembro
CEF (€/ton)	93,29	96,53
Tiragem (ton/mês)	13 371	12 094
Casco médio (%)	66	62
Gás Natural (m ³)	1 144 980	1 124 090
Eletricidade (kW)	1 158 080	976 800

Observando a Tabela 4.1, verifica-se que o mês de março apresenta valores superiores em todos os fatores. Em março foram produzidas mais 1277 toneladas que

no mês de novembro, foram utilizados mais 20890 m³ de gás natural, 181280 kW de eletricidade e uma percentagem de incorporação de casco média também superior. No entanto, corresponde ao mês com menor custo específico de fusão. É possível concluir que, apesar de os custos aumentarem, por serem utilizadas maiores quantidades, aumentando também a produção de vidro, é possível reduzir o custo referente a cada tonelada de vidro.

Como a tiragem é maior em março era de prever um maior consumo de gás natural e de energia elétrica. Isto poderia levar a um CEF igual nos dois meses. No entanto, verificando-se uma diminuição do CEF no mês de março, então é porque esse aumento não é proporcional com a variável mais importante do processo, a tiragem. Por outro lado, o facto de em março se usar uma percentagem de casco maior leva a que o ponto de fusão do vidro baixe e portanto também vai permitir que o aumento de gás natural verificado não seja tao evidente.

Relativamente aos custos de cada elemento presente no cálculo do indicador, das duas utilidades a eletricidade é a que apresenta maiores custos, e o custo do casco também é inferior ao da restante matéria-prima.

5. Análise de dados

Na determinação do principal objetivo desta dissertação, torna-se fundamental avaliar a influência das diversas variáveis inerentes ao processo de fusão. Assim, é possível avaliar quais as alterações a efectuar e quais as mais vantajosas. As variáveis consideradas são:

- Percentagem de incorporação de casco;
- Tiragem de vidro fundido;
- Poder calorífico inferior do gás natural;
- Humidade relativa do ar.

As diferentes variáveis do processo serão analisadas de acordo com a sua influência no consumo específico de energia e no custo específico de fusão.

Pretende-se analisar os dados referentes ao ano de 2016, e atuar no sentido de otimizar o consumo energético de gás natural e de eletricidade. Os dados fornecidos pela empresa foram, percentagem de incorporação de casco, tiragem, consumo energético de cada utilidade e o poder calorífico inferior do gás natural. Estes valores encontram-se apresentados no Anexo A.

No caso do PCI e da percentagem de casco, foi efetuada uma análise estatística para averiguar se os valores médios mensais destas variáveis podem ser utilizados nos cálculos. Assim, é possível verificar se são valores representativos da amostragem. Esta análise é efetuada no Anexo D.

5.1. Influência da Incorporação de Casco

A incorporação de casco pode ser realizada numa elevada gama de percentagens. No ano de 2016 foi utilizada uma gama de 55% a 70% de casco. É importante verificar a influência da quantidade de casco ao nível do consumo específico de energia e do custo específico de fusão.

5.1.1. Consumo Específico de Energia

Para o estudo da influência da incorporação de casco no consumo específico de energia, foram construídas figuras a partir da utilização de intervalos de percentagem de casco. As percentagens foram agrupadas em intervalos de 3%, por não ser uma variação significativa e assim, ser facilitada a análise dos dados fornecidos. Os intervalos considerados foram, 55-58%, 59-62%, 63-66% e 67-70%. Deste modo, foram

construídas figuras, separadamente, para as duas formas de energia, o gás natural e a eletricidade. Estes encontram-se em função da tiragem. Tal como para a percentagem de casco, a tiragem também foi analisada em intervalos de 5 toneladas. Esta escolha deve-se à elevada gama de produção e também à verificação que 5 toneladas de vidro fundido não serem obtidos resultados com variação significativa na produção. Os intervalos considerados estão presentes na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Gamas utilizadas para os diferentes intervalos de tiragem.

Gama	1	2	3	4	5	6	7	8
Tiragem (ton/dia)	[311-316]	[341-346]	[346-351]	[356-361]	[366-371]	[371-376]	[376-381]	[381-386]
Gama	9	10	11	12	13	14	15	16
Tiragem (ton/dia)	[386-391]	[391-396]	[396-401]	[401-406]	[406-411]	[411-416]	[416-421]	[421-426]
Gama	17	18	19	20	21	22	23	24
Tiragem (ton/dia)	[426-431]	[431-436]	[431-436]	[436-441]	[441-446]	[446-451]	[451-456]	[456-461]

As gamas criadas foram utilizadas na construção das Figuras 5.1, 5.2 e 5.3, referentes à influência da incorporação de casco no consumo específico de energia

- Gás Natural

Na Figura 5.1 está presente a relação das diferentes percentagens de incorporação de casco com o consumo específico de energia, para o gás natural.

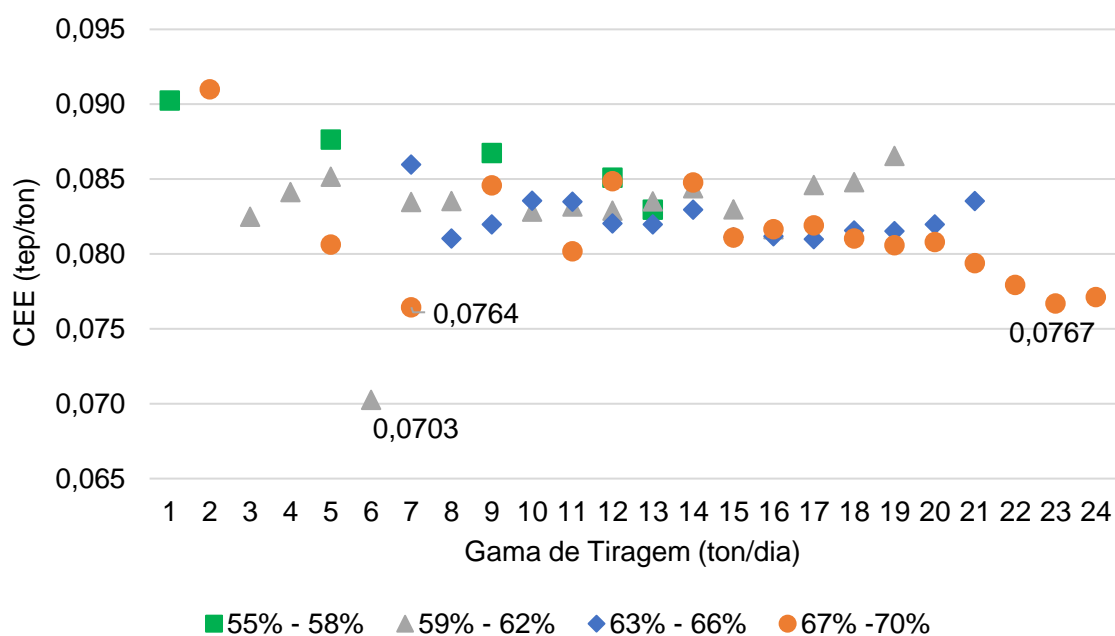


Figura 5.1 – Representação gráfica da relação entre as diferentes percentagens de incorporação de casco e o consumo específico de gás natural, para diferentes intervalos de tiragem.

Na Figura 5.1 é possível verificar um comportamento mais estável do consumo específico para tiragens mais elevadas.

O menor intervalo de casco, 55 a 58%, apresenta maiores consumos. Isto deve-se ao facto de, para uma menor quantidade de casco é necessária uma maior compensação com areia, que apresenta um maior ponto de fusão e, conseqüentemente, uma maior energia de fusão. No entanto, também se pode concluir que isto encontra-se diretamente ligado à quantidade produzida, a tiragem. Para o mesmo intervalo, com o aumento da tiragem, o consumo específico de gás natural diminui. O consumo específico é representado pela energia consumida por cada tonelada de vidro fundido, ou seja, aumentando a produção de vidro, o consumo de energia diminui.

O ponto ótimo de consumo específico, é obtido para o intervalo de 59 a 62%, para a tiragem de 371-376 toneladas, com um valor de 0,0703 tep/ton. De seguida, o ponto mais favorável é para o intervalo de 67 a 70%; para 376-381 toneladas, com 0,0764 tep/ton. No entanto, é o intervalo de 63 a 66% que apresenta um comportamento mais estável.

Relativamente ao maior intervalo de casco, de 67 a 70%, para tiragens superiores apresenta uma maior estabilidade, com um decaimento no consumo específico. Assim, pode-se afirmar que é mais vantajoso produzir elevadas quantidades de vidro fundido, com elevadas percentagens de casco.

- Eletricidade

Após a análise do consumo específico de gás natural, para diferentes incorporações de casco, segue-se a análise do consumo específico de eletricidade. Na Figura 5.2 encontra-se presente a relação entre as diferentes percentagens de incorporação de casco com o consumo específico de energia, para a eletricidade.

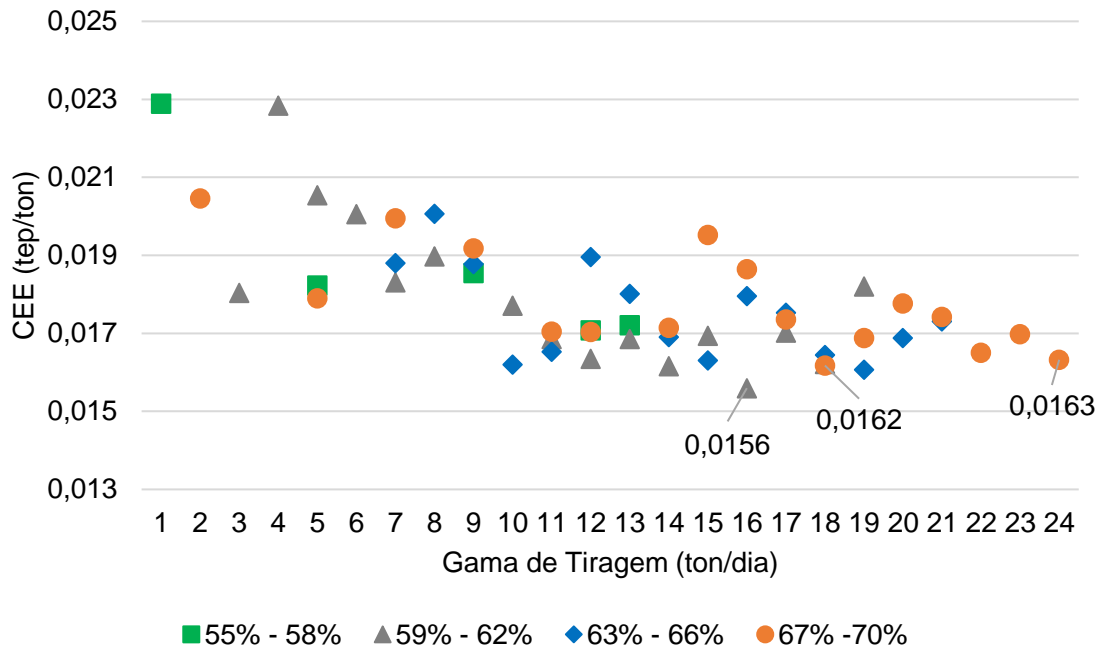


Figura 5.2 - Representação gráfica da relação entre as diferentes percentagens de incorporação de casco e o consumo específico de eletricidade, para diferentes intervalos de tiragem.

A partir do gráfico da Figura 5.2, verifica-se que tal como para o gás natural, para menores tiragens existe uma maior instabilidade no consumo específico de energia, tal como para o gás natural, para todas os intervalos de incorporação de casco. Verifica-se também que, os pontos referentes a maiores consumos de energia correspondem a produções inferiores, independentemente da percentagem de casco.

O ponto ótimo de consumo específico, é obtido para o intervalo de 59 a 62%, para uma tiragem de 421-426 toneladas, com um valor de 0,0156 tep/ton. No entanto, é o intervalo com uma maior amplitude de consumo específico.

Relativamente ao maior intervalo de incorporação de casco, 67 a 70%; o menor consumo específico de eletricidade obtido foi de 0,0162 tep/ton, para uma tiragem de 431-436 toneladas. Para o mesmo intervalo, foi possível produzir 461-466 toneladas de vidro fundido com um consumo específico praticamente igual, ou seja, 0,0163 tep/ton.

Para além do estudo individual de cada forma de energia, é importante avaliar em conjunto o consumo específico de energia. Para tal, foi construído o gráfico da Figura 5.3, que representa o consumo específico total. Assim, é possível retirar conclusões gerais e verificar qual das duas formas de energia apresenta maior influência.

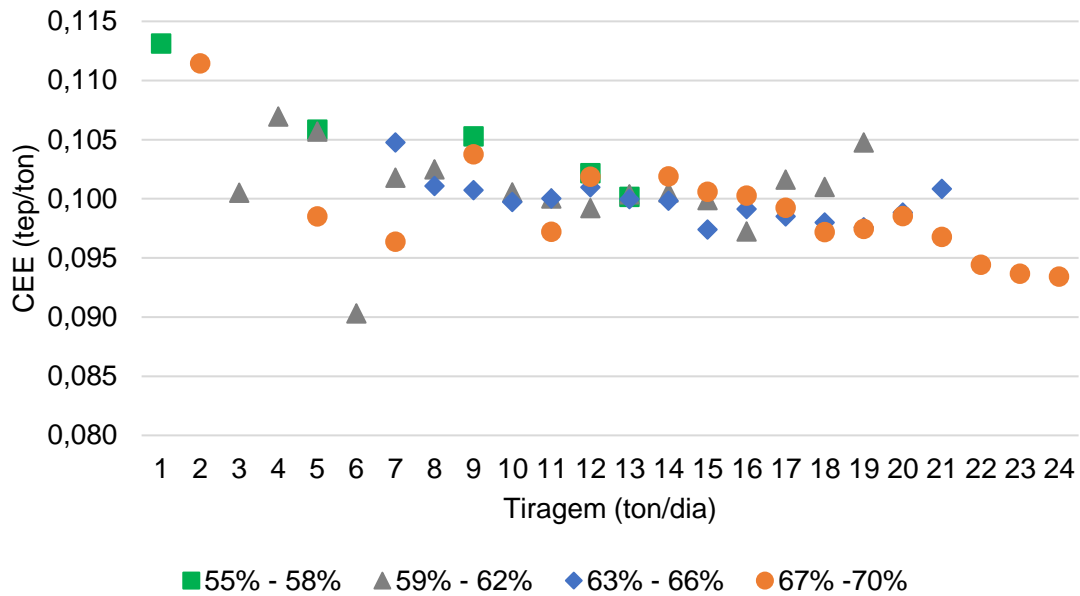


Figura 5.3 - Representação gráfica da relação entre as diferentes percentagens de incorporação de casco e o consumo específico de energia, para diferentes intervalos de tiragem.

Mais uma vez e com o gráfico da Figura 5.3, verifica-se que é o gás natural a forma de energia com maior influência no consumo energético. Desde modo, para as diferentes percentagens de incorporação de casco, é obtido o mesmo comportamento do gráfico da Figura 5.1, relativo ao gás natural.

Em geral, é possível verificar que existe uma maior utilização do intervalo de incorporação de casco de 67 a 70% e uma menor utilização do intervalo de 55 a 58% de casco. No entanto, o intervalo de 63 a 66% apresenta o comportamento mais estável. Para tiragens superiores, são utilizados intervalos de percentagens de casco também superiores.

Assim, a forma de energia fulcral para o consumo específico é o gás natural. Energeticamente, o mais vantajoso é produzir grandes quantidades de vidro fundido com elevadas percentagens de incorporação de casco.

5.1.2. Custo Específico de Fusão

A incorporação de casco, para além de se mostrar importante ao nível do consumo energético, deve ser avaliada também de acordo com o custo específico de fusão, uma vez que as quantidades utilizadas de casco influenciam esse custo. Deste modo, foi construído o gráfico da Figura 5.4, onde se encontra a relação entre a percentagem média de incorporação de casco mensal e o custo específico de fusão.

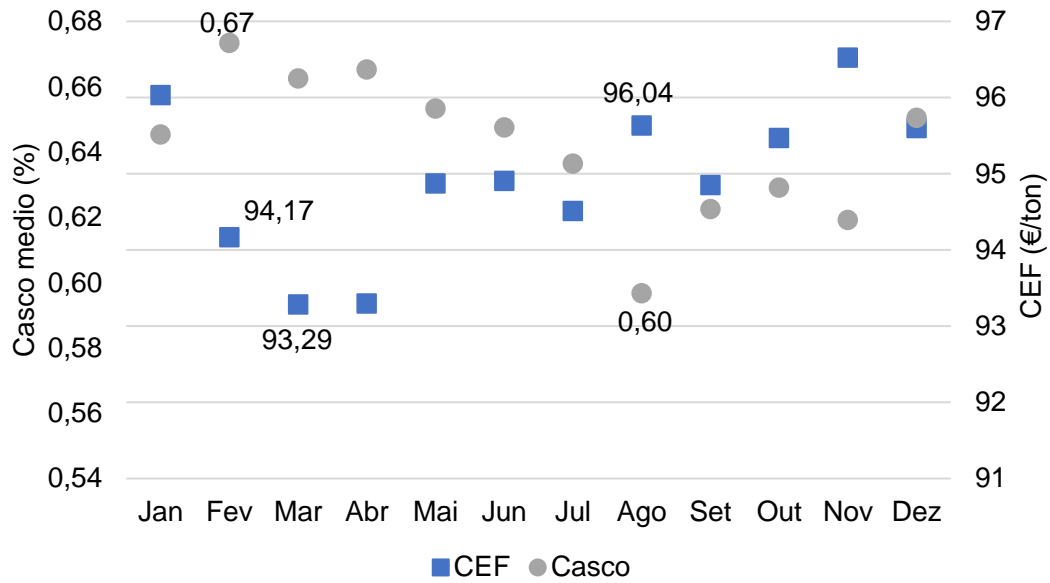


Figura 5.4 – Representação esquemática da evolução do custo específico de fusão de acordo com a percentagem média de incorporação de casco.

Observando o gráfico da Figura 5.4, verifica-se que a incorporação de casco apresenta uma variação contrária ao custo específico de fusão, ou seja, o custo específico de fusão aumenta quando a incorporação de casco diminui. Os meses com menor custo específico apresentam valores médios de incorporação de casco superiores.

Com a diminuição da incorporação de casco o custo específico aumenta. Isto deve-se ao facto de ser necessária uma maior compensação das restantes matérias-primas, como a areia. Estas apresentam um custo superior ao casco. Para além disso, sendo utilizada uma maior quantidade de areia, é necessário um incremento de energia para ocorrer a fusão. Com uma maior quantidade de areia, a temperatura de fusão aumenta e com isso, os custos associados ao gás natural e à eletricidade. Assim, a percentagem de incorporação de casco apresenta uma elevada influência no custo específico de fusão.

Com uma percentagem média de casco de 60% é obtido um custo específico de 96,04 €/ton e com uma percentagem de 67% um custo específico de 94,17 €/ton. Com isto, se forem produzidas diariamente 400 toneladas, há uma poupança de 748€ por dia.

Após a análise da influência da incorporação de casco no consumo específico de energia e no custo específico de fusão, é possível verificar que esta variável apresenta uma elevada influência. Em relação ao consumo específico, verifica-se que se torna mais compensatório produzir elevadas quantidades de vidro fundido. Em relação ao

custo específico, uma maior incorporação de casco, permite diminuir o valor do indicador e assim, a produção torna-se mais económica.

Concluindo, o mais vantajoso é produzir elevadas quantidades de vidro fundido com elevadas quantidades de casco.

5.2. Influência da Tiragem

O estudo relativo à produção de vidro fundido, a tiragem, incidiu sobre a incorporação de casco, o consumo específico de energia e sobre o custo específico de fusão. Nestes parâmetros, é esperado verificar alterações devido à quantidade de vidro fundido produzido.

5.2.1. Incorporação de Casco

A proporção de casco utilizado na matéria-prima apresenta uma grande influência nas características térmicas do processo de fusão. Com o casco, é possível aumentar ou diminuir o consumo do combustível. Para a realização da presente análise, foi construído o gráfico da Figura 5.5, em que foi utilizada a percentagem média de casco e o somatório da tiragem mensal.

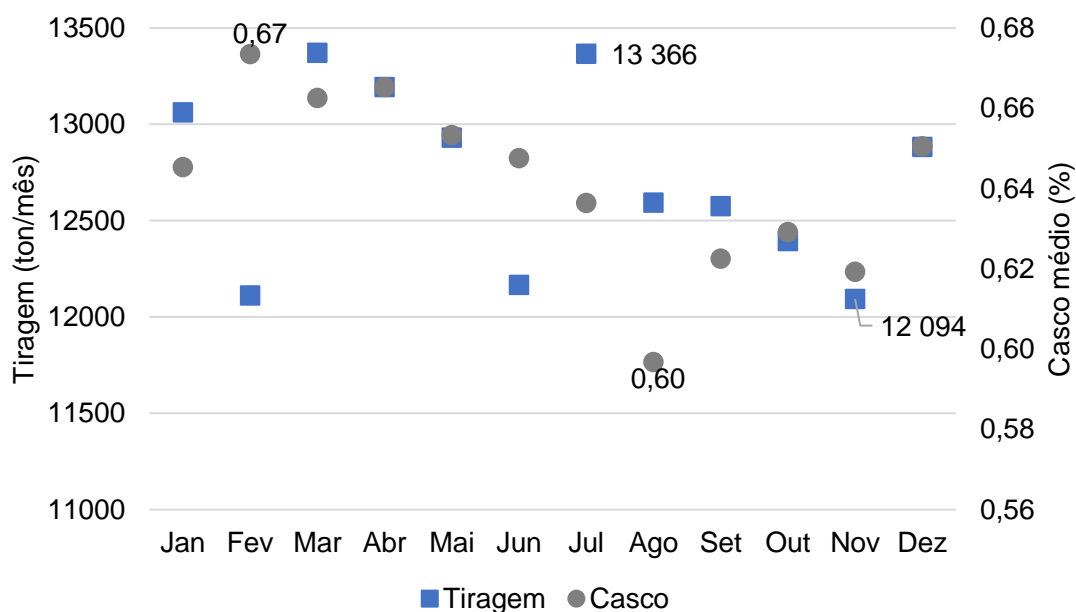


Figura 5.5 – Representação esquemática da influência da tiragem na incorporação de casco usada, ao longo dos meses de 2016.

Analisando o gráfico da Figura 5.5, não é encontrada uma estabilidade ao longo dos meses, para a relação entre a incorporação de casco e a tiragem. O mês com uma maior produção é julho, com 13366 toneladas, e o mês com uma menor produção é novembro, com 12094 toneladas. No entanto, o mês em que é verificada uma maior percentagem

média de casco é fevereiro com 67% e em agosto verifica-se a menor percentagem média, com 60%.

De forma a ser verificado o comportamento da incorporação de casco em relação à tiragem, é importante analisar a evolução mês a mês. Observando a variação entre cada mês, verifica-se que, não é possível obter uma relação entre a tiragem e a incorporação de casco.

5.2.2. Consumo Específico de Energia

Em relação ao consumo específico de energia, é relevante avaliar o comportamento do consumo de gás natural e de eletricidade de acordo com a tiragem. Assim, é possível verificar se ambas as formas de energia sofrem alterações significativas. Para tal, é importante avaliar cada energia individualmente. No gráfico da Figura 5.6 está presente a relação entre o somatório da tiragem mensal e o consumo específico de gás natural.

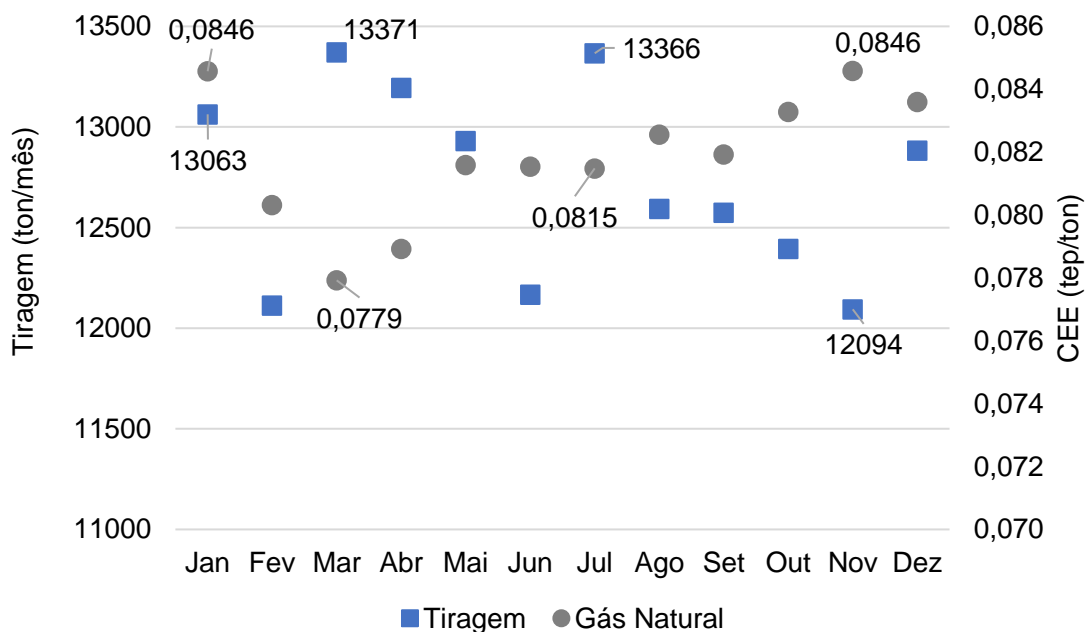


Figura 5.6 – Representação esquemática da relação entre a tiragem mensal e o consumo específico de gás natural, para o ano de 2016.

De acordo com a expressão utilizada para a determinação do consumo específico, com a diminuição da produção, o consumo específico deve aumentar. Na Figura 5.6 pode-se verificar isto entre fevereiro e março, sendo março o mês com menor consumo específico de gás natural e de maior produção de vidro. Janeiro e novembro correspondem aos meses com maior consumo específico. No entanto, em janeiro há uma elevada produção e em novembro há a menor tiragem observada.

É de esperar que com baixas produções de vidro fundido, sejam obtidos elevados consumos específicos de energia. Isto deve-se ao facto de ser fornecida de igual forma uma elevada quantidade de energia para quantidades de vidro fundido mais baixas. Assim, o mês de janeiro comparativamente a novembro é mais compensatório, pois para o mesmo consumo de gás natural foram produzidas mais 969 toneladas de vidro. Deste modo, é importante ser verificado o consumo de eletricidade, para verificar a existência de alguma compensação energética.

Comparando o mês de março com novembro, foram produzidas mais 1277 toneladas de vidro fundido, com menos 0,0067 tep/tonelada. Deste modo, foi realizada uma poupança de 20890 m³ de gás natural.

Para além do gás natural, é também essencial avaliar o comportamento do consumo específico de energia da eletricidade, em relação com a quantidade de vidro fundido. Esta encontra-se presente no gráfico da Figura 5.7.

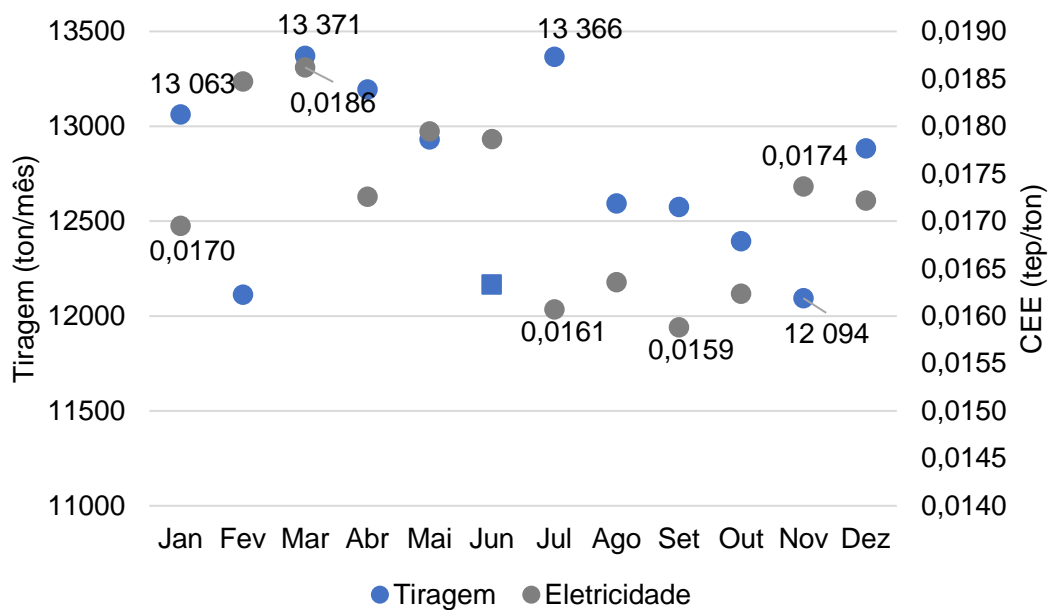


Figura 5.7 – Representação gráfica do CEE de eletricidade, em função da tiragem mensal.

Relativamente ao consumo específico de eletricidade, apresentado na Figura 5.7, é pertinente incidir também nos meses avaliados na Figura 5.6.

Os meses de janeiro e novembro apresentaram igual consumo específico de gás natural. No entanto, em relação à eletricidade, verifica-se apenas uma variação de 0,0004 tep/ton, ou seja, 53080 kW/mês. Assim, em janeiro, verifica-se um menor consumo de energia, em geral, com uma maior produção.

Comparando os meses de maior e menor produção de vidro, março e novembro, o primeiro apresenta um maior consumo específico de eletricidade. No entanto, março, no

total, apresenta um menor consumo, $0,0186+0,0779=0,0965$ tep/ton. Enquanto novembro tem um consumo energético de, $0,0174+0,0846=0,102$ tep/ton.

No mês de julho também foi produzida uma elevada quantidade de vidro fundido, com um baixo consumo de eletricidade, fazendo deste um mês de interesse. Foram produzidas apenas menos 5 toneladas, comparando com março, e apresenta uma energia total de $0,0815+0,0161=0,0976$ tep/ton, ou seja, mais 0,0011 tep/ton.

5.2.3. Custo Específico de Fusão

O custo específico de fusão é inversamente proporcional à produção de vidro fundido, a tiragem. Deste modo, é relevante avaliar o comportamento deste indicador de acordo com o aumento e a diminuição da produção. Assim, é possível verificar o que se torna mais vantajoso, a partir do gráfico construído na Figura 5.8. Neste está presente a relação entre a tiragem mensal e o custo específico de fusão, ao longo de cada mês.

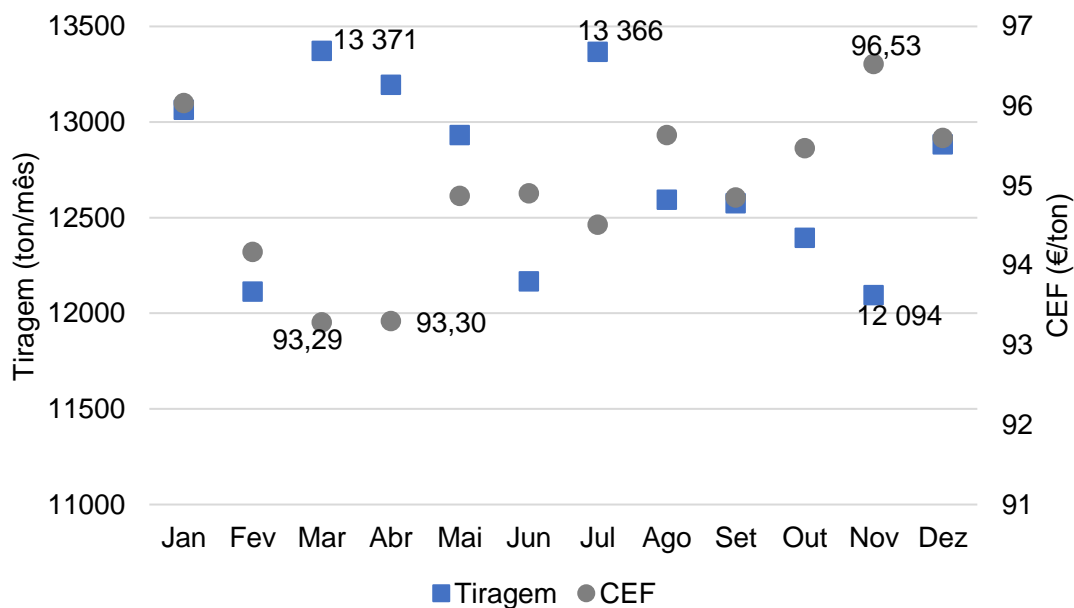


Figura 5.8 – Representação gráfica da relação entre a tiragem e o custo específico de fusão, para os meses de 2016.

A partir do gráfico da Figura 5.8, observa-se a inexistência de um comportamento estável do custo específico de fusão face à tiragem. No entanto, é possível verificar que elevadas tiragens apresentam custos específicos de fusão inferiores como, por exemplo, no mês de março. Neste é produzida a maior quantidade de vidro fundido, com 13371 toneladas, e apresenta o custo específico mais baixo, 93,3 €/tonelada. Ao contrário de novembro, que apresenta a menor produção, 1094 toneladas, e o maior custo específico de fusão, 96,5 €/tonelada. Assim, pode-se concluir que, uma produção superior é o suficiente para levar a uma poupança económica.

5.3. Influência do Poder Calorífico Inferior

Em relação ao gás natural, é importante analisar o poder calorífico inferior. Este é uma variável independente da unidade fabril, sendo intrínseco à qualidade do gás natural fornecido à fábrica. Esta variável é uma característica do gás natural e influencia o consumo de gás natural na reação de combustão, para assegurar as condições operatórias do forno AV5. De seguida, é analisada a influência do valor de PCI no consumo específico de energia relativamente ao gás natural.

5.3.1. Consumo Específico de Energia

O poder calorífico é uma característica do gás natural. Deste modo, no gráfico da Figura 5.9 está presente a relação entre o valor médio mensal do poder calorífico inferior e o consumo específico de gás natural.

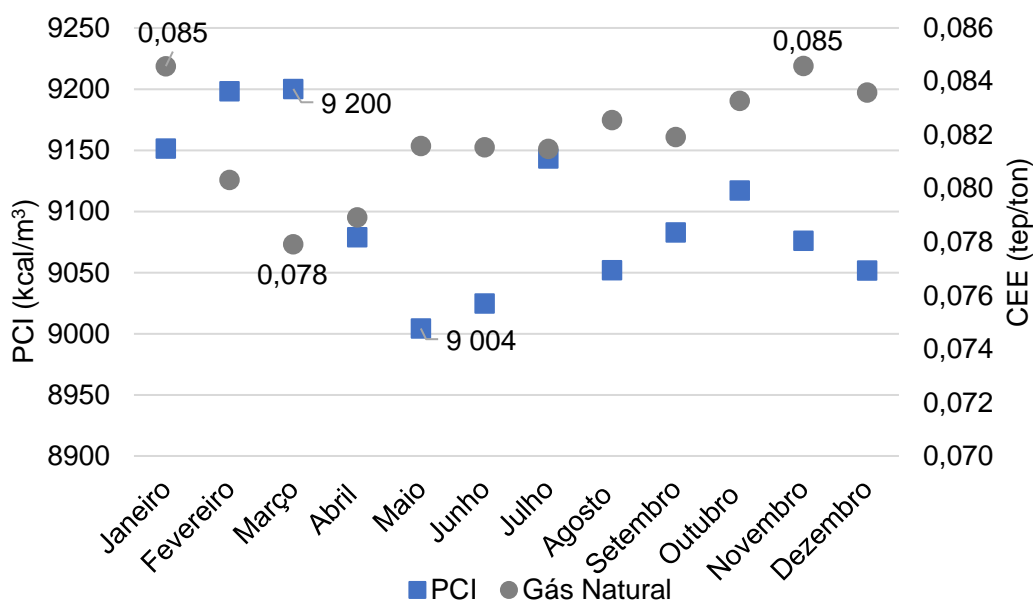


Figura 5.9 – Representação esquemática do poder calorífico do gás natural, em função do consumo específico de energia do mesmo, ao longo dos meses de 2016.

A partir do gráfico obtido na Figura 5.9, é possível observar que para valores de PCI elevados o CEE de gás natural é menor. No entanto, a tiragem em cada mês também vai influenciar esse CEE.

O mês de março corresponde ao mês em que se obteve um maior poder calorífico, com 9200 kcal/m³, e ao mês com menor consumo específico de energia, com 0,078 tep/ton. Com um poder calorífico tão elevado, não é necessária uma quantidade de energia também elevada, existe uma compensação. Nos meses com menores poderes caloríficos observam-se consumos específicos mais elevados.

Os meses com menor consumo específico de gás natural, janeiro e novembro, com 0,085 tep/ton, não correspondem a meses com poderes caloríficos mais baixos. Com um baixo poder calorífico, a temperatura da chama pode diminuir e assim ser necessária uma maior quantidade de energia para compensar. No entanto, como isso não se verifica, é necessário verificar a produção total ao longo dos meses. Caso não se verifique uma tiragem elevada em janeiro e novembro, para justificar a elevada energia fornecida, poderá ter sido gasta energia mais do que era necessária. Com um elevado poder calorífico inferior, pode ser utilizada um volume de gás natural inferior.

De forma a verificar se a energia fornecida a partir de gás natural se encontra adequada ao poder calorífico inferior, na Tabela 5.2 encontram-se as tiragens mensais. As cores utilizadas encontram-se de acordo com a extensão da tiragem. As maiores produções encontram-se a verde e as inferiores a vermelho.

Tabela 5.2 - Produção de vidro fundido total para cada mês de 2016.

Meses	Tiragem (ton/mês)
Janeiro	13063
Fevereiro	12112
Março	13371
Abril	13194
Maiο	12931
Junho	12166
Julho	13366
Agosto	12594
Setembro	12575
Outubro	12394
Novembro	12094
Dezembro	12883

A partir da Tabela 5.2, verifica-se que em março e julho foi produzida uma maior quantidade de vidro fundido. No entanto, março corresponde ao mês com maior poder calorífico e menor consumo específico de gás natural.

Em relação aos meses com maior consumo específico, janeiro e novembro, estes apresentam produções muito distintas. Janeiro é dos meses com uma maior produção, contrariamente a novembro, que foi o mês com uma produção inferior. Assim, janeiro apresenta um igual consumo específico de gás natural, maior poder calorífico inferior e

uma maior tiragem. Comparativamente a novembro, este produziu mais 969 toneladas com uma diferença de 75 kcal/m^3 no poder calorífico.

Concluindo, se o gás natural apresentar um elevado poder calorífico é apenas necessário aumentar a energia fornecida caso a tiragem também aumente. Caso a tiragem se mantenha constante, e o poder calorífico aumente, o volume de gás natural pode ser reduzido. No entanto, independentemente do poder calorífico, é necessário uma maior energia fornecida com o aumento da tiragem.

O poder calorífico aparenta ter uma elevada importância no consumo energético da fusão. Deste modo, seria relevante para o processo obter estes dados com antecedência, para poder ser realizada uma previsão e serem diminuídos os consumos de gás natural.

5.4. Influência da Humidade Relativa

A humidade relativa do ar atmosférico é uma variável do processo que deve ser estudada por haver a possibilidade de influenciar vários parâmetros da fusão. A reação de combustão pode ser influenciada pela humidade relativa do ar, por este ser utilizado como comburente. O casco, por se encontrar ao ar livre antes de ser utilizado no processo de fusão, pode também entrar para os silos onde é armazenado e, conseqüentemente para o forno, com uma maior quantidade de água em dias de chuva. A humidade relativa atmosférica, para o ano de 2016, foi obtida a partir de um histórico disponibilizado na web. [16] Este encontra-se no Anexo A.

5.4.1. Consumo Específico de Energia

Uma forma de avaliar a influência da humidade relativa é verificado se existe alguma relação com os consumos energéticos. Uma maior quantidade de água inserida no forno pode provocar o seu arrefecimento e, conseqüentemente, um incremento energético. Para ser verificada esta relação, foi construído o gráfico da Figura 5.10. Neste está presente a humidade relativa mensal em função do consumo específico de energia total.

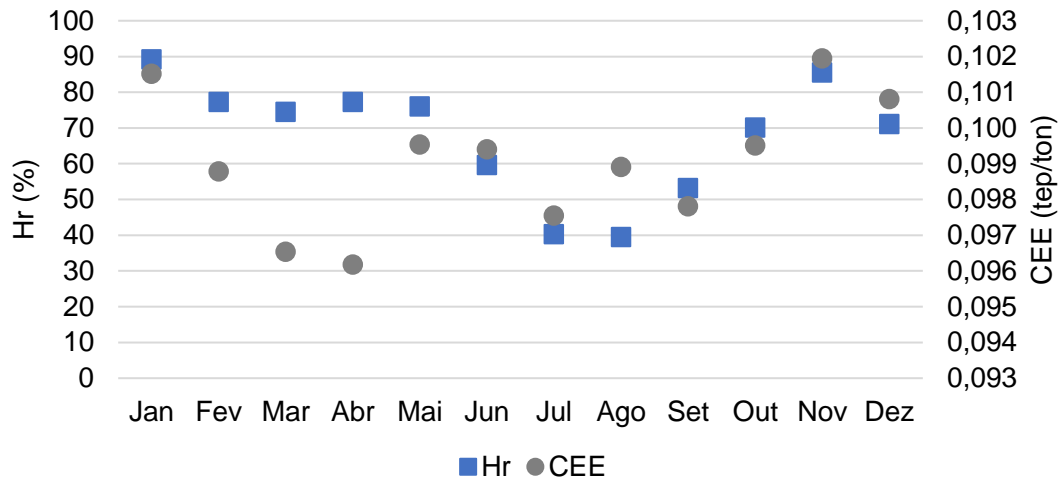


Figura 5.10 – Representação gráfica da relação entre a humidade relativa atmosférica e o consumo específico de energia, para os meses de 2016.

Observando a Figura 5.10, verifica-se que os meses com maior humidade, janeiro e novembro, correspondem também a uma maior utilização de energia. No entanto, meses com menores consumos não correspondem a baixas humidades relativas. Deste modo, não é verificada uma influência significativa da humidade relativa do ar no processo de fusão.

5.5. Estudo de Diferentes Incorporações de Casco

Devido ao elevado número de variáveis inerentes ao processo de fusão, para ser possível avaliar o consumo de energia, é importante analisar percentagens de incorporação de casco isoladamente. Para tal, foram analisadas as diferentes percentagens de incorporação de casco, em relação aos diferentes consumos específicos (gás natural e eletricidade). Assim, foram avaliadas as percentagens de 55, 60, 65 e 70%. Estas foram agrupadas a partir dos dados fornecidos pela empresa e encontram-se organizadas de acordo com o aumento da tiragem. Os valores utilizados para este estudo encontram-se presentes no Anexo A.

55% de Casco

Inicialmente, foi avaliada a evolução do consumo específico de energia, para uma incorporação de 55% de casco. Esta evolução encontra-se presente no gráfico da Figura 5.11, considerando o gás natural, a eletricidade e a energia total fornecida.

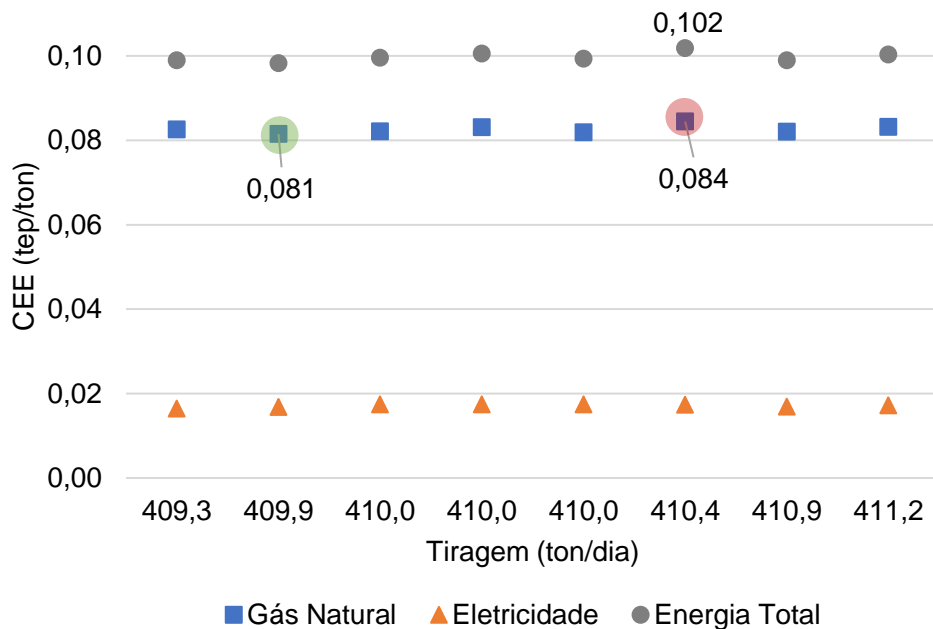


Figura 5.11 - Representação gráfica da evolução do consumo específico de energia para o gás natural e eletricidade, em função da tiragem, para 55% de casco.

Observando o gráfico da Figura 5.11, não se verificam variações significativas do consumo energético para a uma incorporação de casco de 55%. Comparando as duas formas de energia, a que apresenta uma maior estabilidade é a eletricidade, sendo o gás natural a que apresenta ligeiras variações. Em relação ao gás natural, verifica-se que é obtido consumo específico inferior com uma menor tiragem.

A percentagem analisada não apresenta um número elevado de produções no ano de 2016, nem foi utilizada uma grande gama de tiragem. Deste modo, esta percentagem não poderá ser comparada com valores superiores de incorporação de casco.

60% de Casco

Uma incorporação de casco de 60% apresenta uma grande utilização no processo de fusão. Deste modo, é importante realizar a sua análise. Na Figura 5.12 está presente a relação entre o consumo energético para 60% de casco, de acordo com a evolução da tiragem.

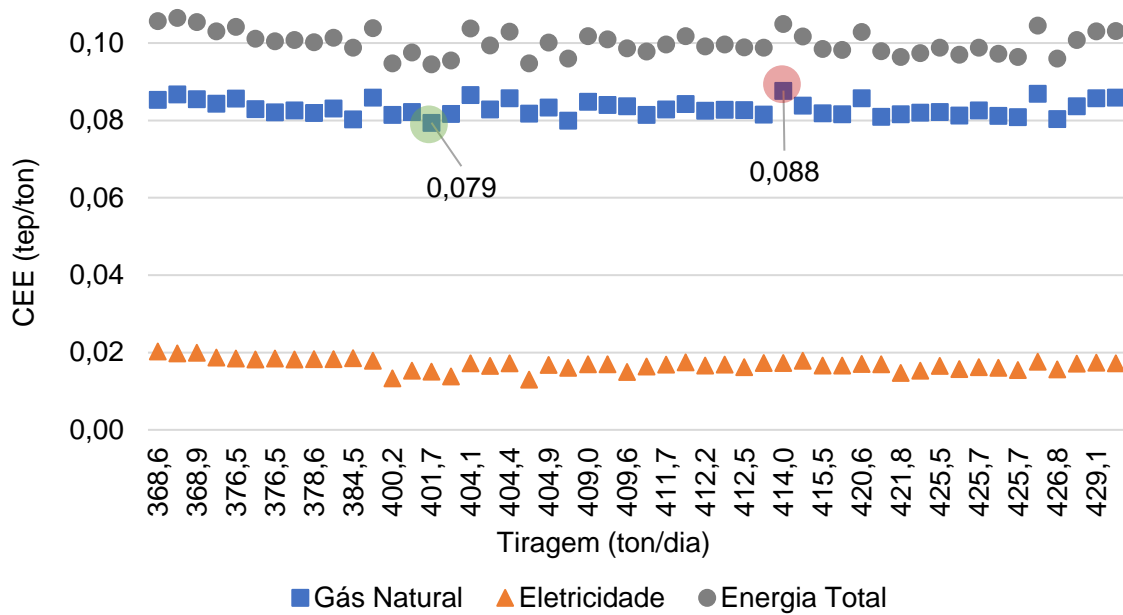


Figura 5.12 - Representação gráfica da evolução do consumo específico de energia para o gás natural e eletricidade, em função da tiragem, para 60% de casco.

Observando a Figura 5.12, verifica-se que a energia elétrica apresenta um comportamento mais constante ao longo do aumento da tiragem, comparando com a energia fornecida pelo gás natural. No consumo específico do gás natural encontram-se ligeiras alterações, mas pouco significativas. Assim, para uma percentagem de 60% de casco não é verificada uma variação do consumo específico com o aumento da tiragem.

Em relação ao gás natural podem ser comparados dois os valores referentes ao máximo e mínimo consumo específico. O maior consumo específico obtido foi de 0,088 tep/ton para 414 toneladas e o menor foi de 0,079 tep/ton para 402 toneladas. Assim, foram produzidas mais 12 toneladas de vidro fundido com menos 0,009 tep/ton, ou seja, menos 5 136 m³ de gás natural. No Anexo E.2.1 encontra-se apresentado o exemplo de cálculo.

65% de Casco

De seguida, foi feita uma análise da percentagem de incorporação de casco de 65%, presente na Figura 5.13. Neste estão presentes os consumos específicos de energia, com o aumento da tiragem.

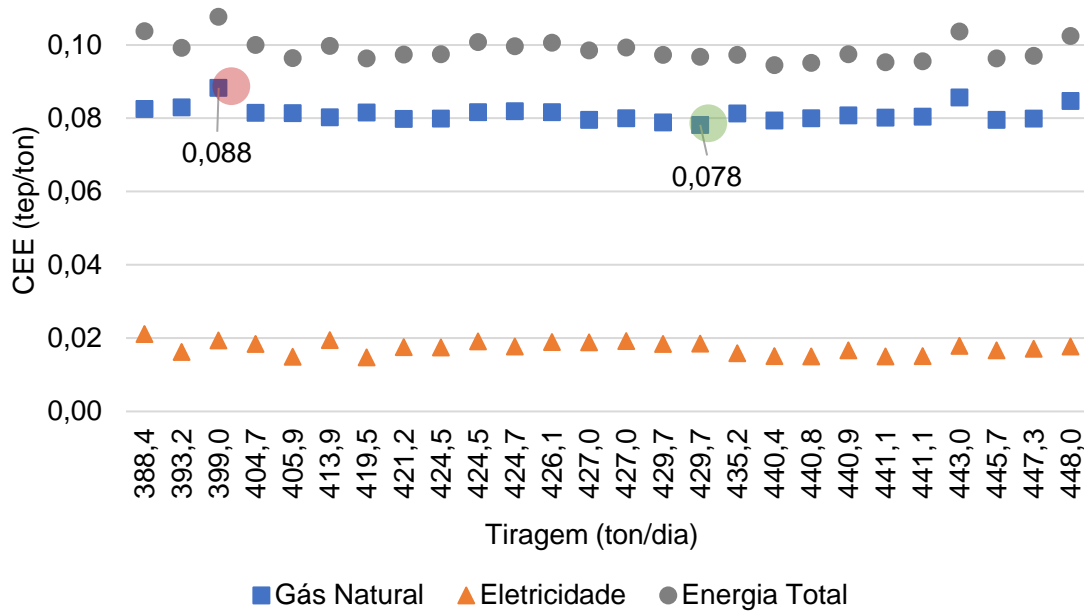


Figura 5.13 - Representação gráfica da evolução do consumo específico de energia para o gás natural e eletricidade, em função da tiragem, para 65% de casco.

A partir da Figura 5.13, pode ser obtida uma conclusão semelhante às anteriores percentagens analisadas. Ambos os consumos de energia apresentam um comportamento estável com o aumento da tiragem.

Em relação ao gás natural podem ser comparados dois os valores referentes ao máximo e mínimo consumo específico. O maior consumo específico obtido foi de 0,088 tep/ton para 399 toneladas e o menor foi de 0,078 tep/ton para 430 toneladas. Assim, foram produzidas mais 31 toneladas de vidro fundido com menos 0,010 tep/ton, ou seja, 1 725 m³ de gás natural.

70% de Casco

Por fim, para uma incorporação de casco de 70%, foi construído o gráfico da Figura 5.14. Tal como nos anteriores, é apresentado o consumo energético de acordo com o aumento da tiragem.

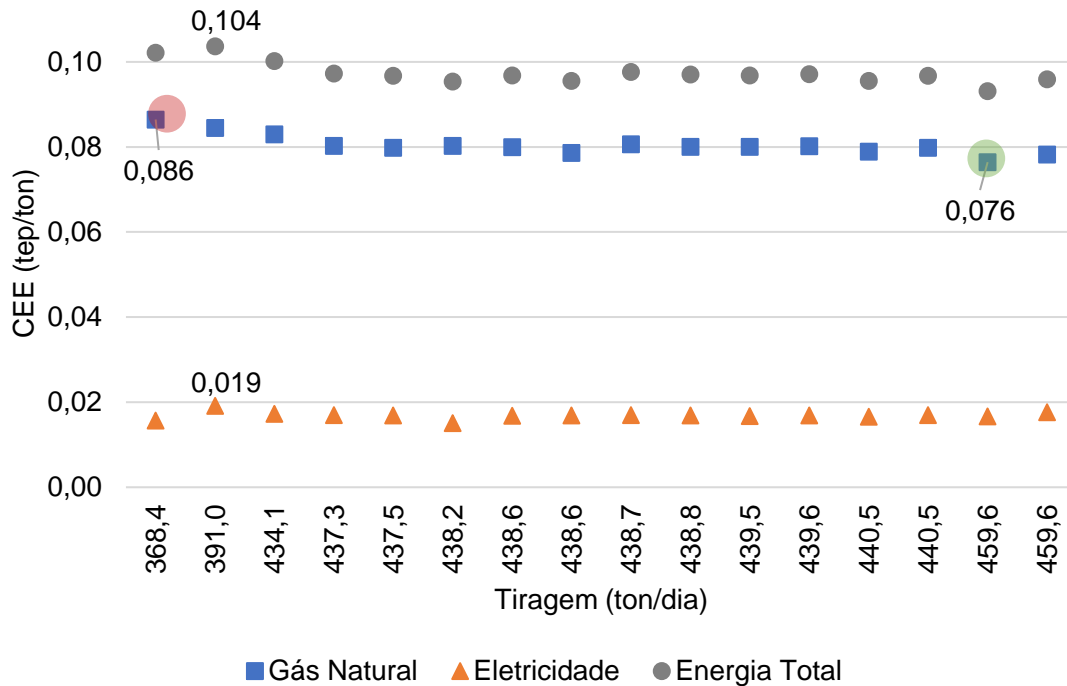


Figura 5.14 – Representação gráfica da evolução do consumo específico de energia para o gás natural e eletricidade, em função da tiragem, para 70% de casco.

A partir do gráfico da Figura 5.14, não são verificadas variações significativas no consumo específico para 70% de casco, principalmente no consumo de eletricidade. Para tiragens inferiores, de 368 a 434 toneladas, o consumo específico de gás natural é superior ao obtido nas restantes produções de vidro fundido. O maior consumo específico, 0,086 tep/ton, foi obtido com 368 toneladas. O consumo específico menos elevado é obtido com 460 toneladas, com 0,076 tep/ton. Deste modo, foram produzidas mais 92 toneladas de vidro e foram economizados 3 637 m³ de gás natural.

Após a análise de diferentes percentagens de incorporação de casco, 50, 55, 60, 65 e 70%, foi possível concluir que esta é uma variável com grande impacto no consumo energético da fusão. Das diferentes incorporações estudadas neste sub-capítulo, a mais utilizada no forno AV5 no ano de 2016 é a de 60%. Em relação à ajuda elétrica, não se verificam alterações nos consumos específicos de energia para os diferentes casos estudados. Contrariamente, a energia fornecida pelo gás natural, sofre ligeiras variações. Para as diferentes quantidades de casco são conferidas as seguintes gamas de produção de vidro fundido e de consumo energético,

- 55%: [409-411] ton/dia, [0,081-0,084] tep/ton;
- 60%: [369-429] ton/dia, [0,079-0,088] tep/ton;
- 65%: [388-448] ton/dia, [0,078-0,088] tep/ton;
- 70%: [368-460] ton/dia, [0,076-0,086] tep/ton

Para 55 e 60% de casco são verificados consumos específicos de gás natural inferiores para tiragens menores, em comparação a aquelas que foram produzidas com consumos específicos superiores. Contrariamente, para 65 e 70% de casco, o que se torna mais compensatório energeticamente é produzir vidro fundido com elevada tiragem. Concluindo, com percentagens menores há uma economia energética com baixa produtividade, com elevadas percentagens há uma economia energética com uma alta produtividade. É importante encontrar a percentagem, entre 60 e 65%, em que ocorre esta alteração, ou seja, em que passa a compensar produzir grandes quantidades de vidro fundido.

No Anexo E.2 encontra-se presente o estudo realizado para percentagens entre os 60 e os 65%, tendo sido estudada a percentagem de 61,62 e 63%. Foi possível verificar que para percentagens superiores a 62%, a nível energético, o mais compensatório é produzir elevadas quantidades de vidro fundido. Até essa percentagem de incorporação de casco o que compensa energeticamente é produzir quantidades de vidro fundido mais baixas.

6. Ponto Ótimo

A presente dissertação tem como principal objetivo a determinação do ponto ótimo entre o consumo de gás natural e de eletricidade do forno AV5. Para tal, irá ser utilizada uma ferramenta do Excel, o *Solver* (solucionador). Esta ferramenta tem como função a resolução de problemas, encontrando valores (máximos ou mínimos) para uma fórmula numa determinada célula, de acordo com restrições impostas.

Na resolução do presente objetivo, é necessário ter em consideração a quantidade produzida de vidro fundida bem como a quantidade de casco utilizado. Para tal, estes valores são inseridos, de acordo com o desejado para a produção.

A equação utilizada para a otimização a partir do *Solver* é a equação 4.3, que representa o custo específico de fusão. Ao longo dos estudos efetuados anteriormente verificou-se que o melhor resultado para este indicador foi de 93,3 €/ton. Este valor foi então fixado para a equação do CEF, de modo a serem variadas apenas as quantidades de gás natural e eletricidade. Na otimização foi também considerado o objetivo anual de consumo energético para a unidade fabril de Avintes, 875 kcal/kg vf. Na utilização do *Solver*, foram utilizadas as etapas seguintes,

- Encontrar o melhor resultado de CEF (93,3 €/ton);
- Inserir um valor para o PCI do gás natural (por exemplo, PCI médio do ano de 2016);
- Inserir a tiragem de vidro fundido desejada (por exemplo, 400 toneladas/dia);
- Inserir a percentagem de casco;
- Inserir custos médios para o casco, a restante matéria-prima, o gás natural e a eletricidade;
- Inserir a equação referente ao CEF;
- Inserir as restrições (ao volume de gás natural, à quantidade de energia elétrica, ao CEF, ao consumo total de energia e à capacidade da ajuda elétrica).

No Anexo F estão presentes os detalhes referentes à ferramenta utilizada e os resultados obtidos. A partir destes, foi possível obter uma relação entre cada percentagem de incorporação de casco e a quantidade produzida de vidro fundido, através de uma equação da reta para cada utilidade consumida no forno AV5. Nas Figuras 6.1 e 6.2 estão presentes os gráficos construídos de acordo com resultados obtidos no *Solver*, para 60 e 65% de casco, respetivamente.

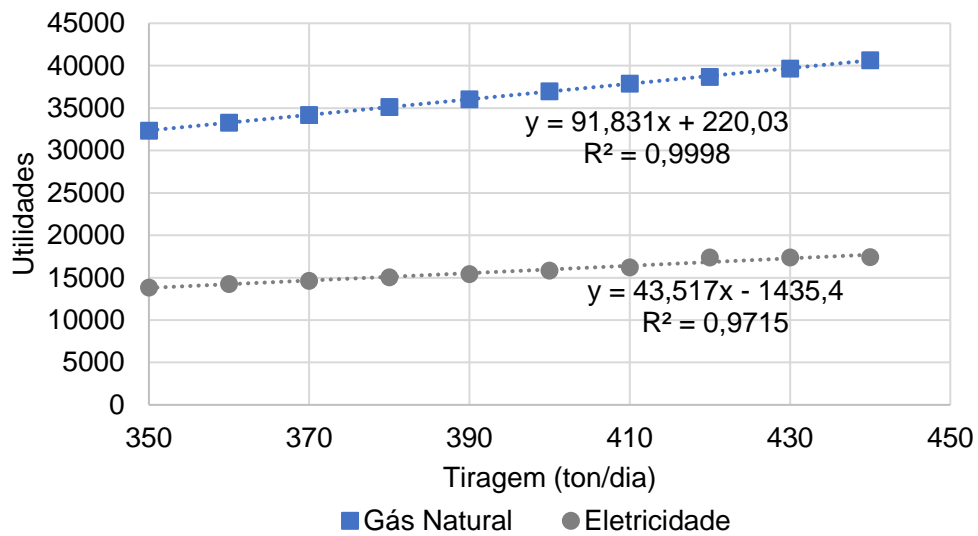


Figura 6.1 – Representação gráfica da relação entre a quantidade de cada utilidade em função da tiragem, para 60% de casco.

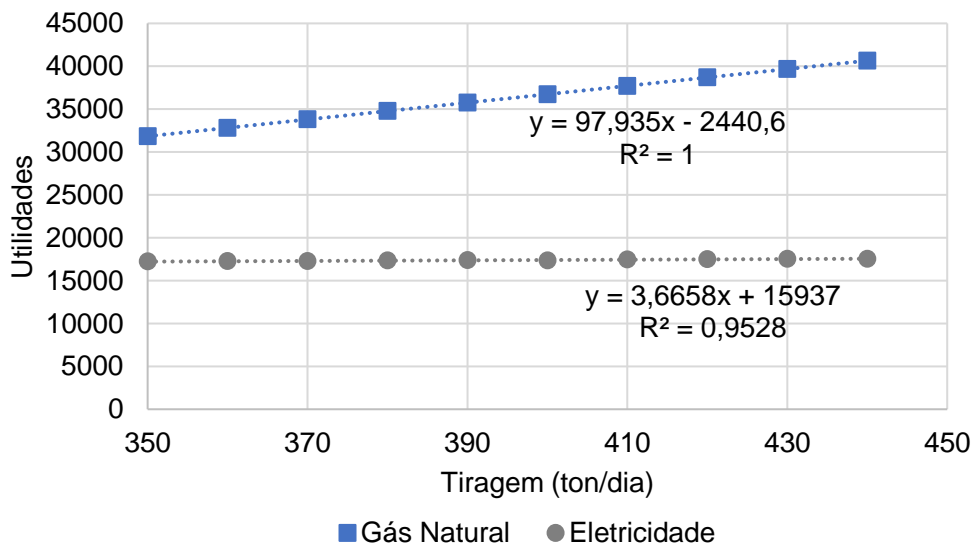


Figura 6.2 - Representação gráfica da relação entre a quantidade de cada utilidade em função da tiragem, para 65% de casco.

A partir da equação da reta, é possível obter o consumo ótimo, retirando o volume de gás natural e a quantidade de energia elétrica. Isto é possível com o conhecimento da produção de vidro fundido planeado e a percentagem de casco adequada.

7. Conclusões e sugestões de trabalhos futuros

O objetivo da dissertação passou pela análise energética do forno de fusão AV5 e pela determinação do ponto ótimo entre o consumo energético de gás natural e de eletricidade. O AV5 corresponde ao forno de maior capacidade de produção da fábrica de Avintes. Este trabalho traduz um estágio curricular inserido na Divisão da Composição e Fusão da empresa BA Vidro.

Ao longo do estágio foi possível obter uma visão global das diferentes secções da unidade fabril. No DCF, houve a possibilidade de entender as diversas componentes envolvidas no forno de fusão AV5.

Inicialmente foi realizado o balanço mássico e energético ao forno. No último, considerando todas as correntes de entrada, de saída e a energia obtida na reação de combustão, foram obtidas umas perdas energéticas anuais de 12 423 883 kW/ano. Este resultado também se encontra inflacionado por não ser considerada a corrente de ar (para o arrefecimento) nas correntes de saída, pois é desconhecido. Tal como, não são consideradas as correntes de água de refrigeração. A partir deste balanço energético, foram utilizados diferentes quantidades de excesso de ar, mantendo as perdas de calor, para a determinação de diferentes volumes de gás natural. Tendo sido obtida uma poupança de 0,233 m³/s, para uma redução de 4% no excesso de ar.

Relativamente aos indicadores energéticos determinados para o AV5 para o ano de 2016, verificou-se uma variação do consumo específico de gás natural entre os 0,078 tep/ton e os 0,085 tep/ton e uma variação entre os 0,016 tep/ton e 0,018 tep/ton para a eletricidade. Deste modo, a eletricidade é o menor contribuidor para o aumento ou diminuição do consumo específico de energia. Para a intensidade carbónica, verificou-se uma variação entre os 2345 kgCO₂/tep e os 2369 kgCO₂/tep. Por fim, no custo específico de fusão, há uma variação entre os 93,3 €/ton e os 96,5 €/ton. Para este último indicador, verifica-se que o menor CEF coincide com uma produção mais elevada e com um maior consumo energético.

Ao longo do trabalho desenvolvido, foram também analisadas diversas variáveis que influenciam o processo de fusão. Com isto, é possível dar a conhecer à DCF qual ou quais os parâmetros principais, sendo necessário um maior controlo. As variáveis analisadas foram a quantidade de vidro fundido produzido diariamente (tiragem), a quantidade de casco reciclado introduzido no forno (casco), a humidade relativa do ar ambiente (utilizado na queima de gás natural e entra em contacto com o casco) e o poder calorífico inferior do gás natural. Com isto, foi possível verificar que a quantidade

de casco e o poder calorífico é o que apresentam uma maior influência. No entanto, a humidade relativa do ar não exibe influência ao nível do consumo energético. Para além das diferentes variáveis, foram analisadas em concreto diferentes percentagens de casco. Foi possível concluir que, até 62% de casco o mais vantajoso a nível energético é a produção de baixas quantidades de vidro fundido. Para valores superiores a 62%, o mais indicado são tiragens elevadas. No entanto, em geral, o mais vantajoso é sempre produzir o máximo de vidro fundido possível.

Por fim, de acordo com o objetivo principal desta dissertação, a determinação do ponto ótimo entre o consumo de gás natural e de eletricidade, foi utilizado o solucionador *Solver*. Para tal, foi fixado o valor de CEF menos elevado ao longo do ano, de forma a ser obtida também uma poupança económica. Para diferentes percentagens de casco, foram obtidas equações da reta, que relacionam a quantidade de gás natural ou eletricidade com a produção de vidro fundido (em toneladas).

Futuramente será interessante realizar uma simulação do processo de fusão, num programa informático adequado. Com isto, seria possível obter resultados sem afetar a produção.

É sugerido também a determinação da energia mínima necessária para manter a qualidade do vidro fundido, ou seja, até que ponto é possível reduzir o volume de gás natural e a energia elétrica. Verificando também, se reduzindo o volume de gás natural o calor transferido para o ar ambiente, nas câmaras de regeneração, também seria afetado, diminuindo a temperatura do ar à entrada do tanque de fusão.

É também sugerido o ajuste as condições de combustão, a partir da instalação de um controlador do teor de oxigênio em tempo real, nos gases de combustão. Com isto, seria possível verificar se o excesso de ar utilizado é o mais adequado. Poderiam também ser verificados possíveis defeitos de isolamento térmico, para serem evitadas perdas de calor para o meio envolvente e assim, diminuir o consumo energético necessário para fundir a matéria-prima.

Bibliografia

- [1] BA Vidro, “History.” [Online]. Available: <http://www.bavidro.com/en/historia.php>. [Accessed: 24-Feb-2017].
- [2] SetorVidreiro, “Propriedades químicas do vidro.” [Online]. Available: <http://www.setorvidreiro.com.br/o-que-procura/192/propriedades+quimicas+do+vidro>. [Accessed: 04-Jun-2017].
- [3] BA Vidro, “Ciclo Do Vidro - BA Glass.” [Online]. Available: http://www.bavidro.com/pt/ciclo_do_vidro.php. [Accessed: 17-Mar-2017].
- [4] BA Vidro, “Production Process.” [Online]. Available: http://www.bavidro.com/en/processo_produtivo.php. [Accessed: 13-Mar-2017].
- [5] J. Alves, “BA - Marca com história no vidro de embalagem,” 2012.
- [6] Essas e Outras, “Como é Feito Vidro: Matéria Prima, Funções, Colorantes, História.” [Online]. Available: <http://essaseoutras.xpg.uol.com.br/como-e-feito-vidro-materia-prima-funcoes-colorantes-historia/>. [Accessed: 15-Mar-2017].
- [7] E. Le Bourhis, *Glass, mechanics and technology*, no. Chapter 10. 2008.
- [8] Bucher Emhart Glass, “The Forming Process.” [Online]. Available: <http://bucheremhartglass.com/products/container-forming/process-products/the-forming-process>. [Accessed: 15-Mar-2017].
- [9] BA Vidro, “Production process,” 2016.
- [10] Glassglobal Consulting, “GLASS MELTING FURNACES.” [Online]. Available: <http://www.glassglobal.com/consulting/reports/technology/>. [Accessed: 25-Feb-2017].
- [11] R. Stormont, “Electric melting and boosting for glass quality improvement,” pp. 1–4, 2010.
- [12] O. Auchet *et al.*, “Glass Furnaces for Control Purpose,” 2002.
- [13] D. D. E. E. Mecânica, T.-M. T. I, and C. Strobel, “Combustíveis e combustão,” pp. 1–25.
- [14] “AulasCombustão FTCEN-2015.” .
- [15] Khan Academy, “Cálculo passo-a-passo do desvio padrão.” [Online]. Available: <https://pt.khanacademy.org/math/probability/data-distributions-a1/summarizing->

- spread-distributions/a/calculating-standard-deviation-step-by-step. [Accessed: 15-May-2017].
- [16] Weather Underground, “Weather History & Data Archive.” [Online]. Available: <https://www.wunderground.com/history>. [Accessed: 22-May-2017].
- [17] J. M. S. M. M. Abbott, H. C. Van Ness, *Introdução à Termodinâmica na Engenharia Química*, 7ª Edição. 2007.
- [18] “2 PROPRIEDADES DO AR ATMOSFÉRICO.”
- [19] S. A. Galp Gás Natural Distribuição, “O que é o Gás Natural?,” 2017. [Online]. Available: <http://galpgasnaturaldistribuicao.pt/gas-natural/o-que-e>. [Accessed: 12-Jun-2017].
- [20] “Specific Heat and Individual Gas Constant of Gases.” [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-gases-d_159.html. [Accessed: 12-Jun-2017].
- [21] K. A. Kabe, “Capacidades caloríficas molares de gases a pressão zero,” in *Petroleum Refiner*, .
- [22] P. C. da C. PINHEIRO and R. M. VALLE, “Controle de combustão: otimização do excesso de ar,” *II Congr. equipamentos e automação da indústria química e petroquímica*, no. 2, pp. 157–162, 1995.

Anexos

A. Levantamento de Dados

A.1. Dados de produção

Os dados de produção de vidro fundido para o ano e 2016 foram fornecidos pela BA Vidro. Na Tabela A.1 estão presentes os valores mensais para a produção média diária, a produção total e a percentagem de incorporação de casco. Para cálculos posteriores é utilizada a quantidade de vidro fundido expressa em kg/s como tal, para cada mês, estão também presentes esses valores.

Tabela A.1 – Valores de casco e tiragens totais, para cada mês.

Meses	Tiragem total (ton/mês)	Tiragem (kg/s)	T vidro (°C)	Casco médio (%)
Janeiro	13 063	5,36	1 129	0,65
Fevereiro	12 112	5,32	1 140	0,67
Março	13 371	5,49	1 161	0,66
Abril	13 194	5,60	1 192	0,67
Maio	12 931	5,31	1 158	0,65
Junho	12 166	5,16	1 165	0,65
Julho	13 366	5,49	1 165	0,64
Agosto	12 594	5,17	1 171	0,60
Setembro	12 575	5,34	1 191	0,62
Outubro	12 394	5,09	1 193	0,63
Novembro	12 094	5,13	1 189	0,62
Dezembro	12 883	5,29	1 180	0,65

A.2. Consumos energéticos

Para a avaliação energética e para os estudos efetuados foi necessário consultar os dados relativos aos consumos energéticos do forno AV5. Na Tabela A.2 estão presentes os valores referentes ao gás natural.

Tabela A.2 – Dados referentes ao gás natural, para cada mês do ano de 2016.

Meses	GN (m ³ /dia)	GN (m ³ /mês)	PCI (kcal/m ³)	T GN (°C)
Janeiro	39 163	1 214 040	9 151	14,4
Fevereiro	36 863	1 069 038	9 198	13,5
Março	36 935	1 144 980	9 200	14,5
Abril	38 144	1 144 330	9 079	16,2
Mai	37 401	1 159 440	9 004	18,9
Junho	36 339	1 090 180	9 025	22,5
Julho	38 608	1 196 850	9 143	25,8
Agosto	36 857	1 142 560	9 052	25,3
Setembro	37 739	1 132 180	9 083	23,3
Outubro	36 590	1 134 300	9 117	20,5
Novembro	37 470	1 124 090	9 076	16,2
Dezembro	39 449	1 183 460	9 052	14,4

Na Tabela A.3 estão presentes os valores referentes à eletricidade.

Tabela A.3 – Dados referentes à eletricidade, para cada mês do ano de 2016.

Meses	AE médio (kW/dia)	AE total (kW/mês)
Janeiro	33 222	1 029 880
Fevereiro	35 886	1 040 680
Março	37 357	1 158 080
Abril	35 303	1 059 100
Mai	34 816	1 079 310
Junho	33 697	1 010 910
Julho	32 224	998 950
Agosto	30 907	958 120
Setembro	30 960	928 800
Outubro	30 188	935 830
Novembro	32 560	976 800
Dezembro	34 389	1 031 660

A.3. Ar Ambiente

No presente anexo encontram-se os dados referentes à humidade relativa e temperatura do ar ambiente, utilizado na reação de combustão com o gás natural.

A.3.1. Humidade Relativa

Na Tabela A.4 estão presentes os valores diários referentes à humidade relativa para, posteriormente, ser obtida a média mensal, para o ano de 2016.

Tabela A.4 – Dados obtidos relativos à humidade relativa do ar atmosférico, em %, para os meses do ano de 2016, e a respetiva média mensal. [16]

Dias	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	98	4	30	58	40	44	49	54	41	61	64	99
2	93	17	68	64	32	47	45	33	---	68	92	100
3	96	60	51	95	29	47	41	31	---	45	90	99
4	100	50	84	99	33	57	39	59	---	32	97	99
5	98	62	99	84	86	64	50	52	---	53	98	94
6	99	87	97	56	99	75	55	23	---	15	85	90
7	98	98	96	58	98	73	55	20	76	15	80	84
8	96	99	70	58	99	38	49	24	---	36	82	85
9	96	99	92	85	97	47	35	27	---	55	97	93
10	94	99	81	92	97	74	42	51	---	50	92	93
11	99	99	62	81	97	53	37	38	54	58	65	62
12	94	99	58	78	95	46	52	23	100	99	94	76
13	79	99	39	82	100	84	42	28	---	98	83	97
14	95	99	32	97	98	72	29	29	---	80	67	99
15	82	98	80	95	82	99	26	37	69	83	45	84
16	50	76	79	93	67	99	25	40	58	84	40	99
17	53	78	29	93	75	93	29	47	39	99	62	99
18	98	92	84	84	68	70	35	20	39	97	84	82
19	81	60	95	99	74	51	40	77	41	100	86	59
20	98	36	99	85	51	53	39	57	40	98	98	69
21	95	42	97	93	65	52	38	30	40	99	97	66
22	90	65	90	84	75	42	63	26	45	100	95	64
23	95	79	79	83	51	53	46	29	52	86	97	50
24	96	97	39	71	78	51	30	38	73	98	94	50
25	98	98	47	57	83	72	26	41	49	100	99	50
26	96	98	96	59	76	54	30	62	51	79	99	20
27	86	97	90	46	73	40	34	55	47	61	99	27
28	96	98	97	78	91	41	34	47	46	66	94	29
29	95	57	84	64	98	46	30	35	52	70	95	30
30	59	---	75	50	84	54	58	45	53	51	98	32
31	64	---	93	---	68		48	47	---	40	---	25
Média	89,3	77,3	74,6	77,4	76,1	59,7	40,4	39,5	53,3	70,2	85,6	71,1

A.3.2. Temperatura

Na Tabela A.5 estão presentes os valores diários referentes à temperatura para, posteriormente, ser obtida a média mensal, para o ano de 2016.

Tabela A.5 – Dados obtidos relativos à temperatura do ar atmosférico, em °C, para os meses do ano de 2016, e a respetiva média mensal. [16]

Dias	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	12	12	8	9	13	20	18	19	20	14	19	16
2	10	10	11	10	16	18	18	19	18	13	18	14
3	11	11	10	11	19	17	23	18	20	14	18	14
4	11	11	11	12	22	17	19	18	20	18	18	17
5	12	12	8	11	17	17	20	19	20	17	12	16
6	11	11	7	11	14	19	23	26	24	14	10	16
7	11	11	9	13	13	18	21	29	18	14	9	14
8	13	13	8	10	14	19	19	29	19	14	10	14
9	13	13	10	10	14	18	19	21	17	14	13	14
10	14	14	10	10	14	18	19	24	20	16	11	15
11	14	14	10	10	13	16	18	24	19	17	12	14
12	14	14	11	12	13	19	17	23	20	17	14	13
13	14	14	11	13	14	18	18	19	18	16	16	12
14	10	10	12	13	14	17	22	16	16	13	15	11
15	9	9	11	13	14	16	27	18	16	17	13	8
16	6	6	11	13	14	16	26	17	17	17	13	10
17	7	7	10	12	16	16	20	19	18	17	11	12
18	7	7	11	13	15	16	21	17	19	17	13	10
19	6	6	11	17	17	18	19	19	18	21	12	9
20	9	9	11	14	15	18	18	17	14	18	16	8
21	12	12	13	15	14	20	18	19	16	17	11	9
22	9	9	11	14	14	18	21	23	16	18	9	12
23	10	10	11	14	16	18	22	19	16	14	7	10
24	11	11	10	13	16	19	24	21	17	17	7	11
25	11	11	11	15	16	19	26	19	16	20	9	12
26	9	9	12	14	15	21	20	21	16	21	11	9
27	7	7	12	13	17	22	21	18	19	23	11	10
28	8	8	13	13	16	18	22	18	22	22	11	9
29	9	9	14	13	16	17	20	18	21	22	12	10
30	8		11	13	16	16	18	18	14	20	14	11
31	12		9		16		19	19		20		10
Média	11,84	10,34	10,58	12,47	15,26	17,97	21,52	20,13	18,13	17,16	12,50	11,94

B. Balanços ao Forno AV5

No presente anexo encontram-se os exemplos de cálculo referentes e os resultados referentes ao balanço mássico e energético.

Os valores das propriedades dos compostos são necessários para os diferentes cálculos efetuados. Estas foram consultadas a partir da literatura. Na Tabela B.1 estão presentes as propriedades do ar ambiente, do gás natural, do vidro e dos gases de combustão, necessárias para cálculos posteriores.

Tabela B.1 - Propriedades de alguns componentes utilizados no forno de fusão. [17] [18] [19] [20]

Propriedades	Ar ambiente	Ar seco	Gás Natural	Vidro	Gases Combustão	Vapor água
ρ (kg/m ³)	1,2	---	0,814	---	0,66	---
c_p (kJ/Kg.K)	1,0	1,012	2,34	0,038	---	2,044
λ (kJ/Kg)	---	---	---	---	---	2 256,66

B.1. Balanço de Massa

No balanço de massa foram consideradas as correntes gasosas envolvidas na fusão (ar de combustão e de gás natural) e as correntes de vidro. Relativamente à corrente de gases à saída do forno, não foram consideradas perdas, correspondendo ao somatório entre a massa de gás natural e a massa de ar de combustão. Para a corrente de vidro fundido, foram consideradas perdas de 10%. Este valor é considerado devido a estudos realizados na divisão sobre a quantidade de matéria-prima perdida, por exemplo, nas máquinas que alimentam o forno. Deste modo, a a matéria-prima utilizada na fusão corresponde a 1,10% da tiragem, ou seja, a quantidade de vidro fundido produzido. A determinação destes balanços de massa tem como objetivo a sua utilização no balanço energético global ao forno AV5.

Na Tabela B.2 estão presentes os resultados obtidos para a quantidade de gases de combustão resultantes, em cada mês de 2016.

Tabela B.2 – Resultados obtidos para a massa de gases de combustão formados no forno AV5 ao longo do meses de 2016.

Meses	$V_{Ar\ comb}$ (m ³ /mês)	$M_{Ar\ comb}$ (kg/mês)	V_{GN} (m ³ /mês)	M_{GN} (kg/mês)	$M_{Gases\ comb}$ (kg/mês)
Janeiro	851 489	1 021 787	1 214 040	988 350	2 010 137
Fevereiro	732 972	879 566	1 069 038	870 304	1 749 870
Março	788 025	945 630	1 144 980	932 128	1 877 758
Abril	733 816	880 579	1 144 330	931 599	1 812 178
Maio	543 906	652 687	1 159 440	943 900	1 596 587
Junho	745 690	894 828	1 090 180	887 516	1 782 344
Julho	814 224	977 069	1 196 850	974 356	1 951 425
Agosto	779 302	935 162	1 142 560	930 158	1 865 320
Setembro	776 227	931 472	1 132 180	921 708	1 853 180
Outubro	775 006	930 007	1 134 300	923 434	1 853 440
Novembro	765 231	918 277	1 124 090	915 122	1 833 398
Dezembro	807 192	968 630	1 183 460	963 455	1 932 085

Na Tabela B.3 estão presentes os resultados obtidos para a matéria-prima fornecida ao forno AV5 para a produção de vidro fundido.

Tabela B.3 – Resultados obtidos para a quantidade de matéria-prima fornecida ao forno AV5 ao longo dos meses de 2016.

Meses	Tiragem (ton/mês)	$M_{MP\ entrada}$ (ton/mês)
Janeiro	13 063	14 369
Fevereiro	12 112	13 323
Março	13 371	14 708
Abril	13 194	14 514
Maio	12 931	14 224
Junho	12 166	13 383
Julho	13 366	14 703
Agosto	12 594	13 853
Setembro	12 575	13 832
Outubro	12 394	13 634
Novembro	12 094	13 303
Dezembro	12 883	14 171

B.2. Balanço de Energia

B.2.1. Composição do efluente gasoso

Os gases resultantes da reação de combustão no forno são lançados para o meio ambiente a partir de uma chaminé. Devido a questões ambientais, são realizadas duas caracterizações anuais a estes gases, de forma a verificar se a sua composição se encontra dentro da legislação de proteção ambiental. Na Tabela B.4 encontram-se apresentados os resultados dos parâmetros analisados com relevância para esta dissertação, referentes a uma medição realizada no ano de 2016.

Tabela B.4 – Resultados obtidos na caracterização dos efluentes gasosos do forno AV5, relativamente ao ano de 2016.

Parâmetros	Medição Anual
Teor de CO ₂ (%)	7,2
Teor de Oxigénio (%)	9,7
Teor de humidade (%)	9,6
Somatório (%)	26,5

Observando a composição do efluente gasoso, apresentada na Tabela B.4, verifica-se que os gases de combustão contém apenas 26,5% de oxigénio, dióxido de carbono e água. Com isto, pode-se concluir que o efluente gasoso contém 73,5% de inertes, ou seja, azoto. Os inertes são componentes que não sofreram qualquer reação, a quantidade final é igual à quantidade inicial.

O ar atmosférico apresenta 79% de azoto, ou seja, o efluente gasoso do forno AV5 possui uma composição semelhante. Assim, para simplificação de cálculos, na determinação do calor específico considerou-se que o calor que o calor específico dos gases de combustão é correspondente ao do ar.

B.2.2. Exemplos de Cálculo

Como exemplo de cálculo, para o balanço energético, vai ser considerada a produção do mês de janeiro.

Energia à entrada (ΣH_e)

- Ar de combustão

$$H_{Ar\ comb} = \dot{m}_{Ar\ seco} * [\lambda_{\acute{a}gua} * Y_e + (c_{p_{Ar\ seco}} + Y_e * c_{p_{Vapor\ \acute{a}gua}}) * (T_{Ar} - T_{ref})]$$

$$\dot{m}_{Ar\ seco} = \dot{m}_{Ar\ comb} - \dot{m}_{\acute{a}gua}$$

$$\dot{m}_{\acute{a}gua} = \dot{m}_{Ar\ comb} * \frac{Hr}{100}$$

$$\dot{m}_{\acute{a}gua} = 1\ 021\ 787 * \frac{89,3}{100} = 912\ 027 \frac{kg}{m\acute{e}s}$$

$$\dot{m}_{Ar\ seco} = 1\ 021\ 787 - 912\ 027 = 109\ 760 \frac{kg}{m\acute{e}s} * \frac{1\ m\acute{e}s}{31\ dias} * \frac{1\ dia}{24\ h} * \frac{1\ h}{3600\ s} = 0,041 \frac{kg}{s}$$

$$H_{Ar\ comb} = 0,041 * (2256,66 * 0,0078 + (1,012 + 0,0078 * 2,044) * (11,84 - 0)) = 1,25\ kW$$

Na determinação da humidade específica são considerados os cálculos intermédios apresentados nas equações B.1 e B.2, para ser esta ser obtida a partir da equação B.3. Para a equação B.1 é necessária a pressão de saturação do ar atmosférico e esta é obtida a partir das tabelas de saturação da água para 1 atmosfera, com a temperatura do ar. A temperatura utilizada e a humidade relativa são valores médios para o mês de janeiro.

$$\text{Para } T = 11,8\ ^\circ\text{C} \rightarrow P\ \text{saturação}\ \acute{a}gua = 1,401\ \text{kPa}$$

$$1\ \text{atm} = 101,325\ \text{kPa}$$

$$Hr = \frac{P\ \text{vapor}}{P\ \text{saturação}} \Leftrightarrow P\ \text{vapor} = 0,893 * 1,401 = 1,251\ \text{kPa} \quad (\text{B.1})$$

$$Y_m = \frac{P\ \text{vapor}}{P\ \text{total} - P\ \text{vapor}} = \frac{1,251}{101,325 - 1,251} = 0,0125 \frac{\text{moles vapor}}{\text{moles ar seco}} \quad (\text{B.2})$$

$$Y_e = Y_m * \frac{MM_{\acute{a}gua}}{MM_{Ar\ seco}} = 0,0125 * \frac{18}{28,9} = 0,0078 \frac{kg\ \acute{a}gua}{kg\ ar\ seco} \quad (\text{B.3})$$

- Gás natural

$$H_{GN} = \dot{V}_{GN} * c_{pGN} * \rho_{GN} * (T_{GN} - T_{ref})$$

$$H_{GN} = \frac{1\,214\,040}{31 * 24 * 3600} \frac{m^3}{s} * 2,34 \frac{kJ}{kg \cdot K} * 0,8141 \frac{kg}{m^3} * (14 - 0) = 12,42 \text{ kW}$$

- Eletricidade

$$AE = 1\,029\,880 \text{ kW}$$

- Matéria-prima

$$H_{MP} = \dot{m}_{MP} * c_{pvidro} * (T_{MP} - T_{ref})$$

Considerando o calor específico do vidro e uma temperatura ambiente de 20°C,

$$H_{MP} = \frac{14\,369 * 1\,000}{31 * 24 * 3\,600} \frac{kg}{s} * 0,038 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} * (20 - 0) = 4,11 \text{ kW}$$

- Ar frio

$$H_{Ar \text{ frio}} = \dot{m}_{Ar \text{ frio}} * [\lambda_{\text{Água}} * Y_e + (c_{pAr \text{ seco}} + Y_e * c_{pVapor \text{ água}}) * (T_{ar} - T_{ref})]$$

O ventilador utilizado aspira um caudal de ar de 34,72 m³/s e apresenta uma temperatura de aspiração de 32°C.

$$\begin{aligned} H_{Ar \text{ frio}} &= 34,72 * 1,2 * (2256,66 * 0,0078 + (1,012 + 0,0078 * 2,044) * (32 - 0)) \\ &= 2102 \text{ kW} \end{aligned}$$

Calor da reação (ΔH_{298}^0)

$$\Delta H_{298}^0 = PCI * \dot{V}_{GN}$$

Considerando o volume de gás natural e o PCI médio do mês de janeiro,

$$\Delta H_{298}^0 = 9151,37 \frac{kcal}{m^3} * 0,453 \frac{m^3}{s} * \frac{4,19 \text{ kJ}}{1 \text{ kcal}} = 17\,380,32 \text{ kW}$$

Energia à saída (ΣH_s)

- Tiragem

$$H_{Tiragem} = \dot{m}_{Tiragem} * c_{pvidro} * (T_{Tiragem} - T_{ref})$$

$$H_{Tiragem} = \frac{13\,063 * 1\,000}{31 * 24 * 3\,600} \frac{kg}{s} * 0,038 * \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} * (1129 - 0) = 210,83 \text{ kW}$$

- Gases de combustão

$$H_{\text{Gases comb}} = \int_{T_{\text{ref}}}^{T_s} (\dot{m}_{\text{Gases comb}} * c_{p\text{Gases comb}}) dT$$

$$c_p = a + b * T + c * T^2 + d * T^3 \left[\frac{\text{cal}}{\text{mol. K}} \right]$$

Para a determinação do poder calorífico dos gases, considerando uma composição igual à do ar, são utilizadas as constantes apresentadas na Tabela B.5.

Tabela B.5 - Constantes tabeladas para a determinação da capacidade calorífica dos gases de combustão. [21]

Constantes	a	b	c	d
	6,713	$0,04697 * 10^{-2}$	$0,1147 * 10^{-5}$	$0,4696 * 10^{-9}$

Considerando como estado de referência o ar atmosférico a 0°C (273 K) e a temperatura de saída dos gases de combustão pela chaminé, 370°C (643 K), é então possível determinar a capacidade calorífica dos gases de combustão.

$$c_{p\text{ar}} = \left(\int_{273}^{643} 6,713 + 0,04697 * 10^{-2} * T + 0,1147 * 10^{-5} * T^2 - 0,4696 * 10^{-9} * T^3 \right) dT$$

$$= 4024 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}$$

Considerando a massa molecular do ar como 28,9 g/mol e que 1 cal corresponde a 4,18 kJ,

$$4024 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} * \frac{1 \text{ mol}}{28,9 \text{ g}} * 4,18 = 582,02 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$H_{\text{Gases comb}} = \dot{m}_{\text{Gases comb}} * \int_{273}^{643} c_p dT = 0,75 * \frac{4024}{28,9} * 4,18 = 436,8 \text{ kW}$$

Aplicação do Balanço Energético

De acordo com os restantes exemplos de cálculo, foi considerado o mês de janeiro para a determinação do volume de gás natural utilizando diferentes percentagens de ar de combustão. Para tal, foi necessário determinar as perdas térmica deste mês.

$$Q = \sum \text{Saída} - \Delta H_{298}^0 - \sum \text{Entrada}$$

$$Q = (210,83 + 436,80) - 17\,380,32 - (12,42 + 1,25 + 1\,029\,880 + 3,87 + 2\,102)$$

$$= -1\,048\,732 \text{ kW em janeiro}$$

Para se obter uma equação de forma a ser determinado o volume de gás natural:

$$-1\,048\,732 = (210,83 + (\dot{m}_{\text{ar comb}} + \dot{m}_{\text{GN}}) * 582) - (V_{\text{GN}} * \text{PCI}) - (12,42 + H_{\text{ar comb}} + 1\,029\,880 + 3,87 + 2\,102)$$

Como $\dot{m}_{\text{GN}} = \rho_{\text{GN}} * V_{\text{GN}}$,

$$V_{\text{GN}} = \frac{-16\,994,54 - \dot{m}_{\text{ar comb}} * 582 + H_{\text{ar comb}}}{582 * \rho_{\text{GN}} - \text{PCI}}$$

B.2.3. Excesso de ar

O excesso de ar é um fator determinando na eficiência da combustão. Este fator controla o volume, a temperatura e a entalpia dos produtos de combustão. Para ser realizada a reação de combustão, é necessária uma quantidade de ar estequiométrica, denominada de ar teórico. No entanto, para assegurar a combustão completa, é necessário um “excesso de ar” de modo a existir um teor de oxigénio suficiente até ao final da chama. [22]

Um grande excesso de ar é indesejável, pois diminui a temperatura da chama e aumenta as perdas de calor devido à entalpia dos gases efluentes. Com isto, é reduzida a eficiência térmica e é diminuído o comprimento da chama. Por outro lado, um baixo excesso de ar, pode resultar numa combustão incompleta e na formação de monóxido de carbono (CO) e possibilitar a acumulação de combustível não queimado, causando risco de explosão. É importante encontrar um valor ótimo de excesso de ar em que, é suficientemente baixo para minimizar a perda de calor pelos gases de exaustão e não produzir uma combustão incompleta. [22]

De acordo com a literatura, a razão de excesso de ar ótima recomendado situa-se entre os 5 e 20%, para a combustão com gás natural. [13] Para ser avaliado o excesso de ar utilizado normalmente no forno AV5, foram analisados os resultados obtidos das medições realizadas semanalmente pela divisão da fusão e foi utilizada uma percentagem média de oxigénio.

O excesso de ar pode ser determinado pela equação descrita seguidamente, considerando combustão completa.

$$\text{Excesso de ar (\%)} = \frac{O_2 (\%)}{21 - O_2 (\%)} \quad (\text{B.5})$$

$$\text{Excesso de ar (\%)} = \frac{4,1}{21 - 4,1} = 23,5 \%$$

Para efeitos de cálculo, foi utilizada uma percentagem de 24% de ar em excesso. Com o resultado obtido, verifica-se que o ar de combustão utilizado pode ser reduzido 4%. Em média, para 1 m³ de gás natural são utilizados 15 m³ de ar ambiente. Assim, poderiam ser utilizados 12,5 m³ de ar ambiente.

É interessante verificar que alterações provocaria uma diminuição do volume de ar ambiente no volume de gás natural consumido. Com uma menor quantidade de ar leva a um menor consumo de gás natural, uma vez que há uma diminuição de ar a aquecer.

B.3. Resultados

- Ar Combustão

Para o ar de combustão, na Tabela B.6 estão presentes os resultados obtidos para a massa de ar seco mensal. Na Tabela B.7 estão presentes os valores mensais para a entalpia associada. Estes variam de acordo com a quantidade de ar utilizado na reação de combustão.

Tabela B.6 – Valores obtidos para a massa de ar seco mensal, em kg.

Meses	V _{Ar comb} (m ³ /mês)	M _{Ar comb} (kg/mês)	M _{água} (kg/mês)	M _{ar seco} (kg/mês)
Janeiro	851 489	1 021 787	91 2027	10 9760
Fevereiro	732 972	879 566	67 9996	19 9571
Março	788 025	945 630	70 5257	24 0373
Abril	733 816	880 579	68 1275	19 9304
Maio	543 906	652 687	49 6674	15 6013
Junho	745 690	894 828	53 4212	36 0616
Julho	814 224	977 069	39 4295	58 2774
Agosto	779 302	935 162	36 9540	56 5622
Setembro	776 227	931 472	49 6009	43 5463
Outubro	775 006	930 007	65 2805	27 7202
Novembro	765 231	918 277	78 6045	13 2232
Dezembro	807 192	968 630	68 8977	27 9653

Tabela B.7 – Resultados obtidos para a entalpia associada ao ar de combustão, para 24% de excesso de ar (com dados diretos da empresa), 15%, 20% e para o ar estequiométrico.

Meses	H _{Ar comb} (kW)			
	24% excesso ar	20% excesso ar	15% excesso ar	Ar estequiométrico
Janeiro	1,25	1,18	1,13	0,98
Fevereiro	2,03	1,84	1,76	1,53
Março	2,32	2,09	2,01	1,74
Abril	2,33	2,12	2,03	1,77
Mai	2,07	1,91	1,83	1,59
Junho	5,65	4,81	4,61	4,01
Julho	9,98	7,70	7,38	6,41
Agosto	8,87	6,85	6,57	5,71
Setembro	6,72	5,53	5,30	4,61
Outubro	4,15	3,68	3,53	3,07
Novembro	1,60	1,49	1,43	1,25
Dezembro	2,99	2,65	2,54	2,21
Total	50	42	40	35

- Humidade específica

Na Tabela B.8 encontram-se presentes os resultados obtidos para a pressão de saturação e de vapor, de acordo com a temperatura do ar atmosférico, e a respetiva humidade molar e específica.

Tabela B.8 – Resultados obtidos para a humidade específica do ar de combustão referente a cada mês de 2016.

Meses	T ar média (°C)	Hr média (%)	P saturação (kPa)	P vapor (kPa)	Ye (kg água/kg ar seco)
Janeiro	11,84	89,26	1,401	1,251	0,0078
Fevereiro	10,34	77,31	1,227	0,949	0,0059
Março	10,58	74,58	1,270	0,947	0,0059
Abril	12,47	77,37	1,449	1,121	0,0070
Mai	15,26	76,10	1,704	1,297	0,0081
Junho	17,97	59,70	2,062	1,231	0,0077
Julho	21,52	40,35	2,564	1,034	0,0064
Agosto	20,13	39,52	2,337	0,923	0,0057
Setembro	18,13	53,25	2,062	1,098	0,0068
Outubro	17,16	70,19	1,936	1,359	0,0085
Novembro	12,50	85,60	1,449	1,240	0,0077
Dezembro	11,94	71,13	1,401	0,997	0,0062

- Gás Natural

Na Tabela B.9 estão presentes os resultados para a entalpia associada ao gás natural. Estes resultados foram utilizados independentemente do excesso de ar.

Tabela B.9 – Resultados obtidos para a entalpia associada à corrente de gases de combustão, para o ano de 2016.

Meses	H _{GN} (kW)
Janeiro	12,42
Fevereiro	10,98
Março	11,83
Abril	13,61
Maio	15,57
Junho	18,04
Julho	21,96
Agosto	20,53
Setembro	19,37
Outubro	16,50
Novembro	13,35
Dezembro	12,10
Total	186,1

- Matéria-prima

Na Tabela B.10 estão presentes os resultados obtidos para a entalpia da matéria-prima utilizada para alimentar o forno. Estes valores são utilizados independentemente da quantidade de ar em excesso.

Tabela B.10 – Resultados obtidos para a entalpia associada à matéria-prima.

Meses	H _{MP} (kW)
Janeiro	3,87
Fevereiro	3,82
Março	3,95
Abril	4,03
Maio	3,82
Junho	3,72
Julho	3,96
Agosto	3,74
Setembro	3,85
Outubro	3,67
Novembro	3,71
Dezembro	3,81
Total	45,96

- Ar frio

Na Tabela B.11 estão presentes os resultados obtidos para a entalpia do ar utilizado na refrigeração do forno. Estes valores são utilizados independentemente da quantidade de ar em excesso.

Tabela B.11 – Resultados obtidos para a entalpia associada ao ar de refrigeração.

Meses	H_{ar frio} (kW)
Janeiro	2 102
Fevereiro	1 919
Março	1 918
Abril	2 023
Maio	2 130
Junho	2 090
Julho	1 971
Agosto	1 903
Setembro	2 009
Outubro	2 168
Novembro	2 096
Dezembro	1 948
Total	24 278

- Calor de reação

Na Tabela B.12 estão presentes os resultados obtidos para o calor de reação. Estes valores são utilizados independentemente da quantidade de ar em excesso, dependendo apenas do poder calorífico do gás natural e do seu volume.

Tabela B.12 - Resultados obtidos para o calor de reação, para o gás natural.

Meses	ΔH_{298}^0 (kW)
Janeiro	17 380
Fevereiro	16 444
Março	16 479
Abril	16 794
Maio	16 332
Junho	15 904
Julho	17 119
Agosto	16 179
Setembro	16 623
Outubro	16 178
Novembro	16 492
Dezembro	16 758
Total	198 683

- Tiragem

Na Tabela B.13 estão presentes os resultados obtidos para o vidro fundido, a tiragem. Estes valores são utilizados independentemente da quantidade de ar em excesso, dependendo apenas do poder calorífico do gás natural e do seu volume.

Tabela B.13 – Resultados obtidos para a entalpia associada à tiragem.

Meses	H Tiragem (kW)
Janeiro	210,83
Fevereiro	210,89
Março	221,82
Abril	232,22
Maió	213,96
Junho	209,25
Julho	222,59
Agosto	217,84
Setembro	214,07
Outubro	211,36
Novembro	212,27
Dezembro	217,34
Total	2 594

- Gases Combustão

Para os gases de combustão, na Tabela B.14 estão presentes os resultados obtidos mensais para a entalpia associada. Estes resultados variam de acordo com a quantidade de ar utilizado.

Tabela B.14 – Resultados obtidos para a entalpia associada aos gases de combustão.

Meses	H Gases comb (kW)			
	24% excesso ar	20% excesso ar	15% excesso ar	Ar estequiométrico
Janeiro	436,80	429,64	420,69	393,83
Fevereiro	406,47	387,12	379,42	356,30
Março	408,04	401,41	393,12	368,27
Abril	406,91	394,36	386,65	363,50
Maiο	346,94	342,36	336,65	319,49
Junho	400,21	387,46	379,62	356,10
Julho	424,05	417,20	408,64	382,95
Agosto	405,34	398,78	390,59	366,00
Setembro	416,12	402,84	394,68	370,20
Outubro	402,75	396,23	388,09	363,64
Novembro	411,68	398,59	390,54	366,41
Dezembro	419,84	413,05	404,57	379,10
Total	4 885	4 769	4 673	4 386

C. Indicadores de Fusão

Como indicadores considerou-se o consumo específico de energia, a intensidade carbónica e o custo específico de fusão. No presente anexo estão presentes os resultados obtidos mensalmente, para cada indicador, e como exemplo de cálculo foi considerado o mês de janeiro.

- Consumo específico de energia

$$CEE \text{ (tep/ton)} = \frac{\text{Energia}}{\text{Produção}}$$

Para o cálculo da energia, expressa em tep, foram utilizados fatores de conversão de acordo com a utilidade, sendo estes:

$$\text{Gás natural} - 0,91 \text{ tep}/10^3 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ KWh corresponde a } 215 \times 10^{-6} \text{ tep}$$

De acordo com os valores apresentados no Anexo A.2, para o gás natural:

$$CEE \text{ gás natural} = \frac{1\,214\,040 \frac{\text{m}^3}{\text{mês}} * \frac{0,91 \text{ tep}}{10^3 \text{ m}^3}}{13\,063 \frac{\text{ton}}{\text{mês}}} = 0,0846 \frac{\text{tep}}{\text{ton}}$$

Para a ajuda elétrica:

$$CEE \text{ ajuda elétrica} = \frac{1\,029\,880 \frac{\text{kW}}{\text{mês}} * 215 * 10^{-6}}{13\,063 \frac{\text{ton}}{\text{mês}}} = 0,0170 \frac{\text{tep}}{\text{ton}}$$

$$CEE = 0,0846 + 0,0170 = 0,1015 \frac{\text{tep}}{\text{ton}}$$

Na Tabela C.1 estão presentes os resultados obtidos para a energia fornecida por cada utilidade, em tep, e o respetivo consumo específico de energia, para cada mês do ano de 2016.

Tabela C.1 – Resultados obtidos para o consumo específico de gás natural e de eletricidade, para o ano de 2016.

Meses	GN (tep/mês)	CEE _{GN} (tep/ton)	AE (tep/mês)	CEE _{AE} (tep/ton)	CEE (tep/ton)
Janeiro	1 104,78	0,0846	221,42	0,0170	0,1015
Fevereiro	972,82	0,0803	223,75	0,0185	0,0988
Março	1 041,93	0,0779	248,99	0,0186	0,0965
Abril	1 041,34	0,0789	227,71	0,0173	0,0962
Maio	1 055,09	0,0816	232,05	0,0179	0,0995
Junho	992,06	0,0815	217,35	0,0179	0,0994
Julho	1 089,13	0,0815	214,77	0,0161	0,0976
Agosto	1 039,73	0,0826	206,00	0,0164	0,0989
Setembro	1 030,28	0,0819	199,69	0,0159	0,0978
Outubro	1 032,21	0,0833	201,20	0,0162	0,0995
Novembro	1 022,92	0,0846	210,01	0,0174	0,1019
Dezembro	1 076,95	0,0836	221,81	0,0172	0,1008

- Intensidade carbónica

$$IC (\text{kgCO}_2/\text{tep}) = \frac{\text{GEE}}{\text{Energia}}$$

Em que, GEE representam os gases com efeito de estufa. Em relação à unidade fabril sabe-se as emissões totais dos três fornos e o consumo total de gás natural. Como tal, sabendo o consumo energético do forno AV5, é possível obter os GEE do mesmo diretamente. Na Tabela C.2 estão presentes os resultados obtidos para a emissão de gases com efeito de estufa e a respetiva intensidade carbónica.

Tabela C.2 – Resultados obtidos para as emissões de gases com efeito de estufa e da intensidade carbónica.

Meses	AV			AV5	
	GEE AV (kgCO ₂)	GN AV (m ³)	IC AV (kgCO ₂ /tep)	GEE AV5 (kgCO ₂)	IC AV5 (kgCO ₂ /tep)
Janeiro	5 714 317	2 676 341	5 172	2 592 125	2 346
Fevereiro	6 226 025	2 916 004	6 400	2 282 527	2 346
Março	6 771 549	3 171 504	6 499	2 444 672	2 346
Abril	6 578 517	3 081 096	6 317	2 443 284	2 346
Mai	6 859 791	3 212 833	6 502	2 475 546	2 346
Junho	6 362 754	2 980 042	6 414	2 327 668	2 346
Julho	6 612 106	3 096 828	6 071	2 555 421	2 346
Agosto	6 458 365	3 024 822	6 212	2 439 505	2 346
Setembro	6 613 530	3 099 408	6 419	2 415 851	2 345
Outubro	6 825 987	3 166 816	6 613	2 444 953	2 369
Novembro	6 482 676	3 033 555	6 337	2 402 169	2 348
Dezembro	6 814 142	3 188 664	6 327	2 529 042	2 348
Soma				29 352 763	

- Custo específico de fusão

$$CEF = \frac{(\text{Preço casco} + \text{Preço MP} + \text{Preço GN} + \text{Preço AE}) \text{ [€]}}{\text{Produção [ton]}}$$

Na determinação do custo específico de fusão são utilizados custos médios de casco, da restante matéria-prima, do gás natural e de eletricidade. Os custos utilizados estão presentes na Tabela C.3.

Tabela C.3 – Custos médios para os diferentes produtos envolvidos no processo de fusão.

Casco (€/ton)	MP (€/tonvf)	GN (€/MWh)	AE (€/MWh)
48	62	35,56	62,79

De acordo com as quantidades utilizadas mensalmente, dos produtos indicados na Tabela C.3, foram obtidos os resultados presentes na Tabela C.4.

Tabela C.4 – Resultados obtidos para o custo específico de fusão mensal.

Meses	CEF (€/ton vf)
Janeiro	96,036
Fevereiro	94,169
Março	93,286
Abril	93,301
Maiο	94,874
Junho	94,906
Julho	94,511
Agosto	95,635
Setembro	94,852
Outubro	95,472
Novembro	96,527
Dezembro	95,601

D. Análise Estatística

O presente anexo tem como objetivo determinar a variabilidade dos valores de percentagem de incorporação de casco e do poder calorífico inferior, para cada mês.

D.1. Incorporação de Casco

As percentagens de incorporação de casco apresentam uma elevada gama de utilização, de 55 a 70% de casco. Esta gama pode ser encontrada ao longo de cada mês, para diferentes produções de vidro fundido. Deste modo, é importante avaliar a variabilidade da percentagem utilizada para cada mês, para se verificar se podem ser utilizados valores médios. Para a determinação desta variabilidade, foram realizadas as etapas seguintes:

1. Determinação da média

Para cada mês foi calculada a média da percentagem de incorporação de casco.

2. Determinação do desvio padrão

O desvio padrão mede a dispersão dos dados (o quanto estão “espalhados”) sobre a média, e este pode ser calculado a partir da equação C.1 Quanto maior for o desvio, maior será a dispersão dos dados. [15]

$$DP = \sqrt{\frac{\sum |X - \bar{X}|^2}{N}} \quad (D.1)$$

Em que,

X – é valor do conjunto de dados, ou seja, a percentagem de casco referente a um determinado dia do mês;

\bar{X} – é a média da percentagem de incorporação de casco;

N – é o número de dados da amostra como, por exemplo, para janeiro o N toma como valor 31 dias.

3. Determinação do coeficiente de variação

O coeficiente é uma medida de dispersão que descreve a variação relativa à média, em percentagem. Este é determinado a partir do quociente entre o desvio padrão e a média, como apresentado na equação C.2.

$$CV = \frac{DV}{\bar{X}} * 100 \quad (D.2)$$

Para coeficientes de variação superiores a 20%, de acordo com a literatura, a amostra de dados não apresenta dados homogêneos, ou seja, existe uma grande variabilidade. [15]

O coeficiente de variação foi determinado para os meses do ano de 2016 e os resultados obtidos encontram-se presentes na Tabela D.1.

Tabela D.1 – Resultados obtidos para a variabilidade da percentagem de incorporação de casco, para cada mês de 2016.

Meses	Média de casco (%)	DP	CV (%)
Janeiro	0,65	0,0262	4,05
Fevereiro	0,67	0,0094	1,40
Março	0,66	0,0263	3,97
Abril	0,67	0,0257	3,87
Maio	0,65	0,0282	4,32
Junho	0,65	0,0413	6,37
Julho	0,64	0,0175	2,75
Agosto	0,60	0,0349	5,85
Setembro	0,62	0,0259	4,17
Outubro	0,63	0,0231	3,67
Novembro	0,62	0,0458	7,40
Dezembro	0,65	0,0349	5,36

Observando os resultados obtidos na Tabela D.1 verifica-se que não existe uma variabilidade elevada para a percentagem de casco utilizada mensalmente. O mês com uma menor variação é fevereiro e onde ocorre uma maior variação é em novembro. No entanto, ao longo de todos os meses não é obtido um coeficiente de variação superior a 20%. Assim, é possível concluir que podem ser utilizados valores médios de incorporação de casco ao longo das análises efetuadas.

D.2. Poder Calorífico Inferior

Para além da utilização da percentagem média de casco, pode também ser necessário usar os valores médios do poder calorífico interior. Deste modo, procedeu-se da mesma forma para os valores do poder calorífico, determinando o coeficiente de variação para cada mês. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela D.2.

Tabela D.2 - Resultados obtidos para a variabilidade da percentagem de incorporação de casco, para cada mês de 2016.

Meses	PCI médio	DP	CV (%)
Janeiro	9151	62,28	0,68
Fevereiro	9198	51,02	0,55
Março	9200	95,45	1,04
Abril	9079	83,06	0,91
Maió	9004	43,17	0,48
Junho	9025	98,28	1,09
Julho	9143	79,37	0,87
Agosto	9052	70,51	0,78
Setembro	9083	139,28	1,53
Outubro	9117	86,65	0,95
Novembro	9076	89,30	0,98
Dezembro	9052	72,80	0,80

Observando a Tabela D.2, verifica-se que ao longo de todos os meses se obtém um coeficiente de variação pouco significativo. O valor mais elevado é obtido em setembro, com 1,53%. Assim, pode ser utilizada a média dos valores mensais para o poder calorífico inferior.

E. Análise de Dados

E.1. Análise dos Consumos

De maneira a poder avaliar a influência que a quantidade de casco tem na tiragem e no consumo específico, foi usada a seguinte metodologia,

1. Os valores da tiragem, produtividade diária, foram agrupados em intervalos de 5 toneladas.
2. A incorporação de casco foi também agrupada, em intervalos de 4% de casco.
3. Foram inseridos os valores correspondentes ao consumo, para cada intervalo de tiragem e intervalo de incorporação de casco.

Isto foi possível utilizando a opção tabela dinâmica do Excel, que permitiu apresentar os dados anteriores agrupados e verificar para cada intervalo de tiragem, as percentagens de casco utilizadas, bem como, o consumo médio para cada intervalo. É possível ainda verificar a média de cada linha da tabela, que corresponde ao intervalo da tiragem, e a média de cada coluna, que corresponde a cada intervalo de incorporação de casco. É possível agrupar estes valores, devido a não existirem variações significativas em pequenas variações de toneladas ou incorporação de casco. O resultado deste procedimento, encontra-se presente na Tabela E.1.

Tabela E.1 - Consumos específicos para cada intervalo de produtividade e incorporação de casco.
Valores referentes ao ano de 2016.

Consumo médio (kcal/kg)	Casco (%)				Total Geral
	55% - 58%	59% - 62%	63% - 66%	67% -70%	
Tiragem (ton/dia)					
311-316	1058				1058
341 -346				1061	1061
346-351		893			893
356-361		954			954
366-371	958	956		943	953
371-376		794			794
376-381		908	949	1050	932
381-386		944	911		924
386-391	948		901	900	918
391-396		918	912		914
396-401		910	909	907	909
401-406	923	906	949	951	923
406-411	911	914	914		913
411-416		919	900	924	913
416-421		922	883	906	898
421-426		904	925	908	913
426-431		917	887	902	895
431-436		925	897	906	902
436-441		949	898	879	887
441-446			903	888	892
446-451			934	884	909
451-456				866	866
456-461				851	851
461-466				846	846
Total Geral	930	914	906	889	904

Na Tabela E.1 é possível verificar que o consumo específico médio diminui com o aumento da incorporação de casco, sendo obtido o menor consumo para o intervalo de 67-70% de casco, com 889 kcal/kg vidro fundido. Este representa também, o intervalo com maior utilização. A produtividade, no geral, varia de 311 ton até 463 ton

E.2. Estudo de Diferentes Incorporações de casco

Em relação ao estudo das diferentes percentagens de incorporações de casco, foi importante analisar as percentagens intermédias do intervalo de 60 a 65% de casco. Na Figura E.1 encontra-se o gráfico realizado para 61% de casco.

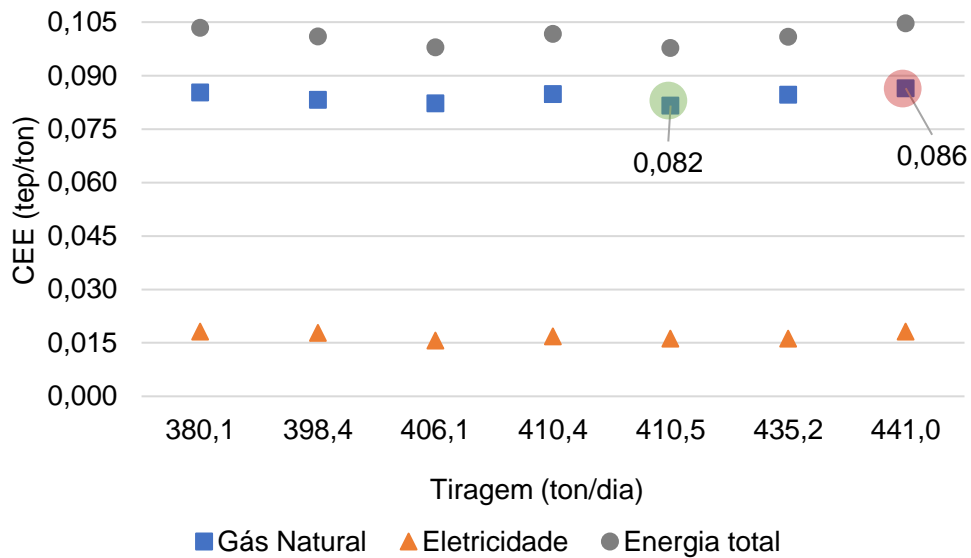


Figura E.1 - Representação gráfica da evolução do consumo específico de energia para o gás natural e eletricidade, em função da tiragem, para 61% de casco.

Na Figura E.2 encontra-se o gráfico realizado para 62% de casco.

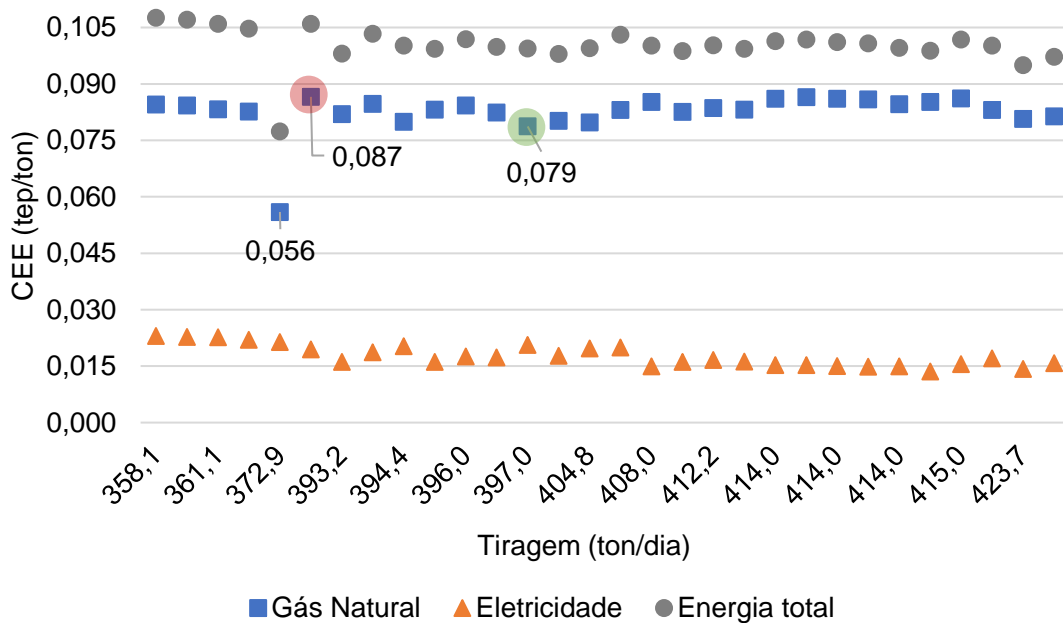


Figura E.2 - Representação gráfica da evolução do consumo específico de energia para o gás natural e eletricidade, em função da tiragem, para 62% de casco.

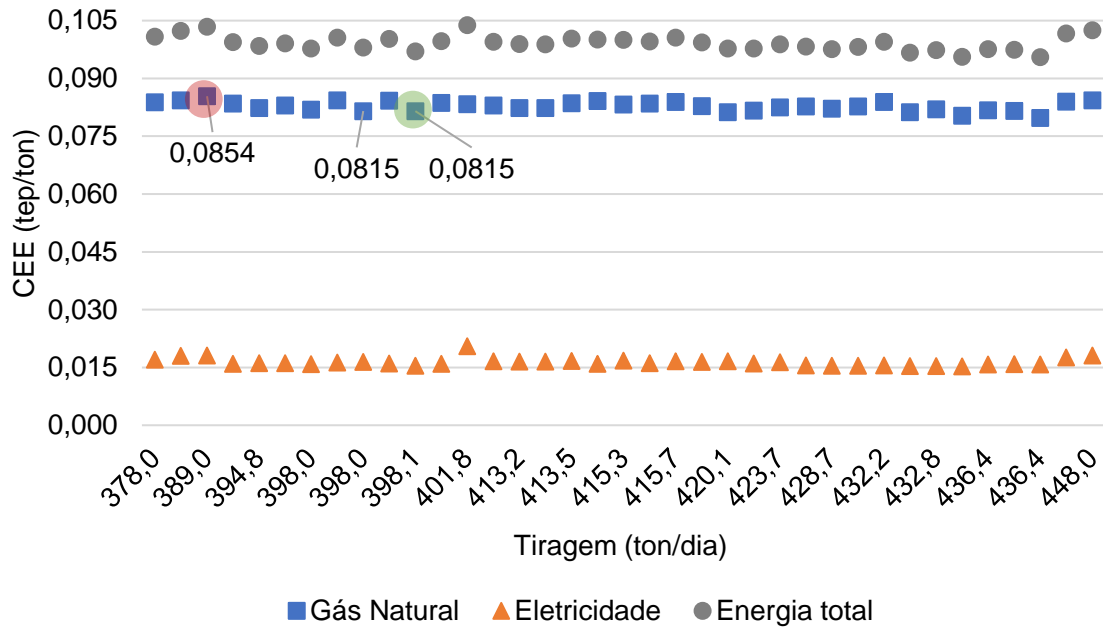


Figura E.3 - Representação gráfica da evolução do consumo específico de energia para o gás natural e eletricidade, em função da tiragem, para 63% de casco.

E.2.1. Exemplo de Cálculo

No estudo de diferentes incorporações de casco, foram obtidas poupanças energéticas. De seguida, segue-se o exemplo de cálculo utilizado para a determinação do valor apresentado para uma percentagem de 60% de casco.

Considerando a conversão de 1 m^3 de gás natural para toneladas equivalentes de petróleo,

$$1 \text{ m}^3 * \frac{0,91}{10^3} = 9,1 * 10^{-4} \text{ tep}$$

Para 60% de casco, foi considerado o maior CEE com 414 ton e o menor CEE com 402 ton. Para a respetiva produção, os tep obtidos são,

$$0,088 \frac{\text{tep}}{\text{ton}} * 414 \text{ ton} = 36,43 \text{ tep}$$

$$0,079 \frac{\text{tep}}{\text{ton}} * 402 \text{ ton} = 31,76 \text{ tep}$$

Assim, se 1 m^3 de gás natural corresponde a $9,1 * 10^{-4} \text{ tep}$, 36,43 tep correspondem a $40\,035 \text{ m}^3$ e 31,76 tep correspondem a $34\,990 \text{ m}^3$. Com isto, é possível obter o volume de gás natural correspondente a 12 toneladas, a partir da diferença entre os dois volumes.

$$40\,035 - 34\,990 = 5\,045 \text{ m}^3$$

F. Ponto Ótimo

F.1. Ferramenta Solver

Na determinação do ponto ótimo entre o consumo energético de gás natural e eletricidade foi utilizada a ferramenta *solver*.

Foi utilizada a equação 4.3, referente ao CEF, considerando a quantidade de gás natural, de eletricidade, de matéria-prima e de casco. Estes foram multiplicados pelos seus respetivos preços médios. No CEF, é também utilizado o valor da tiragem que, tal como a percentagem de incorporação de casco, são inseridos de acordo com o desejado. Neste caso, foram consideradas 400 toneladas de vidro fundido, com uma percentagem de casco de 65%. Isto encontra-se representado na Figura F.1.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		CEF (€/ton)	93,3		Tiragem (ton/dia)	400		
3		PCI (kcal/m ³)	9098		Casco (%)	65%		
4								
5							Casco (€/ton)	48,00
6			dia	hora			MP (€/tonvf)	62,00
7		GN (m ³)	1,0	0,0			GN (€/MWh)	35,56
8		AE (kW)	1,0	0,0			AE (€/MWh)	62,79
9								
10		GN + AE (Kcal)	0,0					
11								
12								
13		=H5*F3+(1-F3)*H6+(((C7*9920*H7)/(360*1000))/F2)+(((C8*H8)/1000)/						
14		F2)						
15		CEF = $\frac{(\text{Preço casco} + \text{Preço MP} + \text{Preço GN} + \text{Preço AE}) \text{ [€]}}{\text{Produção [ton]}}$						
16								
17								

Figura F.1 – Representação da folha de cálculo com o exemplo da utilização do CEF.

Após a inserção da equação de CEF, é então possível utilizar a ferramenta. Vai ser considerado como objetivo a minimização da célula referente ao CEF, alterando as células referentes ao volume de gás natural e de energia elétrica. Nestas, pode ser inserido qualquer valor.

Foi considerada a seguinte conversão de unidades,

$$1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$$

$$1 \text{ MW.h} = 10^6 \text{ W.h}$$

$$1 \text{ kcal} = 4,18 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ MW.h} = 3600 * 10^6 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ MW.h} = 3600 * 10^6 \text{ kJ} * \frac{1 \text{ kcal}}{4,18 \text{ kJ}} = 861 * 10^3 \text{ kcal}$$

Em relação às restrições, foram consideradas cinco, sendo estas:

- Volume de gás natural superior ou igual a 1000 m³. Este valor foi definido de forma a não ser obtido um resultado demasiado inferior ao utilizado na prática.
- Energia elétrica maior ou igual a 1000 kW. Este valor foi definido pelo mesmo motivo do ponto anterior.
- Custo específico de fusão igual à célula C2, ou seja, 93,3. Este valor pode ser alterado.
- O somatório da energia elétrica e do volume de gás natural, convertido para kcal (Figura F.2) tem de ser inferior a 875 kcal/kg vf (objetivo anual da fábrica de Avintes). Para tal, é necessário introduzir um valor referente ao PCI do gás natural. Foi utilizado o valor médio do ano de 2016.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		CEF (€/ton)	93,3		Tiragem (ton/dia)	400		
3		PCI (kcal/m ³)	9098		Casco (%)	65%		
4								
5							Casco (€/ton)	48,00
6			dia	hora			MP (€/tonvf)	62,00
7		GN (m ³)	1,0	0,0			GN (€/MWh)	35,56
8		AE (kW)	1,0	0,0			AE (€/MWh)	62,79
9								
10		GN + AE (Kcal)	=((C7*C3)/(F2*1000))+((C8*860)/(F2*1000))					
11								
12								
13		CEF (€/ton)	52,90					
14								

Figura F.2 – Representação da folha de cálculo com a conversão do consumo das utilidades para kcal.

- A energia elétrica tem de ser inferior ou igual a 35 400 kW diários, ou seja, 1475 kW por hora. Esta restrição deve-se à limitação da própria capacidade nominal das correntes elétricas inseridas no forno. Nos três elétrodos, há uma capacidade disponível de 1475 kW.

As diferentes restrições utilizadas encontram-se apresentadas na Figura F.3.

Parâmetros do Solver ×

Definir Objetivo: ↑

Para: Máximo Mínimo Valor de:

Alterando as Células de Variável:
 ↑

Sujeito às Restrições:

\$C\$10 <= 875
 \$C\$13 = \$C\$2
 \$C\$7 >= 1000
 \$C\$8 <= 35400
 \$C\$8 >= 1000

Adicionar

Alterar

Eliminar

Repor Tudo

Carregar/Guardar

Tornar Não Negativas Variáveis Não Constrangidas

Selec. Método Resolução: Opções

Método de Resolução

Selecione o motor GRG Não Linear para problemas não lineares uniformes do Solver. Selecione o motor LP Simplex para problemas lineares do Solver, e selecione o motor Evolutionary para problemas não uniformes do Solver.

Ajuda Resolver Fechar

Figura F.3 – Restrições utilizadas no Solver.

A partir da opção “Resolver”, é obtido o resultado presente na Figura F.4.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		CEF (€/ton)	93,3		Tiragem (ton/dia)	400		
3		PCI (kcal/m ³)	9098		Casco (%)	65%		
4								
5							Casco (€/ton)	48,00
6			dia	hora			MP (€/tonvf)	62,00
7		GN (m ³)	36972,8	1540,5			GN (€/MWh)	35,56
8		AE (kW)	15838,5	659,9			AE (€/MWh)	62,79
9								
10		GN + AE (Kcal)	875,0					
11								
12								
13		CEF (€/ton)	93,30					
14								

Figura F.4 - Representação da folha de cálculo criada para a utilização do Solver.

F.2. Resultados

De forma a ser respondido o principal objetivo desta dissertação, foi utilizado o solver para diferentes percentagens de incorporação de casco e para diferentes tiragens. Inicialmente, foi fixada a variável “Casco” em 60% e foram verificados os resultados obtidos, para o gás natural e eletricidade, para valores de tiragem entre as 350 e 440 toneladas. De seguida, foi realizado o mesmo procedimento para uma percentagem de 65%. Os resultados obtidos estão presentes na Tabela F.1.

Tabela F.1 – Resultados obtidos para o volume de gás natural e energia elétrica, a partir do Solver, para diferentes percentagens de casco e diferentes tiragens de vidro fundido.

Tiragem (ton/dia)	60% Casco		65% Casco	
	GN (m ³)	AE (kW)	GN (m ³)	AE (kW)
350	32351,4	13857,4	31836,1	17221,5
360	33275,6	14254,7	32814,7	17265,3
370	34199,9	14650,7	33797,3	17279,1
380	35124,3	15046	34771,9	17348,3
390	36048,6	15442	35751,1	17385,6
400	36972,9	15837,9	36743	17339,6
410	37897,3	16233,9	37710,1	17456,5
420	38706,3	17382	38690,1	17488,7
430	39686,7	17412,2	39670,3	17519,3
440	40670,1	17422,4	40650,8	17548,6