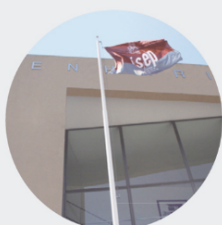




Auditoria energética ao processo de acabamento de cordas para pneus

JOANA RODRIGUES QUINTAS

Setembro de 2021



Auditoria energética ao processo de acabamento de cordas para pneus

Joana Rodrigues Quintas

setembro de 2021

Auditoria energética ao processo de acabamento de cordas para pneus

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Química, ramo opcional Energia e Biorrefinaria

Autor

Joana Rodrigues Quintas

Orientadores

Engenheiro Joaquim Rocha – Continental - ITA

Engenheira Paula Neto – ISEP

Engenheira Anabela Guedes – ISEP

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestrado em Engenharia Química

setembro de 2021

Agradecimentos

A realização deste estágio curricular contribuiu para o contacto com o ambiente empresarial e proporcionou a aprendizagem de novos conhecimentos. O mesmo não seria possível sem a contribuição de várias pessoas a quem dirijo, desde já, o meu agradecimento.

Primeiramente, gostaria de agradecer ao Departamento de Engenharia Química do Instituto Superior de Engenharia do Porto por proporcionar a todos os alunos um estágio curricular e à Continental - ITA por me receber nas suas instalações.

Um agradecimento muito especial ao orientador da empresa, Engenheiro Joaquim Rocha, pela oportunidade de realizar o estágio na Continental - ITA, por todas as condições disponíveis para que o mesmo fosse efetuado, pelo apoio acrescido de confiança e por tornar este percurso o mais proveitoso possível. Todo o conhecimento e competências transmitidas, toda a compreensão e dedicação demonstrada permitiram o meu desenvolvimento profissional, bem como pessoal.

A todos os membros do Departamento de Engenharia da Continental - ITA por toda ajuda, disponibilidade, integração e boa disposição. Aos colaboradores da Continental - ITA que fizeram parte deste percurso e que me ajudaram atenciosamente.

Um obrigada à Engenheira Paula Neto por ser incansável, pela sua personalidade humilde e genuína, por toda a disponibilidade, apoio e carinho demonstrado ao longo destes meses.

À Engenheira Anabela Guedes pelo desempenho na seleção de estágios, pela ajuda e preocupação.

Por fim, à minha família e amigos que estiveram sempre presentes, que me deram força e motivação ao longo de todo este percurso. Ao Simão por me apoiar incondicionalmente.

Muito obrigada a todos que contribuíram para a minha aprendizagem e que colaboraram neste estudo.

Resumo

O principal objetivo desta dissertação foi efetuar uma auditoria energética à máquina de impregnação de cordas para pneus com 4 estufas – *Single-End 1* – tendo em conta a realização de uma análise energética prévia da máquina de impregnação de cordas com 2 estufas – *Single-End 2*.

Apesar da energia elétrica ser a fonte de energia mais utilizada na empresa, cerca de 74,2 %, as máquinas de impregnação de cordas *Single-End 1* e *Single-End 2* consomem essencialmente gás natural, correspondente a 88,1 % da energia total consumida nas mesmas. A otimização energética teve então como objetivo a diminuição do consumo de gás natural.

Inicialmente, foi efetuado um levantamento energético dos consumos na máquina *Single-End 1*, nas diferentes condições de operação, obtendo-se os valores de 56,2 kW e de 65,3 kW para as perdas térmicas, calculadas através dos balanços de energia e de correlações empíricas, respetivamente.

Como medidas de otimização de energia na máquina *Single-End 1*, verificou-se que com o isolamento da máquina será possível uma poupança anual máxima de 4758 € em gás natural. A redução dos tempos de paragem poderá resultar em poupanças de gás natural significativas de 13,4 % no artigo N0 e 20,3 % no artigo H2. Através da instalação do sistema EcoVac, nas 4 estufas, o consumo de gás natural poderá diminuir 8,3 %, 7,5 % e 7,3 % para os artigos N0, H1 e H2, respetivamente. O aproveitamento energético dos gases de exaustão foi também uma medida de otimização energética avaliada, onde o pré-aquecimento até 60 °C, de 70 % do caudal de ar fresco admitido, possibilitará uma poupança de 9,8 % de gás natural. Para garantir a entrada deste caudal será necessário aumentar o diâmetro dos tubos de admissão de ar fresco das 4 estufas para cerca de 190 mm. Por último, desligar as lâmpadas, que são desnecessárias durante o funcionamento da máquina, poderá originar uma redução de 649 € na fatura anual de eletricidade.

Palavras-chave: Máquinas de impregnação de cordas, consumos energéticos, balanços de massa e de energia, otimização energética.

Abstract

The main objective of this dissertation was to perform an energy audit to the tire cord impregnation machine with 4 heat zones – *Single-End 1* – taking into account a previous energy analysis of the cord impregnation machine with 2 heat zones – *Single-End 2*.

Although electric energy is the most used energy source in the company, around 74,2 %, the *Single-End 1* and *Single-End 2* cord impregnation machines consume mainly natural gas, corresponding to 88,1 % of the total energy consumed by them. Energy optimization was therefore aimed at reducing natural gas consumption.

Initially, an energy survey was made of the consumptions in the *Single-End 1* machine, in the different operational conditions, obtaining the values of 56,2 kW and 65,3 kW for thermal losses, calculated using energy balances and empirical correlations, respectively.

As energy optimization measures in the *Single-End 1* machine, it was found that with the isolation of the machine it will be possible to achieve maximum annual savings of 4758 € in natural gas. Reducing downtimes can result in significant natural gas savings of 13,4 % in article N0 and 20,3 % in article H2. Through the installation of the EcoVac system, in the 4 heat zones, natural gas consumption could be reduced by 8,3 %, 7,5 % and 7,3 % for articles N0, H1 and H2, respectively. The energy use of exhaust gases was also an energy optimization measure evaluated, where the pre-heating to 60 °C, of 70 % of the admitted fresh air flow, will allow a saving of 9,8 % of natural gas. To guarantee the intake of this flow, it will be necessary to increase the diameter of the fresh air intake tubes of the 4 heat zones to about 190 mm. Finally, turning off the lamps, which are unnecessary during machine operation, could lead to a reduction of 649 € in the annual electricity bill.

Keywords: Cord impregnation machines, energy consumption, mass and energy balances, energy optimization.

Índice geral

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e contextualização	1
1.2. Apresentação da empresa	1
1.3. Tema e objetivos da dissertação	4
1.4. Organização da dissertação	4
2. Processo produtivo dos pneus	7
2.1. Composição e estrutura dos pneus.....	7
2.2. Produção de cordas e telas para pneus.....	8
2.3. Produção de malhas para o interior de automóveis	14
3. Eficiência energética	17
3.1. Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia.....	17
3.2. Auditorias energéticas	18
3.2.1. Objetivos	18
3.2.2. Metodologia	19
3.2.3. Meios técnicos utilizáveis	20
3.2.4. Plano de Racionalização do Consumo de Energia.....	22
4. Caracterização das máquinas de impregnação de cordas.....	25
4.1. Máquina de impregnação de cordas <i>Single-End 1</i>	25
4.2. Máquina de impregnação de cordas <i>Single-End 2</i>	27
4.3. Características comuns às duas máquinas	29
5. Levantamento energético e análise crítica da <i>Single-End 2</i>	31
5.1. Consumo total de energia	31
5.2. Consumo de gás natural.....	33
5.3. Consumo de energia elétrica.....	35
5.4. Consumos energéticos nas máquinas <i>Single-End 1</i> e <i>Single-End 2</i>	37
5.5. Análise crítica da <i>Single-End 2</i>	39
6. Resultados da <i>Single-End 1</i> – Análise energética	49
6.1. Correntes de entrada	51
6.2. Correntes de saída.....	56

6.3. Balanço de energia e perdas térmicas.....	58
7. Medidas de otimização energética na <i>Single-End 1</i>	63
7.1. Isolamento da máquina.....	63
7.2. Redução da temperatura das estufas no tempo de paragem	64
7.2.1. Influência do tempo de paragem.....	64
7.2.2. Avaliação da temperatura de <i>set-point</i>	67
7.3. Instalação do sistema EcoVac	75
7.4. Aproveitamento energético dos gases de exaustão.....	78
7.5. Iluminação da máquina.....	81
7.6. Resultados finais.....	81
8. Conclusões e propostas de trabalhos futuros.....	83
Bibliografia.....	85
Anexos.....	87
Anexo A – Registo dos valores do levantamento energético da empresa	87
Anexo B – Exemplos de cálculo – Balanços de massa e de energia	96
Anexo C – Exemplos de cálculo – Medidas de otimização energética na máquina <i>Single-End 1</i>	114

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Periodicidade das auditorias energéticas e metas a serem alcançadas para diferentes instalações CIE.	23
Tabela 4.1 - Composição dos artigos N0, H1 e H2 e respetivas velocidades de produção.	25
Tabela 4.2 - Dimensões das estufas da <i>Single-End</i> 1.	26
Tabela 4.3 - Composição dos artigos N1 e N2 e as respetivas velocidades de produção.	27
Tabela 4.4 - Dimensões das estufas da <i>Single-End</i> 2.	28
Tabela 4.5 - Características das máquinas de impregnação de cordas.	30
Tabela 5.1 - Fatores de conversão das diferentes formas de energia [14].	31
Tabela 5.2 - Consumos e emissões gasosas de gás natural e energia elétrica no ano de 2019.	32
Tabela 5.3 - Custos anuais de gás natural e energia elétrica.	33
Tabela 6.1 - Valores usados na determinação do caudal mássico da corda em verde.	52
Tabela 6.2 - Valores usados na determinação da entalpia da corda em verde.	52
Tabela 6.3 - Valores usados na determinação da entalpia da solução de impregnação.	52
Tabela 6.4 - Valores usados na determinação do caudal mássico do gás natural.	53
Tabela 6.5 - Valores usados na determinação da entalpia do gás natural.	53
Tabela 6.6 - Valores usados na determinação do caudal mássico do ar de combustão.	54
Tabela 6.7 - Valores usados na determinação da entalpia da corda impregnada.	56
Tabela 6.8 - Valores usados na determinação do caudal mássico dos gases de exaustão.	57
Tabela 6.9 - Valores experimentais e teóricos obtidos para a corrente de gases de exaustão.	58
Tabela 6.10 - Valores das entalpias das correntes e entalpias totais das entradas e saídas.	58
Tabela 6.11 - Valores das perdas de calor por convecção e radiação nas 4 estufas da <i>Single-End</i> 1.	61
Tabela 7.1 - Valores das perdas térmicas por convecção e radiação das zonas a isolar.	64
Tabela 7.2 - Valores da temperatura de <i>set-point</i> e do tempo teórico de arrefecimento das estufas desde a temperatura de operação de 245 °C.	72
Tabela 7.3 - Valores da temperatura de <i>set-point</i> e do tempo experimental de aquecimento das estufas até à temperatura de operação de 245 °C.	74
Tabela 7.4 - Valores da temperatura de <i>set-point</i> propostos e tempo de arrefecimento e aquecimento.	74
Tabela 7.5 - Valores da percentagem do ar de exaustão atual e otimizada para os artigos N0 e H2.	75

Tabela 7.6 - Indicadores energéticos nas condições de operação atuais e otimizadas.....	78
Tabela 7.7 - Valores do novo diâmetro do tubo de entrada de ar fresco em cada estufa.....	79
Tabela 7.8 - Valores das possíveis poupanças anuais de gás natural para diferentes temperaturas e diferentes percentagens de caudal de ar fresco admitido pelo tubo.....	80
Tabela 7.9 - Número de lâmpadas a serem desligadas e respetiva potência elétrica.....	81
Tabela 7.10 - Resumo dos valores das possíveis poupanças anuais obtidas para as diferentes medidas de otimização energética.....	82
Tabela A.1 - Valores mensais do fator de correção dos PRM's, do consumo total de gás natural e das emissões de gases de efeito de estufa.....	88
Tabela A.2 - Valores mensais do consumo de gás natural corrigido em cada consumidor. ...	89
Tabela A.3 - Valores mensais do consumo total de energia elétrica e emissões de gases de efeito de estufa.	90
Tabela A.4 - Valores mensais do consumo de energia elétrica em cada consumidor.....	91
Tabela A.5 - Valores dos consumos energéticos dos diferentes artigos na torcedura e impregnação.	92
Tabela A.6 - Valores dos consumos específicos de gás natural para diferentes números de cordas, tempos de paragem e percentagem do ar de exaustão nas estufas, para o artigo N1...	93
Tabela A.7 - Valores dos consumos específicos de gás natural para diferentes números de cordas, tempos de paragem e percentagem do ar de exaustão nas estufas, para o artigo N2...	94
Tabela B.1 - Valores da percentagem mássica dos constituintes da solução de impregnação.	97
Tabela B.2 - Valores do volume inicial e final de gás natural, para um dado intervalo de tempo, e respetivo caudal volumétrico.....	97
Tabela B.3 - Valores da percentagem molar dos compostos do gás natural [19].	98
Tabela B.4 - Valores das velocidades do ar de combustão na grelha circular.	99
Tabela B.5 - Valores das pressões diferenciais e respetivas velocidades pontuais.....	102
Tabela B.6 - Valores das áreas correspondentes à parede frontal da máquina, temperatura média e restantes valores essenciais às determinações das perdas de calor.....	108
Tabela B.7 - Valores das áreas correspondentes à parede posterior da máquina, temperatura média e restantes valores essenciais às determinações das perdas de calor.....	109
Tabela B.8 - Valores das áreas correspondentes à parede lateral direita da máquina, temperatura média e restantes valores essenciais às determinações das perdas de calor.....	110
Tabela B.9 - Valores das áreas correspondentes à parede lateral esquerda da máquina, temperatura média e restantes valores essenciais às determinações das perdas de calor.....	111

Tabela B.10 - Valores das áreas correspondentes às chapas das condutas dos ventiladores e parede superior da máquina, temperatura média e restantes valores essenciais às determinações das perdas de calor.	112
Tabela C.1 - Valores dos consumos específicos de gás natural para diferentes números de cordas, tempos de paragem e percentagem do ar de exaustão nas estufas, para o artigo N0. 115	
Tabela C.1 - Valores dos consumos específicos de gás natural para diferentes números de cordas, tempos de paragem e percentagem do ar de exaustão nas estufas, para o artigo N0 (continuação).	116
Tabela C.2 - Valores dos consumos específicos de gás natural para diferentes números de cordas, tempos de paragem e percentagem do ar de exaustão nas estufas, para o artigo H2. 116	
Tabela C.3 - Valores das temperaturas de cada estufa ao longo do tempo, no arranque.	118
Tabela C.4 - Valores dos tempos experimentais e teóricos para diferentes temperaturas, no arranque da estufa 4.	119
Tabela C.5 - Valores das temperaturas de cada estufa ao longo do tempo, no tempo de arrefecimento.	120
Tabela C.6 - Valores das temperaturas das estufas ao longo do tempo, durante o aquecimento.	121
Tabela C.7 - Valores das velocidades médias, nas diferentes estufas, e dos respetivos caudais volumétricos.	124

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Cronograma das atividades mais relevantes da empresa.....	3
Figura 2.1 - Composição e estrutura de um pneu [3].....	7
Figura 2.2 - Esquema representativo da produção de cordas e telas para pneus.....	9
Figura 2.3 - Torcedores.....	10
Figura 2.4 - Torção do feixe em Z e em S [4].....	10
Figura 2.5 - Cruzamento ortogonal da teia e trama [4].....	11
Figura 2.6 - Teares.....	12
Figura 2.7 - Máquina de impregnação de cordas <i>Single-End 1</i>	12
Figura 2.8 - Máquina de impregnação de cordas <i>Single-End 2</i>	13
Figura 2.9 - Máquina de impregnação de tecido – Zell.....	13
Figura 2.10 - Esquema representativo da produção de malhas para o interior de automóveis.	14
Figura 2.11 - Máquinas de tricotar.....	15
Figura 2.12 - Râmula.....	15
Figura 3.1 - Etapas de atuação das auditorias energéticas.....	19
Figura 3.2 - Tubo de <i>Pitot</i>	21
Figura 3.3 - Anemómetro de turbina [13].....	21
Figura 4.1 - Esquema das condições operatórias na máquina <i>Single-End 1</i>	26
Figura 4.2 - Esquema das condições operatórias na máquina <i>Single-End 2</i>	28
Figura 4.3 - Ilustração representativa das estufas presentes na <i>Single-End 2</i>	29
Figura 5.1 - Distribuição percentual dos consumos de gás natural e energia elétrica, em tep.....	32
Figura 5.2 - Distribuição percentual das emissões de gases de efeito de estufa.....	32
Figura 5.3 - Distribuição percentual dos custos de gás natural e energia elétrica, em €.....	33
Figura 5.4 - Distribuição mensal do consumo de gás natural, em toneladas.....	34
Figura 5.5 - Distribuição percentual do consumo de gás natural pelos consumidores.....	35
Figura 5.6 - Distribuição mensal do consumo de energia elétrica, em MWh.....	36
Figura 5.7 - Distribuição percentual do consumo de energia elétrica pelos consumidores.....	36
Figura 5.8 - Consumos energéticos nas máquinas <i>Single-End 1</i> e <i>Single-End 2</i>	37
Figura 5.9 - Distribuição percentual do consumo específico de gás natural para os diferentes artigos.....	38
Figura 5.10 - Distribuição percentual do consumo específico de energia elétrica para os diferentes artigos.....	38

Figura 5.11 - Produção (cinzento) e consumo específico de gás natural (laranja) em função do tempo.....	39
Figura 5.12 - Consumo específico de gás natural em função do número de cordas, para o artigo N1.....	40
Figura 5.13 - Consumo específico de gás natural em função do número de cordas, para o artigo N2.....	41
Figura 5.14 - Custos anuais para diferentes números de cordas, para o artigo N2.	42
Figura 5.15 - Consumo específico de gás natural em função do tempo de paragem, para o artigo N1.....	43
Figura 5.16 - Consumo específico de gás natural em função do tempo de paragem, para o artigo N2.....	43
Figura 5.17 - Custos anuais para diferentes tempos de paragem, para o artigo N1.	44
Figura 5.18 - Custos anuais para diferentes tempos de paragem, para o artigo N2.	44
Figura 5.19 - Consumo específico de gás natural em função da percentagem do ar de exaustão na estufa 2, para o artigo N1.	45
Figura 5.20 - Consumo específico de gás natural em função da percentagem do ar de exaustão na estufa 2, para o artigo N2.	46
Figura 5.21 - Custos anuais para diferentes percentagens do ar de exaustão na estufa 2, para o artigo N1, a 65 % de exaustão na estufa 1.	47
Figura 5.22 - Custos anuais para diferentes percentagens do ar de exaustão da estufa 1, para o artigo N2, a 45 % de exaustão na estufa 2.	47
Figura 5.23 - Influência da pressão diferencial na percentagem do ar de exaustão da estufa 2.	48
Figura 6.1 - Esquema representativo do sistema em estudo.	49
Figura 6.2 - Esquema representativo do misturador de gases quentes.....	57
Figura 6.3 - Entalpias das correntes do sistema em estudo.....	59
Figura 7.1 - Consumo específico de gás natural em função do tempo de paragem, para o artigo N0.....	65
Figura 7.2 - Consumo específico de gás natural em função do tempo de paragem, para o artigo H2.....	65
Figura 7.3 - Custos anuais para diferentes tempos de paragem, para o artigo N0.	66
Figura 7.4 - Custos anuais para diferentes tempos de paragem, para o artigo H2.	67
Figura 7.5 - Temperatura atingida pelas estufas em função do tempo, no arranque.....	68

Figura 7.6 - Valores teóricos e experimentais da temperatura atingida pela estufa 4 ao longo do tempo, no arranque.	70
Figura 7.7 - Temperatura atingida pelas estufas em função do tempo, no tempo de arrefecimento.	71
Figura 7.8 - Temperatura atingida pelas estufas em função do tempo, no tempo de aquecimento.	73
Figura 7.9 - Temperatura atingida pelas estufas em função do tempo, durante o aquecimento.	73
Figura 7.10 - Consumos específicos de gás natural para diferentes condições de exaustão, para o artigo N0.	76
Figura 7.11 - Consumos específicos de gás natural para diferentes condições de exaustão, para o artigo H2.	76
Figura 7.12 - Custos anuais para diferentes condições de exaustão, para o artigo N0.	77
Figura 7.13 - Custos anuais para diferentes condições de exaustão, para o artigo H2.	77
Figura 7.14 - Custos anuais do gás natural para as diferentes temperaturas de entrada do ar fresco e diferentes percentagens de ar fresco aquecido.	80
Figura B.1 - Áreas selecionadas da parede frontal da máquina.	106
Figura B.2 - Áreas selecionadas da parede posterior da máquina.	106
Figura B.3 - Áreas selecionadas da parede lateral direita da máquina.	106
Figura B.4 - Áreas selecionadas da parede lateral esquerda da máquina.	107
Figura B.5 - Áreas da parede superior da máquina e das chapas dos ventiladores.	107

Nomenclatura

Siglas

ADENE – Agência para a Energia

CEE – Consumo Específico de Energia

CIE – Consumidores Intensivos de Energia

C-ITA – Continental - Indústria Têxtil do Ave

IC – Intensidade Carbónica

IE – Intensidade Energética

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCS – Poder Calorífico Superior

PLC – *Programmable Logic Controller*

PREn – Plano de Racionalização do Consumo de Energia

PRM's – Postos de Regulação e Medida

PTN – Pressão e Temperatura Normal

SGCIE – Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia

tCO_{2e} – Toneladas de emissões de gases de efeito de estufa

tep – Toneladas equivalentes de petróleo

VAB – Valor Acrescentado Bruto

Símbolos

A – Área, em m²

c – Comprimento, em m

cp – Calor específico a pressão constante, em J/(kg.K)

cv – Calor específico a volume constante, em J/(kg.K)

d – Diâmetro, em m

f_c – Fator de correção

g – Aceleração gravítica, em m/s^2

Gr – Número de Grashof

h – Coeficiente pelicular de transferência de calor por convecção natural, em $W/(m^2.K)$

H – Entalpia, em W

k – Condutividade térmica, em $W/(m.K)$

L – Dimensão característica, em m

m – Massa, em kg

\dot{m} – Caudal mássico, em kg/s

M – Massa molar, em kg/kmol

P – Pressão, em Pa

Pr – Número de Prandtl

q – Perdas térmicas, em W

R – Constante dos gases perfeitos, em $atm.L/(mol.K)$

t – Tempo, em s

T – Temperatura, em K

v – Velocidade, em m/s

V – Volume, em m^3

\dot{V} – Caudal volumétrico, em m^3/s

W – Potência térmica, em W

Y – Humidade

β – Coeficiente de expansão volumétrica, em 1/K

ε – Emissividade

μ – Viscosidade, em kg/(m.s)

σ – Constante de Stefan-Boltzmann, em W/(m².K⁴)

ρ – Massa volúmica, em kg/m³

ΔH_{298}^0 – Calor padrão de reação a 25 °C, em W

$\Delta H_{\text{vaporização}}$ – Entalpia de vaporização da água, em J/kg

ΔP – Pressão diferencial, em Pa

ΔT – Diferença de temperatura, em K

ΔU – Variação da energia interna, em W

% E – Percentagem do ar de exaustão na estufa

1. Introdução

O presente trabalho foi realizado no âmbito da unidade curricular Dissertação/Estágio do curso de Mestrado em Engenharia Química do Instituto Superior de Engenharia do Porto, na empresa Continental - Indústria Têxtil do Ave. Esta empresa, pertencente ao setor têxtil, encontra-se situada em Lousado e caracteriza-se pela produção de cordas e telas para pneus, bem como malhas para o interior de automóveis.

1.1. Enquadramento e contextualização

De um modo geral, a energia é um fator fundamental para o desenvolvimento económico, social e ambiental, e, também, para a evolução, desenvolvimento e melhoria da qualidade de vida dos países. Globalmente, o consumo de energia tem por base a utilização de recursos não renováveis que comprometem o desenvolvimento sustentável, o meio envolvente e todos que a ele pertencem.

De maneira a controlar a utilização de energia nas empresas, são realizadas auditorias energéticas, sendo que estas têm por base o uso de indicadores (intensidade energética, consumo específico de energia e intensidade carbónica) que demonstrem o desempenho energético das indústrias ao longo dos anos.

As emissões resultantes do uso de energia poderão ser catastróficas para o aquecimento global e para a saúde, logo a otimização energética, principalmente nas indústrias, é uma mais-valia para o planeta. Devem ser tidas em conta medidas que melhorem o desempenho energético, promovam a eficiência energética, reduzam os impactos ambientais, promovam a utilização de fontes de energia alternativas e renováveis, entre outras.

1.2. Apresentação da empresa

A Indústria Têxtil do Ave (ITA) começou o seu funcionamento no dia 4 de agosto de 1950, sendo que resultou da criação da primeira fábrica de pneus em Portugal – a Mabor portuguesa, sendo hoje conhecida como Continental. Uma das grandes vantagens da criação da ITA foi a diminuição de importações e a possibilidade de exportações [1].

Inicialmente, a fábrica tinha em vista apenas a execução de torcedura de fios de algodão e posterior tecelagem dos tecidos destinados à indústria de pneus. Devido à especificidade das características técnicas dos fios, requerida para a produção das telas para os pneus (“*Cord-*

Fabric”), a ITA implementou, na sua própria unidade, uma secção de fiação, que se iniciou a 24 de fevereiro de 1951 [1].

Esta unidade industrial apresenta, desde o início, uma grande capacidade de adaptação a novas tecnologias, equipamentos, matérias-primas e mercados. Nesse sentido, em janeiro de 1952 foi realizada a primeira exportação de “*Cord-Fabric*” [1].

O ano de 1958 ficou marcado pela substituição do algodão, maioritariamente, por multifilamento contínuo de rayon de alta tenacidade, sendo que, como seria de esperar, a mudança da matéria-prima sujeitou a empresa a mudanças tecnológicas a nível de processos e equipamentos. O uso desta matéria-prima levou à necessidade da aplicação de um acabamento final nos tecidos, para garantir a adesão dos compostos de borracha ao novo tecido, sendo que, de encontro a esse propósito, surgiu uma máquina de impregnação de tecidos [1].

Novamente, em 1962 foram impostas mudanças pela utilização de novas matérias-primas, com base em produtos de síntese, nomeadamente, a poliamida (nylon) de alta tenacidade, como suporte dos tecidos de reforço para a elaboração de pneus [1].

Em 1987, a Continental comprou a ITA e, por esse motivo, a fábrica passou a designar-se por Continental - ITA (C-ITA) [1].

De modo a reduzir os custos de energia e a aumentar a sua estabilidade de fornecimento, em 2006 iniciou-se a construção de uma subestação que permitiu a obtenção de eletricidade de alta tensão (60 kV). Ainda neste ano, começou a preparação do investimento para a criação de um Laboratório de pesquisa e desenvolvimento da Continental na C-ITA [1].

No ano 2007 iniciou-se um novo projeto de investimento, orientado para a criação de uma inovadora linha de produção que permitiria, quando em velocidade de cruzeiro, a produção de cerca de 1500 toneladas por ano de cordas impregnadas para fornecer aos clientes, internos e externos, de forma competitiva e vantajosa [1].

Assim, a empresa adquiriu, em 2008, a sua primeira máquina de impregnar cordas, a *Single-End 1*, ou seja, para além de tecidos, passou-se também a impregnar cordas no processo produtivo de pneus [1].

Em 2010 a unidade industrial avançou com o projeto de investimento da instalação de uma linha de produção de malhas. Essa linha de produção proporcionaria um aumento sensível da

dimensão da empresa, tanto em termos de número de colaboradores como em volume e crescimento de produtos [1].

Mais tarde, no ano de 2014, a C-ITA ficou posicionada no 3º lugar do setor têxtil, no ranking das 500 maiores e melhores empresas [1].

Em 2018, no âmbito do projeto de expansão da capacidade de produção de cordas impregnadas, foram executadas obras de preparação dos edifícios, instaladas novas máquinas e reposicionadas outras já existentes. Assim, neste ano, a empresa adquiriu a segunda máquina de impregnar cordas, a *Single-End 2* [1].

O ano de 2019 caracterizou-se por obras de remodelação do edifício administrativo, com o intuito de permitir a concentração de todos os serviços administrativos no mesmo espaço geográfico, gerando eficiências na operação, bem como a possibilidade de libertar espaço fundamental para, no chão de fábrica, se proceder à instalação de novos equipamentos essenciais à produção [1].

De facto, a C-ITA exerce, atualmente, parceria interna com a Continental, sendo também um fornecedor integrado, aplicando a sua visão e missão no respetivo trabalho e desenvolvimento.

De seguida, na Figura 1.1 apresenta-se o cronograma resumido das atividades mais importantes associados à empresa.

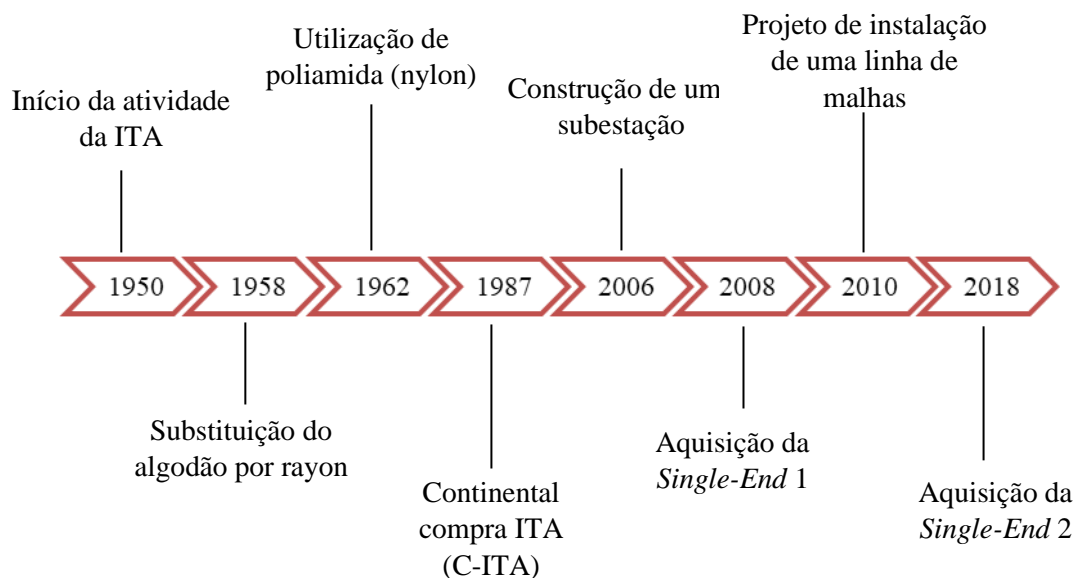


Figura 1.1 - Cronograma das atividades mais relevantes da empresa.

1.3. Tema e objetivos da dissertação

O tema abordado nesta dissertação teve por base uma auditoria energética à máquina de impregnação de cordas para pneus com 4 estufas – *Single-End 1* – e, também, a realização de uma análise energética à máquina de impregnação de cordas com 2 estufas – *Single-End 2*.

Sendo estes processos de tratamento de cordas altamente consumidores de energia, foi muito importante avaliar os parâmetros de operação estabelecidos e, conseqüentemente, as variáveis afetas aos mesmos, como: caudais de gases de exaustão, temperatura e humidade de compostos voláteis das correntes de exaustão, qualidade do ar ambiente e perdas térmicas no processo.

Esta análise exaustiva teve como objetivo a avaliação de indicadores energéticos, nomeadamente, o consumo específico de energia, no sentido de se proceder a uma otimização energética fundamentada destes processos. Para isso, este trabalho passou pela recolha de dados experimentais, nas diferentes condições de operação, e pela realização de balanços térmicos à máquina *Single-End 1*. Assim, pretendeu-se identificar medidas de racionalização energéticas, no que diz respeito às utilidades consumidas: gás natural e energia elétrica.

1.4. Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 8 capítulos que caracterizam as bases teóricas e as atividades práticas realizadas, ao longo do estágio curricular, com o intuito de cumprir os objetivos propostos.

Neste capítulo 1 foi apresentada uma parte introdutória que contém o enquadramento e contextualização do tema desenvolvido, a apresentação da empresa onde o estágio foi realizado, bem como o tema e objetivos da dissertação.

No capítulo 2 apresenta-se uma breve descrição da composição e estrutura dos pneus, do processo produtivo de cordas e telas para pneus e de malhas para o interior dos automóveis.

A elaboração do capítulo 3 foi fundamental dado que se descreve a base teórica da eficiência energética, onde se aborda o sistema de gestão de consumos intensivos de energia, os objetivos, metodologia e meios técnicos utilizáveis nas auditorias energéticas e, por fim, o plano de racionalização do consumo de energia.

O capítulo 4 baseia-se na caracterização das máquinas de impregnação de cordas, *Single-End 1* e *Single-End 2*.

No capítulo 5 apresenta-se o levantamento energético relativamente às utilidades consumidas na empresa, gás natural e energia elétrica, nos diferentes setores. Por outro lado, caracterizaram-se os consumos energéticos dos artigos que operam nas duas máquinas de impregnação de cordas e realizou-se uma análise do impacto de alguns parâmetros no consumo de gás natural na máquina *Single-End 2*, determinando-se as possíveis poupanças anuais.

O capítulo 6 destina-se à realização dos balanços de massa e de energia da máquina *Single-End 1* e à determinação das perdas térmicas da mesma.

No capítulo 7 enumeram-se as medidas de otimização energética na máquina *Single-End 1* e avaliam-se as poupanças inerentes às medidas propostas.

Por fim, no capítulo 8 são apresentadas as conclusões dos resultados obtidos ao longo do estudo e sugestões de propostas de trabalhos futuros.

2. Processo produtivo dos pneus

A empresa em estudo, C-ITA, dedica-se à produção de cordas e telas que promovem a estabilidade e resistência dos pneus, bem como malhas para serem aplicadas no interior dos automóveis. Para a produção de cordas e telas utilizam-se como matérias-primas nylon, aramida, poliéster ou rayon, enquanto para produzir malhas recorre-se a poliéster ou algodão. Nesta secção abordar-se-á a constituição dos pneus e o processo produtivo que ocorre na empresa.

2.1. Composição e estrutura dos pneus

Uma vez que a empresa fabrica um dos constituintes da estrutura dos pneus, é fundamental realizar uma breve abordagem da composição e estrutura dos mesmos, bem como as suas respetivas funções.

Os pneus são dos componentes mais importantes de um veículo, dado que estes suportam o seu peso, contactam com o solo e absorvem os impactos do terreno, sendo que são produtos complexos e que apresentam como matérias-primas diversos compostos de borrachas, metais, têxteis, entre outros [2]. Seguidamente, na Figura 2.1 apresenta-se um pneu e os seus constituintes [3].



Legenda:

- | | | |
|----------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 1 – Banda de rodagem | 4 – Carcaça | 7 – Borda de proteção |
| 2 – Cinta têxtil (tela ou corda) | 5 – Revestimento interno | 8 – Talão |
| 3 – Cintas de aço | 6 – Parede lateral | 9 – Aro |

Figura 2.1 - Composição e estrutura de um pneu [3].

Cada constituinte tem a sua respetiva função, como descrita seguidamente [2,3]:

- **Banda de rodagem:** composta por borracha sintética ou natural e encontra-se dividida em relevo, base e ombro. O relevo é caracterizado por contactar com o pavimento e proporcionar estabilidade direcional e resistência ao desgaste. Por sua vez, a base reduz a resistência ao atrito e a danos no invólucro e o ombro forma a transição entre o relevo e a parede lateral, que permite a segurança em curvas e manobras;
- **Cinta têxtil:** malha de fibra sintética, embutida em borracha, que permite aumentar a estabilidade a altas velocidades;
- **Cintas de aço:** cordas de aço de elevada resistência que aumentam a estabilidade direcional e reduzem a resistência ao atrito;
- **Carcaça:** composta por fios de nylon, poliéster ou aço, revestidos de borracha, que controlam a pressão interna, mantendo, conseqüentemente, a forma do pneu;
- **Revestimento interno:** feito de borracha, sendo que veda a câmara-de-ar interna;
- **Parede lateral:** protege o invólucro contra danos externos e condições atmosféricas, através de borrachas com elevado grau de flexibilidade e alta resistência à fadiga;
- **Borda de proteção:** composta por fibra sintética ou de aramida que aumenta a estabilidade direcional e garante maior precisão de condução;
- **Talão:** borracha sintética que, para além, de melhorar a estabilidade direcional e precisão da condução, melhora o conforto;
- **Aro:** arame de aço, embutido em borracha, garante que o pneu assente firmemente na jante.

2.2. Produção de cordas e telas para pneus

Como já referido, neste processo, utilizam-se como matérias-primas nylon, aramida, poliéster ou rayon e, tanto na produção de cordas como de telas, as matérias-primas (em bobines de fio) são sujeitas à torcedura com o intuito de se produzir cordas, designadas cordas em verde.

Seguidamente, se o objetivo for produzir cordas para pneus, realiza-se a impregnação da corda em verde. Porém, tratando-se da produção de telas, a corda em verde sofre tecelagem e, por fim, é que se procede à impregnação do tecido. O processo de impregnação de cordas

ocorre na *Single-End 1* e *Single-End 2*, enquanto a impregnação de tecidos realiza-se na máquina de impregnar tecido – Zell.

De modo a simplificar o processo produtivo das cordas e telas para pneus, esquematizou-se o mesmo na Figura 2.2.

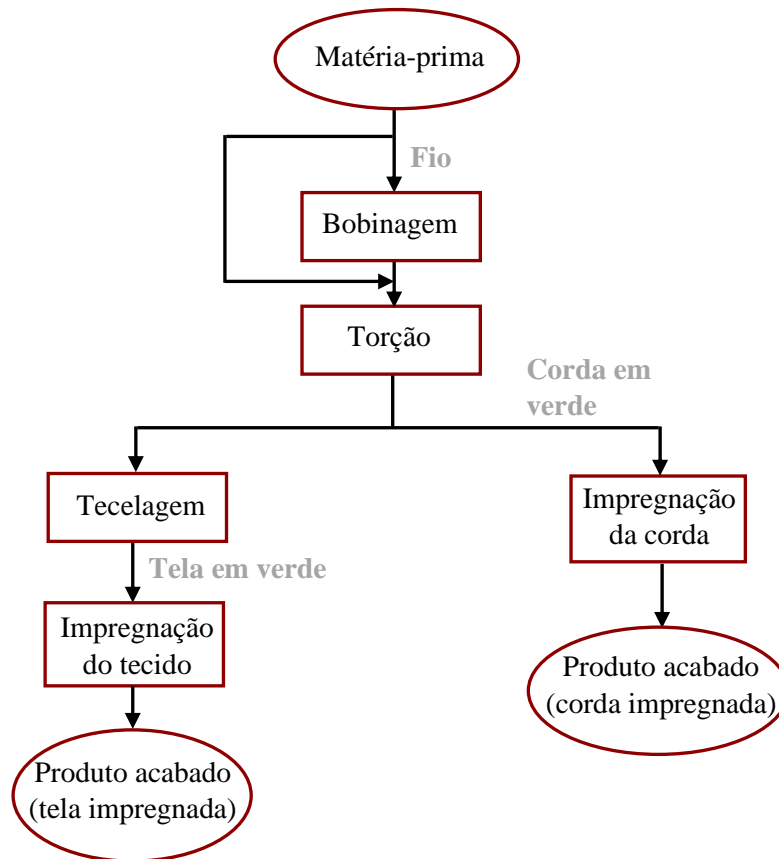


Figura 2.2 - Esquema representativo da produção de cordas e telas para pneus.

Seguidamente, descreve-se sucintamente cada etapa do processo produtivo das cordas e telas para pneus.

Bobinagem:

Antes de se proceder à etapa de torção é necessário que a matéria-prima se encontre em bobines de fio adequadas. Apenas são sujeitas a esta etapa as matérias-primas que não sejam fornecidas à empresa em bobines de dimensões adequadas. A bobinagem é também utilizada para juntar restos de fio, do mesmo artigo, numa bobine única.

Torção:

Nesta etapa as bobines de fio são colocadas em torcedores, presentes na Figura 2.3, sendo que a torção é caracterizada pelo ato de girar, em torno do seu próprio eixo, dois ou mais fios que se entrelaçam, com a finalidade de produzir cordas. Esta garante a resistência e uniformidade do feixe, na medida em que resultará na qualidade de acabamento do produto [4].



Figura 2.3 - Torcedores.

A torção é definida pelo sentido e número de voltas aplicadas no feixe, sendo dividida em [4]:

- **TPM:** torção por metro – número de voltas que o feixe de fibras apresenta por metro de comprimento;
- **TPI:** torção por polegada – número de voltas que o feixe de fibras apresenta por polegada de comprimento;
- **Torção Z:** sentido da torção é para a direita;
- **Torção S:** sentido da torção é para a esquerda.

A torção em Z e S encontra-se representada na Figura 2.4 [4].



Figura 2.4 - Torção do feixe em Z e em S [4].

É de notar que no fim da torção, para um mesmo comprimento, a massa da corda é superior à dos fios que lhe deram origem, devido ao entrelaçamento dos mesmos. A relação entre a massa da corda e o seu comprimento é definida como densidade linear – decitex (gramas por 10000 metros de corda).

Após um período de estabilização, a corda em verde está preparada para ser sujeita às etapas subsequentes do processo.

Tecelagem:

A tecelagem é o processo de cruzamento ortogonal (formação de um ângulo de 90°) de dois conjuntos de fios, com o intuito de produzir um tecido e ocorre em máquinas denominadas teares. Ao conjunto de fios posicionado no sentido longitudinal, atribui-se o nome de teia e ao conjunto de fios disposto no sentido transversal (perpendicular à teia) designa-se de trama [5]. Assim, na Figura 2.5 representa-se o cruzamento ortogonal da teia e trama, que possui como finalidade a formação de um tecido [4].

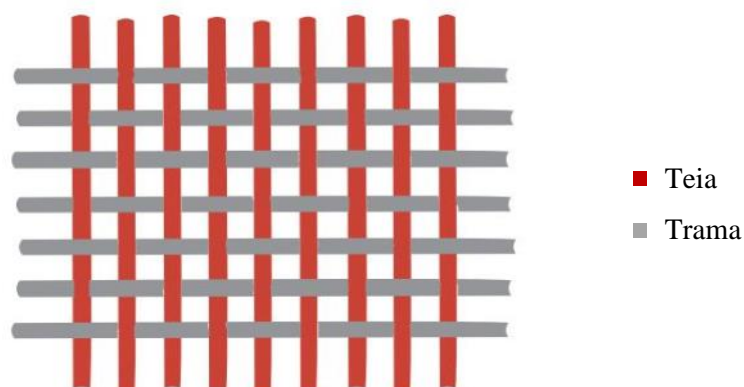


Figura 2.5 - Cruzamento ortogonal da teia e trama [4].

O tecido formado apresenta boa uniformidade, baixa elasticidade, que promove uma estrutura com maior rigidez, e ótima estabilidade dimensional. Os tecidos são classificados segundo o número de teias e tramas, sendo que, através dos fios de teia, fios de trama e da sua estrutura, é possível delinear as características do tecido, tais como a aparência, o toque, a capacidade de moldagem e a flexibilidade [5].

Os teares utilizados para a produção do tecido em verde, antes de seguir para a impregnação, encontram-se na Figura 2.6.



Figura 2.6 - Teares.

Impregnação:

Tanto na produção de cordas como de telas recorre-se à impregnação que é utilizada como metodologia para incorporação de compostos em materiais têxteis. A impregnação divide-se em várias fases, sendo que a primeira consiste em imergir o material têxtil numa solução com composição variável, de acordo com o material a tratar. De seguida, procede-se à secagem e termofixação, sendo que esta última é caracterizada por usar elevadas temperaturas com a finalidade de fixar a solução às fibras [6].

Neste caso específico, esta etapa permite a adesão química do material à borracha do pneu, estabilidade dimensional através do tratamento térmico (termofixação) e melhora a resistência térmica das cordas ou telas à fadiga e ao impacto.

Como já mencionado anteriormente, a impregnação das cordas ocorre nas máquinas *Single-End 1* e *Single-End 2* representadas nas Figuras 2.7 e 2.8, respetivamente.



Figura 2.7 - Máquina de impregnação de cordas *Single-End 1*.



Figura 2.8 - Máquina de impregnação de cordas *Single-End 2*.

As principais diferenças destas duas máquinas baseiam-se no facto de a *Single-End 1* apresentar 4 estufas e ter uma capacidade máxima de 108 bobines, enquanto a *Single-End 2* é composta por 2 estufas e apresenta capacidade máxima de 54 bobines. Além disso, os artigos tratados nestas duas máquinas diferem na sua composição, sendo também sujeitos a diferentes condições operatórias como: velocidade, temperatura, percentagem do ar de exaustão e recirculação. Os tempos de enfiamento e de paragem variam nas duas máquinas, sendo que estes são mais prolongados na *Single-End 1* devido à maior quantidade de bobines em produção.

A impregnação dos tecidos ocorre na máquina de impregnar tecido, sendo apresentada na Figura 2.9.



Figura 2.9 - Máquina de impregnação de tecido – Zell.

2.3. Produção de malhas para o interior de automóveis

A produção de malhas utiliza poliéster ou algodão como matéria-prima e está dividida em tricotagem e ramulagem, como representada na Figura 2.10.

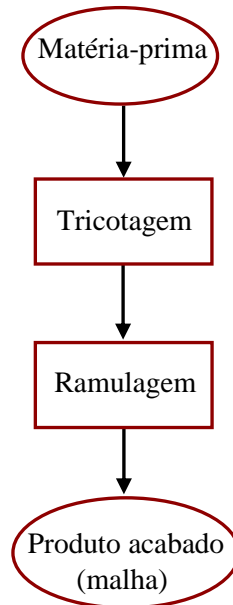


Figura 2.10 - Esquema representativo da produção de malhas para o interior de automóveis.

As malhas produzidas podem ser classificadas como malhas de trama ou malhas de teia, dependendo da tricotagem a que forem sujeitas e, por fim, são submetidas a processos de acabamento, como é o exemplo da ramulagem. Assim, de seguida, faz-se uma breve abordagem destes dois processos.

Tricotagem:

Esta etapa consiste no entrelaçamento de fios, através dos movimentos das máquinas de tricotar, para formação de tecidos, conferindo-lhes várias características como resistência ao encolhimento e capacidade de alongamento [7].

As malhas de trama são produzidas no sentido transversal e as de teia no sentido longitudinal a partir de um conjunto de fios, sendo que na Figura 2.11 se ilustra a secção onde ocorre a tricotagem.



Figura 2.11 - Máquinas de tricotar.

Ramulagem:

A ramulagem é um acabamento mecânico que se aplica às malhas, sendo realizada conforme o pedido de acabamento do cliente. Este processo ocorre numa râmula, apresentada na Figura 2.12, que permite obter a largura e comprimento pretendido [8].



Figura 2.12 - Râmula.

De outro modo, esta etapa é utilizada para a termofixação das malhas, com o intuito de evitar problemas nas propriedades finais do tecido, como gramagem, estabilidade dimensional, entre outros [8]. A temperatura utilizada é próxima da temperatura de transição vítrea, para que as fibras sejam moldadas conforme as condições finais pretendidas, e o tempo de exposição varia conforme os requisitos desejados [7].

3. Eficiência energética

A energia deve ser considerada um fator de produção tão importante como o trabalho, o capital e as matérias-primas. Sendo assim, a eficiência energética, definida como a razão entre a energia útil recebida e a energia fornecida, é um fator relevante no controlo dos custos de uma empresa [9].

A eficiência energética pode ser promovida através de novas exigências ao nível das emissões de gases de efeito de estufa, revisão da fiscalidade do setor energético e realização de acordos para a utilização racional de energia [10].

A utilização racional de energia proporciona o mesmo nível de produção de bens e serviços através de tecnologias que reduzem os consumos, face a soluções convencionais, sendo que pode provocar significativas reduções do consumo de energia e emissões de poluentes associadas à sua conversão [11]. Para além de reduzir as emissões de poluentes, permite a redução da fatura energética do país, da intensidade energética da economia, da dependência da importação energética e promove competitividade entre empresas.

3.1. Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia

Segundo o Decreto-Lei nº 71/2008, de 15 de abril, o Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE) surge com o propósito de promover a eficiência energética e monitorizar os consumos energéticos de instalações consumidoras intensivas de energia (CIE) [10].

O regime previsto pelo referido Decreto-Lei abrange instalações CIE que apresentem um consumo energético anual superior a 500 toneladas equivalentes de petróleo (500 tep/ano), com exceção das instalações de cogeração, juridicamente autónomas dos respetivos consumidores de energia. É de referir que as empresas que dispõem de um consumo energético inferior a 500 tep/ano e que pretendem, de forma voluntária, aderir aos acordos de racionalização de energia, também podem ser abrangidas pelo SGCIE [10].

Ao operador que explore instalações CIE compete promover o registo das instalações na Agência para a Energia (ADENE), efetuar auditorias energéticas, elaborar Planos de Racionalização do Consumo de Energia (PREn) com base nas auditorias, submetendo-os à ADENE e, por fim, executar e cumprir os PREn aprovados sob a responsabilidade de um técnico credenciado [10].

3.2. Auditorias energéticas

As auditorias energéticas consistem num levantamento detalhado de todos os aspetos relacionados com a utilização de energia, com o propósito de caracterizar energeticamente os diferentes equipamentos e sistemas, presentes numa instalação CIE, e identificar oportunidades de medidas com viabilidade técnico-económica possíveis de implementar. Assim, pretende-se aumentar a eficiência energética e/ou reduzir a fatura energética associada às atividades da instalação a ser avaliada [12].

As auditorias são necessárias, na medida em que os dados recolhidos são essenciais à elaboração do PREN e à verificação do seu subsequente cumprimento [12].

É de cariz obrigatório a realização de auditorias energéticas em instalações que apresentem consumo de energia igual ou superior a 1000 tep/ano, com uma periodicidade de seis anos, sendo a primeira auditoria realizada num prazo de quatro meses após o registo. Nas instalações com consumo de energia igual ou superior a 500 tep/ano, mas inferior a 1000 tep/ano, as auditorias devem ser realizadas com uma periodicidade de oito anos, sendo a primeira destas realizada no ano seguinte ao do registo [10].

3.2.1. Objetivos

Uma auditoria energética apresenta diversos objetivos, nomeadamente [12]:

- Quantificar os consumos energéticos e a sua importância no custo final do(s) produto(s);
- Efetuar uma inspeção visual dos equipamentos/sistemas consumidores de energia, complementada pelas medições necessárias;
- Esclarecer como é transformada a energia e quais os seus custos associados;
- Efetuar um levantamento e caracterização detalhados dos principais equipamentos consumidores de energia, sobretudo com maior peso em termos de potência instalada (elétrica e/ou térmica);
- Obter diagramas de carga elétricos dos sistemas considerados grandes consumidores de eletricidade;
- Determinar a eficiência energética de geradores de energia térmica, eventualmente existentes;
- Verificar o estado das instalações de transporte e distribuição de energia;

- Verificar a existência do bom funcionamento dos aparelhos de controlo e regulação do equipamento de conversão e utilização de energia;
- Realizar balanços de massa e de energia aos principais equipamentos consumidores de energia térmica;
- Determinar consumos específicos de energia (CEE) durante o período de realização da auditoria, para posterior comparação com valores médios mensais e anuais e deteção de eventuais variações sazonais;
- Determinar a intensidade energética (IE) da atividade empresarial diretamente ligada à instalação CIE, que corresponde ao quociente entre o consumo energético total e o valor acrescentado bruto;
- Determinar a intensidade carbónica (IC), dada pelo quociente entre as emissões de gases de efeito de estufa e o consumo energético total;
- Identificar e quantificar as possíveis áreas onde as economias de energia são viáveis, como resultado das situações encontradas/anomalias detetadas e medições efetuadas;
- Definir intervenções com viabilidade técnico-económica, conducentes ao aumento da eficiência energética e/ou à redução da fatura energética;
- Definir as linhas orientadoras para a implementação ou melhoria de um esquema operacional de gestão de energia.

3.2.2. Metodologia

De forma a representar esquematicamente as etapas das auditorias energéticas, apresenta-se na Figura 3.1 a sua metodologia de atuação.

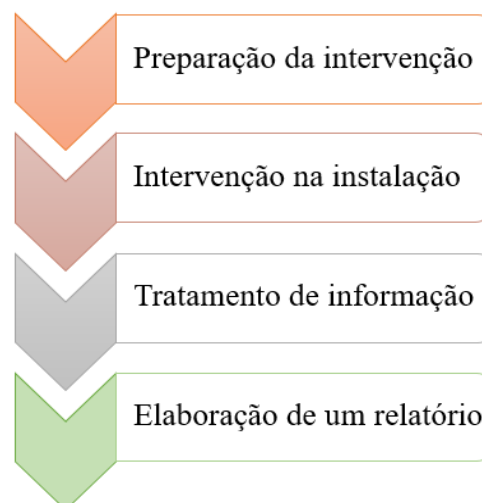


Figura 3.1 - Etapas de atuação das auditorias energéticas.

A fase de preparação da intervenção baseia-se no estabelecimento de objetivos, bem como na seleção e atribuição das responsabilidades da equipa que procederá à realização da auditoria. Nesta fase inicial, é fundamental começar a juntar alguma informação relativa à empresa (regime de laboração, descrição dos processos de fabrico, definição dos produtos, produção anual, entre outros) [13].

A intervenção na instalação é caracterizada pela recolha de informação através de medições efetuadas, com vista à identificação das possibilidades de racionalização de energia. O conhecimento da estrutura dos consumos de energia típicos de cada um dos equipamentos que a utilizam é fundamental. A utilização de fluxogramas do processo produtivo apresenta-se também como uma ferramenta essencial, dado que permite entender onde e como é utilizada a energia consumida. A eficácia da auditoria depende desta intervenção e o auditor terá de ter atenção a tudo que o rodeia, no sentido de detetar todas as situações suscetíveis de correção e melhoria [13].

Relativamente ao tratamento de informação procede-se à realização de balanços de massa e de energia e à determinação de um conjunto de indicadores que permitem a avaliação do desempenho energético da empresa. Nesta etapa é necessário identificar alterações que permitam a racionalização de energia, sem colocar em causa a produção da unidade industrial em questão [13].

Por fim, a elaboração de um relatório, por parte do auditor, deve conter toda a informação recolhida, as análises energéticas realizadas, a identificação de anomalias e as medidas para as eliminar ou minimizar. De um modo geral, alguns dos tópicos que este deve conter passam pelos objetivos e enquadramento da auditoria, identificação da instalação, contabilidade energética, análise dos equipamentos de produção, distribuição e utilização de energia e o cálculo dos consumos específicos de energia, por produto fabricado, e respetiva comparação com os valores legislados [13].

3.2.3. Meios técnicos utilizáveis

Para se proceder à intervenção no local, nomeadamente às medições necessárias, utilizam-se equipamentos típicos para medir grandezas elétricas, composição de gases de combustão, temperatura, humidade, pressão, caudais, entre outros.

Os analisadores de energia elétrica possibilitam o registo dos valores instantâneos, médios e máximos em intervalos de tempo definidos, referentes ao consumo de um dado processo. Os

analisadores de gases de combustão permitem controlar o excesso de ar, emissões gasosas, caudal de gases, rendimento de combustão, entre outros. Os medidores de caudais podem ser por leitura de pressão diferencial (tubo de *Pitot*) ou diretamente por leitura de velocidade (anemómetro) [13].

A medição do caudal através da pressão diferencial tem por base a queda de pressão provocada pela passagem do fluido no equipamento, como função do caudal que passa pela tubagem [13]. O tubo de *Pitot*, representado na Figura 3.2, é muito utilizado para medir caudais de gases em tubagens industriais, bem como em sistemas de ventilação. Este equipamento, quando inserido na tubagem na direção do escoamento, causa uma variação de pressão que permite a determinação da velocidade pontual no local onde o equipamento é introduzido. O valor da pressão diferencial, medido por um transdutor, corresponde à diferença entre a pressão de estagnação causada pelo equipamento e a pressão estática do fluido.



Figura 3.2 - Tubo de *Pitot*.

Por outro lado, a medição do caudal de acordo com a velocidade tem como princípio a utilização de equipamentos que funcionam de modo linear com o volume de escoamento, como é o caso do anemómetro de turbina, ilustrado na Figura 3.3. A passagem do fluido no anemómetro faz girar a turbina e a existência de um interruptor indutivo conta as rotações da turbina, levando à formação de impulsos que são, posteriormente, convertidos em valores de velocidade [13].

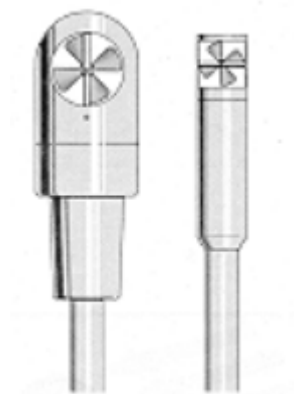


Figura 3.3 - Anemómetro de turbina [13].

3.2.4. Plano de Racionalização do Consumo de Energia

O PREn é elaborado com base nos relatórios provenientes das auditorias energéticas, sendo que para instalações com consumo de energia igual ou superior a 1000 tep/ano deve prever a implementação de todas as medidas identificadas com um período de retorno do investimento menor ou igual a cinco anos. Porém, esse período de retorno é menor ou igual a três anos para as restantes instalações [10].

O PREn deve estabelecer metas relativas à intensidade energética e carbónica, tendo em conta indicadores, entre os quais subsiste a Intensidade Energética (IE), Consumo Específico de Energia (CEE) e Intensidade Carbónica (IC), sendo que são calculados pelas Equações 3.1, 3.2 e 3.3, respetivamente [10]:

$$IE = \frac{\text{Consumo total de energia (tep)}}{\text{Valor acrescentado bruto (€)}} \quad \text{(Equação 3.1)}$$

$$CEE = \frac{\text{Consumo total de energia (tep)}}{\text{Volume de produção (unidade de produção)}} \quad \text{(Equação 3.2)}$$

$$IC = \frac{\text{Emissões gases de efeito de estufa (kgCO}_2\text{e)}}{\text{Consumo total de energia (tep)}} \quad \text{(Equação 3.3)}$$

Após a determinação dos indicadores é necessário verificar se cumprem as metas estabelecidas, sendo que estas dependem da instalação em questão. Instalações com consumos de energia iguais ou superiores a 1000 tep/ano têm de apresentar, no mínimo, uma melhoria de 6 % de IE e CEE, num período de seis anos, e as restantes uma melhoria de 4 %, em oito anos. Relativamente à IC, independentemente da instalação, no mínimo, tem de haver a manutenção dos seus valores históricos, ou seja, os valores têm de, pelo menos, manter-se inalterados [10].

De forma resumida, apresenta-se na Tabela 3.1 a periodicidade da auditoria energética e as metas a serem alcançadas, dadas pelos indicadores, para diferentes instalações CIE.

Tabela 3.1 - Periodicidade das auditorias energéticas e metas a serem alcançadas para diferentes instalações CIE.

Instalações CIE	≥ 500 tep/ano e ≤ 1000 tep/ano	≥ 1000 tep/ano
Periodicidade da auditoria (anos)	8	6
IE e CEE	Melhoria de 4 % em 8 anos	Melhoria de 6 % em 6 anos
IC	Manutenção dos valores históricos	Manutenção dos valores históricos

4. Caracterização das máquinas de impregnação de cordas

Como já referido anteriormente, as duas máquinas de impregnação de cordas, que existem na C-ITA, apresentam diferenças em alguns parâmetros, como:

- Número de estufas;
- Número de cordas;
- Velocidades de impregnação;
- Temperaturas de operação;
- Percentagem do ar de exaustão e recirculação;
- Tempos de enfiamento e de paragem;
- Artigos que tratam.

4.1. Máquina de impregnação de cordas *Single-End 1*

Na máquina *Single-End 1* ocorre a impregnação máxima de 108 cordas, caso nenhuma rebente, sendo que, inicialmente, as 108 cordas são desenroladas e entram num alinhador.

Nesta máquina são produzidos, maioritariamente, 3 artigos que se designarão de N0, H1 e H2, sendo que a sua composição e a velocidade a que são produzidos se encontram na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Composição dos artigos N0, H1 e H2 e respetivas velocidades de produção.

Artigos	Composição	Decitex (g/10000 m)	Velocidade (m/min)
N0	2 fios nylon	1400 x 2	250
H1	2 fios aramida + 1 fio nylon	1680 x 2 + 470	80
H2	1 fio aramida + 1 fio nylon	1680 + 1400	250

Os artigos N0 e H2 passam nas 4 estufas da máquina, enquanto o artigo H1 passa apenas em 2 estufas, no entanto, o processo de tratamento dos artigos é o mesmo. Seguidamente, é feita a descrição do processo para os artigos N0 e H2.

As cordas alinhadas passam no primeiro grupo trator (conjunto de rolos), mergulham na tina que contém a solução de impregnação (composta por água, resorcinol, formaldeído, latex e amónia) e entram na primeira estufa. Posteriormente, seguem para um segundo grupo trator, entram na segunda estufa, passam no terceiro grupo trator, são alimentadas à terceira estufa e,

por fim, à quarta estufa. Após impregnação (secagem e termofixação), as cordas passam no quarto e quinto grupo trator, são enroladas em 108 bobines numa máquina *Sahm* e estão prontas para embalagem.

É de referir que, para o artigo N0 e H2, a estufa 1 funciona como estufa de secagem e as restantes operam como estufas de termofixação dos produtos químicos na corda, porém no caso do artigo H1 a estufa 3 é de secagem e a estufa 4 de termofixação.

Na Figura 4.1 é apresentada a temperatura de operação das estufas, T, a percentagem de recirculação de ar, R, e a percentagem do ar de exaustão nas estufas, E, a que estão sujeitos os artigos referidos.

Estufa 1	N0	T = 155 °C, R = 80 %, E = 50 %
	H2	T = 160 °C, R = 80 %, E = 50 %
Estufa 2	N0	T = 240 °C, R = 80 %, E = 50 %
	H2	T = 245 °C, R = 80 %, E = 50 %
Estufa 3	N0	T = 240 °C, R = 80 %, E = 47 %
	H1	T = 170 °C, R = 50 %, E = 40 %
	H2	T = 245 °C, R = 80 %, E = 45 %
Estufa 4	N0	T = 245 °C, R = 80 %, E = 47 %
	H1	T = 230 °C, R = 50 %, E = 40 %
	H2	T = 245 °C, R = 80 %, E = 40 %

Figura 4.1 - Esquema das condições operatórias na máquina *Single-End 1*.

De seguida, na Tabela 4.2 encontram-se as dimensões exteriores de cada uma das estufas constituintes da máquina *Single-End 1*.

Tabela 4.2 - Dimensões das estufas da *Single-End 1*.

Altura (m)	Comprimento (m)	Largura (m)
1,83	17,03	2,52

4.2. Máquina de impregnação de cordas *Single-End 2*

A máquina *Single-End 2* apresenta um princípio de funcionamento semelhante ao da *Single-End 1*, porém apenas passam no máximo 54 cordas em simultâneo, exceto se alguma rebentar, num alinhador, após desenrolamento.

Nesta máquina são produzidos 2 artigos, N1 e N2, sendo que a sua composição e velocidade de produção se encontram na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Composição dos artigos N1 e N2 e as respetivas velocidades de produção.

Artigos	Composição	Decitex (g/10000 m)	Velocidade (m/min)
N1	2 fios nylon	470 x 2	300
N2	2 fios nylon	940 x 2	300

A diferença entre os 2 artigos é que o artigo N1 é mais fino (leve) que o artigo N2, uma vez que apresenta um decitex menor.

Inicialmente, as cordas passam no primeiro grupo trator, são mergulhadas na tina com solução de impregnação e entram na primeira estufa, onde ocorre secagem. Após passagem na primeira estufa, seguem para o segundo grupo trator e entram na segunda estufa, ocorrendo termofixação dos produtos químicos, justificando o facto desta estufa apresentar temperaturas superiores à estufa de secagem. Por fim, depois da impregnação, as cordas passam no terceiro e quarto grupo trator, são enroladas em 54 bobines numa máquina *Sahm* e estão preparadas para embalagem e armazenamento.

Dependendo de cada artigo as condições de operação a que estes se submetem são diferentes. As condições de operação de temperatura, percentagem de recirculação de ar e percentagem do ar de exaustão, praticadas na atividade atual da empresa, são apresentadas na Figura 4.2.

Estufa 1	N1	T = 170 °C, R = 80 %, E = 65 %
	N2	T = 175 °C, R = 80 %, E = 65 %
Estufa 2	N1	T = 235 °C, R = 80 %, E = 50 %
	N2	T = 235 °C, R = 80 %, E = 50 %

Figura 4.2 - Esquema das condições operatórias na máquina *Single-End 2*.

Seguidamente, na Tabela 4.4 apresentam-se as dimensões exteriores das estufas que compõem a máquina *Single-End 2*.

Tabela 4.4 - Dimensões das estufas da *Single-End 2*.

Altura (m)	Comprimento (m)	Largura (m)
1,86	17,19	1,93

Contrariamente à máquina *Single-End 1*, esta máquina apresenta um sistema EcoVac, nas duas estufas, que consiste no controlo automático das exaustões nas estufas, com base na diferença entre a pressão no interior das mesmas e a pressão atmosférica, sendo que este sistema tem em vista a redução do consumo de gás natural utilizado na combustão.

A alteração da exaustão nas estufas provoca variação na pressão interior que vai afetar o caudal de ar fresco que entra nas mesmas. O caudal de ar fresco entra pelas aberturas de entradas e saídas das cordas e é tanto maior quanto maior a diferença de pressão existente entre o exterior e interior da estufa. O facto de se poder baixar a percentagem do ar de exaustão é um fator positivo no consumo de combustível, porém pode contribuir para uma maior sujidade da estufa, dado que os gases se acumulam no interior da mesma.

O sistema de controlo EcoVac é constituído por 2 tubos, um ligado ao interior e outro ao exterior da estufa, medindo a respetiva pressão a cada instante. Por sua vez, os tubos encontram-se ligados a um transdutor de pressão que envia a informação do diferencial de pressão a um PLC (*Programmable Logic Controller*). O PLC tem como função ajustar a exaustão nas estufas, mantendo a diferença de pressão (pressão diferencial) constante e igual ao valor ótimo definido.

De seguida, na Figura 4.3, encontra-se uma ilustração representativa da estrutura das estufas desta máquina, que é semelhante à *Single-End 1*.

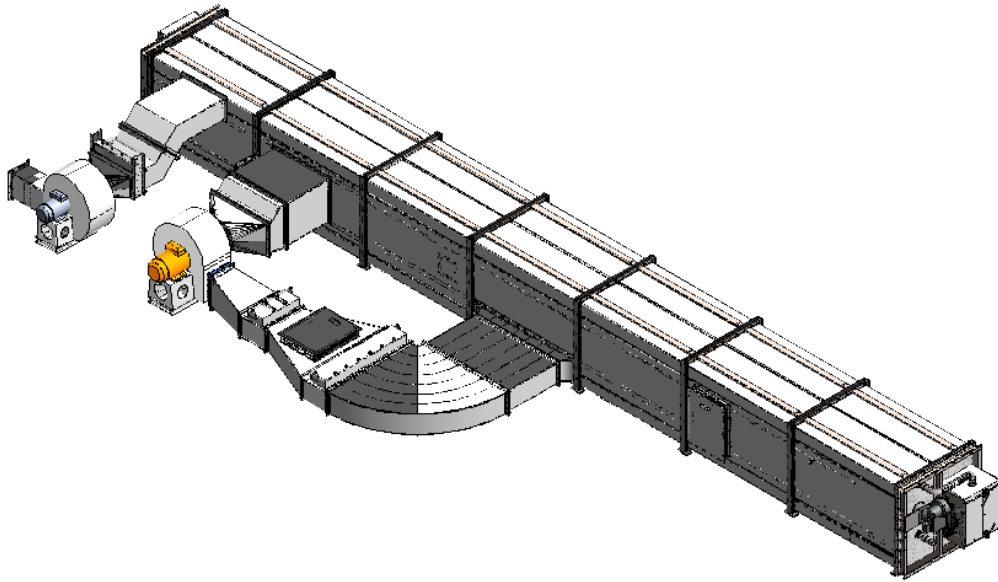


Figura 4.3 - Ilustração representativa das estufas presentes na *Single-End 2*.

4.3. Características comuns às duas máquinas

Em ambas as máquinas, é de referir que os grupos tratores têm como objetivo aplicar a tensão desejada nas cordas, conforme as características pretendidas. Para além destes grupos tratores, existem rolos isolados que ajudam a manter a orientação das cordas. As cordas que passam no interior das estufas realizam 6 passagens em cada.

Como não se está perante um processo contínuo, após um determinado número de metros de produção, especificadas pelo cliente, é necessário trocar as bobines na máquina *Sahm*, sendo que a máquina é parada. Por outro lado, na troca de artigos é também necessária a paragem da máquina para se proceder a um enfiamento da nova matéria-prima.

Relativamente às estufas, todas são constituídas por um queimador onde se dá a combustão do gás natural na presença de ar, que entra numa grelha junto ao queimador. Salienta-se que este ar será designado por ar de combustão e o ar que entra nas aberturas de entradas e saídas das cordas, devido à depressão no interior das estufas, de ar fresco. Junto ao queimador de cada estufa, para ambas as máquinas, existe um tubo de entrada de ar fresco que se encontra,

atualmente, fechado. Futuramente poderá ser aberto para promover a entrada de ar fresco pré-aquecido.

Os gases resultantes da combustão, a uma temperatura elevada, promovem a secagem e termofixação nas máquinas de impregnação de cordas, sendo que o seu movimento ocorre com auxílio de ventiladores.

Para além do queimador e ventilador, cada estufa possui, ainda, um exaustor que remove os gases quentes do interior da estufa para o exterior. Essa remoção de gases é realizada através de uma chaminé comum às 4 estufas no caso da *Single-End 1* e comum às 2 estufas no caso da *Single-End 2*.

Na Tabela 4.5 apresentam-se as características das máquinas de impregnação de cordas.

Tabela 4.5 - Características das máquinas de impregnação de cordas.

Máquinas	Capacidade de exaustão (m ³ /h)	$d_{chaminé}$ (mm)	$d_{tubo\ de\ entrada\ de\ ar\ fresco}$ (mm)
<i>Single-End 1</i>	15000	800	95
<i>Single-End 2</i>	7500	1000	190

Por fim, para medir os consumos de gás natural em cada máquina, na *Single-End 1* existe apenas um contador de gás natural comum às 4 estufas, enquanto na *Single-End 2* há um contador de gás natural associado a cada estufa.

5. Levantamento energético e análise crítica da *Single-End* 2

Uma vez que 2020 foi um ano atípico e a empresa teve de fechar por motivos de pandemia, não seria correto realizar o levantamento energético referente a esse ano. Nesse sentido, optou-se por fazer o levantamento energético relativamente ao ano de 2019.

No ano de referência de 2019 a fábrica laborou 348 dias por ano (tendo em conta as férias e feriados), 7 dias por semana e 24 horas por dia, sendo que corresponde a um valor de 8352 horas anuais.

As principais formas de energia que a empresa utiliza são gás natural e energia elétrica, sendo realizada uma abordagem dos consumos totais e dos consumos por cada consumidor. Apesar do gasóleo, consumido como combustível na frota automóvel, ser uma fonte de energia, será desprezado por ser um gasto muito inferior quando comparado ao gás natural e energia elétrica.

Todos os dados necessários para a determinação dos resultados apresentados seguidamente, nos subcapítulos 5.1, 5.2 e 5.3, encontram-se no Anexo A, secção A.1.

5.1. Consumo total de energia

Com o intuito de se comparar as duas formas de energia converteram-se ambas para toneladas equivalentes de petróleo (tep), com base nos fatores de conversão apresentados na Tabela 5.1 [14].

Tabela 5.1 - Fatores de conversão das diferentes formas de energia [14].

Formas de energia	tep/kWh	tep/ton	tCO ₂ e/tep
Energia elétrica	0,000215	—	2,186
Gás natural	—	1,077	2,684

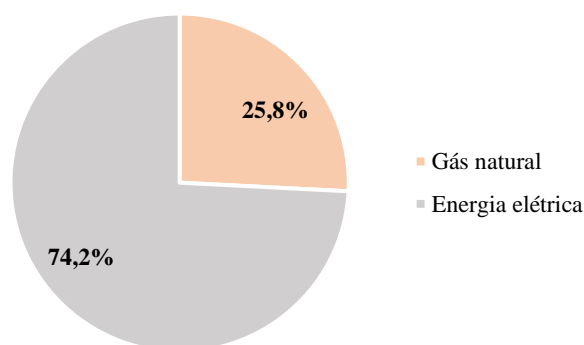
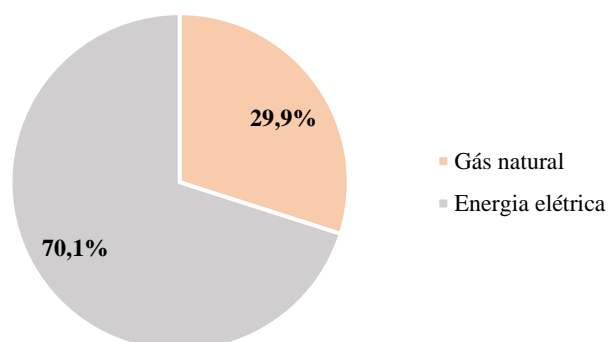
Determinaram-se os consumos de gás natural e energia elétrica, em tep, e as emissões de gases de efeito de estufa, em tCO₂e, como representado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Consumos e emissões gasosas de gás natural e energia elétrica no ano de 2019.

Energia	Consumos (tep/ano)	Emissões gasosas (tCO₂e/ano)
Energia elétrica	7524	16447
Gás natural	2618	7026
Total	10142	23473

De acordo com a Tabela 5.2 verificou-se que a empresa apresenta um consumo energético anual superior a 500 tep/ano, logo é considerada uma instalação consumidora intensiva de energia.

Nas Figuras 5.1 e 5.2 apresentam-se as distribuições percentuais dos consumos de gás natural e energia elétrica e das emissões de gases de efeito de estufa provocadas pelas diferentes formas de energia, respetivamente.

**Figura 5.1** - Distribuição percentual dos consumos de gás natural e energia elétrica, em tep.**Figura 5.2** - Distribuição percentual das emissões de gases de efeito de estufa de gás natural e energia elétrica, em tCO₂e.

Através das Figuras 5.1 e 5.2 tornou-se visível que o consumo de energia elétrica é muito superior ao consumo de gás natural e, conseqüentemente, as emissões de gases de efeitos de estufa são, também, mais elevadas.

Relativamente ao preço unitário das utilidades consumidas, o valor é de:

- Gás natural – 0,02312 €/kWh;
- Energia elétrica – 0,087 €/kWh.

De modo a quantificar os custos anuais das respetivas fontes de energia, apresenta-se na Tabela 5.3 o valor relativo às mesmas.

Tabela 5.3 - Custos anuais de gás natural e energia elétrica.

Energia	Custos (€/ano)
Energia elétrica	3022496
Gás natural	935980
Total	3958476

Desta forma, a distribuição da percentagem dos custos anuais de cada utilidade apresenta-se na Figura 5.3.

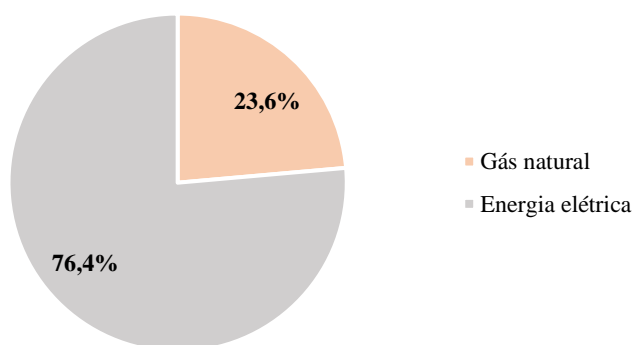


Figura 5.3 - Distribuição percentual dos custos de gás natural e energia elétrica, em €.

5.2. Consumo de gás natural

O gás natural é utilizado, maioritariamente, nas estufas das máquinas de impregnação de cordas e tecidos, sendo que também existe um consumo inerente à râmula e a uma pequena caldeira de vaporização associada à mesma, presentes no processo de produção das malhas. A

cantina e os vestiários são outros setores que consomem gás natural, ainda que em frações bastantes menores.

Na empresa em questão, a instalação de gás natural é composta por dois Postos de Regulação e Medida (PRM's), sendo um de média pressão (PRM(A)), que alimenta os grandes consumidores industriais, e um de baixa pressão (PRM(B)), associado aos serviços sociais, nomeadamente a cantina e os balneários. A repartição mensal desta fonte de energia encontra-se apresentada na Figura 5.4.

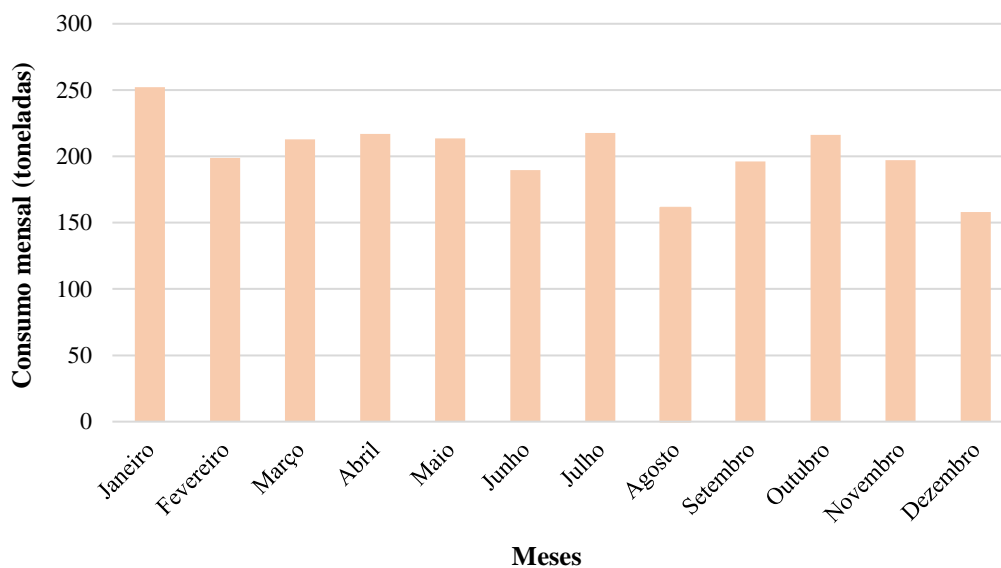


Figura 5.4 - Distribuição mensal do consumo de gás natural, em toneladas.

Pela análise da Figura 5.4 verificou-se que a variação do consumo de gás natural ao longo dos meses não é muito significativa, sendo que o mês de dezembro é o que apresenta menor consumo de gás natural, no valor de 158 toneladas, seguido do mês de agosto que consome 161 toneladas, e o mês de janeiro exibe maiores consumos, equivalentes a 252 toneladas. O facto dos meses de agosto e dezembro corresponderem aos meses de férias da empresa pode levar aos menores consumos verificados no gráfico. Nesse sentido, a produção é menor e, conseqüentemente, os consumos também são inferiores.

Com o intuito de monitorizar os consumos de gás natural, a C-ITA efetua registos de todos os contadores parciais dos consumidores, que apresenta distribuídos pela unidade fabril, assim como dos PRM's. A empresa disponibiliza de uma base de dados onde são registados todos os consumos de energia ao longo do tempo.

Na determinação do consumo de gás natural é fundamental associar o fator de correção do volume, dado pelo respetivo PRM, de modo a proceder-se à correção da pressão, temperatura

e fator de compressibilidade, uma vez que as medidas de volume têm por base as condições da linha.

Com o intuito de se compararem os consumos de gás natural dos consumidores referidos anteriormente, apresenta-se na Figura 5.5 a repartição dos mesmos.

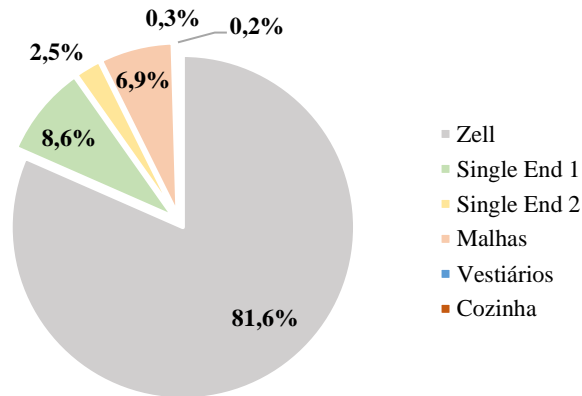


Figura 5.5 - Distribuição percentual do consumo de gás natural pelos consumidores.

De acordo com a Figura 5.5 observou-se que a máquina de impregnar tecido (Zell) é a maior consumidora de energia, na forma de gás natural (81,6 % do consumo total de gás natural), seguida da *Single-End* 1 (8,6 %) e das malhas (6,9 %). Porém, o consumo de gás natural da *Single-End* 2, que representa 2,5 % do consumo total de gás natural, será superior nos anos posteriores, uma vez que em 2019 as leituras do consumo de gás só começaram a ser realizadas a partir de junho do mesmo ano, ou seja, não foi contabilizado o consumo nos primeiros 5 meses. Os consumos de serviços sociais (vestiários e cantina) apenas representam 0,5 % do consumo de gás, significando que são desprezáveis relativamente ao setor industrial.

5.3. Consumo de energia elétrica

Relativamente à energia elétrica esta é consumida por equipamentos inerentes ao processo fabril, como motores elétricos das várias máquinas, ventiladores, compressores de ar, iluminação dos espaços fabris, equipamentos dos serviços sociais, entre outros.

Tal como para os consumos de gás natural, efetuou-se um levantamento energético dos consumos de energia elétrica associados a cada consumidor. É de salientar que estes resultados apenas se referem às máquinas que consomem energia elétrica, não se contabilizando a iluminação e os gastos nos serviços sociais. Assim, os consumos que a empresa apresentou com esta fonte de energia foram superiores aos consumos apresentados nesta secção.

Seguidamente, na Figura 5.6 apresenta-se a distribuição mensal do consumo de energia elétrica.

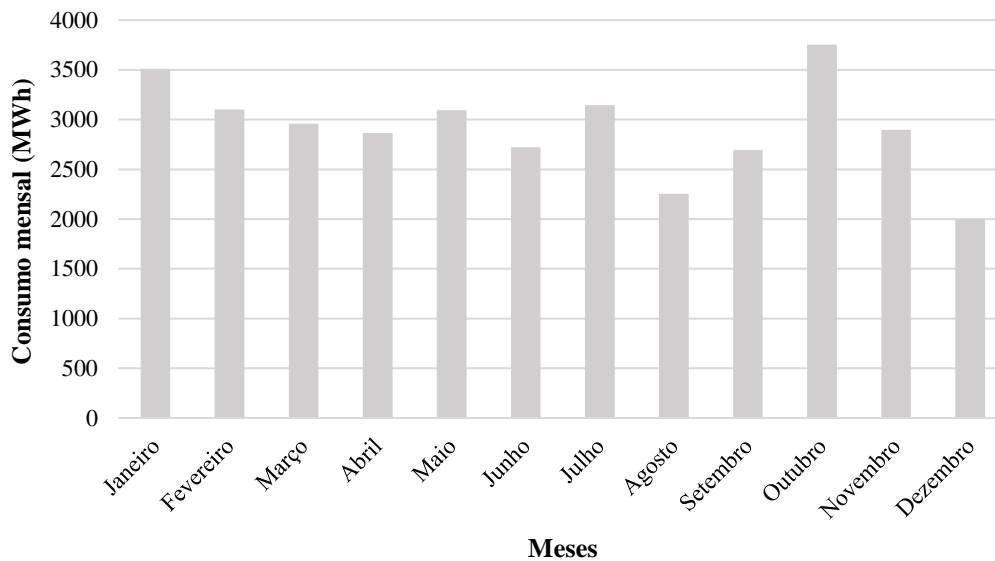


Figura 5.6 - Distribuição mensal do consumo de energia elétrica, em MWh.

Analisando a Figura 5.6 denotou-se que os meses de dezembro e agosto são os que apresentam menor consumo, no valor de 1998 e 2253 MWh, respetivamente. Tal como justificado anteriormente para o gás natural, isto pode dever-se ao facto de corresponder ao período de férias da empresa. O valor máximo consumido corresponde a 3755 MWh, relativo ao mês de outubro.

Para ser possível efetuar uma comparação dos consumos de energia elétrica dada pelos respetivos consumidores, na Figura 5.7 ilustra-se a distribuição dos mesmos.

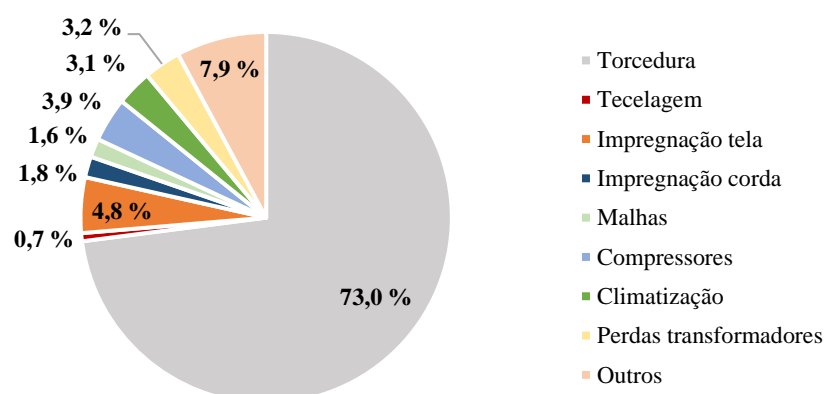


Figura 5.7 - Distribuição percentual do consumo de energia elétrica pelos consumidores.

Através da Figura 5.7 observou-se que o setor da torcedura representa a maior parte do consumo de energia elétrica (73,0 % do consumo total de energia elétrica), devido à elevada quantidade de torcedores existentes na C-ITA. A máquina de impregnar tecido é das maiores consumidoras de energia elétrica, apresentando 4,8 % dos consumos totais, porém a diferença do consumo desta máquina e dos torcedores é bastante significativa. A percentagem de 7,9 %, correspondente aos outros, é significativa e esta inclui todos os consumos elétricos que não foram contabilizados nos outros itens, como tomadas dispersas pela fábrica, secadores e todos os dispositivos que consomem eletricidade.

5.4. Consumos energéticos nas máquinas *Single-End 1* e *Single-End 2*

Nas máquinas de impregnação de cordas são produzidos, maioritariamente, 5 artigos, caracterizados anteriormente, e definidos como:

- *Single-End 1*: N0 – 2 fios nylon (1400×2)
H1 – 2 fios aramida e 1 fio nylon ($1680 \times 2 + 470$)
H2 – 1 fio aramida e 1 fio nylon ($1680 + 1400$)
- *Single-End 2*: N1 – 2 fios nylon (470×2)
N2 – 2 fios nylon (940×2)

De modo a possibilitar a determinação dos resultados apresentados nesta secção, teve-se por base o registo de dados presentes no Anexo A, secção A.2. Assim, após a determinação dos consumos energéticos dos artigos que são produzidos nestas máquinas, verificou-se que a utilidade mais consumida nas mesmas é o gás natural, como demonstrado na Figura 5.8.

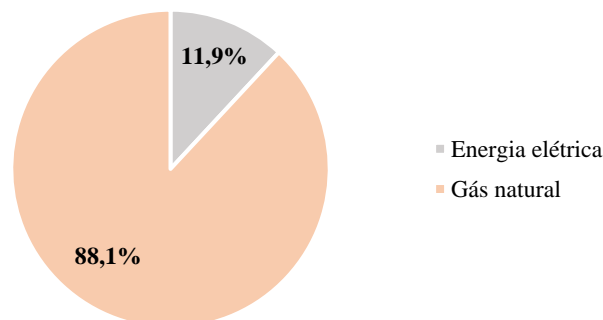


Figura 5.8 - Consumos energéticos nas máquinas *Single-End 1* e *Single-End 2*.

Uma vez que o gás natural é a utilidade mais consumida nas máquinas de impregnação de cordas, o estudo irá debruçar-se, maioritariamente, na otimização do consumo de gás natural.

A distribuição percentual do consumo específico de gás natural, por artigo, na etapa da impregnação é apresentada na Figura 5.9.

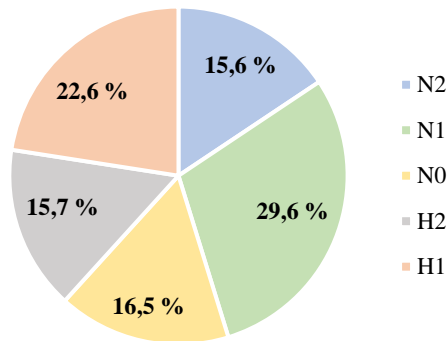


Figura 5.9 - Distribuição percentual do consumo específico de gás natural para os diferentes artigos.

Na Figura 5.10 apresenta-se a distribuição percentual do consumo específico de energia elétrica, por artigo, nas etapas da torcedura e impregnação.

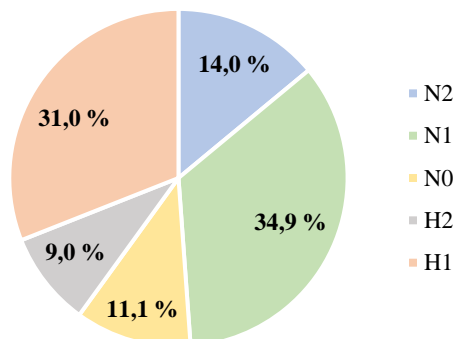


Figura 5.10 - Distribuição percentual do consumo específico de energia elétrica para os diferentes artigos.

Através das Figuras 5.9 e 5.10 verificou-se que o artigo N1 apresenta um maior consumo específico de gás natural e energia elétrica do que os restantes artigos, porque este artigo tem menor decitex, ou seja, é caracterizado por apresentar um fio mais leve.

É de referir que existem vários parâmetros que influenciam os consumos específicos, nomeadamente, condições de operação (velocidades e percentagem do ar de exaustão),

número de cordas, tempo de paragem e condições ambientais (pressão atmosférica, temperatura e humidade relativa do ar envolvente).

Na produção dos diferentes artigos, o tempo de paragem corresponde ao tempo necessário para trocar bobines entre jogos (ciclos de produção), e pode ser dependente do número de operadores em cada turno, sendo que durante este tempo os queimadores das máquinas continuam em funcionamento. Este é um parâmetro crítico, que contribui para o aumento do consumo específico, dado que nesse período se consome energia e não há produção, como se exemplifica na Figura 5.11.

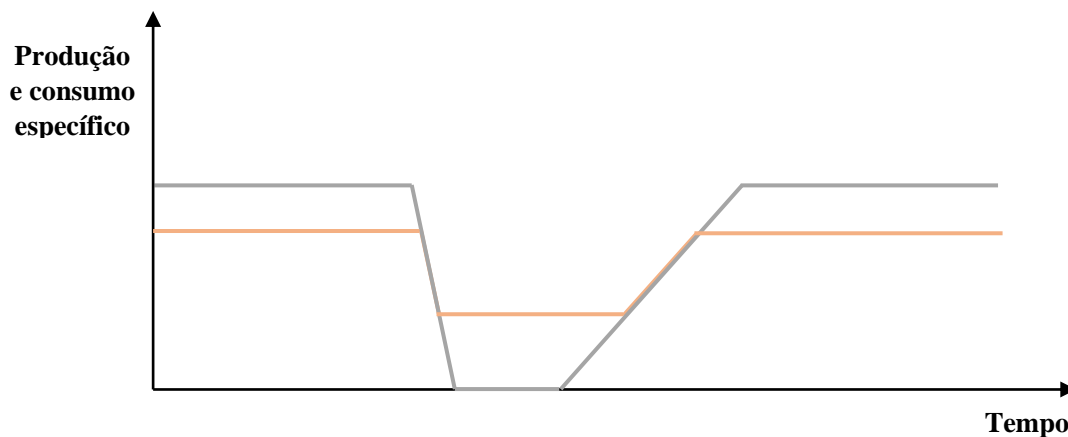


Figura 5.11 - Produção (cinzento) e consumo específico de gás natural (laranja) em função do tempo.

Nesse sentido, encontrar uma solução para diminuir o consumo específico durante o tempo de paragem é essencial. Esta solução deve incidir principalmente na máquina *Single-End 1*, uma vez que na *Single-End 2*, por norma, os tempos de paragem são mais curtos.

A presente dissertação teve como objetivo o estudo da máquina *Single-End 1*, porém efetuou-se um estudo prévio da *Single-End 2* que servirá de base para o objetivo final.

5.5. Análise crítica da *Single-End 2*

Nesta máquina foram analisados os artigos N1 e N2 para diferentes condições de operação, sendo que foram consideradas como variáveis, o número de cordas presentes, o tempo de paragem e a percentagem do ar de exaustão das 2 estufas. Apesar de se ter feito o levantamento energético anterior para o ano de 2019, a análise que se segue corresponde a valores atuais do consumo de gás natural.

Assim, os dados apresentados neste subcapítulo correspondem a valores recolhidos no presente ano, desde 1 de janeiro de 2021 até 31 de maio de 2021. Depois realizou-se uma

extrapolação da produção anual dos artigos N1 e N2, obtendo-se 148012 kg e 685501 kg, respetivamente.

Foram acompanhados muitos ciclos de produção e realizadas diversas leituras para o consumo de gás natural, para as diferentes variáveis em estudo, apresentando-se no Anexo A, secção A.3, as tabelas e os cálculos necessários para a análise e tratamento de dados.

Influência do número de cordas

Com o intuito de avaliar a influência do número de cordas no consumo específico de gás natural, fizeram-se medições de gás natural durante diversos ciclos de produção, em que a percentagem do ar de exaustão foi mantida aproximadamente constante. No entanto, verificou-se que, para o artigo N1, os tempos de paragem apresentaram valores muito diferentes. Os resultados obtidos, que correspondem a valores médios das leituras efetuadas, em vários ciclos de produção, são apresentados nas Figuras 5.12 e 5.13.

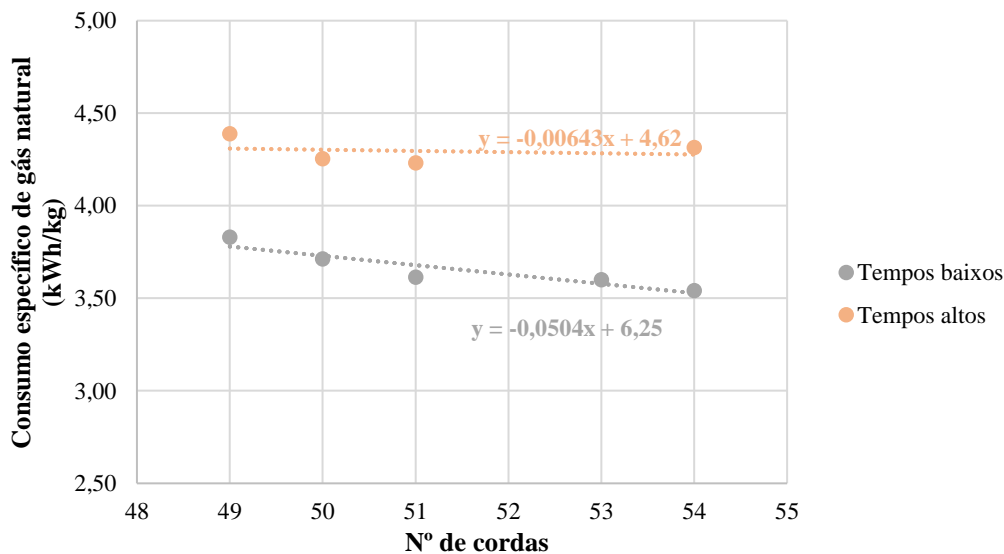


Figura 5.12 - Consumo específico de gás natural em função do número de cordas, para o artigo N1.

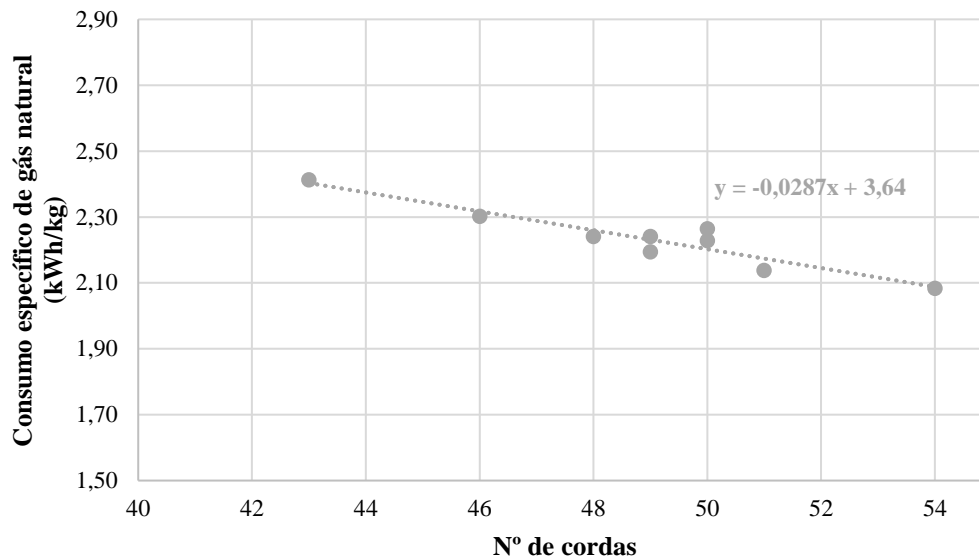


Figura 5.13 - Consumo específico de gás natural em função do número de cordas, para o artigo N2.

Como seria de esperar, com o aumento do número de cordas o consumo específico de gás natural tende a diminuir.

Para o artigo N1 verificou-se que o tempo de paragem variava significativamente entre ensaios e, por isso, representou-se na Figura 5.12 a influência do número de cordas no consumo específico de gás natural para tempos maiores, que correspondem a valores entre 35 e 50 minutos, e de tempos menores de cerca de 13 minutos. De acordo com a Figura 5.12 observou-se a tendência decrescente do consumo de energia com o aumento do número de cordas, sendo essa tendência muito mais acentuada para tempos de paragem menores. É também de salientar que, para o mesmo número de cordas, o consumo específico de gás natural é muito mais elevado quando o tempo de paragem é maior. Relativamente aos tempos de paragem mais baixos, verificou-se que para 49 cordas o consumo específico de gás natural foi de 3,83 kWh/kg e para 54 cordas foi de 3,54 kWh/kg.

Quanto ao artigo N2, na gama de trabalho de 43 a 54 cordas, é ainda mais perceptível a diminuição do consumo específico de gás natural com o aumento do número de cordas. Neste artigo os tempos de paragem não têm uma variação notória de ensaio para ensaio, sendo que nos dados apresentados este teve um valor médio de 16 minutos. Para 43 cordas o tempo de paragem é da mesma ordem de grandeza do valor obtido para as 54 cordas, sendo de 15 e 16 minutos, respetivamente, concluindo-se que, para o mesmo tempo de paragem, o consumo específico de gás natural diminuiu de 2,41 kWh/kg para 2,08 kWh/kg. Para este artigo, dado

que se efetuaram leituras numa gama maior de número de cordas, demonstra-se na Figura 5.14 o custo anual da impregnação de 43 e 54 cordas por jogo.

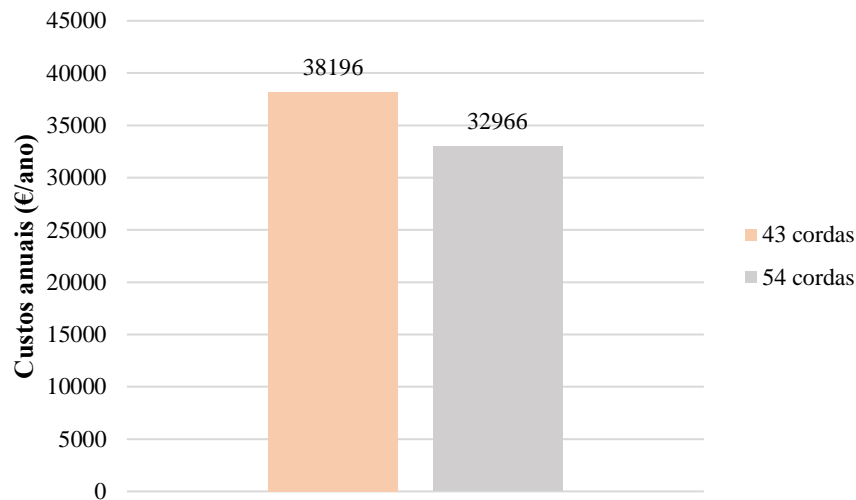


Figura 5.14 - Custos anuais para diferentes números de cordas, para o artigo N2.

De acordo com os dados apresentados na Figura 5.14 concluiu-se que poderá ser possível uma poupança anual de 5230 €, que corresponde a uma diminuição de 13,7 % dos custos de gás natural.

Influência do tempo de paragem

Pelos resultados apresentados anteriormente verificou-se que o tempo de paragem da máquina é um fator que influencia o consumo específico. Deste modo foram acompanhados muitos ciclos de produção dos 2 artigos, de maneira que se pudesse ter uma amostra significativa de resultados em que o número de cordas tratado fosse semelhante e apenas variasse o tempo de paragem.

Com as Figuras 5.15 e 5.16 pretende-se então avaliar o impacto do tempo de paragem no consumo específico de gás natural para os artigos N1 e N2, respetivamente.

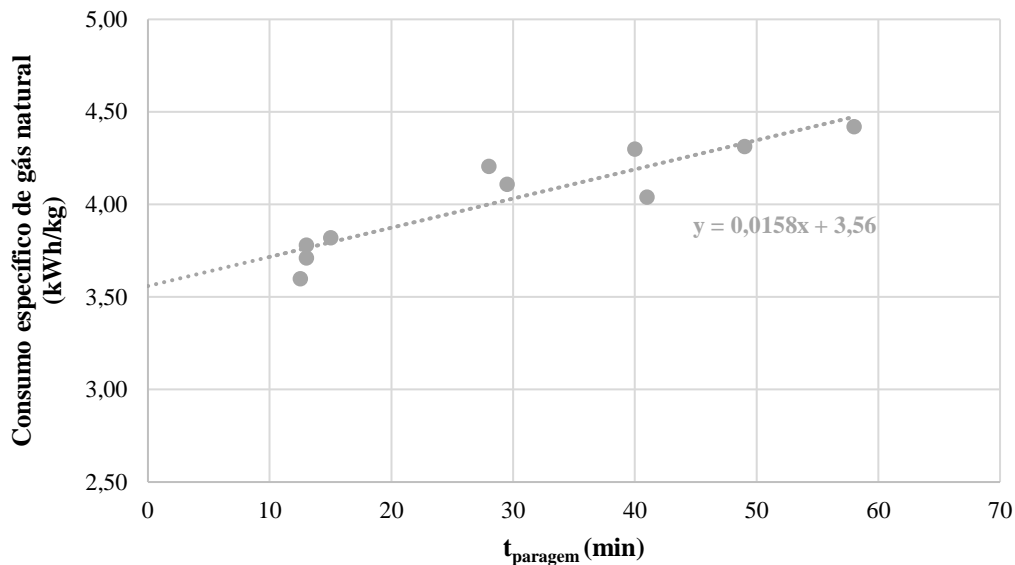


Figura 5.15 - Consumo específico de gás natural em função do tempo de paragem, para o artigo N1.

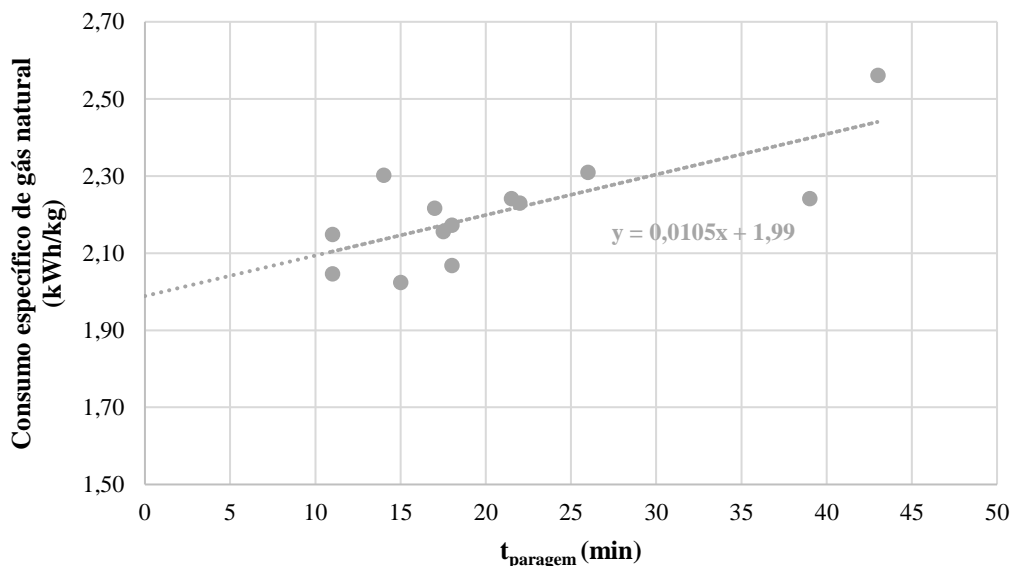


Figura 5.16 - Consumo específico de gás natural em função do tempo de paragem, para o artigo N2.

Verificou-se que na produção do artigo N1 os tempos de paragem são superiores aos que ocorrem na produção do artigo N2. Isto acontece porque é possível, no caso de N2, fazer a emenda das cordas nas bobines, de jogo para jogo, em contínuo, ou seja, com a máquina em funcionamento. O artigo N1 como é mais fino sofre um processo de pistolagem, de 2 em 2 jogos, que consiste na emenda das cordas, mas que só pode ser realizado após paragem da máquina, levando a tempos de paragem significativamente superiores. Deste modo, a procura no mercado de uma máquina para fazer as emendas do artigo mais fino (N1), com a máquina em funcionamento, seria benéfico, na medida em que proporcionaria poupanças energéticas devido à diminuição de tempo de paragem. O artigo N2 apresenta um tempo de paragem

normal de 10 a 20 minutos, no entanto, se houver várias cordas em falta e os operadores procederem ao enfiamento das mesmas, o tempo de paragem pode atingir valores superiores.

Ainda se pode referir que nas Figuras 5.15 e 5.16 as retas de tendência foram extrapoladas para $t = 0$ com o intuito de se analisar o consumo mínimo correspondente a um ciclo de produção sem tempo de paragem. No caso do artigo N1 o valor obtido é de 3,56 kWh/kg e para o artigo N2 o valor obtido é de 1,99 kWh/kg.

A partir das Figuras 5.17 e 5.18, para os artigos N1 e N2, respetivamente, avaliou-se o custo mínimo de produção, caso não houvesse tempo de paragem entre jogos, e também o custo associado a tempos de paragem máximos e mínimos, com o objetivo de se determinar as possíveis poupanças anuais de gás natural. Esta avaliação foi realizada para igual número de cordas e percentagem do ar de exaustão.

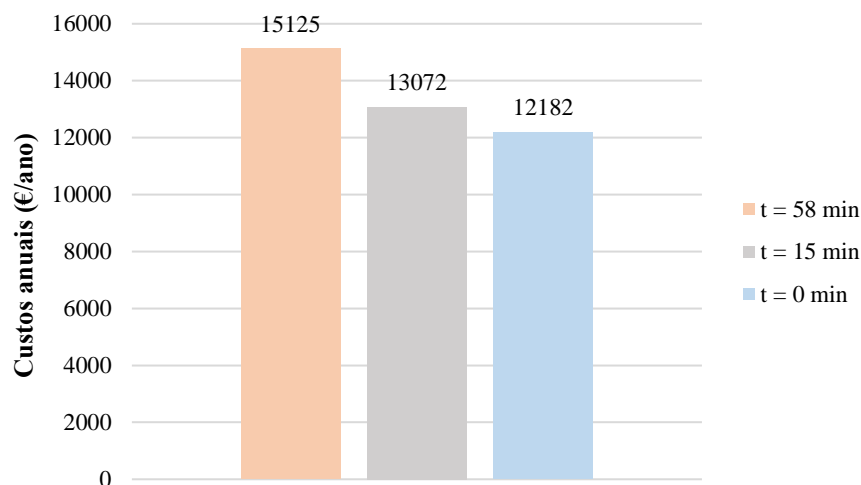


Figura 5.17 - Custos anuais para diferentes tempos de paragem, para o artigo N1.

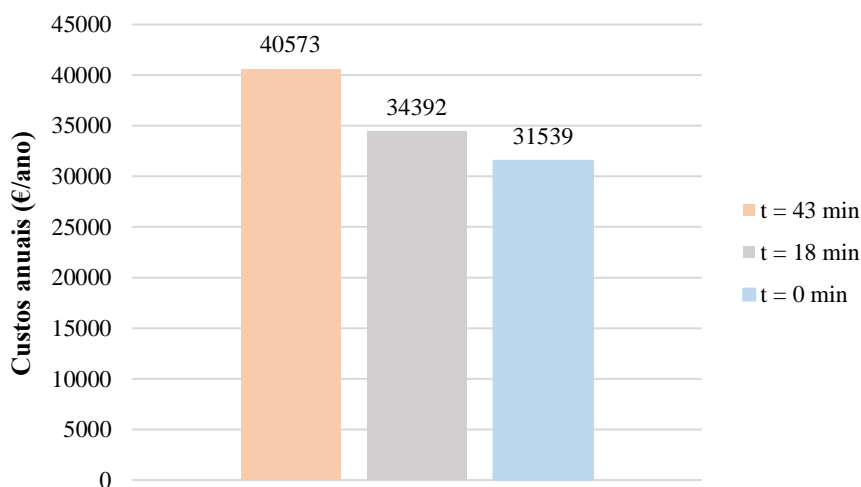


Figura 5.18 - Custos anuais para diferentes tempos de paragem, para o artigo N2.

De acordo com os dados apresentados concluiu-se que, para o artigo N1, quando o tempo de paragem é baixo (neste caso 15 minutos), poderá ocorrer uma poupança de 2053 €/ano, relativamente a um tempo de paragem de 58 minutos, que traduz uma poupança de custos de gás natural de 13,6 %. No artigo N2, a poupança anual para um tempo de paragem de 18 minutos, comparativamente a 43 minutos, poderá ser de 6181 €, correspondente a uma poupança de 15,2 %.

Influência da percentagem do ar de exaustão

Outro fator que afeta os consumos de gás natural é a percentagem do ar de exaustão a que as estufas operam. Nas Figuras 5.19 e 5.20 representam-se os valores médios da variação dos consumos específicos de gás natural em função da percentagem do ar de exaustão na estufa 2, para exaustões fixas na estufa 1 de 60 % e 65 %. Nestas representações gráficas houve dificuldade em seleccionar e agrupar as leituras efetuadas, uma vez que os parâmetros referentes ao número de cordas e tempo de paragem variam de forma incontrolável de ciclo para ciclo de produção. Deste modo, os valores médios obtidos, para o consumo específico de gás natural, resultaram de ensaios em que se procurou que o número de cordas e tempo de paragem fosse semelhante. Assim se explica que nas Figuras 5.19 e 5.20 apareçam pontos referentes à mesma percentagem do ar de exaustão, mas com consumos específicos diferentes.

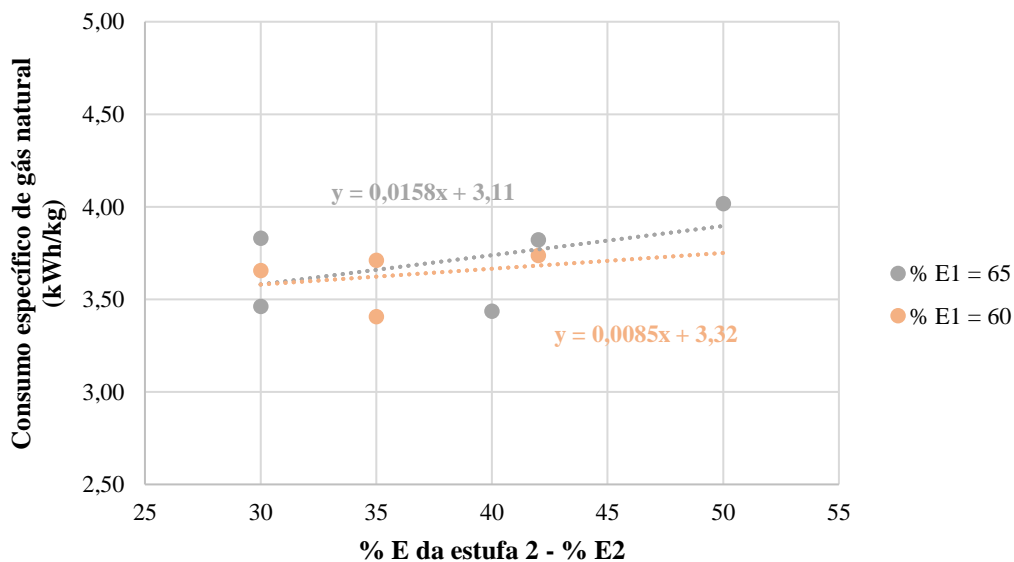


Figura 5.19 - Consumo específico de gás natural em função da percentagem do ar de exaustão na estufa 2, para o artigo N1.

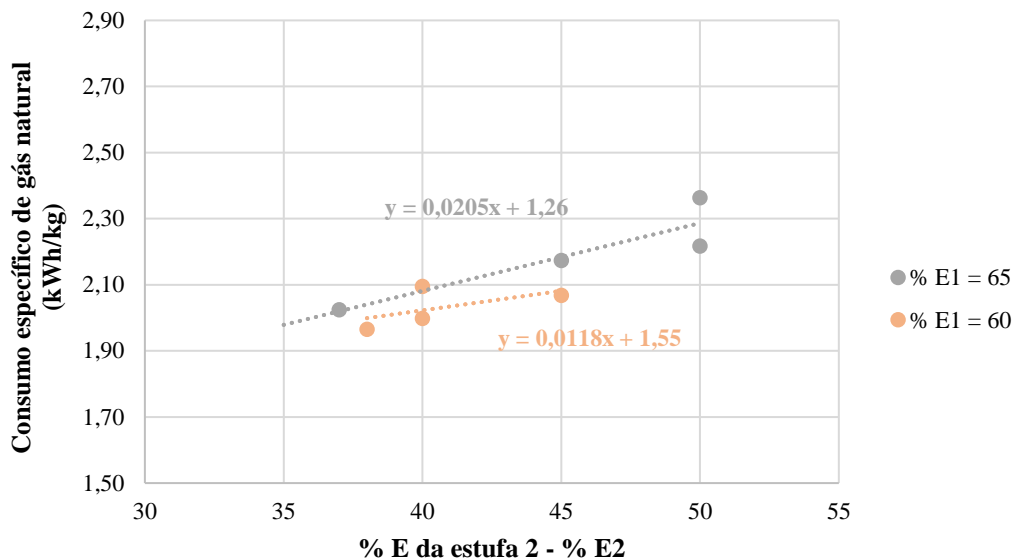


Figura 5.20 - Consumo específico de gás natural em função da percentagem do ar de exaustão na estufa 2, para o artigo N2.

É expectável que com o aumento da percentagem do ar de exaustão, o consumo específico de gás natural aumente, dado que, como já explicado anteriormente, o facto de se remover uma maior quantidade de ar do interior das estufas, promove a entrada de mais ar fresco e, por isso, é necessário fornecer mais calor para o aquecimento.

De uma forma geral, verificou-se que em ambos os artigos a linha de tendência para a percentagem do ar de exaustão de 65 % na estufa 1 encontra-se acima da linha de 60 %. Além disso, para uma exaustão fixa na estufa 1, o aumento da exaustão na estufa 2 traduz-se num aumento do consumo de gás natural.

De modo a serem caracterizados os custos anuais associados a diferentes percentagens do ar de exaustão foram avaliados os ensaios que correspondiam a número de cordas e tempo de paragem semelhantes.

Na Figura 5.21 fixou-se a percentagem do ar de exaustão na estufa 1 em 65 % e avaliou-se a influência da percentagem do ar de exaustão na estufa 2.

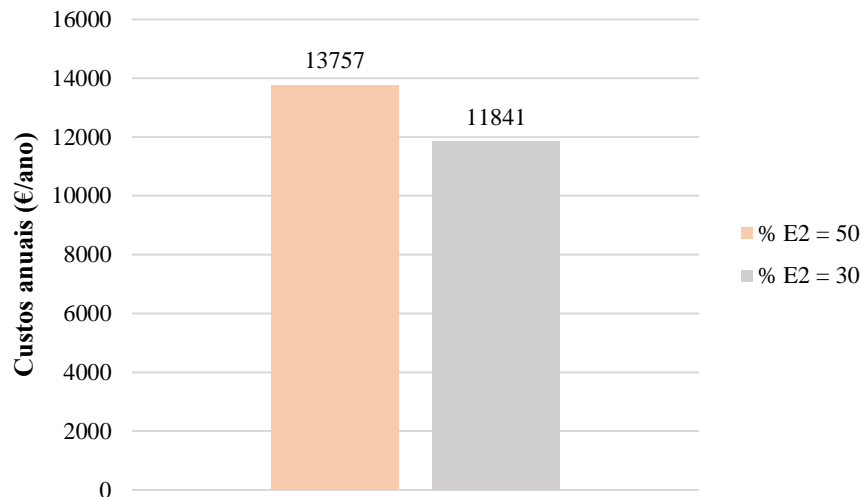


Figura 5.21 - Custos anuais para diferentes percentagens do ar de exaustão na estufa 2, para o artigo N1, a 65 % de exaustão na estufa 1.

Para analisar a influência da percentagem do ar de exaustão na estufa 1 fixou-se a percentagem do ar de exaustão da estufa 2 em 45 %.

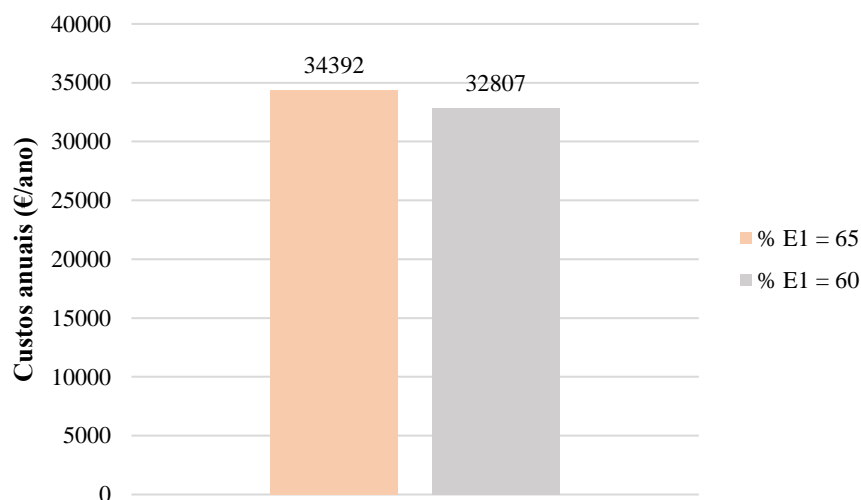


Figura 5.22 - Custos anuais para diferentes percentagens do ar de exaustão da estufa 1, para o artigo N2, a 45 % de exaustão na estufa 2.

Para o artigo N1 o facto de se diminuir a percentagem do ar de exaustão da estufa 2 de 50 % para 30 % poderá permitir uma poupança anual de 1916 €, que representa uma diminuição de 13,9 % dos custos de gás natural.

No artigo N2 poderá ser possível uma poupança de 1585 €/ano, correspondente a 4,6 % dos custos, pelo facto de se utilizar 60 % de exaustão na primeira estufa em vez de 65 %.

Sistema EcoVac

Para além da análise dos parâmetros mencionados, foi realizado um estudo ao sistema EcoVac instalado na estufa 2 desta máquina. Este sistema tem como principal função ajustar a percentagem do ar de exaustão na estufa relativamente às condições de pressão atmosférica local. Assim, para um valor de pressão diferencial fixado (valor de *set-point*) avaliou-se a alteração automática da percentagem do ar de exaustão em função da pressão atmosférica, através da Figura 5.23.

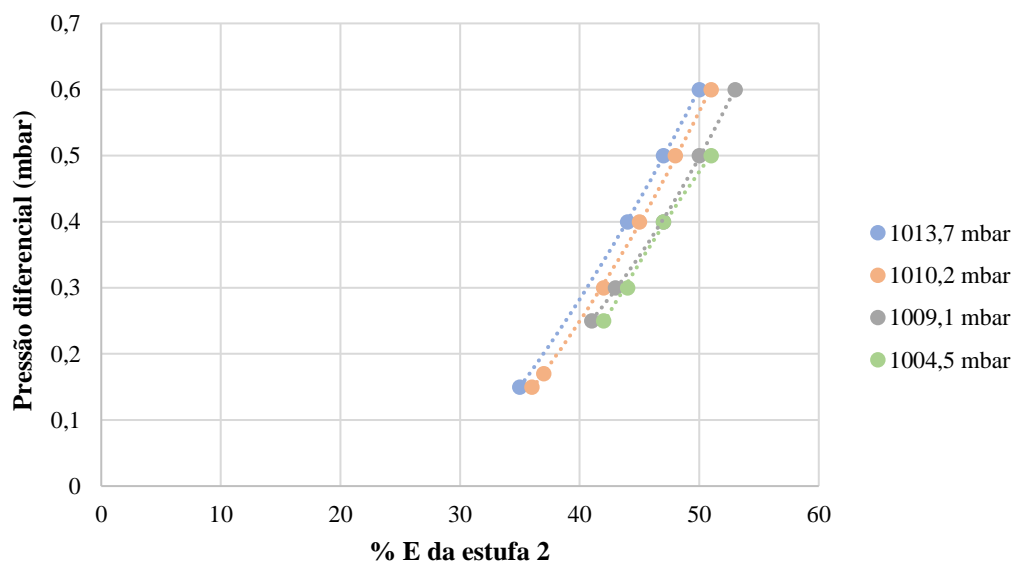


Figura 5.23 - Influência da pressão diferencial na percentagem do ar de exaustão da estufa 2.

De acordo com a Figura 5.23 verificou-se que para uma dada pressão diferencial (EcoVac), com o aumento da pressão atmosférica, a percentagem do ar de exaustão (regulada automaticamente) é menor, permitindo, assim, a poupança de gás natural.

Por outro lado, para a mesma pressão atmosférica, quanto mais elevada for a percentagem do ar de exaustão maior será a pressão diferencial, pois uma maior percentagem do ar de exaustão leva a uma diminuição da pressão no interior da estufa, ou seja, a um aumento da pressão diferencial.

6. Resultados da *Single-End 1* – Análise energética

A elaboração de balanços de massa e de energia à máquina a analisar tem como objetivo determinar a quantidade de energia consumida pela mesma, com a oportunidade de se proceder à sua regulação, controlo e manutenção mais adequada. De outro modo, possibilita-se a implementação de sistemas de recuperação de energia com vista a minimizar os consumos de energia associados. O facto de se proceder a determinadas medições permite conhecer grandezas que traduzirão a eficácia com que se utiliza energia e as perdas térmicas verificadas no sistema [13].

De modo a quantificar as correntes de entrada e saída do sistema em estudo foram realizados balanços de massa e de energia, sendo que como correntes de entrada tem-se a corda em verde, solução de impregnação (onde a corda é mergulhada), gás natural que atua como combustível, ar fresco e ar de combustão. Após secagem e termofixação, nas respetivas estufas, as correntes de saída são os gases de exaustão e corda impregnada, sendo que existem perdas de calor para o exterior, resultantes do processo em questão. Nesse seguimento, na Figura 6.1 apresenta-se um esquema representativo do sistema a estudar, sendo que, como a chaminé dos gases de exaustão é comum às 4 estufas, considerou-se que a fronteira do sistema engloba as 4 estufas.

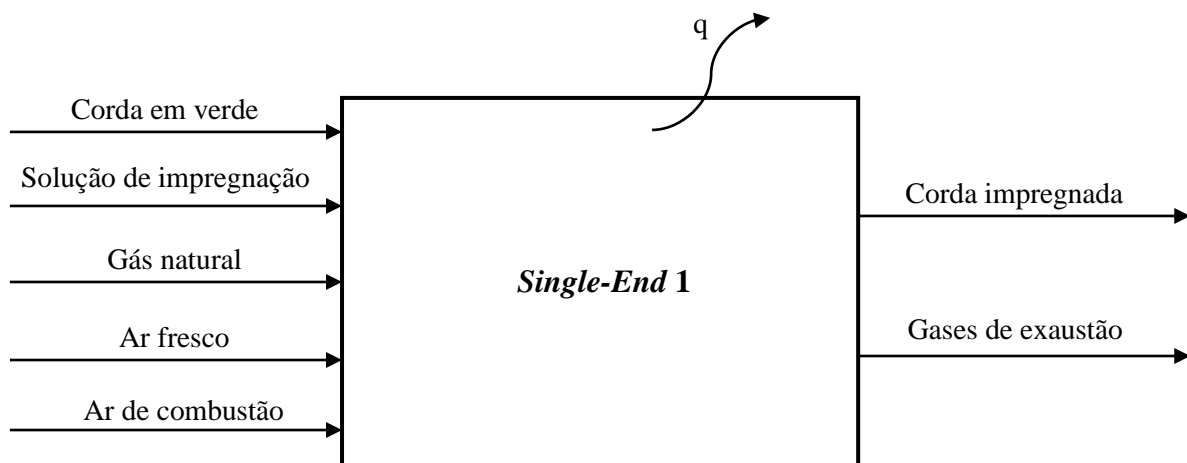


Figura 6.1 - Esquema representativo do sistema em estudo.

Como já referido, na *Single-End 1*, são tratados os artigos N0, H1 e H2. Foi acompanhado o ciclo de produção dos vários artigos, mas os resultados apresentados dizem respeito ao artigo N0 porque é o artigo mais produzido, atualmente, na *Single-End 1*.

Para o artigo N0 as condições de exaustão correspondem a:

- % E1 = 50;
- % E2 = 49;
- % E3 = 47;
- % E4 = 47.

O balanço global de energia para um sistema aberto, em que se considera a energia cinética e potencial desprezáveis, é dado pela Equação 6.1 [15]:

$$q + W + \sum H_{entrada} - \sum H_{saída} = \Delta U_{sistema} \quad \text{(Equação 6.1)}$$

Em que:

q – Calor que atravessa a fronteira do sistema, em W;

W – Potência térmica fornecida ao sistema, em W;

$\sum H_{entrada}$ – Entalpia associada às correntes de entrada do sistema, em W;

$\sum H_{saída}$ – Entalpia associada às correntes de saída do sistema, em W;

$\Delta U_{sistema}$ – Variação da energia interna do sistema por unidade de tempo, em W.

Para a realização deste balanço considerou-se, como pressuposto, o facto do sistema se encontrar em estado estacionário, ou seja, não ocorre variação da energia interna ($\Delta U_{sistema} = 0$) e o trabalho mecânico é nulo. É de referir que, no balanço descrito pela Equação 6.1, o termo correspondente à entalpia das correntes de saída tem de incluir o calor de reação, dado que existe a queima de gás natural. Desta forma, o balanço global de energia encontra-se apresentado na Equação 6.2:

$$q = \sum H_{saída} + \Delta H_{298}^0 - \sum H_{entrada} \quad \text{(Equação 6.2)}$$

Onde:

ΔH_{298}^0 – Calor padrão de reação a 25 °C, em W.

De encontro ao propósito de determinar a entalpia das correntes de entrada e saída utilizou-se a expressão presente na Equação 6.3 [15]:

$$H = \dot{m} \times \int_{T_{ref}}^T cp \times dT \quad \text{(Equação 6.3)}$$

Em que:

H – Entalpia da corrente, em W;

\dot{m} – Caudal mássico da corrente, em kg/s;

T_{ref} – Temperatura de referência, em K;

T – Temperatura da corrente, em K;

cp – Calor específico a pressão constante da corrente, em J/(kg.K).

Na realização dos balanços de energia da *Single-End 1*, nas condições atuais praticadas pela empresa, considerou-se como estado de referência água líquida a 25 °C e ar seco a 25 °C.

Para cada corrente do sistema em estudo foi fundamental efetuar medições de velocidades de escoamento e temperaturas que permitissem calcular o caudal mássico e a quantidade energética associada a cada corrente, sendo que se teve por base os cálculos que se encontram no Anexo B.

6.1. Correntes de entrada

Corda em verde:

Para se determinar o caudal mássico da corda em verde alimentada à máquina é necessário ter em consideração a velocidade a que é introduzida na máquina, o seu comprimento, massa e o número de cordas a tratar, de acordo com a Equação 6.4:

$$\dot{m}_{corda\ em\ verde} = \frac{v_{impregna\c{a}o} \times n^{\circ}\ cordas \times m_{corda\ em\ verde}}{c_{corda}} \quad \text{(Equa\c{c}o\ 6.4)}$$

Em que:

$\dot{m}_{corda\ em\ verde}$ – Caudal mássico da corda em verde, em kg/s;

$v_{impregna\c{c}o}$ – Velocidade de impregna\c{c}o da corda, em m/s;

$m_{corda\ em\ verde}$ – Massa da corda em verde, em kg;

c_{corda} – Comprimento da corda, em m.

Através da equação apresentada calculou-se o respetivo caudal mássico, sendo o seu valor apresentado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Valores usados na determinação do caudal mássico da corda em verde.

$v_{impregnação}$ (m/min)	c_{corda} (m)	$m_{corda\ em\ verde}$ (kg)	$n^{\circ}\ cordas$	$\dot{m}_{corda\ em\ verde}$ (kg/s)
250	30000	8,88	103	0,127

De outro modo, para obter a energia transportada pela corda é fundamental referir que o seu calor específico corresponde ao calor específico do nylon [16]. Na Tabela 6.2 encontra-se o valor da entalpia da corrente em questão, bem como os dados que permitiram o seu cálculo, através da Equação 6.3.

Tabela 6.2 - Valores usados na determinação da entalpia da corda em verde.

$\dot{m}_{corda\ em\ verde}$ (kg/s)	$c_{p\ corda\ em\ verde}$ (kJ/(kg.K))	$T_{corda\ em\ verde}$ (°C)	$T_{referência}$ (°C)	$H_{corda\ em\ verde}$ (kW)
0,127	1,70	27,3	25,0	0,497

Solução de impregnação:

O caudal mássico desta corrente foi determinado através de valores retirados de um contador de massa de solução, durante um intervalo de tempo, para um dado número de cordas. Para as 103 cordas obteve-se o valor 2,39 kg/min.

Com o intuito de se determinar o calor específico da solução de impregnação teve-se em consideração a percentagem mássica dos diferentes compostos que a constituem, presente no Anexo B, e a temperatura da solução foi medida com um termómetro no banho de solução, sendo que estes valores possibilitaram o cálculo da entalpia da solução de impregnação e encontram-se presentes na Tabela 6.3 [17,18].

Tabela 6.3 - Valores usados na determinação da entalpia da solução de impregnação.

$\dot{m}_{solução}$ (kg/s)	$c_{p\ solução}$ (kJ/(kg.K))	$T_{solução}$ (°C)	$T_{referência}$ (°C)	$H_{solução}$ (kW)
0,0400	3,28	26,4	25,0	0,183

Gás natural:

Foram realizadas leituras do consumo de gás natural durante um determinado intervalo de tempo. Como já referido, nos cálculos do consumo de gás natural é necessário considerar o fator de correção, como representado na Equação 6.5:

$$\dot{m}_{gás\ natural} = \dot{V}_{gás\ natural} \times \rho_{gás\ natural} \times f_c \quad \text{(Equação 6.5)}$$

Onde:

$\dot{m}_{gás\ natural}$ – Caudal mássico de gás natural, em kg/s;

$\dot{V}_{gás\ natural}$ – Caudal volumétrico de gás natural, nas condições PTN, em m³/s;

$\rho_{gás\ natural}$ – Massa volúmica do gás natural, nas condições PTN, em kg/m³;

f_c – Fator de correção.

Nas Tabelas 6.4 e 6.5 encontram-se os valores obtidos para o caudal mássico e a entalpia do gás natural, respetivamente. O calor específico foi calculado com base na composição mássica dos diferentes elementos que o gás natural apresenta na sua constituição, como apresentado no Anexo B [15,19].

Tabela 6.4 - Valores usados na determinação do caudal mássico do gás natural.

$\dot{V}_{gás\ natural}$ (m ³ /s)	$\rho_{gás\ natural}$ (kg/m ³)	f_c	$\dot{m}_{gás\ natural}$ (kg/s)
$9,26 \times 10^{-3}$	0,8141	1,8854	0,0142

Tabela 6.5 - Valores usados na determinação da entalpia do gás natural.

$\dot{m}_{gás\ natural}$ (kg/s)	$c_{p\ gás\ natural}$ (kJ/(kg.K))	$T_{gás\ natural}$ (°C)	$T_{referência}$ (°C)	$H_{gás\ natural}$ (kW)
0,0142	2,07	23,74	25,0	-0,0371

O aquecimento das estufas é conseguido através da queima do gás natural, sendo o calor envolvido na reação dado pela Equação 6.6:

$$\Delta H_{298}^0 = \dot{V}_{gás\ natural} \times PCS \times f_c \quad \text{(Equação 6.6)}$$

Em que:

PCS – Poder calorífico superior, nas condições PTN, em kWh/m³ – 11,76 kWh/m³ [19].

No cálculo do calor de reação utilizou-se o PCS, uma vez que se considerou que o estado de referência é água que se encontra no estado líquido. Deste modo, obteve-se um valor para o calor de reação de 739,27 kW.

$\dot{m}_{ar\ de\ combust\tilde{a}o\ seco}$ – Caudal mássico do ar de combustão seco, em kg/s;

$\Delta H_{vaporiza\tilde{c}ao}$ – Entalpia de vaporização da água, em J/kg;

Y_e – Humidade específica do ar de combustão;

$T_{ar\ de\ combust\tilde{a}o}$ – Temperatura do ar de combustão, em K.

O caudal mássico de ar de combustão seco determinou-se através da Equação 6.9:

$$\dot{m}_{ar\ combust\tilde{a}o\ h\acute{u}mido} = (1 + Y_{e,ar\ de\ combust\tilde{a}o}) \times \dot{m}_{ar\ combust\tilde{a}o\ seco} \quad \text{(Equação 6.9)}$$

Sendo a humidade específica dada pela Equação 6.10:

$$Y_{e,ar\ de\ combust\tilde{a}o} = \frac{p_v}{P - p_v} \times \frac{M_{\acute{a}gua}}{M_{ar}} \quad \text{(Equação 6.10)}$$

Onde:

p_v – Pressão de vapor de água, em Pa;

P – Pressão ambiente, em Pa;

$M_{\acute{a}gua}$ – Massa molar da água, em kg/kmol;

M_{ar} – Massa molar do ar, em kg/kmol.

A pressão de vapor de água foi obtida através da Equação 6.11, sendo que com um higrómetro se obteve a humidade relativa:

$$p_v = \frac{\% Y_r}{100} \times p_{satura\tilde{c}ao} \quad \text{(Equação 6.11)}$$

Em que:

Y_r – Humidade relativa do ar de combustão;

$p_{satura\tilde{c}ao}$ – Pressão de saturação, em Pa.

Assim, a entalpia desta corrente apresenta um valor de 17,44 kW.

Ar fresco:

Uma vez que houve muita dificuldade em realizar medições das velocidades de ar fresco que entram pelas aberturas de entrada e saída das cordas, a determinação do caudal mássico

desta corrente teve por base a diferença entre os caudais mássicos de todas as correntes de saída e de entrada, obtendo-se o valor de 3,41 kg/s, como apresentado no Anexo B.

Relativamente à entalpia desta corrente, recorreu-se às equações 6.8 a 6.11, considerando a humidade desta corrente igual à do ar de combustão e obteve-se o valor de 106,76 kW.

6.2. Correntes de saída

Corda impregnada:

A determinação do caudal mássico da corda impregnada foi similar ao da corda em verde (Equação 6.4), obtendo-se um valor de 0,129 kg/s, sendo que entre a corda em verde e impregnada apenas varia o decitex e, conseqüentemente, a massa da bobine.

No cálculo da entalpia desta corrente considerou-se que a temperatura da corda corresponde à temperatura da última estufa pela qual passa (estufa 4) e o seu calor específico foi considerado igual ao da corda em verde, sendo que na Tabela 6.7 apresentam-se os valores que permitiram o cálculo da entalpia da corda impregnada de acordo com a Equação 6.3.

Tabela 6.7 - Valores usados na determinação da entalpia da corda impregnada.

$\dot{m}_{corda\ impregnada}$ (kg/s)	$c_{p\ corda\ impregnada}$ (kJ/(kg.K))	$T_{corda\ impregnada}$ (°C)	$T_{referência}$ (°C)	$H_{corda\ impregnada}$ (kW)
0,129	1,70	245,0	25,0	48,31

Gases de exaustão:

O caudal mássico dos gases de exaustão foi determinado usando um tubo de *Pitot* ligado a um transdutor de pressão diferencial. A partir do valor de pressão diferencial indicado para cada posição do tubo de *Pitot* determinou-se a velocidade correspondente a essa linha de corrente, presente na Tabela B.5 do Anexo B, usando a Equação 6.12 [15]:

$$v_{gases\ de\ exaustão} = \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho_{gases\ de\ exaustão}}} \quad \text{(Equação 6.12)}$$

Em que:

$v_{gases\ de\ exaustão}$ – Velocidade pontual dos gases de exaustão, em m/s;

ΔP – Pressão diferencial, em Pa;

$\rho_{gases\ de\ exaustão}$ – Massa volúmica dos gases de exaustão, em kg/m³.

Foi também lida a temperatura desta corrente, usando uma sonda de temperatura, e, assim, na Tabela 6.8 encontra-se o valor médio da velocidade dos gases quentes, na conduta de exaustão, e os restantes dados que permitiram obter o caudal mássico.

Tabela 6.8 - Valores usados na determinação do caudal mássico dos gases de exaustão.

$\bar{v}_{\text{gases de exaustão}}$ (m/s)	$T_{\text{gases de exaustão}}$ (°C)	$\rho_{\text{gases de exaustão}}$ (kg/m ³)	$A_{\text{chaminé}}$ (m ²)	$\dot{m}_{\text{gases de exaustão húmido}}$ (kg/s)
9,69	153,5	0,826	0,503	4,02

Na determinação da humidade desta corrente foi necessário realizar um balanço de massa à água, sendo o valor obtido de 0,0241 kg água/kg gases secos. O vapor de água desta corrente é proveniente da:

- Humidade do ar à entrada;
- Água formada na combustão;
- Água evaporada no processo de secagem.

Após os cálculos fundamentais através das Equações 6.8 a 6.11, a entalpia obtida foi de 759,64 kW, como demonstrado no Anexo B.

Apesar de se ter calculado o caudal mássico desta corrente à custa de valores experimentais, este pode ser comparado com o previsto teoricamente. Esta comparação é importante para poder avaliar a capacidade de exaustão da chaminé comum, de acordo com a Figura 6.2.

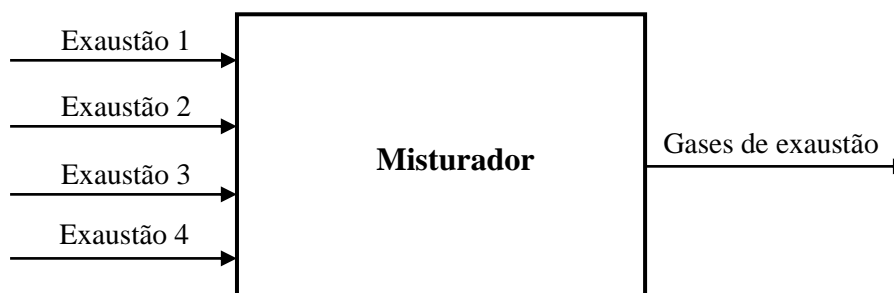


Figura 6.2 - Esquema representativo do misturador de gases quentes.

Através de um balanço de energia ao ponto de mistura das 4 condutas de exaustão e à custa da percentagem do ar de exaustão de cada estufa e da respetiva temperatura é possível estimar

o caudal teórico de gases de exaustão na chaminé e a sua temperatura, como representado no Anexo B. Os valores experimentais e teóricos obtidos são representados na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 - Valores experimentais e teóricos obtidos para a corrente de gases de exaustão.

Estufas	% E	T_{estufa} (°C)	$\rho_{gases\ na\ estufa}$ (kg/m ³)	$\dot{m}_{teórico}$ (kg/s)	$\dot{m}_{experimental}$ (kg/s)	$T_{teórica}$ (°C)	$T_{experimental}$ (°C)
1	50	155	0,823	5,80	4,02	208,4	153,5
2	49	240	0,687				
3	47	240	0,687				
4	47	245	0,680				

De acordo com os valores obtidos verificou-se que a área da chaminé, que corresponde a um diâmetro interno de 800 mm, não é suficiente para garantir a exaustão completa. A chaminé encontra-se, por isso, subdimensionada, pelo que se calculou o diâmetro necessário para garantir uma boa exaustão dos gases quentes. O valor obtido foi de 1000 mm, correspondendo a um aumento do diâmetro de 25 %.

6.3. Balanço de energia e perdas térmicas

Com o intuito de se quantificar as perdas térmicas do sistema em estudo procedeu-se à elaboração da Tabela 6.10, onde constam as entalpias de cada corrente, bem como as entalpias totais de entradas e saídas.

Tabela 6.10 - Valores das entalpias das correntes e entalpias totais das entradas e saídas.

Entrada	$H_{entrada}$ (kW)	Saída	$H_{saída}$ (kW)	ΔH_{298}^0 (kW)
Corda em verde	0,497	Corda impregnada	48,31	-739,27
Solução de impregnação	0,183	Gases de exaustão	759,64	
Gás natural	-0,0371	—	—	
Ar fresco	106,76	—	—	
Ar de combustão	17,44	—	—	
Total	124,84	Total	807,95	

De acordo com a Tabela 6.10 e tendo em atenção o balanço de energia definido pela Equação 6.2, verificou-se que as perdas térmicas são de 56,2 kW.

A entalpias das correntes de entrada, correntes de saída, calor de reação e perdas térmicas do sistema encontram-se representadas na Figura 6.3.

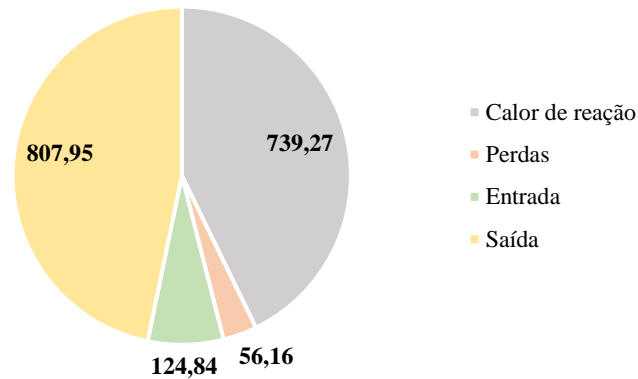


Figura 6.3 - Entalpias das correntes do sistema em estudo.

Pela análise da Figura 6.3 observou-se que a parcela correspondente à potência térmica das correntes de saída é muito elevada. Isto sugere a importância do aproveitamento energético da corrente dos gases de exaustão como medida racional de otimização energética no processo.

As perdas térmicas do sistema são devidas, maioritariamente, às perdas de calor por convecção e radiação das paredes das estufas e condutas dos ventiladores, sendo que estas podem ser quantificadas empiricamente e, posteriormente, comparadas com as perdas de calor determinadas pelos balanços de energia.

A transferência de calor por convecção natural é dada pela Equação 6.13 [15]:

$$q_{convecção} = h \times A \times (T_p - T_{\infty}) \quad \text{(Equação 6.13)}$$

Onde:

$q_{convecção}$ – Transferência de calor por convecção natural, em W;

h – Coeficiente pelicular de transferência de calor por convecção natural, em W/(m².K);

A – Área de transferência de calor, em m²;

T_p – Temperatura da parede exterior da estufa, em K;

T_{∞} – Temperatura do meio envolvente, em K.

Para determinar o coeficiente pelicular de transferência de calor por convecção natural foi necessário determinar o número de Prandtl e o número de Grashof, de acordo com as Equações 6.14 e 6.15 [15]:

$$Pr = \frac{cp \times \mu}{k} \quad \text{(Equação 6.14)}$$

$$Gr = \frac{L^3 \times \rho^2 \times g \times \beta \times \Delta T}{\mu^2} \quad \text{(Equação 6.15)}$$

No qual:

Pr – Número de Prandtl;

cp – Calor específico à temperatura média do filme, em J/(kg.K);

μ – Viscosidade à temperatura média do filme, em kg/(m.s);

k – Condutividade térmica à temperatura média do filme, em W/(m.K);

Gr – Número de Grashof;

L – Dimensão característica, em m;

ρ – Massa volúmica à temperatura média do filme, em kg/m³;

g – Aceleração gravítica, em m/s²;

β – Coeficiente de expansão volumétrica à temperatura média do filme, em 1/K;

ΔT – Diferença positiva de temperaturas entre o fluido e a parede, em K.

De acordo com o produto entre o número de Prandtl e Grashof determinou-se o coeficiente pelicular de transferência de calor por convecção natural através de correlações empíricas [15].

A transferência de calor por radiação foi determinada pela Equação 6.16 [15]:

$$q_{\text{radiação}} = \varepsilon \times \sigma \times A \times (T_p^4 - T_{\text{vizinhança}}^4) \quad \text{(Equação 6.16)}$$

Em que:

$q_{radiação}$ – Transferência de calor por radiação, em W;

ε – Emissividade da parede de chapa de aço;

σ – Constante de Stefan-Boltzmann, em $W/(m^2 \cdot K^4)$;

$T_{vizinhança}$ – Temperatura da vizinhança, em K.

Para a determinação empírica das perdas térmicas selecionaram-se diferentes áreas e efetuaram-se leituras das temperaturas, com auxílio de um termómetro de contacto. As áreas selecionadas incluem as paredes laterais direita e esquerda, parede frontal, posterior e superior da máquina, tubos que transferem ar quente de uma zona para outra e umas chapas presentes nas condutas dos ventiladores, sendo que o tubo e as chapas não se encontram isoladas. Uma vez que as condutas dos ventiladores se encontram a uma temperatura próxima da temperatura ambiente desprezaram-se aí as perdas térmicas. Devido à impossibilidade de realizar leituras na parte superior da máquina assumiu-se que a temperatura nessa superfície seria a média das temperaturas das faces laterais que a envolvem.

As leituras foram realizadas apenas para a estufa 4 e assumiu-se que as perdas térmicas calculadas seriam iguais nas restantes estufas, sendo os resultados obtidos apresentados no Anexo B, Tabelas B.6 a B.10. Os calores transferidos por convecção e radiação nas 4 estufas são representados na Tabela 6.11.

Tabela 6.11 - Valores das perdas de calor por convecção e radiação nas 4 estufas da *Single-End 1*.

Paredes	$q_{convecção}$ (kW)	$q_{radiação}$ (kW)
Frontal	4,65	8,87
Lateral direita	8,45	11,06
Posterior	5,82	10,26
Lateral esquerda	4,22	5,93
Superior	2,39	3,69
Total	25,53	39,81
Total	65,3	

Concluiu-se, então, que as perdas térmicas por convecção e por radiação apresentam o valor de 65,3 kW, sendo da mesma ordem de grandeza do valor obtido pelo balanço de energia (56,2 kW).

Neste levantamento energético experimental observou-se que existem zonas que não se encontram isoladas e, por isso, apresentam uma temperatura elevada. Como medida de otimização energética devia proceder-se ao isolamento dessas zonas com o intuito de se minimizar as perdas térmicas e, assim, diminuir os consumos de gás natural.

7. Medidas de otimização energética na *Single-End 1*

O principal objetivo desta dissertação foi identificar e propor possíveis medidas de otimização energética na máquina *Single-End 1*, com o intuito de reduzir o consumo de energia da empresa. Assim sendo, nesta secção abordam-se algumas propostas de racionalização de energia:

- Isolamento de zonas da máquina;
- Redução da temperatura das estufas no tempo de paragem;
- Instalação do sistema EcoVac;
- Aproveitamento energético da corrente dos gases de exaustão;
- Iluminação da máquina.

Por fim, avaliam-se as poupanças que estas medidas poderão possibilitar, apresentando-se os respetivos cálculos no Anexo C.

7.1. Isolamento da máquina

Após a determinação das perdas térmicas por convecção e radiação, no capítulo anterior, selecionaram-se as zonas da *Single-End 1* que deveriam ser isoladas devido à sua elevada temperatura. A elevada temperatura, proveniente da falta de isolamento, pode ser prejudicial a nível de segurança para os colaboradores e contribui para perdas energéticas desnecessárias. Assim sendo, e de acordo com as Tabelas B.6 a B.10 presentes no Anexo B, as áreas que devem ser isoladas são:

- Paredes correspondentes às portas das estufas (A8 a A11 e A8' a A11') em que a temperatura varia entre 71,2 °C e 101,9 °C;
- Chapas presentes nas condutas dos ventiladores (A15) que se encontram a uma temperatura de 115,3 °C;
- Tubos (A13) a uma temperatura de 117,3 °C.

Assim, na Tabela 7.1 encontram-se os valores das perdas térmicas por convecção e radiação, das zonas que devem ser isoladas.

Tabela 7.1 - Valores das perdas térmicas por convecção e radiação das zonas a isolar.

Zonas	A (m ²)	T _p (°C)	q _{convecção} (kW)	q _{radiação} (kW)
A8	2,69	101,9	1,22	1,47
A9	1,81	71,2	0,32	0,49
A10	1,81	76,6	0,38	0,57
A11	2,69	99,5	1,17	1,40
A13	7,19	117,3	4,24	5,13
A15	2,22	115,3	1,27	1,53
A8'	2,69	101,9	1,22	1,47
A9'	1,81	71,2	0,32	0,49
A10'	1,81	76,6	0,38	0,57
A11'	2,69	99,5	1,17	1,40
Total			11,69	14,52
Total			26,2	

O facto de se proceder ao isolamento destas zonas, assumindo que a sua eficiência é de 100 %, e sabendo que as horas de funcionamento anuais da máquina são 7852 horas, poderá permitir uma poupança máxima de gás natural de 4758 €/ano, de acordo com os cálculos apresentados no Anexo C, secção C.1.

7.2. Redução da temperatura das estufas no tempo de paragem

Como referido anteriormente na *Single-End* 1 operam maioritariamente 3 artigos, sendo que a produção dos artigos N0, H1 e H2 para 2021, obtida por extrapolação das produções efetuadas entre 1 de janeiro e 31 de maio do presente ano, apresenta os valores de 1016253 kg, 140222 kg e 658621 kg, respetivamente. Uma vez que a produção de H1 é muito inferior à dos restantes artigos, neste subcapítulo de otimização energética optou-se por analisar apenas os artigos N0 e H2.

7.2.1. Influência do tempo de paragem

Para estudar a influência deste parâmetro apresenta-se nas Figuras 7.1 e 7.2 a variação do consumo específico de gás natural em função do tempo de paragem para os artigos N0 e H2,

respetivamente. Os valores apresentados encontram-se nas Tabelas C.1 e C.2, do Anexo C, secção C.2, e correspondem aos resultados obtidos para vários ciclos de produção.

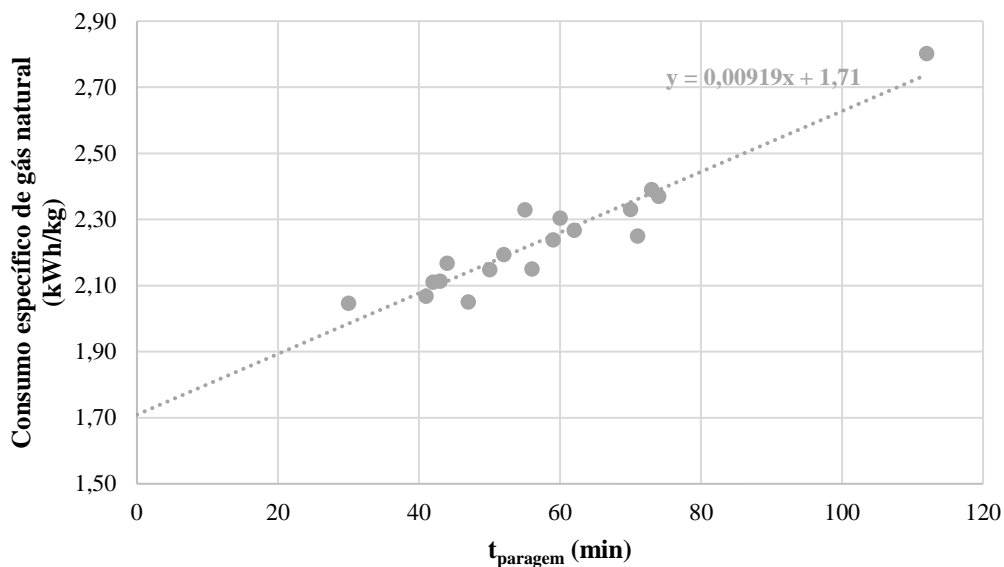


Figura 7.1 - Consumo específico de gás natural em função do tempo de paragem, para o artigo N0.

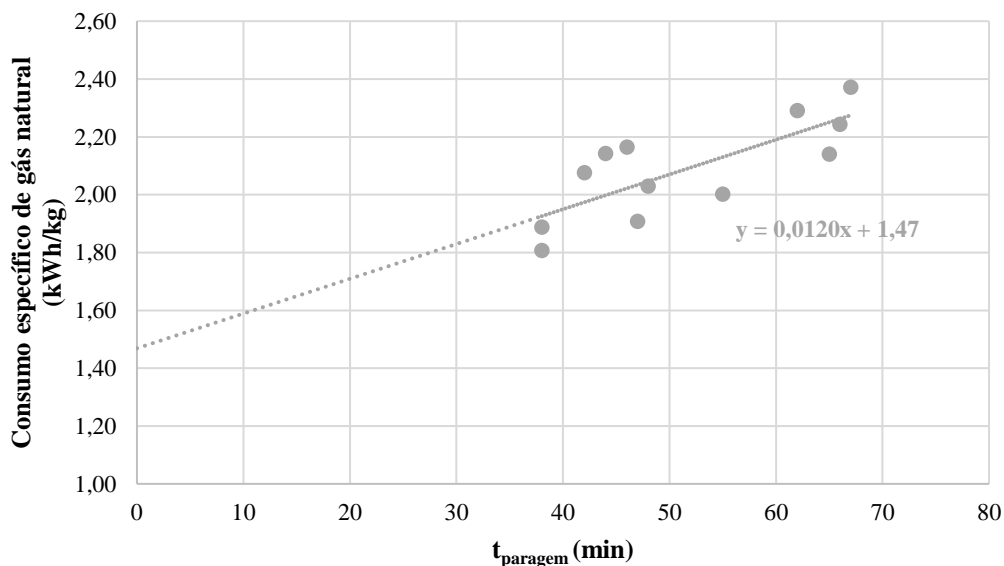


Figura 7.2 - Consumo específico de gás natural em função do tempo de paragem, para o artigo H2.

Através das Figuras 7.1 e 7.2 verificou-se que o tempo de paragem influencia significativamente os consumos específicos de gás natural, como já concluído na análise da máquina *Single-End 2*.

Observou-se que em ambos os artigos o tempo de paragem varia, maioritariamente, entre os 40 e 70 minutos. Estes tempos são elevados, uma vez que em todos os tempos de paragem

entre jogos, é necessário realizar o processo de pistolagem que só pode ser efetuado após paragem da máquina.

Nas Figuras 7.1 e 7.2 procedeu-se às extrapolações das retas de tendência para $t = 0$ com o intuito de se analisar o consumo mínimo correspondente a um ciclo de produção sem tempo de paragem. No caso do artigo N0 o valor obtido foi de 1,71 kWh/kg e para o artigo H2 o valor obtido foi de 1,47 kWh/kg.

A partir das Figuras 7.3 e 7.4, para os artigos N0 e H2, respetivamente, avaliou-se o custo mínimo de produção, caso não houvesse tempo de paragem entre jogos e também o custo associado a tempos de paragem máximos e mínimos, com o objetivo de se determinar as poupanças anuais de gás natural. Esta avaliação foi feita para igual número de cordas e igual percentagem do ar de exaustão.

Relativamente ao artigo N0, uma vez que o tempo de paragem de 112 minutos é uma exceção, não se determinou as poupanças referentes a esse valor.

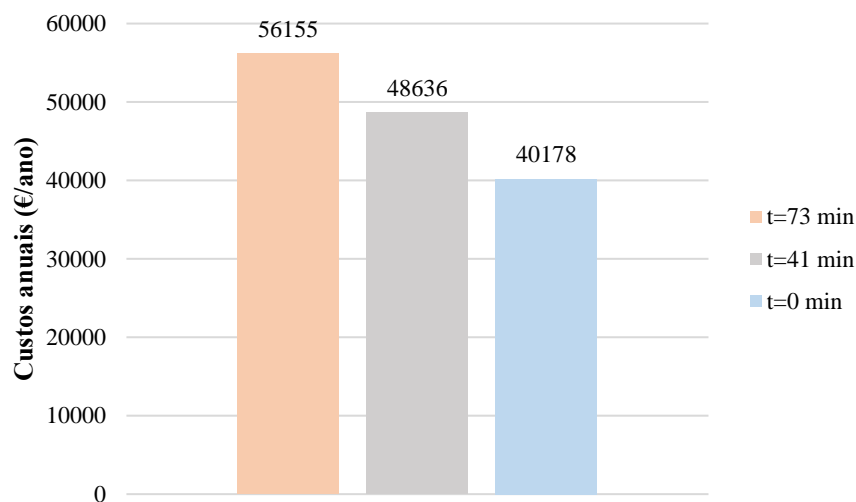


Figura 7.3 - Custos anuais para diferentes tempos de paragem, para o artigo N0.

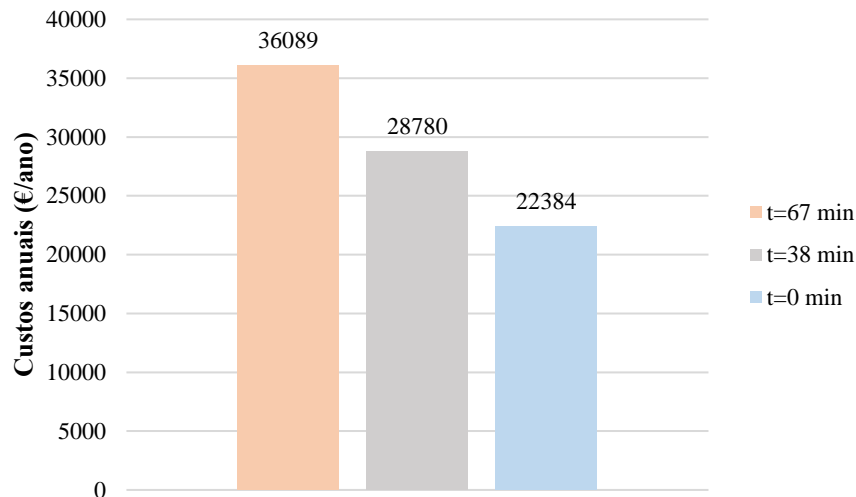


Figura 7.4 - Custos anuais para diferentes tempos de paragem, para o artigo H2.

Através dos dados apresentados concluiu-se que, para o artigo N0, quando o tempo de paragem é de 41 minutos, poderá ser possível uma poupança de 7519 €/ano, relativamente a um tempo de paragem de 73 minutos, que traduz uma poupança de custos de 13,4 %.

No artigo H2 a poupança anual de um tempo de paragem de 38 minutos, comparativamente a 67 minutos, poderá resultar em 7309 €, correspondente a uma poupança de 20,3 %.

7.2.2. Avaliação da temperatura de *set-point*

Arranque da máquina:

A máquina em estudo funciona 24 horas por dia e apenas se desligam os queimadores quando são realizadas manutenções e limpezas da mesma. No fim de uma dessas manutenções foram realizadas leituras do tempo que cada estufa demora a atingir diferentes temperaturas, sendo os resultados destas medições apresentados na Figura 7.5. Os valores experimentais recolhidos encontram-se no Anexo C, secção C.2.

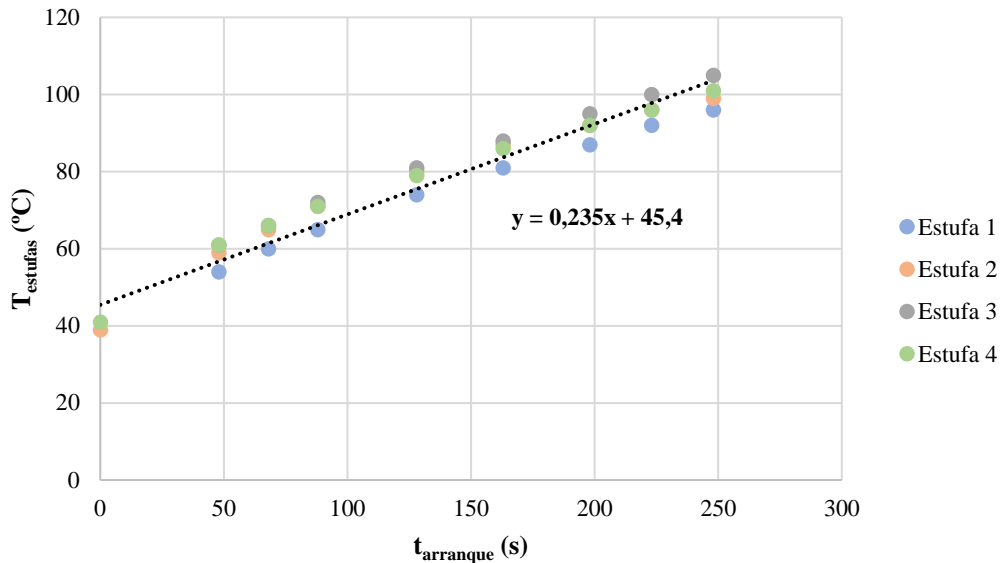


Figura 7.5 - Temperatura atingida pelas estufas em função do tempo, no arranque.

Pelos dados apresentados na Figura 7.5 verificou-se que as estufas apresentam comportamento semelhante e demoram 248 segundos (aproximadamente 4 minutos) para aumentarem a sua temperatura cerca de 60 °C, a partir da temperatura ambiente.

De modo a encontrar um modelo que traduzisse o tempo de aquecimento das estufas, realizou-se um balanço de energia em estado não estacionário às mesmas. Para as estufas alcançarem a temperatura desejada é necessário o aquecimento quer do ar fresco que entra nas estufas quer das paredes interiores da mesma (chapa de aço), como considerado na Equação 7.1:

$$q + \sum \dot{m}_{entrada} \times h_{entrada} - \Delta H_{298}^0 - \sum \dot{m}_{saída} \times h_{saída} = (m \times cv + V_{chapa\ de\ aço} \times cp_{chapa\ de\ aço} \times \rho_{chapa\ de\ aço}) \times \frac{dT}{dt}$$

(Equação 7.1)

Onde:

q – Perdas térmicas, em W;

m – Massa dos gases no interior da estufa, em kg;

cv – Calor específico a volume constante dos gases, em J/(kg.K);

t – Tempo, em s;

$V_{chapa\ de\ aço}$ – Volume da chapa de aço, em m³;

$cp_{chapa\ de\ aço}$ – Calor específico da chapa de aço, em J/(kg.K);

$\rho_{chapa\ de\ aço}$ – Massa volúmica da chapa de aço, em kg/m³.

Considerando:

- Perdas térmicas durante este aquecimento, a partir da temperatura ambiente, desprezáveis;
- Estado de referência 25 °C e água no estado gasoso;
- Correntes de entrada à temperatura de referência;
- Propriedades dos gases de combustão aproximadas às do ar, à temperatura média entre o estado inicial e final [15].

De acordo com estes pressupostos e rearranjando a Equação 7.1, obtém-se a Equação 7.2:

$$\left(m \times cv + V_{chapa\ de\ aço} \times cp_{chapa\ de\ aço} \times \rho_{chapa\ de\ aço}\right) \times \frac{dT}{dt} = -\left(\sum \dot{m}_{saída} \times h_{saída} + \Delta H_{298}^0\right)$$

$$\Leftrightarrow \int_0^t dt = \int_{Ti}^{Tf} \frac{\rho_{ar} \times V_{estufa} \times cv + V_{chapa\ de\ aço} \times cp_{chapa\ de\ aço} \times \rho_{chapa\ de\ aço}}{-\dot{m}_{gases\ de\ exaustão} \times cp \times (T - 25) - \dot{V}_{gás\ natural\ consumido} \times fc \times (-PCI)} \times dT$$

(Equação 7.2)

Para os dados experimentais obtidos, apresentados na Figura 7.5, as condições de operação da estufa 4 foram:

- Percentagem do ar de exaustão de 43 %;
- Caudal de gás natural consumido no aquecimento de 41 °C a 101 °C igual a 20,94 m³/h.

Para integrar a Equação 7.2 é preciso ter em consideração que o consumo de gás natural lido é apenas válido na gama de temperatura referida. Foi, então, necessário fazer a seguinte correção, dada pela Equação 7.3:

$$\dot{V}_{gás\ natural\ consumido} = \frac{\dot{V}_{gás\ natural}}{60} \times \Delta T \quad \text{(Equação 7.3)}$$

O ΔT foi considerado, para efeitos de integração, igual a $(T-25)$. Assim, o resultado obtido apresenta-se na Equação 7.4:

$$t_{\text{arranque}} = 186,1 \times \ln\left(\frac{(T_f - 25)}{(T_i - 25)}\right), \text{ válida para } 41^\circ\text{C} < T < 101^\circ\text{C}$$

(Equação 7.4)

De modo a comparar-se os valores experimentais com os obtidos pela Equação 7.4, procedeu-se à representação gráfica na Figura 7.6, sendo que se teve por base o Anexo C, secção C.2.

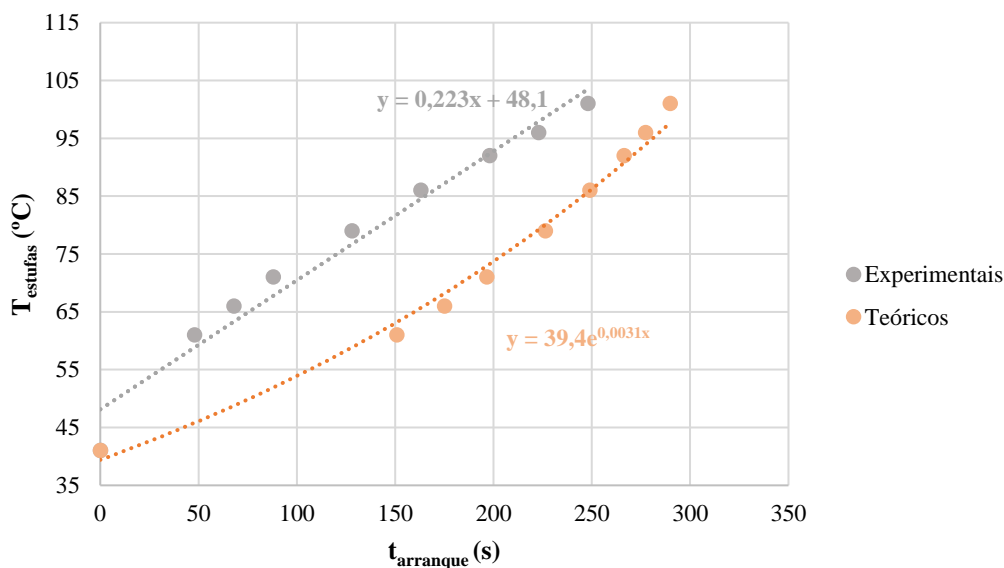


Figura 7.6 - Valores teóricos e experimentais da temperatura atingida pela estufa 4 ao longo do tempo, no arranque.

Tempo de arrefecimento:

Nos tempos de paragem, entre jogos, os operadores reduzem as temperaturas das estufas para um dado *set-point*, porém, para se otimizar o consumo específico de gás natural realizou-se um estudo que permitisse determinar qual a temperatura mais baixa que seria possível colocar no controlo das estufas, sendo importante que o posterior aquecimento se possa assegurar, de modo a não afetar a continuidade do processo.

Para isso foi registada a variação da temperatura, ao longo do tempo, das estufas 2, 3 e 4, durante o tempo de arrefecimento, como se refere na Figura 7.7. Este estudo não foi efetuado para a estufa 1, uma vez que esta estufa trabalha com uma temperatura de operação de 155°C e o valor de *set-point* não foi alterado.

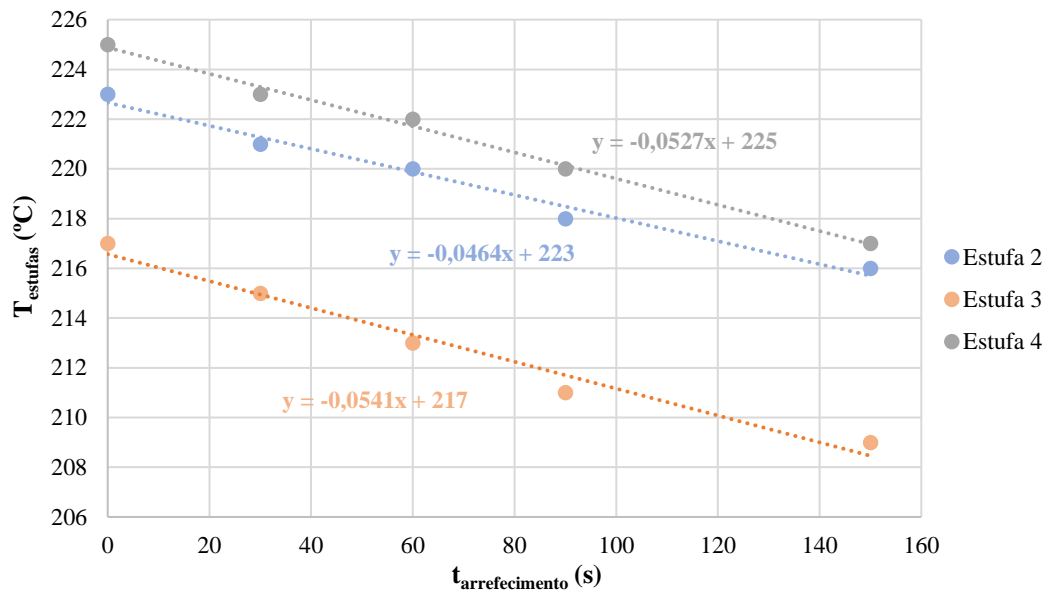


Figura 7.7 - Temperatura atingida pelas estufas em função do tempo, no tempo de arrefecimento.

Foi, também, aplicado um balanço de energia em estado não estacionário ao sistema, no tempo de arrefecimento, em que os queimadores estão desligados e onde as perdas térmicas foram consideradas as obtidas pelos balanços de energia em estado estacionário. Obteve-se, assim, a Equação 7.4:

$$q + \sum \dot{m}_{entrada} \times h_{entrada} - \sum \dot{m}_{saída} \times h_{saída} = (m \times cv + V_{chapa\ de\ aço} \times cp_{chapa\ de\ aço} \times \rho_{chapa\ de\ aço}) \times \frac{dT}{dt}$$

(Equação 7.4)

Considerando novamente que as correntes de entrada se encontram à temperatura de 25°C, tem-se a Equação 7.5:

$$(m \times cv + V_{chapa\ de\ aço} \times cp_{chapa\ de\ aço} \times \rho_{chapa\ de\ aço}) \times \frac{dT}{dt} = q - \sum \dot{m}_{saída} \times h_{saída}$$

$$\Leftrightarrow \int_0^t dt = \int_{T_i}^{T_f} \frac{\rho_{ar} \times V_{estufa} \times cv + V_{chapa\ de\ aço} \times cp_{chapa\ de\ aço} \times \rho_{chapa\ de\ aço}}{q - \dot{m}_{gases\ de\ exaustão} \times cp \times (T - 25)} \times dT$$

(Equação 7.5)

Para uma percentagem do ar de exaustão na estufa de 100 % e um fator de segurança, na determinação do tempo de arrefecimento, de 25 %, obteve-se a Equação 7.6:

$$t_{\text{arrefecimento}} = -302,1 \times \ln \left(\frac{3182 \times (T_f - 25) + 14,04 \times 10^3}{3182 \times (T_i - 25) + 14,04 \times 10^3} \right) \times 1,25$$

(Equação 7.6)

Aplicando a Equação 7.6, com um fator de segurança de 25 %, à estufa 4, determinou-se um tempo de arrefecimento de 15,1 segundos desde 225 °C até 217 °C. O valor experimental obtido foi de 150 segundos, ou seja, o arrefecimento é muito mais lento do que o previsto teoricamente. No entanto, a variação de temperatura nas estufas durante o arrefecimento foi da ordem dos 8 °C e, por isso, os erros obtidos são muito elevados. É então necessário definir, no sistema de controlo das estufas, valores de temperatura de *set-point* mais baixos e avaliar os tempos de arrefecimento, só assim se poderá aceitar ou não os valores previstos pela Equação 7.6.

Na Tabela 7.2 apresentam-se possíveis valores de temperatura de *set-point* e os respetivos tempos de arrefecimento, a partir da temperatura de operação de 245 °C.

Tabela 7.2 - Valores da temperatura de *set-point* e do tempo teórico de arrefecimento das estufas desde a temperatura de operação de 245 °C.

Estufas 2, 3 e 4						
$T_{\text{set-point}}$ (°C)	245	200	180	150	120	100
$t_{\text{arrefecimento}}$ (s)	0	85	129	208	307	392

Tempo de aquecimento:

Depois de estarem reunidas as condições necessárias para produção de novas bobines, os operadores elevam a temperatura de *set-point* para a temperatura de operação, sendo que na Figura 7.8 se apresenta o aumento da temperatura das estufas ao longo do tempo.

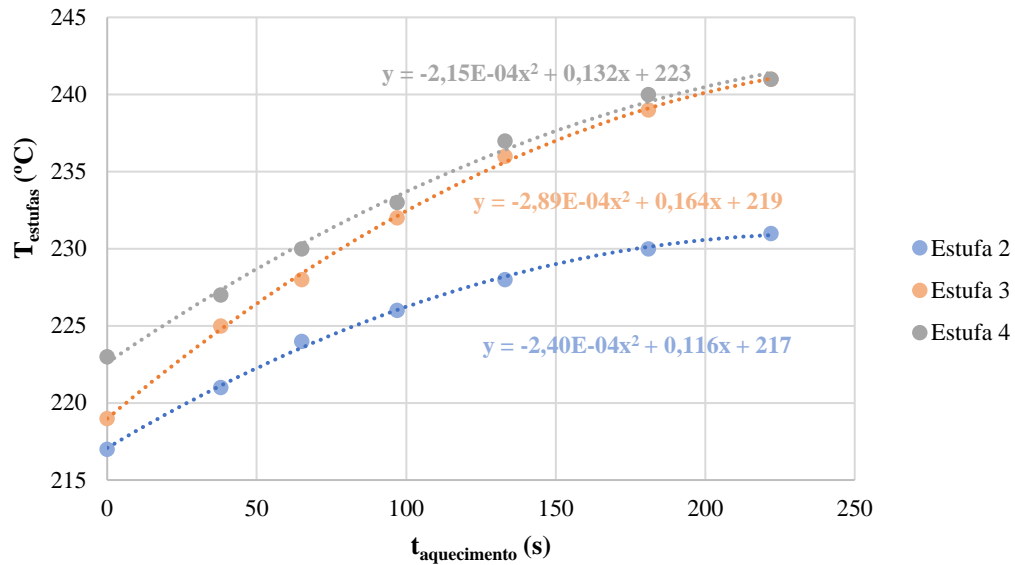


Figura 7.8 - Temperatura atingida pelas estufas em função do tempo, no tempo de aquecimento.

Para o tempo de aquecimento não se aplicou o balanço de energia em estado não estacionário, definido pela Equação 7.1, uma vez que o consumo de gás natural varia de acordo com a gama de temperaturas a que a estufa se encontra.

Porém, com todos os valores experimentais, possíveis de obter, traçou-se o gráfico da Figura 7.9 que traduz o comportamento das estufas 2, 3 e 4, durante o aquecimento desde a temperatura ambiente até à temperatura de operação.

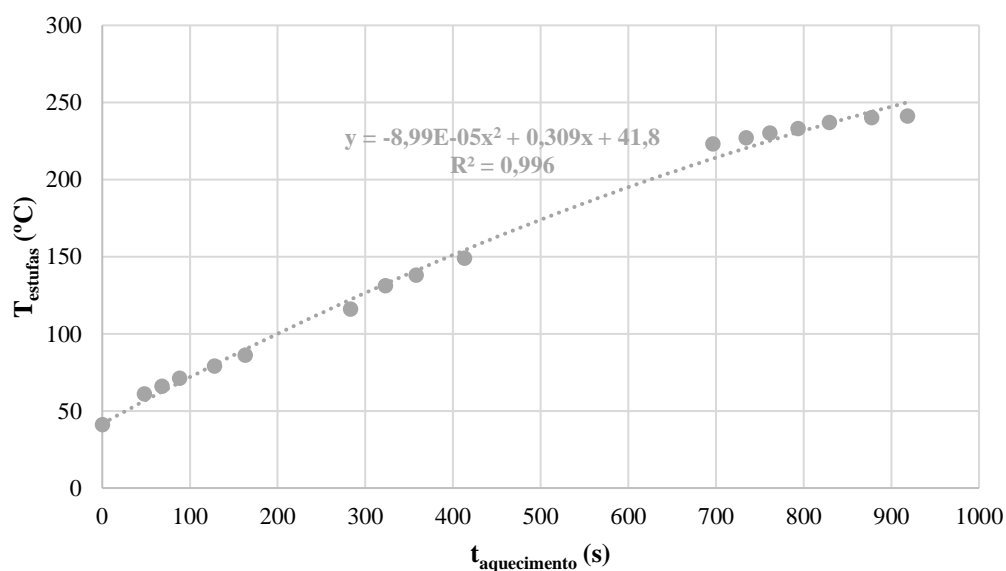


Figura 7.9 - Temperatura atingida pelas estufas em função do tempo, durante o aquecimento.

A equação de ajuste dos pontos experimentais é dada pela Equação 7.7:

$$T = -8,99 \times 10^{-5} \times t^2 + 0,309 \times t + 41,8, \text{ válida para } 40 \text{ }^\circ\text{C} < T < 245 \text{ }^\circ\text{C}$$

(Equação 7.7)

De acordo com a Equação 7.7 foi possível quantificar o tempo necessário para o aquecimento das estufas desde o valor de *set-point* (definido para o tempo de arrefecimento), até à temperatura de operação de 245 °C, como apresentado na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 - Valores da temperatura de *set-point* e do tempo experimental de aquecimento das estufas até à temperatura de operação de 245 °C.

Estufas 2, 3 e 4					
$T_{set-point}$ (°C)	100	120	150	180	200
$t_{aquecimento}$ (s)	686	611	490	357	260

Conclusão:

Dependendo do tempo de paragem entre cada jogo os operadores poderão adotar diferentes temperaturas de *set-point*, tendo em vista a poupança de gás natural. Assim, na Tabela 7.4 apresentam-se os tempos de arrefecimento a partir da temperatura de operação e o tempo de aquecimento até à temperatura de operação, em função de valores de *set-point* fixados.

Tabela 7.4 - Valores da temperatura de *set-point* propostos e tempo de arrefecimento e aquecimento.

Estufas 2, 3 e 4					
$T_{set-point}$ (°C)	100	120	150	180	200
$t_{arrefecimento}$ (s)	392	307	208	129	85
$t_{aquecimento}$ (s)	686	611	490	357	260
t_{total} (s)	1078	918	698	486	345

Concluindo, para uma temperatura de *set-point* de 100 °C, demorar-se-ia:

- 7 minutos, a partir da temperatura de operação (245 °C), até atingir os 100 °C;
- Cerca de 11 minutos para garantir novamente a temperatura de operação de 245 °C.

7.3. Instalação do sistema EcoVac

Outra proposta de redução dos consumos energéticos baseia-se na implementação do sistema EcoVac em todas as estufas da *Single-End 1*.

O sistema EcoVac regula automaticamente a percentagem do ar de exaustão conforme a pressão atmosférica, permitindo poupanças no consumo de gás natural. Para um determinado valor de *set-point* de pressão diferencial fixado, quanto maior for a pressão atmosférica local, menor será a percentagem do ar de exaustão, automaticamente reduzida, levando a uma diminuição do caudal de ar fresco e, conseqüentemente, a um menor consumo de gás natural.

Para se definir o *set-point* de pressão diferencial é preciso garantir que o ar de exaustão é suficiente para que não ocorra saída de fumo pelas aberturas de entrada e saída de cordas. Esta situação pode ocorrer quando a percentagem do ar de exaustão é baixa.

As leituras efetuadas para as condições de exaustão atuais dos artigos N0 e H2 e para condições otimizadas encontram-se na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 - Valores da percentagem do ar de exaustão atual e otimizada para os artigos N0 e H2.

Artigos	N0		H2	
Estufas	% E atual	% E otimizada	% E atual	% E otimizada
1	50	45	50	45
2	50	50	50	50
3	47	40	45	40
4	47	40	40	40

De modo a verificar a diferença nos consumos energéticos para as condições de exaustão atuais e otimizadas, apresenta-se nas Figuras 7.10 e 7.11 os consumos específicos de gás natural, obtidos através da média dos vários ensaios efetuados, presentes nas Tabelas C.1 e C.2 do Anexo C, secção C.2.

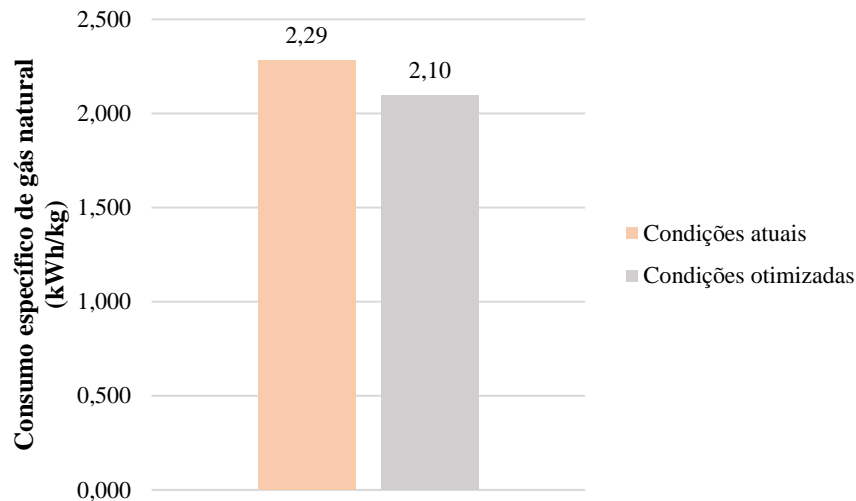


Figura 7.10 - Consumos específicos de gás natural para diferentes condições de exaustão, para o artigo N0.

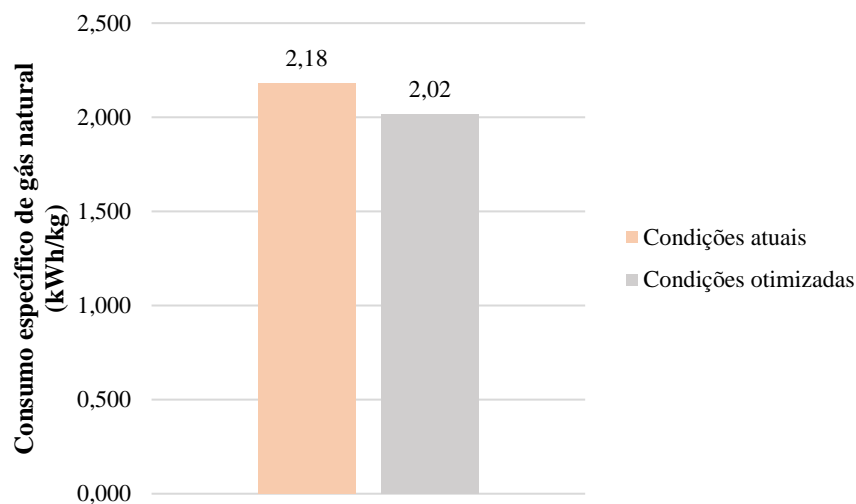


Figura 7.11 - Consumos específicos de gás natural para diferentes condições de exaustão, para o artigo H2.

De acordo com as representações gráficas verificou-se que o consumo de gás natural tende a diminuir e, conseqüentemente, os respetivos custos anuais terão a mesma tendência, como demonstrado nas Figuras 7.12 e 7.13.

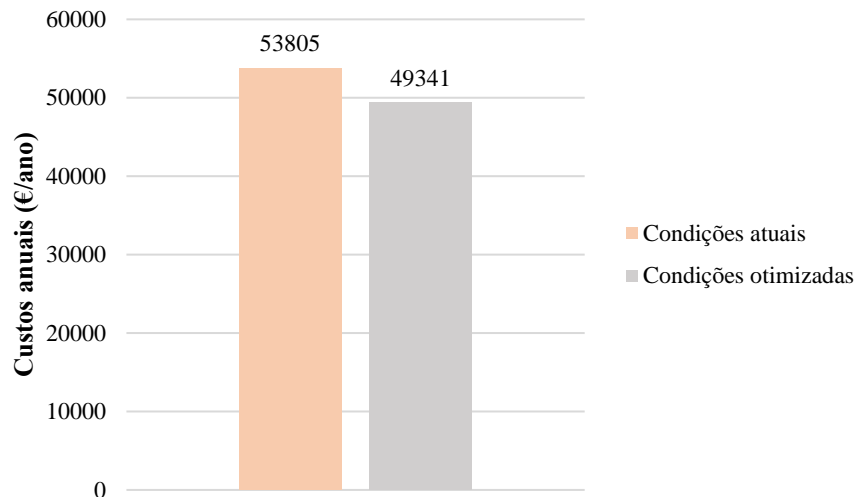


Figura 7.12 - Custos anuais para diferentes condições de exaustão, para o artigo N0.

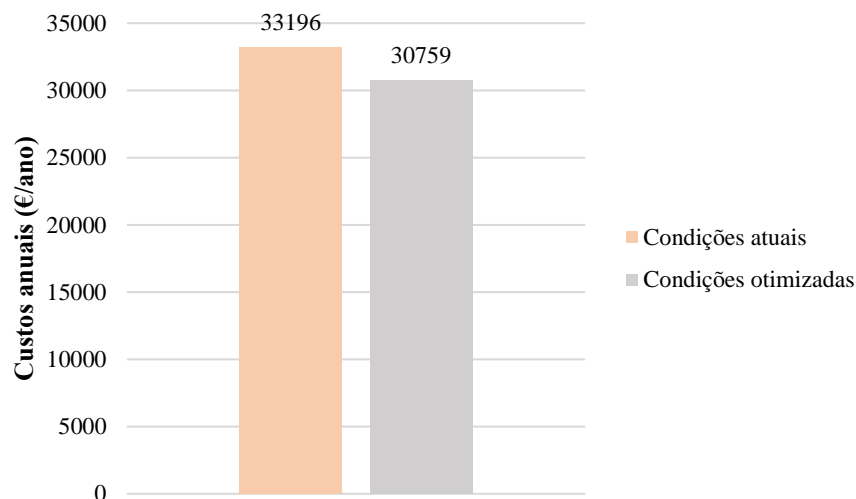


Figura 7.13 - Custos anuais para diferentes condições de exaustão, para o artigo H2.

De acordo com os valores representados concluiu-se que poderá obter-se poupanças de gás natural no valor de 4464 €/ano, para o artigo N0, que traduzem uma poupança de custos de 8,3 %. O artigo H2 poderá permitir uma poupança anual de 2437 €, correspondente a 7,3 %.

O facto da produção do artigo H1 ser menor não permitiu a realização dos ensaios necessários ao cálculo da respetiva poupança. Uma vez que este artigo utiliza 2 estufas, apenas se poderá otimizar 2 estufas, à semelhança do artigo H2, e, por isso, estimou-se uma poupança de aproximadamente 7,5 %, correspondendo a 757 €/ano.

Assim, anualmente, a poupança obtida com a implementação do sistema EcoVac poderá resultar em 7658 €. O investimento a ser realizado para adquirir o sistema de EcoVac é de 35000 €, concluindo-se que o retorno de investimento será de 4,6 anos.

Com o intuito de determinar os indicadores energéticos nas condições de exaustão atuais e otimizadas elaborou-se a Tabela 7.6, com base nos fatores de conversão apresentados na Tabela 5.1 e nos cálculos demonstrados no Anexo C, secção C.3.

Tabela 7.6 - Indicadores energéticos nas condições de operação atuais e otimizadas.

Artigos	N0		H2	
	Condições atuais	Condições otimizadas	Condições atuais	Condições otimizadas
CEE (kg _{ep} /kg)	0,177	0,163	0,169	0,157
IC (kgCO _{2e} /kg _{ep})	2,665	2,664	2,665	2,664

Para os diferentes indicadores energéticos, as reduções obtidas quando se otimiza as condições de exaustão, para os artigos N0 e H2, são, respetivamente:

- Consumo específico de energia – 8,0 % e 7,2 %;
- Intensidade carbónica – 0,06 % e 0,05 %.

Não se procedeu ao cálculo da intensidade energética, dado que o valor acrescentado bruto diz respeito a todos os artigos produzidos nos diversos setores da empresa.

7.4. Aproveitamento energético dos gases de exaustão

Como demonstrado nos balanços de massa e de energia, presentes no capítulo 6, a corrente dos gases de exaustão apresenta um elevado conteúdo energético que pode ser aproveitado para aumentar a temperatura de entrada da corrente de ar fresco, a qual se encontra normalmente a cerca de 30 °C. O aquecimento desta corrente possibilita um menor consumo de gás natural, sendo, por isso, o aproveitamento energético dos gases de exaustão uma medida de otimização energética a analisar.

Atualmente, o ar fresco é admitido na *Single-End* 1 pelas aberturas de entrada e saída das cordas. Porém, a máquina apresenta um tubo de entrada de ar fresco (atualmente fechado) situado junto do queimador de cada estufa, sendo que o objetivo é que o ar fresco aquecido seja admitido naturalmente a partir desse tubo.

Para se poder determinar o caudal de ar fresco que pode ser admitido, naturalmente, por esse tubo, efetuaram-se vários ensaios, em que se abriu totalmente o tubo, e se mediu a velocidade média do ar à entrada, com auxílio do anemómetro de turbina. Uma vez que o ar fresco entra também pelas aberturas de entrada e saída da corda, calculou-se a percentagem correspondente ao caudal de entrada de ar fresco somente pelo tubo (totalmente aberto), obtendo-se o valor de 18 %. Os cálculos efetuados encontram-se no Anexo C, secção C.4.

De acordo com o valor obtido verificou-se que a entrada de ar fresco pelo tubo é baixa e, por isso, o aquecimento do caudal de ar fresco podia não compensar em termos de investimento feito. Nesse sentido, aumentar o diâmetro deste tubo seria benéfico, uma vez que seria possível alimentar uma maior quantidade de ar fresco aquecido e, por isso, aumentar a poupança de gás natural.

Para determinar o novo diâmetro do tubo de entrada de ar fresco, considerou-se que a velocidade de admissão do ar seria a mesma que a lida experimentalmente para o diâmetro atual. Como pressuposto assumiu-se que, pelo tubo, entrariam 50 %, 60 % ou 70 % do caudal total de ar fresco, determinado pelos balanços de massa, e dimensionou-se o tubo de maneira a garantir o caudal de ar fresco suposto, apresentando-se na Tabela 7.7 os resultados obtidos.

Tabela 7.7 - Valores do novo diâmetro do tubo de entrada de ar fresco em cada estufa.

%	$\dot{V}_{ar\ no\ tubo\ por\ estufa}$ (m ³ /s)	$\bar{v}_{ar\ no\ tubo}$ (m/s)	d_{tubo} (mm)
50	0,367	18,5	160
60	0,440		170
70	0,514		190

É então necessário aumentar a abertura do tubo para um valor de 190 mm, caso se pretenda alimentar 70 % de ar fresco pelo tubo.

A partir dos caudais de ar fresco que podem ser admitidos pelo tubo, determinaram-se os diferentes consumos de gás natural, com base nos cálculos do Anexo C, secção C.4, para o aumento da temperatura de ar fresco, onde se impuseram as temperaturas de 40 °C, 50 °C e 60 °C. Na Figura 7.14 representam-se os custos anuais de gás natural para as diferentes temperaturas do ar fresco aquecido, considerando a percentagem de ar fresco a ser aquecido de 50 %, 60 % e 70 %.

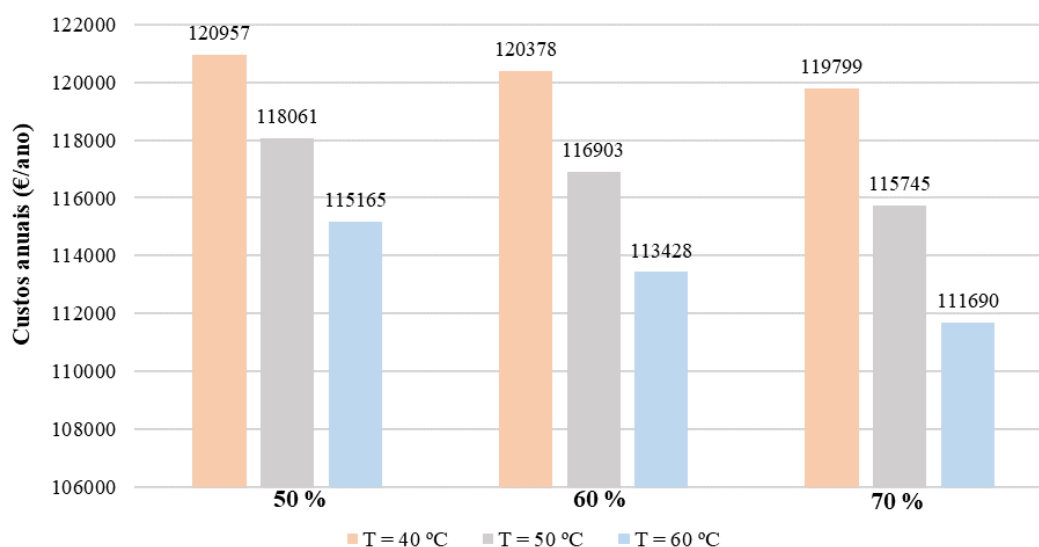


Figura 7.14 - Custos anuais do gás natural para as diferentes temperaturas de entrada do ar fresco e diferentes percentagens de ar fresco aquecido.

Assim, verificou-se que o aquecimento do ar fresco até 40 °C, 50 °C ou 60 °C, poderá originar significativas poupanças anuais de gás natural, apresentadas na Tabela 7.8.

Tabela 7.8 - Valores das possíveis poupanças anuais de gás natural para diferentes temperaturas e diferentes percentagens de caudal de ar fresco admitido pelo tubo.

%	$T_{ar\ no\ tubo}$ (°C)	Poupança (€/ano)
50	40	2908
	50	5804
	60	8701
60	40	3488
	50	6963
	60	10438
70	40	4067
	50	8121
	60	12176

Através dos resultados apresentados na Tabela 7.8 concluiu-se, como seria de esperar, que quanto maior a temperatura do ar fresco e maior o caudal de ar fresco admitido pelo tubo, maior a poupança de gás natural possível de se obter.

7.5. Iluminação da máquina

Na máquina *Single-End* 1 existem luzes ligadas 24 horas por dia que são desnecessárias no período em que não há manutenção e limpeza da mesma. Estas paragens apenas ocupam 10 horas semanais e, dado que a empresa labora 50 semanas por ano, é fundamental determinar a poupança que poderá ser possível obter se as luzes forem desligadas.

A potência elétrica associada a cada lâmpada e o número de lâmpadas a serem desligadas no tempo de funcionamento da máquina (7852 horas anuais), ou seja, descontando as horas de limpeza da mesma, encontram-se na Tabela 7.9.

Tabela 7.9 - Número de lâmpadas a serem desligadas e respetiva potência elétrica.

Nº de lâmpadas	Potência elétrica (W)
7	2×49
3	1×36
2	2×25
1	1×56
Total	950

Assim, com a implementação desta medida de racionalização de energia elétrica possibilitar-se-ia uma poupança anual de 649 €, com base nos cálculos do Anexo C.5.

7.6. Resultados finais

Com base em todas as medidas de otimização energética analisadas neste capítulo apresentam-se, de seguida, na Tabela 7.10, de forma sucinta, os resultados das poupanças anuais possíveis de se obter.

Tabela 7.10 - Resumo dos valores das possíveis poupanças anuais obtidas para as diferentes medidas de otimização energética.

Otimização energética	Poupança anual (€/ano)	
Isolamento da máquina	4758	
Redução dos tempos de paragem	N0	7519
	H2	7309
Instalação do sistema EcoVac	7658	
Aproveitamento dos gases de exaustão	50 %	40 °C – 2908
		50 °C – 5804
		60 °C – 8701
	60 %	40 °C – 3488
		50 °C – 6963
		60 °C – 10438
	70 %	40 °C – 4067
		50 °C – 8121
		60 °C – 12176
Iluminação da máquina	649	

8. Conclusões e propostas de trabalhos futuros

O principal objetivo deste trabalho foi a realização de uma análise energética, de maneira a otimizar o processo de acabamento de cordas para pneus na máquina *Single-End 1*.

Inicialmente, procedeu-se ao levantamento energético dos diversos consumidores de energia da C-ITA, com o intuito de verificar se a empresa se caracteriza como consumidora intensiva de energia. Na avaliação energética das máquinas de impregnação de cordas realizaram-se leituras dos consumos energéticos, tendo em atenção as variáveis envolvidas no processo, tais como, número de cordas, tempo de paragem e percentagem do ar de exaustão. A elaboração de balanços de massa e de energia possibilitou a análise de medidas de otimização para minimizar os consumos energéticos da empresa.

De encontro ao levantamento energético efetuado, no ano de referência de 2019, a empresa consome, nas duas formas de energia, 10142 tep/ano, sendo, por isso, consumidora intensiva de energia e emite 23473 tCO₂e por ano. A energia elétrica é a fonte de energia mais utilizada na empresa, representando 70,1 % do consumo total. A *Single-End 1* é a segunda maior consumidora de gás natural da empresa, sendo antecedida pela máquina de impregnar tecido e, desta forma, será importante minimizar os seus consumos energéticos. Foram calculadas as perdas térmicas do processo através de balanços de massa e de energia obtendo-se o valor de 56,2 kW. Recorrendo às equações empíricas o valor obtido foi de 65,3 kW.

Relativamente às medidas de otimização de energia na *Single-End 1*, tem-se que as possíveis poupanças anuais são de:

- Isolamento da máquina – 4758 € em gás natural;
- Redução dos tempos de paragem – 7519 € em gás natural se no artigo N0 o tempo diminuir de 73 para 41 minutos e 7309 € se o tempo reduzir de 67 para 38 minutos no artigo H2;
- Instalação do sistema EcoVac – 7658 €/ano em gás natural;
- Aproveitamento dos gases de exaustão – de 2908 €, 5804 € e 8701 € em gás natural, se o ar fresco for aquecido até 40 °C, 50 °C e 60 °C, respetivamente, para uma entrada de caudal de ar fresco pelo tubo de 50 % do ar fresco total. Para 60 % do ar fresco total uma poupança anual de 3488 €, 6963 € e 10438 € e para 70 % de 4067 €, 8121 € e 12176 €;
- Iluminação da máquina – 649 € em eletricidade.

É necessário ter em consideração o custo associado ao investimento do equipamento e material que possibilitará a obtenção destas poupanças energéticas.

Ao longo do estágio, para além das máquinas de impregnação de cordas, foi também realizado um estudo dos consumos energéticos da máquina de impregnar tecido, presente na C-ITA. Detetou-se que a estufa 1 apresenta baixa eficiência, sendo que esta representa 20 % do consumo total de gás natural das 7 estufas presentes nessa máquina. Assim, como proposta de trabalho futuro seria importante avaliar esta ineficiência, uma vez que, como visto no capítulo 5, esta máquina representa 81,6 % do consumo total de gás natural dos diversos consumidores da empresa. Na parte final do estágio verificou-se que os contadores de gás natural de algumas máquinas da C-ITA paravam e entrou-se em contacto com fornecedores de 2 empresas para pedir um orçamento, sendo que os contadores de gás natural devem ser trocados com frequência.

Após a realização do presente trabalho sugerem-se as seguintes propostas de trabalhos futuros:

- Procura no mercado de uma máquina para fazer as emendas do artigo mais fino que opera na *Single-End 2* (N1), na medida em que proporcionaria poupanças energéticas devido à diminuição dos tempos de paragem e, conseqüentemente, dos consumos energéticos;
- Validação do modelo teórico sugerido para calcular os tempos de aquecimento e arrefecimento na *Single-End 1*, de modo a confirmar os valores obtidos de temperatura de *set-point* e respetivos tempos;
- Instalação do sistema EcoVac;
- Avaliação do custo de investimento para a instalação de um permutador de calor que permitisse o aproveitamento da entalpia dos gases de exaustão para aquecimento da corrente de ar fresco.

Bibliografia

- [1] *Continental, Indústria Têxtil do Ave, Livro comemorativo de 60 anos.*
- [2] "O pneu, composição e estrutura". http://www.vias-seguras.com/veiculos/pneumaticos/manual_twi_informacoes_tecnicas_sobre_pneus/o_pneu_composicao_e_estrutura (acedido Jan. 06, 2021).
- [3] "Componentes de um pneu". <https://www.uniroyal.pt/ligeiros/guia-de-pneus/guia-de-pneus/componentes-de-um-pneu> (acedido Jan. 08, 2021).
- [4] E. S. F. Matarazzo, *Manual Técnico Têxtil e Vestuário*. Escola SENAI Francisco Matarazzo, 2016.
- [5] S. S. N. da Costa, "Auditoria Energética à Indústria Têxtil Tempo de Tendências", Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [6] P. Teixeira, "Incorporação de Quitosano em Têxteis Hospitalares Reutilizáveis", Faculdade de Engenharia do Porto, 2015.
- [7] J. R. T. Ferreira, "Otimização energética à secção das malhas", Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2015.
- [8] R. G. A. de Sousa, "Caracterização de produtos finais com diferentes especificações de qualidade nas diferentes fibras têxteis", Instituto Politécnico de Bragança, 2010.
- [9] A. C. S. Brazão, "Políticas para a Promoção da Eficiência Energética na Indústria Portuguesa", Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [10] M. da E. e da Inovação, Ed., "Decreto-Lei n.º 71/2008", *Diário da República n.º 74/2008, Série I de 2008-04-15*, 2008. <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/71/2008/04/15/p/dre/pt/html> (acedido Fev. 02, 2021).
- [11] *MANUAL de BOAS PRÁTICAS na Utilização Racional de Energia e Energias Renováveis*. Apicer.
- [12] "Despacho 17449/2008, de 27 de Junho", *DIARIO DA REPUBLICA - 2.ª SERIE, Nº 123, de 27.06.2008*, 2008. <https://dre.tretas.org/dre/235551/despacho-17449-2008-de-27-de-junho>.

- [13] *EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA*. AGÊNCIA PARA A ENERGIA - ADENE, 2004.
- [14] *Auditoria Energética e Plano de Racionalização de Energia da ITA*. Auditene, 2017.
- [15] T. L. BERGMAN, A. S. LAVINE, F. P. INCROPERA, e D. P. DEWITT, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, SEVENTH ED. JOHN WILEY & SONS, 2002.
- [16] “INCOMPLAST”. <https://incomplast.com.br/nylonpa/>. (acedido Jun. 30, 2021).
- [17] “Propriedades dos líquidos”. https://www.if.ufrj.br/~bertu/fis2/hidrostatica/tabela_LIQ.html (acedido Jun. 30, 2021).
- [18] “LATEX, LIQUID SYNTHETIC”. <https://cameochemicals.noaa.gov/chris/LLS.pdf> (acedido Jun. 30, 2021).
- [19] “Galp”. <https://www.ggnd.pt/Centro-de-Informação/Monitorizacao-do-gas-natural> (acedido Jun. 15, 2021).
- [20] C. Assis, “Rendimentos de geradores de vapor”, 2017.

Anexos

Anexo A – Registo dos valores do levantamento energético da empresa

O registo dos valores obtidos é fundamental para a obtenção dos resultados principais e alcance dos objetivos propostos. De modo a demonstrar como foram obtidos os resultados apresentados no capítulo do levantamento energético, nesta secção apresentou-se o registo dos valores mais significativos.

Anexo A.1 – Valores do consumo de energia nos diversos consumidores

Os valores relativos ao levantamento energético da empresa foram recolhidos da base de dados que a empresa possui, relativos ao ano de 2019, sendo que as leituras se realizaram no início e fim de cada mês.

Assim, relativamente ao gás natural, registou-se na Tabela A.1 o consumo total no PRM(A) e PRM(B), após ser corrigido com o respetivo fator de correção, e os consumos totais dos dois PRM'S, em toneladas, recorrendo à massa volúmica do gás natural. Para além dos valores referidos, encontram-se também presentes os valores dos consumos totais, em tep, e das emissões gasosas, em tCO₂e, obtidas com base nos fatores de conversão referidos no capítulo 5.

Tabela A.1 - Valores mensais do fator de correção dos PRM's, do consumo total de gás natural e das emissões de gases de efeito de estufa.

Mês	Fator de correção PRM(A)	Fator de correção PRM(B)	Consumo total PRM(A) (m ³)	Consumo total PRM(B) (m ³)	Consumo total (m ³)	Consumo total (toneladas)	Consumo total (tep)	Emissões gasosas (tCO ₂ e)
Janeiro	1,9250	1,24306	307118	2725	309843	252	272	729
Fevereiro	1,9137	1,24306	242785	1449	244234	199	214	575
Março	1,8935	1,24306	259850	1664	261514	213	229	615
Abril	1,8723	1,24306	265208	1365	266574	217	234	627
Maió	1,8443	1,24306	261616	633	262249	214	230	617
Junho	1,8424	1,24306	232093	819	232912	190	204	548
Julho	1,8154	1,24306	266939	531	267470	218	235	629
Agosto	1,8334	1,24306	197578	500	198078	161	174	466
Setembro	1,8379	1,24306	240623	508	241131	196	211	568
Outubro	1,8681	1,24306	265007	591	265598	216	233	625
Novembro	1,8992	1,24306	241602	695	242297	197	212	570
Dezembro	1,9151	1,24306	191829	2249	194077	158	170	457
Total	—	—	2972248	13729	2985977	2431	2618	7026

Para se obter este consumo total foram necessários a leitura e registo dos consumos de cada consumidor através dos seus contadores parciais, como demonstrado na Tabela A.2.

Tabela A.2 - Valores mensais do consumo de gás natural corrigido em cada consumidor.

Mês	PRM (A)					PRM (B)	
	Zell (m ³)	Single-End 1 (m ³)	Single-End 2 (m ³)	Malhas		Vestiários (m ³)	Cozinha (m ³)
				Caldeira da râmula (m ³)	Râmula (m ³)		
Janeiro	258129,67	25930,43	—	1890,58	21167,44	2217,95	507,30
Fevereiro	205210,99	21656,17	—	1221,64	14696,24	958,86	490,44
Março	217302,21	23096,72	—	1506,72	17944,64	1168,08	495,64
Abril	226949,42	20379,58	—	1688,18	16191,15	864,19	501,14
Maió	223614,64	21125,35	—	1511,21	15365,02	275,76	357,42
Junho	186734,36	20317,72	8703,01	1601,43	14736,41	149,30	669,32
Julho	218812,46	21631,44	9837,08	1762,72	14895,47	38,20	492,59
Agosto	156620,28	13336,36	9719,83	1697,04	16204,89	23,37	476,29
Setembro	190237,86	21814,10	12338,48	1388,56	14843,51	0,00	507,99
Outubro	209416,74	25774,78	12809,82	1422,77	15582,80	25,69	565,16
Novembro	191873,44	23672,20	11344,77	1379,15	13332,51	162,88	531,82
Dezembro	151243,76	18945,91	8585,11	1124,68	11929,33	1830,46	418,06
Total	2436145,83	257680,78	73338,09	18194,70	186889,39	7714,73	6013,17

Como já mencionado anteriormente, relativamente à máquina *Single-End 2*, nos primeiros 5 meses do ano de 2019 não foram realizados registos dos consumos de gás natural e, dessa forma, na Tabela A.2 não se encontram apresentados os valores referentes.

Quanto à energia elétrica apresentou-se na Tabela A.3 os valores do consumo total de energia elétrica, sendo que se recorreu aos fatores de conversão para determinar o consumo total, em tep, e as emissões de gases de efeito de estufa, em tCO_{2e}. Tal como já explicado, os consumos de energia elétrica registados não englobam iluminação e energia elétrica utilizada nos serviços sociais, nomeadamente, cantina e balneários.

Tabela A.3 - Valores mensais do consumo total de energia elétrica e emissões de gases de efeito de estufa.

Mês	Consumo total (MWh)	Consumo total (kWh)	Consumo total (tep)	Emissões gasosas (tCO _{2e})
Janeiro	3509	3509168	755	1649
Fevereiro	3102	3101879	667	1458
Março	2959	2959046	636	1391
Abril	2866	2865843	616	1347
Maio	3095	3094609	665	1454
Junho	2720	2720177	585	1279
Julho	3147	3147027	677	1479
Agosto	2253	2252604	484	1059
Setembro	2694	2694151	579	1266
Outubro	3755	3755089	807	1765
Novembro	2897	2896613	623	1361
Dezembro	1998	1998408	430	939
Total	34995	34994614	7524	16447

De forma a obter os consumos de energia elétrica em cada consumidor, que possibilitaram a determinação do consumo total, apresentou-se na Tabela A.4 os valores referentes aos mesmos.

Tabela A.4 - Valores mensais do consumo de energia elétrica em cada consumidor.

Mês	Consumo torcedura (MWh)	Consumo tecelagem (MWh)	Consumo impregnação de cordas (MWh)	Consumo impregnação de tecido (MWh)	Consumo secção de solutos (MWh)	Consumo malhas (MWh)	Consumo climatização (MWh)	Consumo compressores (MWh)	Consumo perdas nos transformadores (MWh)	Consumo de outros (MWh)
Janeiro	2681,06	25,42	54,91	161,56	2,05	78,45	37,38	117,31	112,33	238,71
Fevereiro	2367,31	20,48	55,76	145,28	2,01	65,36	43,39	105,36	96,44	200,47
Março	2119,21	19,51	57,89	142,50	1,67	50,80	83,64	99,83	45,87	338,13
Abril	2079,60	19,21	50,63	141,32	1,70	43,51	78,64	106,45	92,89	251,89
Mai	2180,35	20,31	55,83	142,98	1,66	39,44	134,43	113,75	98,25	307,61
Junho	1942,60	18,08	49,85	130,91	1,64	38,81	125,28	106,42	87,25	219,34
Julho	2228,42	22,93	54,20	155,17	1,95	43,69	185,53	136,14	100,74	218,25
Agosto	1505,63	20,48	46,56	132,43	1,64	46,73	107,21	119,99	84,37	187,57
Setembro	1932,63	19,63	53,23	129,75	1,83	41,10	123,64	110,52	88,15	193,68
Outubro	2826,93	24,49	67,80	165,90	2,00	47,47	110,75	139,49	119,69	250,58
Novembro	2220,33	20,35	52,23	130,15	1,57	38,69	44,29	110,93	93,52	184,56
Dezembro	1449,88	14,68	36,75	95,14	1,01	33,91	16,47	80,15	107,98	162,45
Total	25533,94	245,58	635,64	1673,07	20,73	567,95	1090,64	1346,34	1127,48	2753,23

Anexo A.2 – Valores dos consumos energéticos dos artigos que operam nas máquinas de impregnação de cordas

De modo a analisar-se os consumos energéticos associados ao ciclo de vida dos artigos que são tratados nas máquinas de impregnação de cordas, fez-se um levantamento dos seus consumos nas etapas de torcedura e impregnação, sendo os registos apresentados na Tabela A.5.

Tabela A.5 - Valores dos consumos energéticos dos diferentes artigos na torcedura e impregnação.

Artigo	Impregnação		Torcedura
	Energia elétrica (kWh/kg)	Gás natural (kWh/kg)	Energia elétrica (kWh/kg)
N2	0,297	2,22	1,94
N1	0,654	4,20	4,92
N0	0,308	2,34	1,47
H2	0,300	2,23	1,14
H1	0,360	3,20	4,59
Total	1,919	14,19	14,06

Anexo A.3 – Valores dos consumos energéticos na máquina *Single-End 2*

Com o intuito de se estudar a máquina *Single-End 2* através do impacto de diferentes parâmetros nos consumos específicos de gás natural, realizaram-se diversos ensaios apresentados nas Tabelas A.6 e A.7, para os artigos N1 e N2, respetivamente.

Tabela A.6 - Valores dos consumos específicos de gás natural para diferentes números de cordas, tempos de paragem e percentagem do ar de exaustão nas estufas, para o artigo N1.

Consumo específico de gás natural (kWh/kg)	Nº de cordas	t_{paragem} (min)	% E1	% E2
4,31	54	49	65	50
3,78	54	13	65	50
4,07	54	16	65	50
4,20	52	16	65	50
4,59	52	37	65	50
4,42	51	58	65	42
3,82	51	15	65	42
3,44	54	10	65	40
4,39	49	35	65	35
3,83	49	24	65	30
3,46	53	14	65	30
4,21	50	28	60	50
3,73	53	11	60	42
4,30	50	40	60	35
3,71	50	13	60	35
3,41	54	12	60	35
3,66	54	30	60	30
4,04	51	41	60	30

Tabela A.7 - Valores dos consumos específicos de gás natural para diferentes números de cordas, tempos de paragem e percentagem do ar de exaustão nas estufas, para o artigo N2.

Consumo específico de gás natural (kWh/kg)	Nº de cordas	t _{paragem} (min)	% E1	% E2
2,36	50	15	65	50
2,22	54	17	65	50
2,17	54	18	65	45
2,56	52	43	65	44
2,02	54	15	65	35
2,24	54	39	65	37
2,17	51	13	65	35
2,14	54	22	65	35
2,25	48	24	65	35
2,41	43	15	65	35
2,23	48	19	65	35
2,07	54	18	60	45
2,30	46	12	60	40
2,30	46	16	60	40
2,00	54	13	60	40
2,10	50	9	60	40
2,22	50	22	60	40
2,24	49	22	60	40
2,10	51	12	60	38
2,20	49	10	60	38
2,31	50	26	60	38
1,97	54	12	60	38

Seguidamente é apresentado o exemplo de cálculo da poupança anual de gás natural obtida para a produção de 54 cordas, comparativamente a 43 cordas, para o artigo N2.

O custo anual correspondente à produção de 54 cordas é dado por:

$$Custo\ anual\ \left(\frac{\text{€}}{\text{ano}}\right) = Consumo\ \left(\frac{kWh}{kg}\right) \times Preço_{gás\ natural}\ \left(\frac{\text{€}}{kWh}\right) \times Produção\ \left(\frac{kg}{ano}\right)$$

$$\Leftrightarrow Custo\ anual = 2,08 \times 0,02312 \times 685501 = 32966\ \text{€/ano}$$

Relativamente à produção de 43 cordas tem-se o valor de:

$$\text{Custo anual} \left(\frac{\text{€}}{\text{ano}} \right) = \text{Consumo} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right) \times \text{Preço}_{\text{gás natural}} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \times \text{Produção} \left(\frac{\text{kg}}{\text{ano}} \right)$$

$$\Leftrightarrow \text{Custo anual} = 2,41 \times 0,02312 \times 685501 = 38196 \text{ €/ano}$$

Assim, obtém-se:

$$\text{Poupança anual} \left(\frac{\text{€}}{\text{ano}} \right) = 38196 - 32966 = 5230 \text{ €/ano}$$

Anexo B – Exemplos de cálculo – Balanços de massa e de energia

Neste anexo encontram-se, de forma detalhada, os dados e cálculos fundamentais dos balanços de massa e de energia da máquina *Single-End* 1. Como mencionado anteriormente, o estado de referência considerado foi água líquida a 25 °C e ar seco a 25 °C. Neste anexo é também apresentada a quantificação empírica das perdas térmicas.

Corda em verde:

Para se determinar o caudal mássico desta corrente foi necessário calcular, inicialmente, a massa da corda em verde, a partir da expressão:

$$m_{\text{corda em verde}} = c_{\text{corda}} \times \text{decitex} = 30000 \times \frac{2960}{10000} \times 10^{-3} = 8,88 \text{ kg}$$

Assim:

$$\dot{m}_{\text{corda em verde}} = \frac{v_{\text{impregnação}} \times n^{\circ} \text{ cordas} \times m_{\text{corda em verde}}}{c_{\text{corda}}}$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{\text{corda em verde}} = \frac{250 \times 103 \times 8,88}{30000 \times 60} = 0,127 \text{ kg/s}$$

Com o caudal mássico da corda em verde foi possível calcular a sua entalpia:

$$H_{\text{corda em verde}} = \dot{m}_{\text{corda em verde}} \times c_{p_{\text{corda em verde}}} \times (T_{\text{corda em verde}} - T_{\text{referência}})$$

$$\Leftrightarrow H_{\text{corda em verde}} = 0,127 \times 1,70 \times (27,3 - 25,0)$$

$$\Leftrightarrow H_{\text{corda em verde}} = 0,497 \text{ kW}$$

Solução de impregnação:

A partir de um contador de massa de solução determinou-se diretamente o seu caudal mássico, dado que se registou a variação de massa durante um determinado intervalo de tempo. Para 103 cordas obteve-se um valor de 0,0400 kg/s.

Para possibilitar a determinação da entalpia da solução de impregnação foi necessário calcular o calor específico ponderado, tendo em conta a composição da solução, demonstrada na Tabela B.1.

Tabela B.1 - Valores da percentagem mássica dos constituintes da solução de impregnação.

Compostos	% mássica
Água	59,39
Látex	35,00
Amónia	0,92
Resina	3,10
Formaldeído	1,60

Com base na percentagem mássica:

$$cp_{solução} = \sum cp_i \times x_i$$

$$\Leftrightarrow cp_{solução} = 0,5939 \times 4,18 + 0,35 \times 2,00 + 0,0092 \times 4,60 + 0,016 \times 3,26$$

$$\Leftrightarrow cp_{solução} = 3,28 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

Assim:

$$H_{solução} = \dot{m}_{solução} \times cp_{solução} \times (T_{solução} - T_{referência})$$

$$\Leftrightarrow H_{solução} = 0,0400 \times 3,28 \times (26,4 - 25,0)$$

$$\Leftrightarrow H_{solução} = 0,183 \text{ kW}$$

Gás natural:

Através do contador de gás natural presente na *Single-End* 1, para um dado intervalo de tempo, registou-se o valor inicial e final de volume de combustível, obtendo-se o caudal volumétrico do mesmo, presente na Tabela B.2.

Tabela B.2 - Valores do volume inicial e final de gás natural, para um dado intervalo de tempo, e respetivo caudal volumétrico.

V_i (m ³)	V_f (m ³)	ΔV (m ³)	Δt (min)	$\dot{V}_{\text{gás natural}}$ (m ³ /min)
386,86	403,85	16,99	30	0,566
403,85	411,44	7,59	14	0,542
411,44	436,02	24,58	44	0,559
Média				0,556

Através da massa volúmica ($0,814 \text{ kg/m}^3$) e considerando o fator de correção médio anual, tem-se:

$$\dot{m}_{gás\ natural} = \dot{V}_{gás\ natural} \times \rho_{gás\ natural} \times fc$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{gás\ natural} = \frac{0,556}{60} \times 0,814 \times 1,8854$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{gás\ natural} = 0,0142 \text{ kg/s}$$

Para cálculo do calor específico ponderado do gás natural teve-se em consideração os principais compostos que constituem o combustível, apresentados na Tabela B.3.

Tabela B.3 - Valores da percentagem molar dos compostos do gás natural [19].

Compostos	% molar
Metano	87,885
Etano	8,056
Propano	1,378
C_nH_m	0,327
Azoto	1,088
Dióxido de carbono	1,266

Tendo em conta a percentagem molar:

$$cp_{gás\ natural} = \sum cp_i \times x_i$$

$$\Leftrightarrow cp_{gás\ natural} = 0,87885 \times 35,74 + 0,08056 \times 52,79 + 0,01378 \times 73,92 + 0,01088 \times 29,10 + 0,01266 \times 37,14$$

$$\Leftrightarrow cp_{gás\ natural} = 37,15 \text{ kJ/(kmol. K)}$$

O valor da massa molar do gás natural é dado por:

$$\begin{aligned} \text{Massa molar} &= 0,87885 \times 16 + 0,08056 \times 30 + 0,01378 \times 44 + 0,01088 \times 28 + \\ &0,01266 \times 44 = 17,95 \text{ kg/kmol} \end{aligned}$$

A entalpia foi determinada segundo a seguinte equação:

$$H_{gás\ natural} = \dot{m}_{gás\ natural} \times c_{p_{gás\ natural}} \times (T_{gás\ natural} - T_{referência})$$

$$\Leftrightarrow H_{gás\ natural} = 0,0142 \times 2,07 \times (23,74 - 25,0)$$

$$\Leftrightarrow H_{gás\ natural} = - 0,0371\ kW$$

Calor de reação:

Com a determinação do caudal volumétrico de gás natural e considerando o valor médio anual do PCS obteve-se o calor de reação libertado durante a combustão:

$$\Delta H_{298}^0 = \dot{V}_{gás\ natural} \times PCS \times fc$$

$$\Leftrightarrow \Delta H_{298}^0 = 0,556 \times 60 \times 11,76 \times 1,8854$$

$$\Leftrightarrow \Delta H_{298}^0 = 739,27\ kW$$

Ar de combustão:

Para determinar o caudal mássico desta corrente foi necessário registar os valores da velocidade junto à grelha circular de admissão de ar de combustão, com um anemómetro de turbina, presentes na Tabela B.4.

Tabela B.4 - Valores das velocidades do ar de combustão na grelha circular.

$v_{ar\ de\ combustão}\ (m/s)$	$\bar{v}_{ar\ de\ combustão}\ (m/s)$
4,4	5,1
4,6	
4,8	
3,9	
5,1	
4,4	
5,6	
3,4	
6,2	
7,0	
6,7	

A área circular foi calculada como demonstrada seguidamente:

$$A_{grelha} = \pi \times \left(\frac{d_{grelha}}{2}\right)^2$$

$$\Leftrightarrow A_{grelha} = \pi \times \left(\frac{0,173}{2}\right)^2 = 0,0235 \text{ m}^2$$

A massa volúmica da corrente é dada pela equação dos gases perfeitos:

$$\rho_{ar \text{ de combustão}} = \frac{P \times M}{R \times T} = \frac{1 \times 28,9}{0,082 \times (30 + 273)} = 1,163 \text{ kg/m}^3$$

Assim, o valor do caudal mássico do ar de combustão húmido é:

$$\dot{m}_{ar \text{ de combustão húmido}} = \bar{v}_{ar \text{ de combustão}} \times \rho_{ar \text{ de combustão}} \times A_{grelha}$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{ar \text{ de combustão húmido}} = 5,10 \times 1,163 \times 0,0235$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{ar \text{ de combustão húmido}} = 0,139 \text{ kg/s}$$

Como existem 4 queimadores, o caudal total de ar de combustão é de 0,558 kg/s.

Com o auxílio de um higrómetro mediu-se a humidade relativa do ar de combustão que apresentou um valor de 41,1 % e a temperatura do ar húmido um valor de 30 °C, sendo que para esta temperatura a pressão de saturação, obtida através de tabelas da água, é de 4,241 kPa. A pressão atmosférica lida apresenta um valor de 1018,3 mbar.

A pressão de vapor foi calculada como se apresenta de seguida:

$$p_v = \frac{\% Y_r}{100} \times p_{saturação} = 0,411 \times 4,241 = 1,743 \text{ kPa}$$

O valor da humidade específica desta corrente é dado por:

$$Y_{e,ar \text{ de combustão}} = \frac{p_v}{P - p_v} \times \frac{M_{água}}{M_{ar}} = \frac{1,743}{101,83 - 1,743} \times \frac{18}{28,9} = 0,0108$$

O caudal de ar de combustão seco necessário ao cálculo da entalpia é então:

$$\dot{m}_{ar \text{ de combustão húmido}} = (1 + Y_{e,ar \text{ de combustão}}) \times \dot{m}_{ar \text{ de combustão seco}}$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{ar \text{ de combustão seco}} = \frac{0,558}{(1 + 0,0108)} = 0,552 \text{ kg/s}$$

Assim, a entalpia é dada por:

$$H_{ar\ de\ combust\ \acute{a}o\ h\acute{u}mido} = \dot{m}_{ar\ de\ combust\ \acute{a}o\ seco} \times [\Delta H_{vaporiza\ \acute{c}ao} \times Y_{e,ar\ de\ combust\ \acute{a}o} + (0,24 + 0,45 \times Y_{e,ar\ de\ combust\ \acute{a}o}) \times 4,18 \times (T_{ar\ de\ combust\ \acute{a}o} - 25,0)]$$

$$\Leftrightarrow H_{ar\ de\ combust\ \acute{a}o\ h\acute{u}mido} = 0,552 \times [2442,5 \times 0,0108 + (0,24 + 0,45 \times 0,0108) \times 4,18 \times (30,0 - 25,0)]$$

$$\Leftrightarrow H_{ar\ de\ combust\ \acute{a}o\ h\acute{u}mido} = 17,44\ kW$$

Corda impregnada:

O cálculo do caudal mássico desta corrente é similar ao da corda em verde, sendo que a diferença obtida nos caudais é o facto de, neste caso, o decitex ser superior devido à termofixação da solução na corda.

Desta forma, a massa da corda impregnada apresenta o valor de:

$$m_{corda\ impregnada} = c_{corda} \times decitex = 30000 \times \frac{3010}{10000} \times 10^{-3} = 9,03\ kg$$

Assim:

$$\dot{m}_{corda\ impregnada} = \frac{v_{impregna\ \acute{c}ao} \times n^{\circ}\ cordas \times m_{corda\ impregnada}}{c_{corda}}$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{corda\ impregnada} = \frac{250 \times 103 \times 9,03}{30000 \times 60} = 0,129\ kg/s$$

Com o caudal mássico da corda impregnada foi possível calcular a sua entalpia, sendo que se considerou que a temperatura da corda corresponde à temperatura da última estufa pela qual passou:

$$H_{corda\ impregnada} = \dot{m}_{corda\ impregnada} \times cp_{corda\ impregnada} \times (T_{corda\ impregnada} - T_{refer\ \acute{e}ncia})$$

$$\Leftrightarrow H_{corda\ impregnada} = 0,129 \times 1,70 \times (245,0 - 25,0)$$

$$\Leftrightarrow H_{corda\ impregnada} = 48,31\ kW$$

Gases de exaustão:

Para determinar o caudal mássico dos gases de exaustão usou-se um tubo de *Pitot*. Realizaram-se leituras da pressão diferencial ao longo da secção da chaminé e, posteriormente, converteram-se os valores em velocidades pontuais, sendo apresentados na Tabela B.5.

Tabela B.5 - Valores das pressões diferenciais e respetivas velocidades pontuais.

ΔP (hPa)	$v_{gases\ de\ exaustão}$ (m/s)	$\bar{v}_{gases\ de\ exaustão}$ (m/s)
0,438	10,3	9,69
0,446	10,4	
0,414	10,0	
0,392	9,74	
0,325	8,87	
0,321	8,81	
0,389	9,69	

O balanço de energia mecânica aplicado a uma linha de corrente da conduta, permitiu o cálculo da velocidade pontual:

$$v_{gases\ de\ exaustão} = \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho_{gases\ de\ exaustão}}} = \sqrt{\frac{2 \times 0,438 \times 100}{0,826}} = 10,3\ m/s$$

A massa volúmica dos gases de exaustão, utilizada na expressão anterior, foi calculada pela seguinte expressão:

$$\rho_{gases\ de\ exaustão} = \frac{P \times M}{R \times T} = \frac{1 \times 28,9}{0,082 \times (153,5 + 273)} = 0,826\ kg/m^3$$

Uma vez que a chaminé apresenta 800 mm de diâmetro, a sua área transversal é dada por:

$$A_{chaminé} = \pi \times \left(\frac{d_{chaminé}}{2}\right)^2$$

$$\Leftrightarrow A_{chaminé} = \pi \times \left(\frac{0,8}{2}\right)^2 = 0,503\ m^2$$

Assim, o valor do caudal mássico dos gases de exaustão é de:

$$\dot{m}_{\text{gases de exaustão húmido}} = \bar{v}_{\text{gases de exaustão}} \times \rho_{\text{gases de exaustão}} \times A_{\text{chaminé}}$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{\text{gases de exaustão húmido}} = 9,69 \times 0,826 \times 0,503$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{\text{gases de exaustão húmido}} = 4,02 \text{ kg/s}$$

O caudal mássico dos gases de exaustão teórico pode ser determinado, uma vez que se sabe que, no artigo para o qual se realizou os balanços, as estufas 1, 2, 3 e 4 operam com 50 %, 49 %, 47 % e 47 % da capacidade máxima de exaustão (15000 m³/h). As temperaturas das mesmas são 155 °C, 240 °C, 240 °C e 245 °C, respetivamente, sendo possível retirar-se as respetivas massas volúmicas pela equação dos gases perfeitos (0,823 kg/m³, 0,687 kg/m³, 0,687 kg/m³ e 0,680 kg/m³). Assim:

$$\dot{m}_{\text{gases de exaustão húmido teórico}} = 0,50 \times \frac{15000}{3600} \times 0,823 + 0,49 \times \frac{15000}{3600} \times 0,687 +$$

$$0,47 \times \frac{15000}{3600} \times 0,687 + 0,47 \times \frac{15000}{3600} \times 0,680 = 5,80 \text{ kg/s} = 28950 \text{ m}^3/\text{h}$$

De outro modo a temperatura teórica também pode ser calculada, considerando um balanço ao ponto de mistura, em que as perdas térmicas são desprezadas. Os calores específicos são 1,029 kJ/(kg.K) para 155 °C e 1,040 kJ/(kg.K) para 240 °C e 245°C, e como pressuposto assumiu-se que à saída os gases saem a 200 °C, aproximadamente, sendo a massa volúmica de 0,745 kg/m³ e o calor específico de 1,035 kJ/(kg.K). Dessa forma:

$$0,50 \times \frac{15000}{3600} \times 0,823 \times 1,029 \times (155 - 25) + 0,49 \times \frac{15000}{3600} \times 0,687 \times 1,04 \times$$

$$(240 - 25) + 0,47 \times \frac{15000}{3600} \times 0,687 \times 1,04 \times (240 - 25) + 0,47 \times \frac{15000}{3600} \times 0,680 \times$$

$$1,04 \times (245 - 25) = \frac{28950}{3600} \times 0,745 \times 1,035 \times (T_{\text{gases de exaustão teórica}} - 25)$$

$$\Leftrightarrow T_{\text{gases de exaustão teórica}} = 208,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

O facto dos valores de caudal e temperatura experimentais serem inferiores aos teóricos justificam o facto da chaminé se encontrar subdimensionada. Para se obter o caudal teórico na chaminé e, conseqüentemente, os gases apresentarem maior temperatura, considerou-se a velocidade dos mesmos igual ao valor obtido experimentalmente e procedeu-se a um possível

dimensionamento da chaminé, sendo que seria necessário a chaminé apresentar um diâmetro de:

$$\frac{\dot{m}_{\text{gases de exaustão húmido teórico}}}{\rho_{\text{gases de exaustão teórico}}} = v_{\text{gases de exaustão}} \times A_{\text{chaminé}}$$

$$\Leftrightarrow \frac{5,80}{0,732} = 9,69 \times \pi \times \left(\frac{d_{\text{chaminé}}}{2}\right)^2$$

$$\Leftrightarrow d_{\text{chaminé}} = 1 \text{ m}$$

O valor da humidade específica desta corrente foi obtido a partir de um balanço à água do sistema, sendo que por cada quilograma de gás natural queimado formam-se 2 quilogramas de água [20]:

$$\dot{m}_{\text{água, ar fresco}} + \dot{m}_{\text{água, ar de combustão}} + \dot{m}_{\text{água, solução}} + \dot{m}_{\text{água produzida}}$$

$$= \dot{m}_{\text{água, gases de exaustão}}$$

$$\Leftrightarrow (\dot{m}_{\text{ar fresco seco}} + \dot{m}_{\text{ar combustão seco}}) \times Y_{e, \text{ar de combustão}} + \% \text{ água, solução} \times \dot{m}_{\text{solução}} +$$

$$\Phi \times \dot{m}_{\text{gás natural}} = \dot{m}_{\text{água, gases de exaustão}}$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{\text{água, gases de exaustão}} = (3,38 + 0,552) \times 0,0108 + 0,5939 \times 0,0400 + 2 \times 0,0142$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{\text{água, gases de exaustão}} = 0,0946 \text{ kg/s}$$

Assim:

$$Y_{e, \text{gases de exaustão}} = \frac{\dot{m}_{\text{água, gases de exaustão}}}{\dot{m}_{\text{gases de exaustão}} - \dot{m}_{\text{água, gases de exaustão}}}$$

$$\Leftrightarrow Y_{e, \text{gases de exaustão}} = \frac{0,0946}{4,02 - 0,0946} = 0,0241$$

Desta forma, o caudal de gases de exaustão seco necessário ao cálculo da entalpia é:

$$\dot{m}_{\text{gases de exaustão húmido}} = (1 + Y_{e, \text{gases de exaustão}}) \times \dot{m}_{\text{gases de exaustão seco}}$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{\text{gases de exaustão seco}} = \frac{4,02}{(1 + 0,0241)} = 3,93 \text{ kg/s}$$

Assim, a entalpia é dada por:

$$H_{\text{gases de exaustão húmido}} = \dot{m}_{\text{gases de exaustão seco}} \times [\Delta H_{\text{vaporização}} \times Y_{e,\text{gases de exaustão}} + (0,24 + 0,45 \times Y_{e,\text{gases de exaustão}}) \times 4,18 \times (T_{\text{ar fresco}} - 25,0)]$$

$$\Leftrightarrow H_{\text{gases de exaustão húmido}} = 3,93 \times [2442,5 \times 0,0241 + (0,24 + 0,45 \times 0,0241) \times 4,18 \times (153,5 - 25,0)]$$

$$\Leftrightarrow H_{\text{gases de exaustão húmido}} = 759,64 \text{ kW}$$

Ar fresco:

Para determinar o caudal mássico desta corrente procedeu-se ao fecho do balanço da seguinte forma:

$$\dot{m}_{\text{ar fresco húmido}} = \dot{m}_{\text{corda impregnada}} + \dot{m}_{\text{gases de exaustão húmido}} - (\dot{m}_{\text{corda em verde}} + \dot{m}_{\text{solução}} + \dot{m}_{\text{gás natural}} + \dot{m}_{\text{ar de combustão húmido}})$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{\text{ar fresco húmido}} = 0,129 + 4,02 - (0,127 + 0,0400 + 0,0142 + 0,558)$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{\text{ar fresco húmido}} = 3,41 \text{ kg/s}$$

Esta corrente apresenta a mesma humidade que a corrente de ar de combustão, sendo possível determinar o caudal de ar fresco seco necessário ao cálculo da entalpia do mesmo:

$$\dot{m}_{\text{ar fresco húmido}} = (1 + Y_{e,\text{ar fresco}}) \times \dot{m}_{\text{ar fresco seco}}$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{\text{ar fresco seco}} = \frac{3,41}{(1 + 0,0108)}$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{\text{ar fresco seco}} = 3,38 \text{ kg/s}$$

Assim, a entalpia é dada por:

$$H_{\text{ar fresco húmido}} = \dot{m}_{\text{ar fresco seco}} \times [\Delta H_{\text{vaporização}} \times Y_{e,\text{ar fresco}} +$$

$$(0,24 + 0,45 \times Y_{e,\text{ar fresco}}) \times 4,18 \times (T_{\text{ar fresco}} - 25,0)]$$

$$\Leftrightarrow H_{\text{ar fresco húmido}} = 3,38 \times [2442,5 \times 0,0108 + (0,24 + 0,45 \times 0,0108) \times 4,18 \times (30,0 - 25,0)]$$

$$\Leftrightarrow H_{\text{ar fresco húmido}} = 106,76 \text{ kW}$$

Com base nas entalpias determinadas e, sabendo que a reação é exotérmica, foi possível calcular as perdas de calor pela máquina através da seguinte expressão:

$$q = \sum H_{saída} + \Delta H_{298}^0 - \sum H_{entrada}$$

$$\Leftrightarrow q = 48,31 + 759,64 + (-739,27) - (0,497 + 0,183 - 0,0371 + 106,76 + 17,44)$$

$$\Leftrightarrow q = -56,16 \text{ kW}$$

De modo a calcularem-se as perdas térmicas, recorrendo aos mecanismos de transferência de calor, foi necessário dividir as estufas em diferentes áreas e medir a temperatura com um termómetro de contacto. Assim, nas Figuras B.1 a B.5 encontram-se representadas as diferentes áreas seleccionadas.

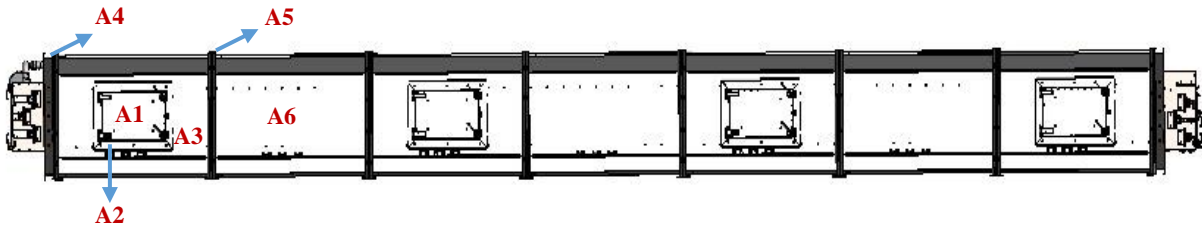


Figura B.1 - Áreas seleccionadas da parede frontal da máquina.

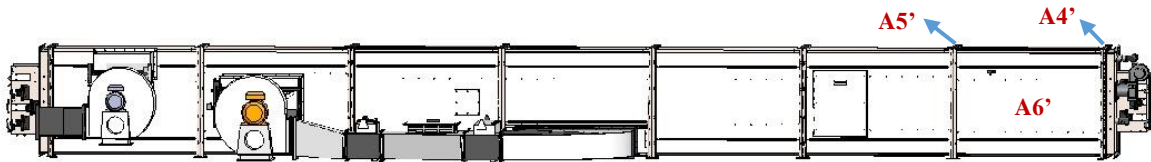


Figura B.2 - Áreas seleccionadas da parede posterior da máquina.

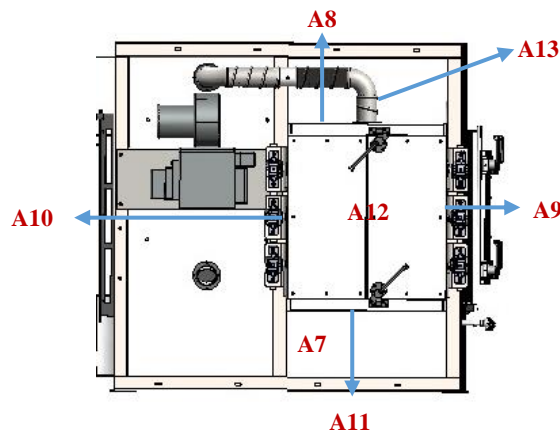


Figura B.3 - Áreas seleccionadas da parede lateral direita da máquina.

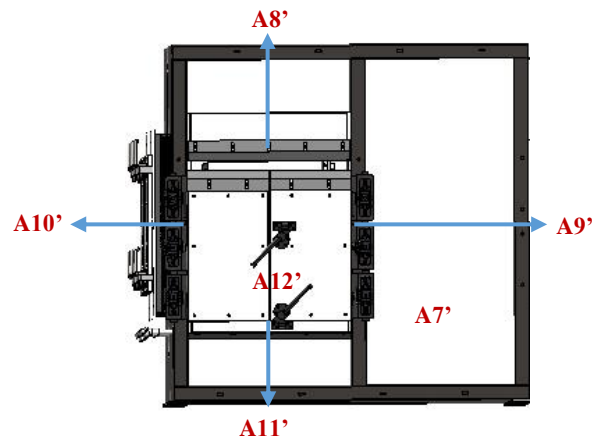


Figura B.4 - Áreas seleccionadas da parede lateral esquerda da máquina.

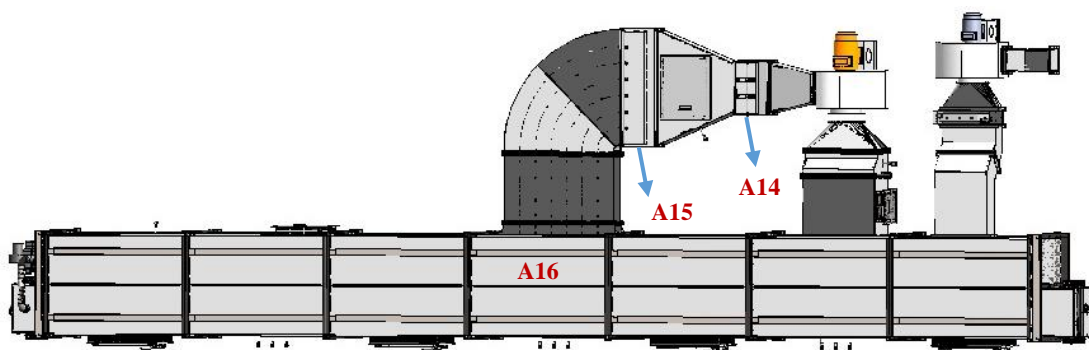


Figura B.5 - Áreas da parede superior da máquina e das chapas dos ventiladores.

É de referir que as áreas A7 e A7' correspondem a toda a área da parede lateral com exceção das portas (A8 a A12 e A8' a A12', respetivamente). A área A16 traduz toda a placa superior da máquina.

Como pressuposto assumiu-se que as superfícies semelhantes das paredes laterais direita e esquerda, bem como da parede frontal e posterior da máquina apresentavam a mesma temperatura. As leituras foram realizadas apenas na estufa 4, considerando-se que as restantes estufas se encontravam à mesma temperatura. Nesse sentido, nas tabelas apresentadas seguidamente contabilizou-se o número de áreas seleccionadas que se repetem ao longo das estufas e o facto de existirem 4 estufas. De outro modo, foram desprezadas as perdas térmicas nos ventiladores, dado que a sua temperatura era aproximadamente a temperatura ambiente.

Assim, na Tabela B.6 a B.10 encontram-se os valores das áreas correspondentes a cada superfície, a respetiva temperatura média, obtida através de diversas leituras, e todos os valores fundamentais ao cálculo das perdas térmicas por convecção e radiação.

Tabela B.6 - Valores das áreas correspondentes à parede frontal da máquina, temperatura média e restantes valores essenciais às determinações das perdas de calor.

Parâmetro	A1	A2	A3	A4	A5	A6
A (m ²)	10,67	7,58	41,07	4,49	8,40	46,62
T_p (°C)	38,45	47,83	41,56	37,40	66,44	40,38
T_∞ (°C)	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
$T_{\text{média filme}}$ (°C)	34,23	38,92	35,78	33,70	48,22	35,19
ΔT (°C)	8,45	17,83	11,56	7,40	36,44	10,38
L (m)	0,68	0,96	1,76	1,76	1,76	1,76
μ (kg/(m.s))	$1,89 \times 10^{-5}$	$1,91 \times 10^{-5}$	$1,89 \times 10^{-5}$	$1,89 \times 10^{-5}$	$1,95 \times 10^{-5}$	$1,89 \times 10^{-5}$
ρ (kg/m ³)	1,16	1,15	1,16	1,17	1,12	1,16
cp (kJ/(kg.K))	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
k (W/(m.K))	$2,67 \times 10^{-2}$	$2,71 \times 10^{-2}$	$2,68 \times 10^{-2}$	$2,67 \times 10^{-2}$	$2,78 \times 10^{-2}$	$2,68 \times 10^{-2}$
β (1/K)	$3,25 \times 10^{-3}$	$3,21 \times 10^{-3}$	$3,24 \times 10^{-3}$	$3,26 \times 10^{-3}$	$3,11 \times 10^{-3}$	$3,24 \times 10^{-3}$
Gr	$3,23 \times 10^8$	$1,77 \times 10^9$	$7,47 \times 10^9$	$4,92 \times 10^9$	$1,98 \times 10^{10}$	$6,75 \times 10^9$
Pr	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
$Gr \times Pr$	$2,29 \times 10^8$	$1,25 \times 10^9$	$5,30 \times 10^9$	$3,49 \times 10^9$	$1,40 \times 10^{10}$	$4,80 \times 10^9$
h (W/(m ² .K))	2,57	3,24	2,80	2,42	4,11	2,70
ε	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
$q_{\text{convecção}}$ (W)	231,99	438,10	1331,92	80,22	1257,79	1308,17
$q_{\text{radiação}}$ (W)	504,28	791,80	2696,83	184,67	1961,22	2730,30

Tabela B.7 - Valores das áreas correspondentes à parede posterior da máquina, temperatura média e restantes valores essenciais às determinações das perdas de calor.

Parâmetro	A4'	A5'	A6'
A (m ²)	4,49	8,40	108,79
T_p (°C)	37,40	66,44	40,38
T_∞ (°C)	30,0	30,0	30,0
$T_{\text{média filme}}$ (°C)	33,70	48,22	35,19
ΔT (°C)	7,40	36,44	10,38
L (m)	1,76	1,76	1,76
μ (kg/(m.s))	$1,89 \times 10^{-5}$	$1,95 \times 10^{-5}$	$1,89 \times 10^{-5}$
ρ (kg/m ³)	1,17	1,12	1,16
cp (kJ/(kg.K))	1,01	1,01	1,01
k (W/(m.K))	$2,67 \times 10^{-2}$	$2,78 \times 10^{-2}$	$2,68 \times 10^{-2}$
β (1/K)	$3,26 \times 10^{-3}$	$3,11 \times 10^{-3}$	$3,24 \times 10^{-3}$
Gr	$4,92 \times 10^9$	$1,98 \times 10^{10}$	$6,75 \times 10^9$
Pr	0,71	0,71	0,71
$Gr \times Pr$	$3,49 \times 10^9$	$1,40 \times 10^{10}$	$4,80 \times 10^9$
h (W/(m ² .K))	2,42	4,11	2,70
ε	0,85	0,85	0,85
$q_{\text{convecção}}$ (W)	80,22	1257,79	3052,40
$q_{\text{radiação}}$ (W)	184,67	1961,22	6370,70

Tabela B.8 - Valores das áreas correspondentes à parede lateral direita da máquina, temperatura média e restantes valores essenciais às determinações das perdas de calor.

Parâmetro	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13
A (m ²)	12,43	2,69	1,81	1,81	2,69	5,27	7,19
T_p (°C)	51,13	101,94	71,19	76,58	99,50	44,56	117,34
T_∞ (°C)	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
$T_{\text{média filme}}$ (°C)	40,57	65,97	50,59	53,29	64,75	37,28	73,67
ΔT (°C)	21,13	71,94	41,19	46,58	69,50	14,56	87,34
L (m)	1,76	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,98
μ (kg/(m.s))	$1,92 \times 10^{-5}$	$2,03 \times 10^{-5}$	$1,96 \times 10^{-5}$	$1,97 \times 10^{-5}$	$2,02 \times 10^{-5}$	$1,90 \times 10^{-5}$	$2,06 \times 10^{-5}$
ρ (kg/m ³)	1,14	1,06	1,11	1,10	1,06	1,15	1,03
cp (kJ/(kg.K))	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
k (W/(m.K))	$2,72 \times 10^{-2}$	$2,91 \times 10^{-2}$	$2,80 \times 10^{-2}$	$2,82 \times 10^{-2}$	$2,90 \times 10^{-2}$	$2,70 \times 10^{-2}$	$2,97 \times 10^{-2}$
β (1/K)	$3,19 \times 10^{-3}$	$2,95 \times 10^{-3}$	$3,09 \times 10^{-3}$	$3,06 \times 10^{-3}$	$2,96 \times 10^{-3}$	$3,22 \times 10^{-3}$	$2,88 \times 10^{-3}$
Gr	$1,28 \times 10^{10}$	$4,70 \times 10^9$	$3,32 \times 10^9$	$3,61 \times 10^9$	$4,61 \times 10^9$	$1,41 \times 10^9$	$5,80 \times 10^9$
Pr	0,71	0,70	0,71	0,71	0,70	0,71	0,70
$Gr \times Pr$	$9,05 \times 10^9$	$3,30 \times 10^9$	$2,34 \times 10^9$	$2,55 \times 10^9$	$3,24 \times 10^9$	$9,99 \times 10^9$	$4,07 \times 10^9$
h (W/(m ² .K))	3,43	6,32	4,28	4,46	6,25	3,03	6,74
ε	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
$q_{\text{convecção}}$ (W)	900,00	1223,39	318,31	375,05	1168,32	232,20	4236,10
$q_{\text{radiação}}$ (W)	1562,16	1469,41	487,52	565,83	1403,28	441,87	5125,07

Tabela B.9 - Valores das áreas correspondentes à parede lateral esquerda da máquina, temperatura média e restantes valores essenciais às determinações das perdas de calor.

Parâmetro	A7'	A8'	A9'	A10'	A11'	A12'
A (m ²)	12,43	2,69	1,81	1,81	2,69	5,27
T_p (°C)	51,13	101,94	71,19	76,58	99,50	44,56
T_∞ (°C)	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
$T_{\text{média filme}}$ (°C)	40,57	65,97	50,59	53,29	64,75	37,28
ΔT (°C)	21,13	71,94	41,19	46,58	69,50	14,56
L (m)	1,76	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
μ (kg/(m.s))	$1,92 \times 10^{-5}$	$2,03 \times 10^{-5}$	$1,96 \times 10^{-5}$	$1,97 \times 10^{-5}$	$2,02 \times 10^{-5}$	$1,90 \times 10^{-5}$
ρ (kg/m ³)	1,14	1,06	1,11	1,10	1,06	1,15
cp (kJ/(kg.K))	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
k (W/(m.K))	$2,72 \times 10^{-2}$	$2,91 \times 10^{-2}$	$2,80 \times 10^{-2}$	$2,82 \times 10^{-2}$	$2,90 \times 10^{-2}$	$2,70 \times 10^{-2}$
β (1/K)	$3,19 \times 10^{-3}$	$2,95 \times 10^{-3}$	$3,09 \times 10^{-3}$	$3,06 \times 10^{-3}$	$2,96 \times 10^{-3}$	$3,22 \times 10^{-3}$
Gr	$1,28 \times 10^{10}$	$4,70 \times 10^9$	$3,32 \times 10^9$	$3,61 \times 10^9$	$4,61 \times 10^9$	$1,41 \times 10^9$
Pr	0,71	0,70	0,71	0,71	0,70	0,71
$Gr \times Pr$	$9,05 \times 10^9$	$3,30 \times 10^9$	$2,34 \times 10^9$	$2,55 \times 10^9$	$3,24 \times 10^9$	$9,99 \times 10^8$
h (W/(m ² .K))	3,43	6,32	4,28	4,46	6,25	3,03
ε	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
$q_{\text{convecção}}$ (W)	900,00	1223,39	318,31	375,05	1168,32	232,20
$q_{\text{radiação}}$ (W)	1562,16	1469,41	487,52	565,83	1403,28	441,87

Tabela B.10 - Valores das áreas correspondentes às chapas das condutas dos ventiladores e parede superior da máquina, temperatura média e restantes valores essenciais às determinações das perdas de calor.

Parâmetro	A14	A15	A16
A (m ²)	1,16	2,22	42,85
T_p (°C)	59,63	115,30	44,91
T_∞ (°C)	30,0	30,0	30,0
$T_{\text{média filme}}$ (°C)	44,81	72,65	37,46
ΔT (°C)	29,63	85,30	14,91
L (m)	0,64	0,99	9,77
μ (kg/(m.s))	$1,93 \times 10^{-5}$	$2,06 \times 10^{-5}$	$1,90 \times 10^{-5}$
ρ (kg/m ³)	1,13	1,03	1,15
cp (kJ/(kg.K))	1,01	1,01	1,01
k (W/(m.K))	$2,75 \times 10^{-2}$	$2,96 \times 10^{-2}$	$2,70 \times 10^{-2}$
β (1/K)	$3,15 \times 10^{-3}$	$2,89 \times 10^{-3}$	$3,22 \times 10^{-3}$
Gr	$8,27 \times 10^8$	$5,84 \times 10^9$	$1,62 \times 10^{12}$
Pr	0,71	0,70	0,71
$Gr \times Pr$	$5,85 \times 10^8$	$4,09 \times 10^9$	$1,15 \times 10^{12}$
h (W/(m ² .K))	4,70	6,69	3,74
ε	0,85	0,85	0,85
$q_{\text{convecção}}$ (W)	161,76	1265,23	2391,08
$q_{\text{radiação}}$ (W)	213,31	1528,30	3688,61

Para obtenção destes valores, a dimensão característica das placas verticais corresponde à altura da placa, nas placas horizontais retangulares à média aritmética das dimensões do retângulo e nos tubos horizontais ao diâmetro externo do tubo, como descrito na referência bibliográfica consultada [15]. As paredes das superfícies são de chapa de aço sendo a sua emissividade de 0,85 e as propriedades físicas são avaliadas à temperatura média do filme.

Para simplificar a compreensão da determinação das perdas térmicas apresentou-se, de seguida, o exemplo de cálculo para a A1.

Para determinar a área da superfície teve-se em consideração que essa área se repete 4 vezes ao longo de uma das estufas e ainda que a máquina é constituída por 4 estufas, logo:

$$A_1 = 0,68 \times 0,98 \times 4 \times 4 = 10,67 \text{ m}^2$$

A temperatura média do filme é dada por:

$$T_{\text{média filme}} = \frac{T_p + T_\infty}{2} = \frac{38,45 + 30,0}{2} = 34,23 \text{ }^\circ\text{C}$$

Uma vez que se trata de uma placa vertical, a dimensão característica corresponde à altura da placa, ou seja, 0,68 metros.

Para determinação do coeficiente pelicular de transferência de calor por convecção natural foi necessário calcular o número de Grashof e de Prandtl através das seguintes equações:

$$Pr = \frac{cp \times \mu}{k} = \frac{1,01 \times 1,89 \times 10^{-5}}{2,67 \times 10^{-2} \times 10^{-3}} = 0,71$$

$$Gr = \frac{L^3 \times \rho^2 \times g \times \beta \times \Delta T}{\mu^2} = \frac{0,68^3 \times 1,16^2 \times 9,81 \times 3,25 \times 10^{-3} \times 8,45}{(1,89 \times 10^{-5})^2} = 3,23 \times 10^8$$

Assim, foi possível calcular o produto entre o número de Grashof e Prandtl:

$$Pr \times Gr = 0,71 \times 3,23 \times 10^8 = 2,29 \times 10^8$$

Com base neste valor e através de correlações empíricas para o ar a 1 atmosfera, determinou-se o valor do coeficiente pelicular de transferência de calor por convecção natural:

$$h = 1,37 \times \left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{\frac{1}{4}} = 1,37 \times \left(\frac{8,45}{0,68}\right)^{\frac{1}{4}} = 2,57 \frac{W}{\text{m}^2 \cdot K}$$

Assim, considerando que a temperatura da vizinhança corresponde à temperatura ambiente, as perdas de calor por convecção natural e radiação nesta superfície apresentam os seguintes valores:

- $q_{\text{convecção}} = h \times A \times (T_p - T_\infty) = 2,57 \times 10,67 \times (38,45 - 30,0) = 232,0 \text{ W}$

- $q_{\text{radiação}} = \varepsilon \times \sigma \times A \times (T_p^4 - T_{\text{vizinhança}}^4)$

$$\Leftrightarrow q_{\text{radiação}} = 0,85 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 10,67 \times ((38,45 + 273)^4 - (30,0 + 273)^4) = 504,3 \text{ W}$$

Anexo C – Exemplos de cálculo – Medidas de otimização energética na máquina *Single-End 1*

Nesta secção serão apresentados todos os cálculos necessários das medidas de otimização energética na máquina *Single-End 1*.

Anexo C.1 – Isolamento da máquina – Cálculos

Como já referido anteriormente, existem secções da máquina que não se encontram isoladas e que, por isso, levam a perdas de calor pelas estufas desnecessárias e, consequentemente, ao aumento do consumo de gás natural. Assim, as paredes que se devem isolar são:

- Paredes correspondentes às portas das estufas (A8 a A11 e A8' a A11');
- Chapas presentes nas condutas dos ventiladores (A15);
- Tubos (A13).

As horas de funcionamento anuais da máquina correspondem às horas de laboração anuais, excluindo as horas de manutenção:

$$t_{\text{laboração}} = t_{\text{funcionamento}} + t_{\text{manutenção}}$$

$$\Leftrightarrow t_{\text{funcionamento}} = 348 \frac{\text{dias}}{\text{ano}} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{dia}} - 10 \frac{\text{h}}{\text{semana}} \times 50 \frac{\text{semanas}}{\text{ano}}$$

$$\Leftrightarrow t_{\text{funcionamento}} = 8352 - 500 = 7852 \text{ h}$$

Ao isolar-se as paredes referidas, poderá ocorrer uma diminuição de perdas térmicas de:

$$q = (q_{\text{convecção}})_{A8 \text{ a } A11 + A8' \text{ a } A11' + A13 \text{ e } A15} + (q_{\text{radiação}})_{A8 \text{ a } A11 + A8' \text{ a } A11' + A13 \text{ e } A15}$$

$$\Leftrightarrow q = ((1,22 + 0,32 + 0,38 + 1,17) \times 2 + 4,24 + 1,27) +$$

$$((1,47 + 0,49 + 0,57 + 1,40) \times 2) + 5,13 + 1,53$$

$$\Leftrightarrow q = 26,21 \text{ kW}$$

Assim, consegue-se diminuir as perdas de calor e, consequentemente, o consumo de gás natural, que se poderá traduzir numa poupança máxima de:

$$\text{Poupança anual} = q \times t_{\text{funcionamento}} \times \text{Preço}_{\text{gás natural}}$$

$$\Leftrightarrow \text{Poupança anual} = 26,21 \times 7852 \times 0,02312 = 4758 \text{ €/ano}$$

Anexo C.2 – Redução da temperatura das estufas no tempo de paragem – Cálculos

De modo a estudar a máquina *Single-End* 1, realizaram-se diversos ensaios apresentados nas Tabelas C.1 e C.2, para os artigos N0 e H2, respetivamente.

Tabela C.1 - Valores dos consumos específicos de gás natural para diferentes números de cordas, tempos de paragem e percentagem do ar de exaustão nas estufas, para o artigo N0.

Consumo específico de gás natural (kWh/kg)	Nº de cordas	t _{paragem} (min)	% E1	% E2	% E3	% E4
2,37	107	74	51	49	47	47
2,27	105	62	50	50	47	47
2,11	105	43	50	50	47	40
2,80	104	112	50	50	45	40
2,35	103	56	50	50	47	47
2,15	102	56	50	51	48	48
2,24	101	59	50	51	48	48
2,25	102	44	50	45	47	40
2,17	105	44	50	48	47	40
2,50	105	69	50	47	47	47
2,39	103	73	50	47	40	40
2,07	103	41	50	47	40	40
2,33	104	55	50	50	47	47
2,11	105	42	50	50	47	43
2,15	103	50	50	50	45	43
2,05	103	47	50	50	44	40
2,19	107	52	50	50	46	40
2,30	103	60	50	50	44	40
2,05	101	51	50	52	40	40
2,07	101	54	48	50	40	40
2,38	108	42	47	53	40	40
2,05	107	30	47	53	40	40
2,59	106	47	47	53	45	45
2,24	106	29	47	53	45	45
2,14	106	74	50	53	45	40

Tabela C.1 - Valores dos consumos específicos de gás natural para diferentes números de cordas, tempos de paragem e percentagem do ar de exaustão nas estufas, para o artigo N0 (continuação).

Consumo específico de gás natural (kWh/kg)	Nº de cordas	t _{paragem} (min)	% E1	% E2	% E3	% E4
2,02	106	61	50	53	45	40
1,95	108	51	47	47	47	40
1,94	107	61	47	47	40	40
2,66	103	66	45	49	40	40
2,25	107	71	45	49	45	45
2,73	104	70	45	49	45	40
2,74	101	61	50	49	40	40
2,33	99	70	50	52	47	47

Tabela C.2 - Valores dos consumos específicos de gás natural para diferentes números de cordas, tempos de paragem e percentagem do ar de exaustão nas estufas, para o artigo H2.

Consumo específico de gás natural (kWh/kg)	Nº de cordas	t _{paragem} (min)	% E1	% E2	% E3	% E4
2,08	105	42	50	47	45	40
2,17	105	41	50	47	45	40
2,37	105	67	50	47	45	40
2,38	104	61	50	47	45	40
2,29	104	62	50	48	45	40
2,16	107	46	50	48	45	40
2,46	99	64	50	52	45	40
2,24	105	66	50	50	45	40
1,89	105	38	50	50	45	40
1,88	105	49	50	50	40	39
2,14	105	65	50	50	40	39
2,14	104	44	50	47	45	40
2,00	106	55	45	50	39	39
2,03	105	48	45	50	39	39
1,91	104	47	50	51	40	40
1,81	104	38	45	51	40	40

Com intuito de se determinar as poupanças anuais suscetíveis de se obter para diferentes tempos de paragem, apresentou-se o exemplo de cálculo para um tempo de paragem de 41 minutos comparativamente a 70 minutos, para o artigo N0.

O custo anual correspondente a um tempo de paragem de 41 minutos é dado por:

$$\text{Custo anual} \left(\frac{\text{€}}{\text{ano}} \right) = \text{Consumo} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right) \times \text{Preço}_{\text{gás natural}} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \times \text{Produção} \left(\frac{\text{kg}}{\text{ano}} \right)$$

$$\Leftrightarrow \text{Custo anual} = 2,07 \times 0,02312 \times 1016253 = 48636 \text{ €/ano}$$

Relativamente ao tempo de paragem de 73 minutos tem-se o valor de:

$$\text{Custo anual} \left(\frac{\text{€}}{\text{ano}} \right) = \text{Consumo} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right) \times \text{Preço}_{\text{gás natural}} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \times \text{Produção} \left(\frac{\text{kg}}{\text{ano}} \right)$$

$$\Leftrightarrow \text{Custo anual} = 2,39 \times 0,02312 \times 1016253 = 56155 \text{ €/ano}$$

Assim, obtém-se:

$$\text{Poupança anual} \left(\frac{\text{€}}{\text{ano}} \right) = 56155 - 48636 = 7519 \text{ €/ano}$$

De modo a otimizar os consumos específicos de gás natural, nos tempos de paragem, entre ciclos de produção, foi efetuado um estudo para determinar o comportamento das estufas e, dessa forma, quantificar o tempo que as mesmas demoram a atingir determinadas temperaturas.

Arranque da máquina:

Após uma das limpezas da máquina foram registadas as temperaturas de cada estufa ao longo do tempo, como demonstrado na Tabela C.3.

Tabela C.3 - Valores das temperaturas de cada estufa ao longo do tempo, no arranque.

$t_{\text{arranque}} \text{ (s)}$	$T_{\text{estufa 1}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{\text{estufa 2}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{\text{estufa 3}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{\text{estufa 4}} \text{ (}^\circ\text{C)}$
0	38	39	32	41
48	54	59	61	61
68	60	65	66	66
88	65	71	72	71
128	74	80	81	79
163	81	87	88	86
198	87	92	95	92
223	92	96	100	96
248	96	99	105	101

Com o intuito de validar-se o modelo teórico foi aplicado o balanço em estado não estacionário à estufa 4, como apresentado seguidamente:

$$\int_0^t dt = \int_{T_i}^{T_f} \frac{\rho_{\text{ar}} \times V_{\text{estufa}} \times cv + V_{\text{chapa de aço}} \times cp_{\text{chapa de aço}} \times \rho_{\text{chapa de aço}}}{-\dot{m}_{\text{gases de exaustão}} \times cp \times (T - 25) - \dot{V}_{\text{gás natural consumido}} \times fc \times (-PCI)} \times dT$$

A realização deste ensaio experimental de arranque da máquina teve como condições de operação na estufa 4:

- Consumo de gás natural igual a 20,94 m³/h no aquecimento entre 41 °C e 101 °C;
- Percentagem do ar de exaustão de 43 %.

Uma vez que as estufas apresentam isolamentos de lã de rocha e chapa de aço num valor de 153 mm, o volume interior de cada estufa é dado por:

$$V_{\text{estufa}} = (17,03 - 2 \times 0,153) \times (1,828 - 2 \times 0,153) \times (2,516 - 2 \times 0,153) = 56,25 \text{ m}^3$$

Como já referido, para além de se aquecer o ar que se encontra no interior das estufas é necessário aquecer a chapa de aço do interior das estufas que apresenta uma espessura de 2 mm, sendo que o seu volume foi calculado pela seguinte expressão:

$$V_{\text{chapa de aço}} = [(17,03 - 2 \times 0,151) \times (1,828 - 2 \times 0,151) \times (2,516 - 2 \times 0,151)] - 56,25$$

$$\Leftrightarrow V_{\text{chapa de aço}} = 0,263 \text{ m}^3$$

O calor específico a volume constante é dado por:

$$c_p - c_v = R \Leftrightarrow c_v = 1009 - 287,7 = 721,3 \frac{J}{kg \cdot K}$$

Para integrar o balanço de energia, de maneira a ser válida na gama de temperatura estudada, foi necessário fazer a seguinte correção:

$$\dot{V}_{gás\ natural\ consumido} = \frac{\dot{V}_{gás\ natural}}{60} \times \Delta T$$

O ΔT foi considerado, para efeitos de integração, igual a $(T-25)$.

Assim:

$$t_{arranque} = \int_{41}^{101} \frac{1,025 \times 56,25 \times 721,3 + 0,263 \times 450 \times 7860}{-0,43 \times \frac{15000}{3600} \times 1,025 \times 1009 \times (T - 25) - \frac{20,94}{60} \times (T - 25) \times 1,8852 \times (-10,755) \times 1000} \times dT$$

$$\Leftrightarrow t_{arranque} = 186,1 \times \ln\left(\frac{(101 - 25)}{(41 - 25)}\right) = 290\ s$$

De modo a compararem-se os tempos obtidos experimentalmente e teoricamente, para a estufa 4, representaram-se os respetivos valores na Tabela C.4.

Tabela C.4 - Valores dos tempos experimentais e teóricos para diferentes temperaturas, no arranque da estufa 4.

$T_{estufa\ 4}$ (°C)	$t_{experimental}$ (s)	$t_{teórico}$ (s)
41	0	0
61	48	151
66	68	175
71	88	196
79	128	226
86	163	249
92	198	266
96	223	277
101	248	290

Tempo de arrefecimento:

Nos tempos de paragem, entre ciclos de produção, inicialmente, os operadores reduzem a temperatura das estufas para um determinado valor de *set-point*, com vista a reduzir o consumo específico de gás natural. Para estudar o comportamento das estufas, registou-se na Tabela C.5 a diminuição da temperatura das estufas ao longo do tempo. É de referir que neste ensaio a temperatura da estufa 1 não foi alterada e, por isso, não se registou valores da mesma.

Tabela C.5 - Valores das temperaturas de cada estufa ao longo do tempo, no tempo de arrefecimento.

$t_{\text{arrefecimento}}$ (s)	$T_{\text{estufa 2}}$ (°C)	$T_{\text{estufa 3}}$ (°C)	$T_{\text{estufa 4}}$ (°C)
0	223	217	225
30	221	215	223
60	220	213	222
90	218	211	220
150	216	209	217

Para se determinar o tempo de arrefecimento teórico, dependendo da temperatura de *set-point*, aplicou-se novamente o balanço de energia em estado não estacionário. A realização deste ensaio de arrefecimento da máquina apresentou uma percentagem do ar de exaustão de 100 %. Assim para as estufas 2, 3 e 4 e uma temperatura de *set-point* de 100 °C:

$$\int_0^t dt = \int_{245}^{100} \frac{\rho_{\text{ar}} \times V_{\text{estufa}} \times cv + V_{\text{chapa de aço}} \times cp_{\text{chapa de aço}} \times \rho_{\text{chapa de aço}}}{q - \dot{m}_{\text{gases de exaustão}} \times cp \times (T - 25)} \times dT$$

$$t_{\text{arrefecimento}} = \int_{245}^{100} \frac{0,745 \times 56,25 \times 737,3 + 0,263 \times 450 \times 7860}{-\frac{56,16}{4} \times 1000 - 1 \times \frac{15000}{3600} \times 0,745 \times 1025 \times (T - 25)} \times dT$$

$$\Leftrightarrow t_{\text{arrefecimento}} = -302,1 \times \ln \left(\frac{3182 \times (100 - 25) + 14,04 \times 10^3}{3182 \times (245 - 25) + 14,04 \times 10^3} \right)$$

Com o fator de segurança de 25 %:

$$t_{\text{arrefecimento}} = -302,1 \times \ln \left(\frac{3182 \times (100 - 25) + 14,04 \times 10^3}{3182 \times (245 - 25) + 14,04 \times 10^3} \right) \times 1,25 = 392 \text{ s}$$

Tempo de aquecimento:

Após estarem reunidas as condições necessárias para nova produção, os operadores elevam a temperatura de *set-point* até à temperatura de operação. Os valores experimentais do aumento da temperatura das estufas até à temperatura de operação, ao longo do tempo, encontram-se na Tabela C.6.

Tabela C.6 - Valores das temperaturas das estufas ao longo do tempo, durante o aquecimento.

$t_{\text{aquecimento}} \text{ (s)}$	$T_{\text{estufas}} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$
0	41
48	61
68	66
88	71
128	79
163	86
283	116
323	131
358	138
413	149
696	223
734	227
761	230
793	233
829	237
877	240
918	241

De acordo com a equação de ajuste dos pontos experimentais (Equação 7.7), foi possível quantificar o tempo que as estufas necessitam para aumentar a temperatura desde o valor de *set-point* até à temperatura de operação de 245 °C.

Seguidamente, apresenta-se o exemplo de cálculo do tempo de aquecimento para uma temperatura de *set-point* de 100 °C.

- $100 = -8,99 \times 10^{-5} \times t_{aquecimento}^2 + 0,309 \times t_{aquecimento} + 41,8$
 $\Leftrightarrow t_{aquecimento} = 200 \text{ s}$
- $245 = -8,99 \times 10^{-5} \times t_{aquecimento}^2 + 0,309 \times t_{aquecimento} + 41,8$
 $\Leftrightarrow t_{aquecimento} = 886 \text{ s}$

Assim, o tempo que as estufas demoram no aumento até à temperatura de operação (245 °C), a partir da temperatura de *set-point* de 100 °C, apresenta o valor de:

$$t_{aquecimento} = 886 - 200 = 686 \text{ s}$$

Anexo C.3 – Instalação do sistema EcoVac – Cálculos

Alguns dados apresentados no subcapítulo 7.3 foram baseados nos valores apresentados no Anexo C.2. Para se obter as possíveis poupanças anuais entre operar nas condições de percentagem do ar de exaustão atuais e nas condições otimizadas, apresentou-se o exemplo de cálculo para o artigo N0.

Dessa forma, o custo anual correspondente às condições atuais é dado por:

$$\text{Custo anual} \left(\frac{\text{€}}{\text{ano}} \right) = \text{Consumo} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right) \times \text{Preço}_{\text{gás natural}} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \times \text{Produção} \left(\frac{\text{kg}}{\text{ano}} \right)$$

$$\Leftrightarrow \text{Custo anual} = 2,29 \times 0,02312 \times 1016253 = 53805 \text{ €/ano}$$

Relativamente às condições otimizadas tem-se o valor de:

$$\text{Custo anual} \left(\frac{\text{€}}{\text{ano}} \right) = \text{Consumo} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right) \times \text{Preço}_{\text{gás natural}} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \times \text{Produção} \left(\frac{\text{kg}}{\text{ano}} \right)$$

$$\Leftrightarrow \text{Custo anual} = 2,10 \times 0,02312 \times 1016253 = 49341 \text{ €/ano}$$

Assim, obtém-se:

$$\text{Poupança anual} \left(\frac{\text{€}}{\text{ano}} \right) = 53805 - 49341 = 4464 \text{ €/ano}$$

Uma vez que a poupança anual que se poderá obter com a implementação do sistema EcoVac é de 7658 € e como o custo de investimento apresenta o valor de 35000 €, o retorno de investimento apresenta o valor de:

$$\text{Retorno de investimento} = \frac{\text{Custo de investimento (€)}}{\text{Poupança anual (€/ano)}} = \frac{35000}{7658} = 4,6 \text{ anos}$$

Para a obtenção dos indicadores energéticos, apresentou-se o exemplo de cálculo para o artigo N0 nas condições atuais, sendo que na determinação dos mesmos é necessário ter em conta as diversas formas de energia consumidas pela empresa (maioritariamente gás natural e energia elétrica).

Inicialmente foi necessário converter as unidades tep/ton em tep/kWh de gás natural, através da seguinte expressão:

$$1,077 \frac{\text{tep}}{\text{ton}} \times \frac{\text{ton}}{1000 \text{ kg}} \times 0,814 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1}{11,76 \text{ kWh}} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 7,45 \times 10^{-5} \frac{\text{tep}}{\text{kWh}}$$

Assim, o consumo específico de energia é dado por:

$$CEE = \frac{\text{Consumo total de energia (tep)}}{\text{Volume de produção (kg)}}$$

$$\Leftrightarrow CEE = 2,29 \times 7,45 \times 10^{-5} + 0,311 \times 2,15 \times 10^{-4}$$

$$\Leftrightarrow CEE = 1,77 \times 10^{-4} \frac{\text{tep}}{\text{kg}}$$

E a intensidade carbónica é dada por:

$$IC = \frac{\text{Emissões gases de efeito de estufa (tCO}_2\text{e)}}{\text{Consumo total de energia (tep)}}$$

$$\Leftrightarrow IC = \frac{2,29 \times 1016253 \times 7,45 \times 10^{-5} \times 2,684 + 0,311 \times 1016253 \times 2,15 \times 10^{-4} \times 2,186}{2,29 \times 7,45 \times 10^{-5} \times 1016253 + 0,311 \times 2,15 \times 10^{-4} \times 1016253}$$

$$\Leftrightarrow IC = 2,665 \frac{\text{tCO}_2\text{e}}{\text{tep}}$$

Anexo C.4 – Aproveitamento energético dos gases de exaustão – Cálculos

Nesta secção apresentam-se os cálculos das poupanças que serão possíveis obter com o aquecimento da corrente de ar fresco a partir dos gases de exaustão, tendo por base o aumento do diâmetro do tubo por onde o ar fresco aquecido poderá entrar para a máquina.

Como referido anteriormente o ar fresco, atualmente, entra pelas aberturas de entrada e saída das cordas, sendo que existe um tubo pelo qual se pretende alimentar ar fresco, aquecido num permutador através dos gases de exaustão, para o interior das estufas.

De modo a determinar-se a percentagem de ar fresco que entra pelo tubo, atualmente, mediu-se nas diferentes estufas, com auxílio de um anemómetro de turbina, a velocidade de admissão do ar, sendo que na Tabela C.7 se apresentam os respetivos valores médios, bem como os valores do caudal volumétrico, tendo em conta que o tubo apresenta 95 mm de diâmetro.

Tabela C.7 - Valores das velocidades médias, nas diferentes estufas, e dos respetivos caudais volumétricos.

Estufas	$v_{ar\ no\ tubo}$ (m/s)	A_{tubo} (m ²)	$\dot{V}_{ar\ no\ tubo}$ (m ³ /s)
1	21,3	0,00709	0,151
2	18,9		0,134
3	15,8		0,112
4	18,2		0,129
Total			0,526

Para determinar o caudal mássico do ar que entra pelo tubo, e tendo em conta a massa volúmica (1,163 kg/m³ para 30 °C), utilizou-se a seguinte expressão:

$$\dot{m}_{ar\ no\ tubo} = \dot{V}_{ar\ no\ tubo} \times \rho_{ar\ no\ tubo} = 0,526 \times 1,163 = 0,612\ kg/s$$

Assim a percentagem de ar fresco que entra pelo tubo apresenta o valor de:

$$\%_{ar\ no\ tubo} = \frac{\dot{m}_{ar\ no\ tubo}}{\dot{m}_{ar\ fresco\ total}} \times 100 = \frac{0,612}{3,41} \times 100 = 18\ \%$$

Uma vez que o objetivo é aquecer o ar que entra pelo tubo, quanto maior o seu caudal, mais vantajosa se torna a medida de aquecimento de ar fresco. Nesse sentido, determinou-se o diâmetro que o tubo teria de apresentar caso se alimentasse 50 %, 60 % ou 70 % do caudal mássico de ar fresco total, sendo que de seguida se apresenta o exemplo de cálculo para 50 % do caudal de ar fresco total.

Assim:

$$\dot{m}_{ar\ no\ tubo} = 0,5 \times \dot{m}_{ar\ fresco\ total} = 0,5 \times 3,41 = 1,71\ kg/s$$

Através da massa volúmica determinou-se o caudal volumétrico:

$$\dot{V}_{ar\ no\ tubo} = \frac{\dot{m}_{ar\ no\ tubo}}{\rho_{ar\ no\ tubo}} = \frac{1,71}{1,163} = 1,47\ m^3/s$$

Dado que este caudal volumétrico corresponde ao total das 4 estufas, o caudal volumétrico por estufa apresenta o valor de $0,367\ m^3/s$. Experimentalmente, a média das velocidades das 4 estufas apresentou o valor de $18,5\ m/s$, sendo que para se determinar o novo diâmetro recorreu-se à seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ar\ no\ tubo\ por\ estufa} &= \bar{v}_{ar\ no\ tubo} \times \pi \times \frac{d_{tubo}^2}{4} \\ \Leftrightarrow 0,367 &= 18,5 \times \pi \times \frac{d_{tubo}^2}{4} \\ \Leftrightarrow d_{tubo} &= 0,16\ m \end{aligned}$$

Para cada percentagem de caudal de ar fresco aquecido determinou-se o consumo de gás natural, caso o ar fresco fosse admitido à temperatura de $40\ ^\circ C$, $50\ ^\circ C$ e $60\ ^\circ C$. O exemplo de cálculo que se segue refere-se à temperatura de $40\ ^\circ C$.

Para se determinar o consumo de gás natural, recorreu-se ao balanço de energia apresentado no capítulo 6, sendo que as diferenças são:

- Corrente de ar fresco dividida em 2 – ar fresco que entra pelas aberturas das entradas e saídas de cordas e ar fresco aquecido que entra pelo tubo;
- As entalpias correspondentes à corrente de gás natural e ao calor de reação têm como incógnita o consumo de gás natural.

Dessa forma, a entalpia da corrente de ar fresco aquecido que entra pelo tubo é dada por:

$$\begin{aligned} H_{ar\ no\ tubo} &= \dot{m}_{ar\ seco\ no\ tubo} \times [\Delta H_{vaporização} \times Y_{e,ar\ fresco} + \\ &\quad (0,24 + 0,45 \times Y_{e,ar\ fresco}) \times 4,18 \times (T_{ar\ no\ tubo} - 25,0)] \\ \Leftrightarrow H_{ar\ tubo} &= \frac{1,71}{1 + 0,0108} \times [2442,5 \times 0,0108 + (0,24 + 0,45 \times 0,0108) \times \\ &\quad 4,18 \times (40,0 - 25,0)] \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow H_{ar \text{ no tubo}} = 70,47 \text{ kW}$$

E a entalpia da corrente de ar fresco que entra pelas aberturas de entradas e saídas das cordas é dada por:

$$\begin{aligned}
 H_{ar \text{ nas aberturas}} &= \dot{m}_{ar \text{ seco nas aberturas}} \times [\Delta H_{\text{vaporização}} \times Y_{e,ar \text{ fresco}} + \\
 &\quad (0,24 + 0,45 \times Y_{e,ar \text{ fresco}}) \times 4,18 \times (T_{ar \text{ nas aberturas}} - 25,0)] \\
 \Leftrightarrow H_{ar \text{ nas aberturas}} &= \frac{3,41 - 1,71}{1 + 0,0108} \times [2442,5 \times 0,0108 + (0,24 + 0,45 \times 0,0108) \times \\
 &\quad 4,18 \times (30,0 - 25,0)] \\
 \Leftrightarrow H_{ar \text{ nas aberturas}} &= 53,19 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Recorrendo ao balanço de energia:

$$\begin{aligned}
 q - \sum H_{saída} - \Delta H_{298}^0 + \sum H_{entrada} &= 0 \\
 \Leftrightarrow -56,16 - 48,31 - 759,64 - (-11,76 \times 1,8854 \times 3600 \times \dot{V}_{gás \text{ natural}}) + 0,497 + \\
 0,183 + 70,47 + 53,19 + \dot{V}_{gás \text{ natural}} \times 0,814 \times 1,8854 \times 2,07 \times (23,74 - 25,0) + 17,44 &= 0 \\
 \Leftrightarrow \dot{V}_{gás \text{ natural}} &= 0,00905 \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

Para determinar o respetivo custo anual, foi necessário determinar, previamente, as horas de funcionamento da máquina, sendo que apenas se pretende realizar este aproveitamento da entalpia dos gases de exaustão quando operam os artigos que utilizam as 4 estufas (N0 e H2):

$$\begin{aligned}
 t_{\text{laboração}} &= t_{N0+H2} + t_{\text{manutenção}} + t_{H1} \\
 \Leftrightarrow t_{N0+H2} &= 348 \frac{\text{dias}}{\text{ano}} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{dia}} - 10 \frac{\text{h}}{\text{semana}} \times 50 \frac{\text{semanas}}{\text{ano}} \\
 &\quad - 0,077 \times 348 \frac{\text{dias}}{\text{ano}} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{dia}} - 10 \frac{\text{h}}{\text{semana}} \times 50 \frac{\text{semanas}}{\text{ano}} \\
 \Leftrightarrow t_{N0+H2} &= 8352 - 500 - 605 = 7247 \text{ h}
 \end{aligned}$$

Assim:

$$Custo \text{ anual} = \dot{V}_{gás \text{ natural}} \times fc \times PCS \times t_{N0+H2} \times Preço_{gás \text{ natural}}$$

$$\Leftrightarrow \text{Custo anual} = 0,00905 \times 3600 \times 1,8854 \times 11,76 \times 7247 \times 0,02312$$

$$\Leftrightarrow \text{Custo anual} = 120957 \text{ €/ano}$$

Sem aquecimento do ar fresco o custo anual é de:

$$\text{Custo anual} = \dot{V}_{\text{gás natural}} \times fc \times PCS \times t_{N_0+H_2} \times \text{Preço}_{\text{gás natural}}$$

$$\Leftrightarrow \text{Custo anual} = 0,00926 \times 3600 \times 1,8854 \times 11,76 \times 7247 \times 0,02312$$

$$\Leftrightarrow \text{Custo anual} = 123866 \text{ €/ano}$$

Logo a poupança anual é dada por:

$$\text{Poupança anual} = 123866 - 120957 = 2908 \text{ €/ano}$$

Anexo C.5 – Iluminação da máquina – Cálculos

Uma vez que no tempo de funcionamento da máquina (7852 horas anuais) existem algumas lâmpadas que estão ligadas desnecessariamente, e apenas são fundamentais quando se faz limpeza e manutenção da máquina, calculou-se a poupança anual que seria possível obter se fossem desligadas.

Assim, fez-se um levantamento do número de lâmpadas e respetiva potência elétrica, obtendo-se o seguinte valor:

$$\text{Potência} = 2 \times 49 + 1 \times 36 + 2 \times 25 + 1 \times 56 = 950 \text{ W}$$

A poupança anual poderá ser então:

$$\text{Poupança anual} = \text{Potência} \times t_{\text{funcionamento}} \times \text{Preço}_{\text{eletricidade}}$$

$$\Leftrightarrow \text{Poupança anual} = 0,95 \times 7852 \times 0,087 = 649 \text{ €/ano}$$