



Análise do processo de secagem na estufa 1 e otimização do consumo de gás natural

JOÃO JOSÉ MARTINS MACHADO AZEVEDO

Outubro de 2022

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

Mestrado em Engenharia Química – Energia e Biorrefinaria

Dissertação de mestrado

2ºano – 2ºsemestre

Análise do processo de secagem na estufa 1 e otimização do consumo de gás natural

Aluno:

João José Azevedo

Orientadora do ISEP:

Eng^a Maria Paula Neto

Orientador da empresa:

Eng^o Rafael Castro

Agradecimentos

Ao longo da realização deste trabalho foram surgindo dúvidas, dificuldades e alguns barreiras que foram ultrapassados com ajuda. Gostaria de deixar aqui o meu sincero reconhecimento a todas as pessoas que de alguma forma colaboraram para a conclusão deste projeto.

Quero agradecer aos meus orientadores, Eng.^a Paula Neto e Eng.^o Rafael Castro, por conseguirem que realizasse esta dissertação em ambiente industrial, e também pelo apoio e ajuda ao longo destes meses para que pudesse ter melhor experiência possível.

Gostaria de agradecer a todos os meus colegas do departamento de Engenharia da Continental- Indústria Têxtil do Ave pelo carinho e os conselhos dados como também ajuda para realizar esta tese.

Quero agradecer a todos os meus professores e Engenheiros do Instituto Superior de Engenharia do Porto por estes 5 anos incríveis e por tudo que me ensinaram para que pudesse chegar onde estou.

Gostava de agradecer a todos os meus amigos que acompanharam me nestes 5 anos fantásticos e que tiveram sempre uma mão amiga para que pudesse estar sempre no meu melhor.

O meu agradecimento muito especial aos meus pais, que sempre me ofereceram uma boa educação, me incentivaram a ser melhor e a fazer o melhor em todos os projetos que abracei ao longo da minha vida académica e pessoal.

Por fim, queria dedicar este trabalho aos meus avós, um amor incondicional que todos os dias tenho uma saudade imensa.

Resumo

Esta dissertação realizou-se na empresa Continental-Indústria Têxtil do Ave, S.A. e teve como principal objetivo a melhoria do processo de secagem da tela, que ocorre na estufa 1 da máquina de impregnação de tela, ZELL, e consequentemente a otimização do consumo de gás natural nesta máquina.

Deste modo, foi feito um levantamento prévio das condições de operação da estufa, como: temperatura de operação, percentagem de ventilação e de exaustão, para as telas com mais representatividade na produção da empresa, dois artigos de Nylon e dois de Poliéster.

Com base nos valores obtidos, propôs-se a alteração da ventilação da estufa 1 com intuito de uniformizar a temperatura no interior da estufa e assim promover um aumento da taxa de secagem. Deste modo, seria possível diminuir a exaustão da estufa seguinte, com intuito de diminuir o consumo de gás natural e contribuir para uma maior poupança energética.

As alterações efetuadas permitiram obter uma poupança anual de 4,2% para o artigo N1 e de 7,4 % para o artigo N2. Relativamente aos artigos de poliéster, conseguiu-se obter uma poupança de 12 % para o artigo P2.

Analisou-se também a possibilidade de um pré aquecimento da solução de impregnação da tela usando os gases quentes de exaustão. Obteve-se uma poupança de gás natural de 2,5%.

A proposta de instalação de painéis radiantes no interior da estufa 1 para promover a secagem da tela através de radiação foi apenas analisada numa perspetiva de alternativa energética.

Abstract

This dissertation took place at Continental-Indústria Têxtil do Ave, S.A. and its main objective was to improve the fabric drying process, which takes place in drying oven nº1 of the fabric impregnation machine, ZELL, and consequently to optimize the consumption of natural gas in this machine.

In this way, a preliminary survey of the operating conditions of the drying oven was carried out, such as: operating temperature, ventilation and exhaustion percentage, for the products with the most representativeness in the company's production, two articles of Nylon and two of Polyester.

Based on the values obtained, it was proposed to change the ventilation of drying oven nº1 in order to standardize the temperature inside the drying oven and thus promote an increase in the drying rate. In this way, it would be possible to reduce the exhaustion of the next drying oven, in order to reduce the consumption of natural gas and contribute to greater energy savings.

The changes made allowed for annual savings of 4.2% for article N1 and 7.4% for article N2. For polyester articles, a saving of 12% was achieved for article P2.

The possibility of preheating the fabric impregnation solution using the hot exhaust gases was also analysed. A natural gas saving of 2.5% was obtained.

The proposal to install radiant panels inside the greenhouse 1 to promote the drying of the screen through radiation was only analysed from an energy alternative perspective.

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Continental ITA.....	1
1.2	Enquadramento do trabalho.....	3
1.3.	Auditoria energética.....	5
1.5	Objetivos e organização da tese.....	8
2	Processo Produtivo	9
2.1	Materiais têxteis	9
2.2	Processo produtivo da C-ITA	14
3	Máquina de impregnação da tela, ZELL.....	17
3.1	Componentes principais da máquina de impregnação	18
3.2	Caraterização da estufa 1.....	23
3.3	Utilidades energéticas	24
4	Levantamento energético.....	25
4.1	Produção anual da ZELL.....	25
4.2	Consumo energético.....	25
4.3	Gás natural.....	27
4.5	Energia elétrica	28
5.	Balanços de massa e de energia.....	30
5.1	Balanço de massa à água	30
5.2	Balanço de energia à estufa 1.....	37
5.2.1	Potência térmica das correntes de saída.....	38
5.2.2.	Potência térmica das correntes de entrada	39
6.	Estufa 1- Análise das condições operatórias.....	43
6.1	Caracterização dos artigos a analisar e condições operatórias.....	43
6.2	Caraterização da ventilação	44
6.3	Variação da temperatura na estufa.....	47
7.	Medidas de otimização da secagem da estufa e do consumo de gás natural	49
7.1	Alteração da Ventilação para artigos Nylon	51
7.2	Alteração da Ventilação para artigos Poliésteres.....	55
7.3	Apreciação Global da proposta da ventilação	59
7.4	Aquecimento da solução de impregnação	61
7.3.	Painéis Radiantes.....	63
8.	Conclusões finais e sugestões de trabalho futuros.....	64

Bibliografia.....	66
Anexos.....	68
Anexos A- Registo dos Valores do levantamento energético da empresa.....	68
Anexo B- Propriedades físicas e análise dos gases de exaustão	73
B.1 Propriedades e caracterização do gás natural	73
B.2 Propriedades do ar	74
B.3 Solução de impregnação.....	74
B.4 Análises dos gases de exaustão	75
Anexo C- Exemplos de cálculos. Balanço de massa e energia	76
C.1. Balanço de Massa	76
C.1.1. Ar de combustão.....	76
C.1.2. Ar fresco.....	79
C.1.3. Tela verde e DIP	81
C.1.4. Formação de água na queima de gás natural.....	85
C.1.5. Caudal de água nos gases de exaustão.....	86
C.2- Balanço de Energia	88
C.2.1 Potencia térmica das correntes de saída	88
C.2. Potência térmica das correntes de entrada	89
C.3. Perdas térmicas	93
Anexo D- Caracterização da estufa 1.	94
Anexo E- Temperatura na estufa 1 e consumo de gás natural	95
Anexo E.1 Alteração da Ventilação- medição da temperatura	95
Anexo E.2.- Caudal de Gás natural na estufa 1 em função da ventilação	96
Anexo E.3.- Caudal de Gás natural na estufa 2 para diferentes exaustões.....	98
Anexo E.4 – Aquecimento da solução- cálculo do consumo de gás.....	100

Índices de Figuras

Figura 1. 1 Industria Têxtil do Ave nos anos 60.....	2
Figura 1. 2: ITA nos anos 90	3
Figura 1. 3 Máquina de impregnar tela para pneus- ZELL da ITA	4
Figura 1. 4 Metodologia de uma auditoria energética	5
Figura 1. 5 Esquema de instalação de um ARCE	7
Figura 2. 1 Processo produtivo da C-ITA	9
Figura 2. 2: Síntese da Aramida (Rodrigues, 2017)	10
Figura 2. 3 Reação de síntese de Nylon 6,6 (Rodrigues, 2017)	11
Figura 2. 4 Reação de Polimerização do Nylon 6 (Rodrigues, 2017).....	11
Figura 2. 5 Síntese de fibras de rayon (Rodrigues, 2017).....	12
Figura 2. 6 Síntese da fibra de poliéster PET (Rodrigues, 2017)	13
Figura 2. 7: Tricotagem em teia (esquerda) e tricotagem em trama (direita) (Pais, 2017)	14
Figura 2. 8: Representação esquemática da máquina de impregnar Single End 1 (Torrinha, 2011)	15
Figura 3. 1 Representação da máquina ZELL (Torrinha, 2011).....	17
Figura 3. 2 Queimadores da Estufas 1.....	18
Figura 3. 3 Ventiladores e exaustor da Estufa 1.....	18
Figura 3. 4 Tampas das estufas	19
Figura 3. 5 Grupo Trator.....	19
Figura 3. 6 Enrolamento da tela	20
Figura 3. 7 Acumulador	20
Figura 3. 8 Interior da Tina de solução.....	21
Figura 3. 9 Esquema de escoamento de rolos com duas extremidades (Maia, 2014)	22
Figura 3. 10 Esquema de escoamento de rolos com única extremidade (Maia, 2014)	22
Figura 3. 11 Esquema da Estufa 1	23
Figura 4. 1 Distribuição mensal de gás natural em tep	27
Figura 4. 2 Distribuição do consumo de gás natural de uso industrial	28
Figura 4. 3 Distribuição mensal do consumo de energia elétrica	28
Figura 4. 4 Distribuição percentual de energia elétrica de unidade fabril.....	29
Figura 5. 1 Identificação das correntes de entrada e saída da estufa 1.....	30
Figura 5. 2 Anemómetro Testo 480	31
Figura 5. 3 Medidor de Humidade e temperatura Fluke 971	31
Figura 5. 4 Esquema esquemático da grelha dos queimadores da estufa 1.....	32
Figura 5. 5 Leituras realizadas pelo INEGI em 2019 aos gases de exaustão	35
Figura 6. 1 Esquema da estufa 1 da ZELL	44
Figura 6. 2 Velocidade de injeção de ar a 30% da capacidade máxima dos ventiladores e posição das FLAPs.....	45

Figura 6. 3 Velocidade de injeção de ar a 50% da capacidade máxima dos ventiladores e posição das FLAPs.....	45
Figura 6. 4 Velocidade de injeção de ar em função da posição da FLAPs e percentagem de ventilação	46
Figura 6. 5 Localização das PT100 ao longo da estufa 1	47
Figura 6. 6 Distribuição da temperatura ao longo da estufa nas condições operatórias atuais. 48	
Figura 7. 1 Temperatura registada para artigo N1 em função da alteração da ventilação, $T_{SP} = 160^{\circ}\text{C}$	51
Figura 7. 2 Temperatura registada para artigo N2 em função da alteração ventilação, $TSP = 155^{\circ}\text{C}$	52
Figura 7. 3 Custos anuais na estufa 2 para o artigo N1	54
Figura 7. 4 Custos anuais na estufa 2 para o artigo N2	54
Figura 7. 5 Temperatura registada para artigo P1 em função da alteração ventilação.....	55
Figura 7. 4 Temperatura registada para artigo P2 em função da alteração da ventilação	56
Figura 7. 7 Custos anuais da estufa 2 do artigo P1 consoante a ventilação	57
Figura 7. 8 Custos anuais da estufa 2 do artigo P1 consoante a ventilação	58
Figura B. 1 Composição dos gases de exaustão	75
Figura C. 1 Localização dos pontos de medição de ar fresco	79

Índice de Tabelas

Tabela 1. 1 Metas Relativas do PREn	6
Tabela 4. 1 Quantidade produzida dos vários artigos da máquina ZELL.....	25
Tabela 4. 2 Fatores de conversão de energia e fatores de emissão segundo SCGIE (Pilão, 2021)	25
Tabela 4. 3: Consumo energético anual de 2021 e média mensal da empresa e da ZELL em tep	26
Tabela 4. 4: Emissões de gases de efeitos de estufa para consumo de gás natural e energia elétrica no ano de 2021 em tCO ₂ e	26
Tabela 4. 5: Custo energético anual de 2021	26
Tabela 5. 1 Valores médios do ar na entrada dos queimadores das estufas para diferentes artigos	32
Tabela 5. 2 Caudais mássicos de ar admitido nos queimadores da estufa 1	32
Tabela 5. 3 Caudais mássicos de ar seco e água que entram nos queimadores da estufa 1.....	33
Tabela 5. 4 Velocidade média da entrada de ar fresco na estufa.....	33
Tabela 5. 5 Caudais mássicos de ar fresco para cada artigo	33
Tabela 5. 6 Massa de água por metro de tela e caudal de água arrastado pela tela	34
Tabela 5. 7 Consumo de gás natural e caudal de água de reação	35
Tabela 5. 8 Caudais mássicos dos gases de exaustão	36
Tabela 5. 9 Percentagens de evaporação para cada artigo	36
Tabela 5. 10 Potência térmica da tela para artigos.....	38
Tabela 5. 11 Potência térmica de saída.....	38
Tabela 5. 12 Potência térmica do gás natural para cada artigo.....	39
Tabela 5. 13 Potência térmica do ar de combustão.....	40
Tabela 5. 14 Potência térmica do ar fresco.....	40
Tabela 5. 15 Potência térmica de entrada	41
Tabela 5. 16 Perdas térmicas na estufa 1	41
Tabela 6. 1 Composição dos artigos N1, N2, P1 e P2 e respetivas velocidades de produção	43
Tabela 6. 2 Condições operatórias atuais na estufa 1da ZELL	43
Tabela 7. 1 Energia específica e custo gás natural na estufa 1 com alterações de ventilação para artigos de Nylon	52
Tabela 7. 2 Potência de gás natural na estufa 2-exaustão a 40%- com alterações de ventilação na estufa 1 para artigos de Nylon	53
Tabela 7. 3 Potência de gás natural na estufa 2 com alterações tanto na ventilação da estufa 1 como na exaustão para artigos de Nylon.....	53
Tabela 7. 4 Potência de gás natural na estufa 1 com alterações de ventilação para artigos de Poliéster	56
Tabela 7. 5 Potência de gás natural na estufa 2 com alterações de ventilação na estufa 1 para artigos de Poliésteres.....	57

Tabela 7. 6 Custo anual consoante as alterações da ventilação e exaustão do Nylon	59
Tabela 7. 7 Custo anual consoante as alterações da ventilação dos artigos Poliésteres.....	59
Tabela 7. 8 Potência térmica da solução DIP pré aquecida a 60°C, 65°C e 70 °C	61
Tabela 7. 9 Temperatura dos gases de exaustão à de saída do permutador	61
Tabela 7. 10 Caudal volumétrico do gás natural.....	62
Tabela 7. 11 Poupança associado ao aquecimento da solução de impregnação	62
Tabela 7. 12 Comparação dos custos nos painéis radiantes a diferentes potências	63
Tabela A. 1 Produção mensal dos artigos estudados em kg	68
Tabela A. 2 Consumo energético mensal C-ITA	68
Tabela A. 3 Toneladas equivalentes de Dióxido de carbono mensais por fontes de energia.....	69
Tabela A. 4: Custos mensais associados às fontes de energia	70
Tabela A. 5 Consumos mensais de cada unidade fabril.....	70
Tabela A. 6 Levantamentos energéticos mensais associado aos PMRs.....	71
Tabela A. 7.Custos associados aos PRMs	71
Tabela A. 8. Valores associados aos consumos de Gás natural	72
Tabela A. 9 Consumos e custos associados à energia elétrica.....	72
Tabela B. 1 Composição molar do Gás natural em % molar e calor específico	73
Tabela B. 2 Dados relativos ao Poder calorífico do gás natural em condições PTN	73
Tabela B. 3 Propriedades dos gás natural	73
Tabela B. 4 Componentes do ar atmosférico	74
Tabela B. 5 Propriedades do ar atmosférico	74
Tabela B. 6 Composição da solução de ativação do Poliéster	74
Tabela B. 7 Composição de cada componente na solução de impregnação da máquina ZELL..	75
Tabela C. 1 Dimensões características da grelha de admissão de ar da estufa 1.....	76
Tabela C. 2 Valores médios da humidade relativa do ar de combustão dos diferentes artigos.	77
Tabela C. 3 Dimensões da seção da entrada e saída da tela da estufa 1.....	79
Tabela C. 4 Velocidade médias de ar fresco na região de entrada e saída da tela.....	79
Tabela C. 5 Caudais volumétricos e mássicos de ar fresco	80
Tabela C. 6 Valores de humidade relativa e específica e caudais mássicos de ar seco e água...	80
Tabela C. 7 Parâmetros do N1.....	81
Tabela C. 8 Parâmetros do N2.....	81
Tabela C. 9 Parâmetros do P1	82
Tabela C. 10 Parâmetros do P2	82
Tabela C. 11 Velocidade da tela e caudal mássico da tela	83
Tabela C. 12 Quantidade de solução absorvida por rolo e percentagem de água por rolo	83
Tabela C. 13 Caudal de água que entra com a tela verde.....	84
Tabela C. 14 Caudais volumétricos e mássicos de gás natural	85
Tabela C. 15 Caudal de água de entrada e da reação	86
Tabela C. 16 Evaporação na estufa 1	87
Tabela C. 17 Potência térmica da tela impregnada	88
Tabela C. 18 Potência térmica das correntes de saída.....	88
Tabela C. 19 Caudais de gás natural.....	89

Tabela C. 20 Potência térmica do gás natural.....	89
Tabela C. 21 Caudal mássico do ar de combustão	90
Tabela C. 22 Humidade específica do ar de combustão	90
Tabela C. 23 Potência térmica do ar de combustão	90
Tabela C. 24 Caudal mássico e molar e ar fresco	91
Tabela C. 25 Humidade específica do e potencia térmica do ar fresco	91
Tabela C. 26 Caudal mássico de DIP e calor específico dos artigos estudados.....	92
Tabela C. 27 Caudal mássico de tela verde	92
Tabela C. 28 Potência térmica das correntes de saída.....	92
Tabela C. 29 Potência térmicas na estufa 1	93
Tabela D. 1 Medições da ventilação do ar	94
Tabela D. 2 Temperaturas registadas nos PT100	94
Tabela E. 1 Temperaturas médias registadas para ventilação a 32/32 para Poliésteres.....	95
Tabela E. 2 Temperaturas médias registadas para ventilação a 33/33 para Poliésteres.....	95
Tabela E. 3 Temperaturas médias registadas para ventilação de 35/35 para Nylons	95
Tabela E. 4 Temperaturas médias registadas para ventilação de 40/40 para Nylons	95
Tabela E. 5 Temperaturas médias registadas para ventilação 45/45 para Nylons	95
Tabela E. 6 Caudal de gás natural e consumos específicos da estufa 1 nas condições atuais....	96
Tabela E. 7 Caudal de gás natural e consumo específico da estufa 1 para Nylons em função da ventilação	97
Tabela E. 8 Caudal de gás natural e consumo específico da estufa 1 para Poliésteres em função da ventilação	97
Tabela E. 9 Consumo de gás natural da estufa 2- exaustão 40%- nas condições de ventilação atuais da estufa 1	98
Tabela E. 10 Consumo de gás natural da estufa 2- exaustão 40%- para artigos de Nylon consoante a ventilação da estufa 1	98
Tabela E. 11 Consumo de gás natural da estufa 2- exaustão 40%- para artigos de Poliésteres consoante a ventilação da estufa 1.....	98
Tabela E. 12 Consumo de gás natural na estufa 2 com alteração da exaustão para 35%	99
Tabela E. 13 Novos valores de caudal volumétrico do gás natural para T_{DIP} de 70°C	100
Tabela E. 14 Custos associados ao gás natural	100
Tabela E. 15 Valores associados a solução DIP aquecida até 65°C.....	101
Tabela E. 16 Valores associados a solução DIP aquecida até 60°C.....	101

Nomenclatura

Siglas

ADENE- Agência para a Energia;

CEE – Consumo Específico de Energia

CIE – Consumidores Intensivos de Energia

ENR- Borracha natural epoxídica;

C-ITA: Continental- Indústria Têxtil do Ave, S.A;

IC – Intensidade Carbónica

IE – Intensidade Energética

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCS – Poder Calorífico Superior

PMR`s- Postos de Regulação e Medida

SCGIE- Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia;

tCO₂e – Toneladas de emissões de gases de efeito de estufa;

tep – Toneladas equivalentes de petróleo;

ZELL- máquina de impregnação da C-ITA;

1. Introdução

Com o crescimento contínuo das economias globais, existe a tendência de utilizar mais recursos naturais, tanto de origem renovável como não-renovável. A utilização de recursos impulsionada pelo desenvolvimento industrial e tecnológico e assentando na evolução dos padrões de consumo do ser humano, aumentou 10 vezes desde 1900 e prevê-se que duplique até ao ano de 2030. O aumento da população mundial, ao longo dos anos, tem se repercutido em consequências negativas no ambiente de forma a conseguir responder à elevada procura existente na resposta a estes consumos. (Ambiente, 2022)

A produção e o consumo de energia são responsáveis, direta e indiretamente, por alguns dos principais impactos negativos da atividade humana no ambiente. Entre estes, sobressaem os problemas associados às emissões de gases com efeito de estufa para atmosfera, bem como de outros poluentes como o dióxido de enxofre e os óxidos de azoto. Promover a adoção de modelos económicos mais sustentáveis é essencial num mundo de recursos e ecossistemas limitados. Procura-se por este motivo alcançar a desejada dissociação entre desenvolvimento económico e impacto ambiental, entre produção de bens e utilização de recursos. (Ambiente, 2022)

Atualmente, as indústrias têm necessariamente de ter em conta o uso racional de utilidades tais como recursos hídricos e a produção de energia elétrica só de forma a garantir a sua competitividade e sustentabilidade e assim permitir uma redução nos consumos energéticos e impactos ambientais. (Oliveira, 2015).

Utiliza-se processos de integração energética com intuito de obter um maior aproveitamento energético dos processos industriais para diminuir a utilização de recursos e consequentemente, a redução dos custos energéticos sem danificar o produto final pretendido.

A Continental – Indústria Têxtil do Ave, S.A (C-ITA) tem o papel importante de fabrico das telas para os pneus da Continental-Mabor. Desta forma, a empresa tem como preocupação a qualidade da tela produzida e, também o controlo dos consumos energéticos contribuindo para a redução destes e para a minimização do impacto ambiental.

1.1. Continental ITA

A Continental - Indústria Têxtil do Ave (C-ITA) foi fundada no ano de 1948, por Henrique Malheiro com objetivo de fornecer materiais de reforço dos pneus da empresa vizinha, *Mabor*. No ano de 1950, iniciou-se a produção de tela para pneus. Nesta fase inicial, a C-ITA era chamada por *INTEX*, abrangia uma área coberta de 12.000 m², e produzida telas de algodão para fabrico de pneus.

Em 1951, devido à especificidade técnica dos fios requeridos na produção de “*Cordfabric*”, os quais no mercado da altura eram praticamente impossíveis, a C-ITA decidiu instalar uma seção de fiação, exportando o primeiro “*CordFabric*” no ano de 1952.

Em 1958, o algodão utilizado na produção das telas foi substituído por uma fibra sintética conhecida por Rayon, uma fibra sintética de alta tenacidade. A substituição do algodão possibilitou o primeiro salto tecnológico na construção do pneu.

Nos anos de 1962, figura 1.1, C-ITA teve de alterar as técnicas de fabrico a nível de tecelagem e torcedura, devido ao surgimento de novas matérias-primas baseadas em novos produtos de síntese, como a poliamida/nylon de alta tenacidade, usada como base dos tecidos de reforço para construção dos pneus. Em 1963, para dar resposta ao aumento e produção, construiu-se um novo salão dedicado exclusivamente à produção de telas de pneus, que permitiu completar o esquema, Torcedura/Tecelagem/Acabamentos. (Pais, 2017).



Figura 1. 1 Indústria Têxtil do Ave nos anos 60

Nas décadas de 70/80, houve um grande projeto de inovação tecnológico e um aumento da capacidade de produção da unidade industrial, nomeadamente na renovação do setor de torcedura e foi adquirida uma segunda máquina de impregnar. No seguimento dos investimentos efetuados, a capacidade produtiva atingiu em 1982, 350 ton/mês. Em setembro de 1982, foi encerrada a seção de fiação do algodão, dado que esta matéria-prima deixou de ser utilizada na indústria de pneus.

Em 1988, a empresa Banco Borges & Irmão vendeu ao grupo Amorim a sua participação na INTEx, o que fez com que a partir deste momento, a empresa se intitulasse por Indústria do Têxtil do Ave-ITA.

Em 1992, decorre a reestruturação industrial com otimização dos quadros de pessoal e a implementação de um sistema de recolha automática de dados do processo produtivo. O início do funcionamento da máquina de impregnar telas para pneus, ZELL, e a aquisição de dez teares de tecnologia de inserção de trama por projétil, que vieram aumentar a velocidade de tecelagem e aumentar a produção da empresa, foram as principais causas da necessidade da referida reestruturação.

Em 1993, figura 1.2, a ITA foi uma das primeiras empresas a conseguir o certificado do Sistema de gestão de qualidade (norma ISO9002) e neste mesmo ano, 95% do capital da ITA foi adquirido pela a Continental AG passando a designar por C-ITA. Em 1998, conseguiu o certificado do Sistema de gestão Ambiental (norma ISO14001), tornando-se, para este efeito, a segunda empresa a nível nacional. Entre o final da década de 90 e o início do século XXI começou-se um novo ciclo de investimento, com vista à modernização das áreas de torcedura, tecelagem e impregnação, que aumentou significativamente a capacidade de produção para 14000 ton/ano. Este ciclo completou-se com a construção de um laboratório de investigação e com o desenvolvimento de uma linha de impregnação de corda, sendo esta última completada em 2008.



Figura 1. 2: ITA nos anos 90

No ano de 2012, através de uma estratégia implementada com apoio da ITA e de *Benecke-Kaliko*(BK), empresa do grupo da *ContiTech*, foi instalada uma nova linha de produção, as malhas, que levou à necessidade de um aumento da dimensão da Continental e permitiu à BK, uma maior segurança de fornecimento e um controlo mais eficiente, não só de ponto de vista tecnológico e dos custos, mas também da produção de tecidos.

No ano de 2013, a ITA passou a denominar-se como Continental- Indústria Têxtil do Ave, S.A. Atualmente tem uma área total de 52329m² sendo que 30153 m² são de área coberta, tem 200 colaboradores e apresenta uma produção anual de 20000ton de telas e corda para pneus, usando diversas matérias-primas como rayon, o poliéster e aramida. (Pais, 2017)

1.2 Enquadramento do trabalho

Atualmente, a maior preocupação das indústrias passou a ser o desenvolvimento de processos devidamente otimizados relativamente às utilidades usadas no processo produtivo e aos resíduos gerados. Para tal, e para reduzir os custos desnecessários, é importante tomar medidas como valorização de energia térmica das correntes quentes do processo além da otimização dos parâmetros de produção.

Com a mudança de paradigma que se vive na atualidade, o Grupo Continental definiu o ambicioso objetivo de atingir a neutralidade carbónica até 2030. Para atingir este objetivo, o Grupo é forçado olhar para todos os processos, por forma a otimizar consumos ou mesmo alterar as fontes de energia utilizadas. Como o consumo de gás natural tem um impacto significativo neste objetivo, pretendeu-se com este trabalho analisar uma das estufas da máquina de impregnar telas e avaliar processos de otimização

Para ser possível otimizar o processo produtivo de uma indústria, é prioritário de uma boa gestão de consumos das utilidades, como energia elétrica, gás natural, água e ar comprimido. Por isso, a C-ITA deve desenvolver um plano de Utilização Racional de Energia, URE, que é um conjunto de ações e medidas que tem como objetivo de melhorar a utilização de energia, reduzir custos mas mantendo ou melhorar o nível de produção.

A máquina industrial a avaliar neste trabalho encontra-se no setor de impregnação das telas para pneus e é a principal consumidora de gás natural para queima. A queima de gás natural é a fonte de aquecimento das estufas de forma a possibilitar a secagem e a impregnação da tela. Atualmente verifica-se que existem desequilíbrios de temperaturas na parte inferior da primeira estufa da máquina de impregnar tecidos, o que afeta a eficiência de secagem da mesma.

Assim, surgiu a necessidade de estudar e otimizar a seção de impregnação da empresa, de forma de assinalar possíveis medidas de otimização energética. Na figura 1.3, encontra-se a máquina de impregnar telas da C-ITA, a ZELL.



Figura 1. 3 Máquina de impregnar tela para pneus- ZELL da ITA

1.3. Auditoria energética

Uma auditoria energética consiste na caracterização detalhada, crítica, geral e sectorial das condições de utilização de Energia, com vista à identificação de oportunidades de racionalização de consumos energéticos, através de implementação de medidas com viabilidade técnico-económico, que possibilitem aumentar a eficiência energética. (Pilão, 2021)

Uma auditoria energética tem objetivos de:

- Quantificar os consumos energéticos e a sua importância no custo final dos custos;
- Efetuar uma inspeção visual dos equipamentos e/ou sistemas consumidores de energia ;
- Efetuar um levantamento e caracterização dos principais equipamentos consumidores de energia;
- Determinar a eficiência energética de geradores de energia térmica existentes, pelos métodos das perdas ou direto;
- Verificar o estado das instalações de transporte e distribuição de energia;
- Verificar o bom funcionamento dos aparelhos de controlo e regulação do equipamento de conversão e utilização de energia;
- Identificar e quantificar as possíveis áreas onde as economias de energia são viáveis, como resultado das situações encontradas ou anomalias detetadas e medições efetuadas;
- Definir as linhas orientadoras para a implementação ou melhoria de um esquema operacional de Gestão de Energia.

Segundo o esquema da figura 1.4, as etapas de metodologia de atuação para uma auditoria energética são:



Figura 1. 4 Metodologia de uma auditoria energética

A primeira etapa consiste na análise de processo produtivo e energético da empresa, como a recolha de informação relativa a tecnologias disponíveis no mercado e respetivos custos. Na segunda fase, deve-se realizar a caracterização energética da empresa, como quantificação da produção, quantificação das utilizações de energia por tipo de combustível/fonte de energia, consumos energéticos totais e desagregados e análises de custos. A definição de fluxogramas de processo e a realização de balanços energéticos e rendimentos energéticos possibilitam entender como e onde a energia é utilizada.

Na terceira etapa, ocorre a determinação dos indicadores como os balanços energéticos e mássicos que possibilitam avaliar a empresa quanto ao desempenho energético. Nesta etapa ocorre a identificação de oportunidades que permitem racionalizar o consumo de energia. Por fim, na etapa de elaboração do relatório de AE, 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. Resumidamente, auditoria deve possuir informações básicas da empresa, caracterização energética, consumos e custos de energia como consumos

específicos de energia mensais, distribuição dos consumos energéticos por setor produtivo e gestão de energia potenciais propostas de otimização energética. (Pilão, 2021)

De acordo com informação da empresa, é possível concluir que a C-ITA é uma indústria consumidora intensiva de energia, CIE, dado que tem consumos anuais energéticos superiores a 500 tep/ano. Assim sendo tem obrigação legal de realizar periodicamente auditorias energéticas. Neste caso concreto como a C-ITA possui instalações com consumo superior a 1000 tep/ano, tem de realizar uma auditoria energética com periodicidade de 6 anos.

Estas auditorias incidem sobre condições de utilização de energia, como a conceção e o estado da instalação, devendo ser recolhidos elementos necessários para realização de um Plano de Racionalização de Energia, ou seja, um PREn, assim como a verificação do seu cumprimento.

O PREn é elaborado com base em relatórios das auditorias anteriores obrigatórias, prevendo implementação nos primeiros três anos de todas as medidas com período de retorno do investimento inferior a cinco anos.

Os principais indicadores do PREn são a Intensidade energética (IE), o consumo específico de energia (CEE) e a intensidade carbónica (IC). O PREn deve criar metas relativas à IE, CEE e ao IC, e deverão ser indicadas as modificações ou substituintes a introduzir nos equipamentos ou na instalação, com intuito de haver reduções de consumo. Na tabela 1.1, estão a periodicidade e metas a ser cumpridas numa instalação com consumo superior a 1000 tep/ano como a C-ITA.

Tabela 1. 1 Metas Relativas do PREn

Mínimo de IE e CEE	Melhoria de 6% em seis anos
Mínimo de IC	Manutenção dos valores históricos IC

A entrega do PREn deve ser feita à ADENE, Agência para a Energia, que posteriormente, submete para aprovação da DGEG, Direção Geral da energia e Geologia, acompanhado com respetivo relatório de auditoria energético. De seguida, a DGEG tem 30 dias para se pronunciar sobre o PREn e pode solicitar informações complementares ao operador, inclusive nova auditoria energética, e recomendações de alteração tendo em vista a aprovação do PREn. Se aprovado, o PREn designa-se por Acordo de Racionalização dos consumos de energia (ARCE). Na Figura 1.5, encontra-se o esquema representativo da elaboração de um ARCE.

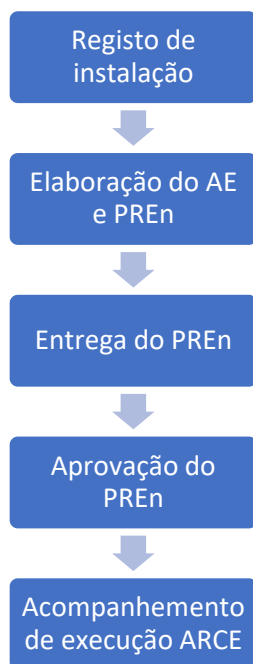


Figura 1. 5 Esquema de instalação de um ARCE

1.5 Objetivos e organização da tese

A C-ITA é um dos maiores consumidores de energia elétrica e gás natural a norte do rio Douro, por isso, é necessário que consumos de energia quer térmica quer elétrica sejam eficientes. Logo, surgiu a necessidade de analisar uma seção de impregnação da empresa, de forma a assinalar possíveis medidas de otimização energética. Deste modo o principal objetivo do trabalho consiste na otimização energética da 1ª estufa da máquina de impregnar telas para pneus – ZELL. Esta 1ª estufa é essencialmente uma estufa de secagem, mas atualmente têm-se verificado alguns problemas na uniformização da temperatura interior da estufa e uma secagem pouco eficiente. Assim, numa 1ª fase será necessário analisar:

- os caudais de recirculação de ar no interior da estufa;
- os caudais de exaustão de gases quentes;
- a variação da temperatura no interior;
- a quantidade de água evaporada na 1ª estufa.

A partir deste levantamento pretende-se tomar medidas que permitam o equilíbrio dos caudais de recirculação do ar no interior no sentido de uniformizar as temperaturas. Assim será possível aumentar a eficácia do processo de secagem que permitirá reduzir o consumo de gás natural a jusante da estufa 1. Por fim pode ainda ser analisada a viabilidade de instalação de novos sistemas, tais como painéis radiantes elétricos.

No presente capítulo, foi feita a apresentação da C-ITA e o enquadramento do trabalho tendo em vista as exigências energéticas a que as empresas com a C-ITA, que são classificadas como CIE, estão atualmente sujeitas.

No capítulo 2 descreve-se o processo produtivo da empresa, desde receção da matéria prima, até a distribuição do produto final à empresa vizinha, Continental-Mabor, que irá fazer adesão da tela à borracha do Pneu.

De seguida, no capítulo 3 é feita descrição da atividade produtiva da máquina de impregnação, ZELL, como os seus constituintes e utilidades que esta usa.

No capítulo 4 procede-se ao levantamento energético da empresa e mais concretamente da máquina de impregnação da tela- ZELL. Deste modo é possível determinar os consumos específicos para assim poder realizar a otimização da estufa número um da ZELL.

No capítulo 5, realiza-se um balanço de massa à estufa 1 da ZELL. Deste modo é possível identificar as perdas de energia e estudar processos de otimização, como também conhecer a eficiência de secagem desta estufa.

No capítulo 6, apresenta-se uma caracterização da estufa 1 com valores de ventilação de ar para 15%, 30% e 50% da capacidade máxima, como das temperaturas de trabalho dos artigos que são impregnados, em condições operatórias normais.

No capítulo 7, são apresentados propostas de otimização da secagem e do consumo de gás natural, como resultados destas mesmas medidas.

Por fim, no capítulo 8, descrevem-se as conclusões principais e ainda sugestões para trabalhos futuros

2 Processo Produtivo

A Continental- Indústria têxtil do Ave produz telas e cordas sintéticas para pneus utilizando matérias-primas como aramida, rayon, nylon e o poliéster. Estas telas e cordas designam-se por *CordFabric*, e são o principal constituinte de reforço dos pneus. A qualidade deste material tem enorme importância na satisfação das condições de segurança requeridas para estabilidade da direção e a condução a altas velocidades como conforto e a performance do veículo.

Inicialmente, o processo de produção de telas começa com torção dos fios de modo a produzir a corda e depois de um tempo de estabilização, a corda passa por teares para produção da tela. De seguida, as telas são impregnadas na máquina de impregnação, ZELL, que se encontra na seção de impregnação da empresa, consumindo várias utilidades como água, ar comprimido, gás natural e energia elétrica. A tela impregnada segue então para a fábrica de pneus, onde passam num processo de calandragem sendo de seguida agregadas ao pneu. Na figura 2.1, encontra-se um esquema que resume o processo produtivo da tela.



Figura 2. 1 Processo produtivo da C-ITA

2.1 Materiais têxteis

Tal como foi descrito anteriormente, os materiais usados com maior frequência encontram-se na família de tecidos sintéticos, como aramida, nylon, rayon, poliéster que conferem às cordas e às telas as características essenciais para segurança e performance do pneu, além de uma boa experiência de condução ao utilizador do veículo.

Aramida

A Aramida ou *Kevlar* é uma classe de fibras que têm alta resistência térmica e resistem a altas pressões mecânicas. É uma das fibras sintéticas mais utilizadas na indústria do pneu. A aramida é produzida através da reação de uma amina e um grupo halogeneto de ácido carboxílico. Na figura 2.2, pode-se observar a reação de síntese da Aramida. (Rodrigues, 2017).

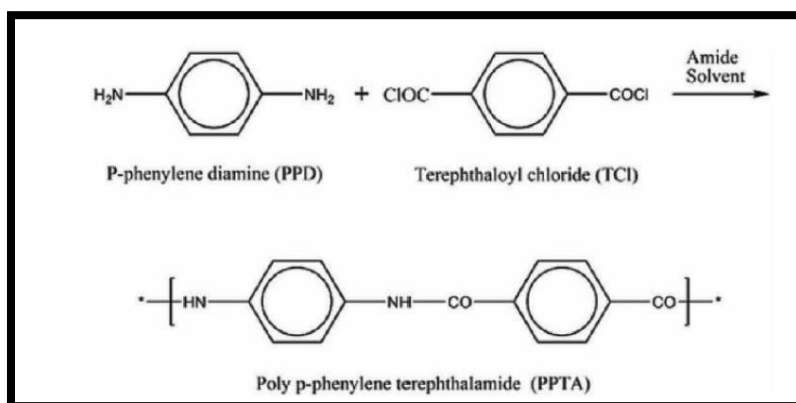


Figura 2. 2: Síntese da Aramida (Rodrigues, 2017)

Graças à presença de uma estrutura bem organizada de grupos aromáticos, a aramida tem forças de tensão muito fortes, o que lhe conferem propriedades importantes para ser aplicada quer na indústria do pneu, quer na indústria do armamento, com fatos à prova de bala que usam *Kevlar*. Todavia, a grande desvantagem desta fibra é o seu alto custo.

Nylon

Nylon (PA) é uma fibra sintética que é caracterizado por ser uma poliamida alifática linear. Esta fibra pode ser produzida de várias maneiras, formando diferentes fibras sintéticas. Este material tem inúmeras propriedades e aplicações, incluindo a roupa e reforço de pneus. Na C-ITA utiliza-se o Nylon 6 e o nylon 6,6 nesta indústria.

Apresenta boas propriedades como excelente resistência à abrasão, boa absorção de humidade, estabilidade, resistência a químicos, elasticidade e é de fácil lavagem. Nylon é utilizado frequentemente como substituto de metais de baixa-resistência e é o plástico mais usado em muitos componentes de veículos automóveis, devido à sua resistência, resiliência à temperatura e compatibilidade química. (Staff, 2022)

Em relação à síntese deste material, esta difere consoante o tipo de material que se quer obter. O Nylon 6,6 é produzido a partir de dois monómeros, cada um com 6 átomos de carbono, enquanto o Nylon 6 é através de um só monómero. Tendo em conta o Nylon 6,6, como se pode observar na figura 2.3., a síntese desta fibra resulta da condensação de hexametilenodiamina e ácido adípico. Quanto ao nylon 6, como se observa na figura 2.4, esta é produzida através da

$$n \text{ H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_6\text{NH}_2 + n \text{ HOOC}(\text{CH}_2)_4\text{COOH} \longrightarrow$$

Hexametilendiamina Ácido adípico

$$\left[\text{N}(\text{H}) - \text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2 - \text{N}(\text{H}) - \text{C}(=\text{O}) - \text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{C}(=\text{O}) \right]_n$$

Nylon 6,6



6-hexanolactam
 ϵ -caprolactam

Polimerização

$\text{--}[\text{NH}(\text{CH}_2)_5\text{C}(=\text{O})]_n\text{--}$
 nylon 6

11

Rayon

A rayon é considerada fibra semi-sintética formada pela purificação de fibras de celulose, que são tipicamente formadas de casca de madeira. Existem vários tipos de rayon, mas a mais comum e que se vende mais no mercado, é a viscose, devido às suas propriedades de boa absorção à humidade e excelentes estabilidade e resistência às forças de tração. Através da figura 2.5, pode-se observar uma reação síntese do Rayon. (Rodrigues, 2017)

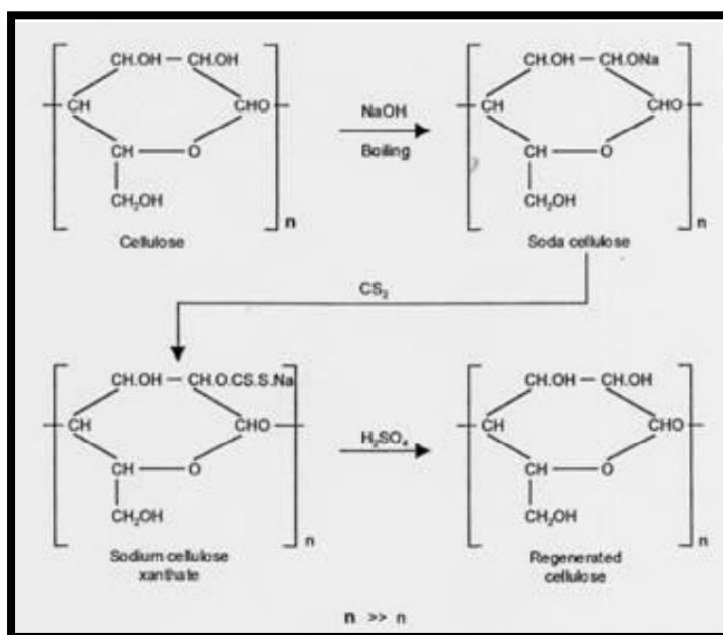


Figura 2. 5

fibras de rayon (Rodrigues, 2017)

Síntese de

Poliéster PET

O poliéster é o tecido sintético mais utilizado no mundo, devido ao seu baixo custo e grande versatilidade, e apresenta dezenas vantagens como ser uma fibra antirrugas, fácil de lavar e alta durabilidade. Cada vez mais, o poliéster é produzido por meios sustentáveis e a produção de poliéster reciclado tem crescido. A alta resistência e a elasticidade do poliéster levou a um aumento da produção deste tipo de fibra.

Como se pode observar na figura 2.6, a fibra é obtida através de reação do ácido tereftálico com etilenoglicol a quente, na presença de catalisadores. A policondensação ocorre durante um período de 5 a 8 horas, ocorrendo a pressão reduzida numa temperatura de 300°C com intuito do polímero ficar fluído. A pureza do ácido tereftálico e a utilização de catalisadores específicos possibilita a atuação mais direta destes sobre o etilenoglicol.

No fim, o polímero recolhido da policondensação é solidificado através de jatos de água fria e cortado em grãos regulares que apresentam muitas vezes, uma forma cúbica. O polímero fundido é fiado e os fios são solidificados, formando o poliéster.

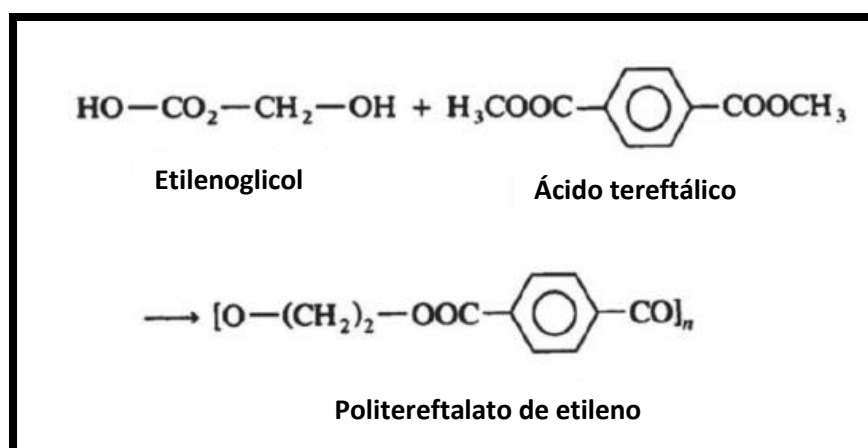


Figura 2. 6 Síntese da fibra de poliéster PET (Rodrigues, 2017)

2.2 Processo produtivo da C-ITA

Torcedura

Depois da receção da matéria prima, o processo produtivo inicia-se na etapa da torcedura, através torção do fio dentro de parâmetros controlados , que tem como objetivo aumentar a resistência do material ao desgaste por fricção, ao alongamento e à fadiga. As bobinas do fio são colocadas em torcedores com capacidades de torcer 2 ou mais fios, dependendo da máquina que é utilizada. A corda produzida possui um peso superior ao fio devido ao entrelaçamento. Para medir a composição da corda, utiliza-se a unidade denominada *decitex*, que exprime a grossura do fio em gramas por cada 10000m. Ou seja, quanto menor o valor de *decitex*, menor será a grossura do fio. (Melo, 2013).

Tecelagem

Depois da torcedura, existe um período de estabilização que precede a fase de tecelagem, ou seja, a etapa de produção da tela. Aqui, as bobinas são alinhadas em serie e em paralelo e a corda de cada bobine é presa ao tear. A tela produzida é envolta sobre si, formando um rolo. Para que as cordas fiquem alinhadas com igual distância umas das outras, utiliza-se um fio de algodão transversalmente às cordas, produzindo-se a tela. Para cada rolo produzido, são necessários 1100 a 2600 cordas, dependendo do artigo. O produto final da tecelagem é designado por “ tecido verde”. (Pais, 2017)

Produção de Malha

O Processo de produção de malhas tem duas fases, tricotagem e ramulagem. A tricotagem consiste na interligação de “laços” feito por agulhas em gancho. Nesta técnica, as malhas são classificadas em duas categorias:

- Tecido tricotado em tecnologia de teia, alimentação do fio às agulhas é efetuada na vertical;
- Tecido tricotado em tecnologia em trama, a alimentação do fio às agulhas é efetuada na horizontal (Lopes, 2016; Pais, 2017) ;

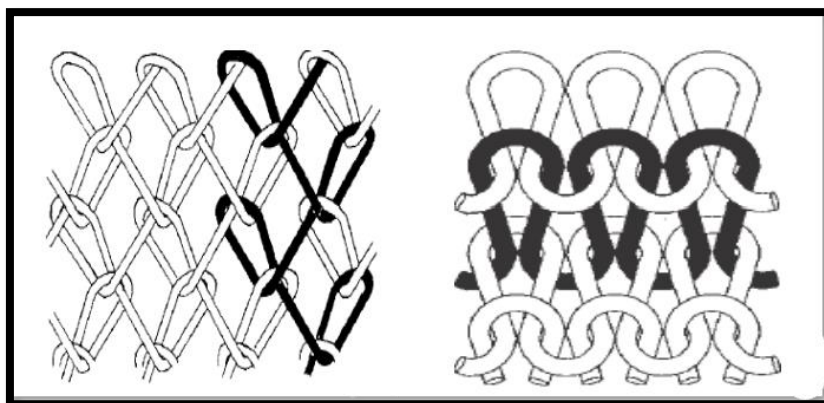


Figura 2. 7: Tricotagem em teia (esquerda) e tricotagem em trama (direita) (Pais, 2017)

Na ramulagem, o produto é termofixado através de diferentes tensões aplicadas a temperaturas elevadas, o que dá estabilidade dimensional, de acordo com as especificações que cliente o exige. O equipamento utilizado para este fim é a râmula, que permite obter a largura e comprimento de malha desejado pelo cliente. Quanto à temperatura de operação, esta é próxima da temperatura de transição vítrea para que as fibras sejam moldadas conforme as circunstâncias finais ambicionadas. O tempo de exposição muda também de acordo com as condições pretendidos. (Lopes, 2016; Pais, 2017).

Impregnação

A impregnação é última etapa do processo produtivo da C-ITA, e talvez a etapa mais importante, pois sem ela, além de não ser possível adesão da cordas e tela à borracha, o que podia comprometer a produção e performance dos pneus, também é esta etapa que confere à tela e às cordas estabilidade dimensional. A impregnação além de melhorar a adesão, permite conferir melhor resistência térmica à fadiga e ao impacto. (Melo, 2013)

Esta etapa envolve quer tratamento físico, quer químico. No tratamento químico, as cordas e a tela ainda em estado “verde” são impregnados numa solução aquosa de resorcina, formaldeído e látex para permitir adesão da borracha ao tecido. O tratamento físico, é conseguido através do tratamento térmico nas estufas. (Rodrigues, 2017)

Quanto à impregnação de corda, é utilizada uma máquina chamada *Single-End*. Esta seção é constituída por duas máquinas funcionando em conjunto, *Sahm e Benninger*. A primeira é uma máquina com a função de bobinar as cordas à saída da máquina *Benninger*. Na *Benninger* é onde se dá a impregnação propriamente dita. Na figura 2.9, é possível analisar uma representação esquemática da máquina de impregnar *Single-End*

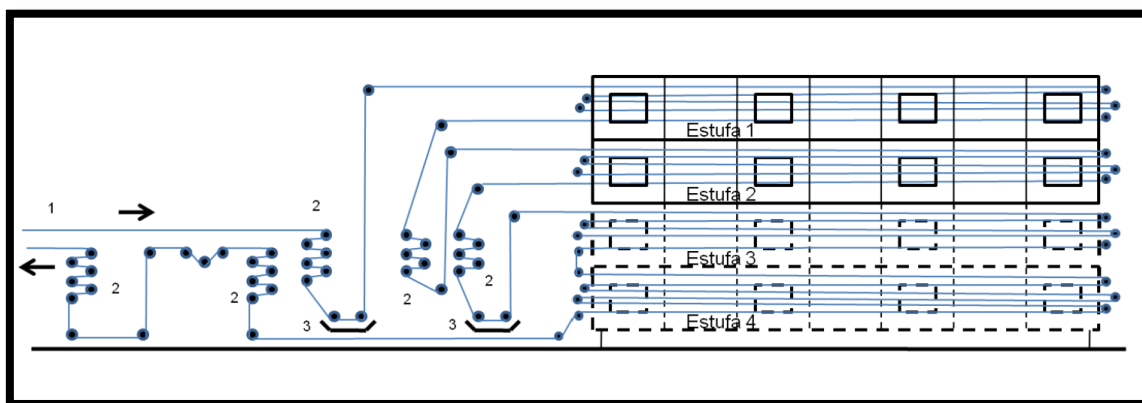


Figura 2. 8: Representação esquemática da máquina de impregnar Single End 1 (Torrinha, 2011)

Legenda

- 1-Cordas
- 2-Grupos tratores;
- 3- Tina de solução química

A corda “verde” atravessa por um primeiro grupo trator antes de ser submersa numa primeira tina de solução. Depois, segue para um segundo grupo trator e entra na primeira estufa. Seguindo para a segunda estufa e daí entra na segunda tina de solução para depois seguir para as estufas 3 e 4. Esta máquina tem a capacidade de impregnar 100 cordas ao mesmo tempo. Se o artigo a produzir for nylon, ao fim de 40.000 m de impregnação procede-se à troca das bobines na máquina *Sahm*, impedindo que este seja um processo ininterrupto. Todavia, se o artigo for híbrido, a metragem encurta para os 22.000m e ao fim destes, a máquina pra de forma a poder ser removida a junção entre fios “em verde” (nós), pois estas ligações não podem ser entregues ao cliente. (Torrinha, 2011; Lopes, 2016; Pais, 2017)

A impregnação das telas é feita na máquina ZELL, que pertence à seção de impregnação da C-ITA. Esta máquina trabalha 24h por dia 365 dias por ano, com paragens semanais de 6h para manutenção e limpeza. Esta máquina é bastante complexa e de grandes dimensões, constituída por inúmeros mecanismos, sensores e sistemas integrados, que contribuem para bom funcionamento desta etapa. (Maia, 2014)

3 Máquina de impregnação da tela, ZELL

Como se pode observar na figura 1.3, a máquina ZELL é máquina de enormes dimensões que é constituído por sete pisos, onde são distribuídas sete estufas, cinco grupos tratores, duas tintas de solução de impregnação (*Dip*), dois acumuladores, um desenrolador do “tecido verde”, enrolador da tela, sistema de vácuo e rolos. Cada constituinte da máquina tem uma função específica.

A tela “verde” inicia o processo de impregnação passando um acumulador de entrada, pelo primeiro grupo trator e pela primeira tina com solução de ativação. De seguida, o artigo entra na primeira estufa, passando por uma segunda, em que posteriormente, passa num segundo grupo trator, antes de seguir para terceiro e quarta estufa. Depois, passa por um terceiro trator e pela segunda tina que contém a solução de impregnação. Por fim, passa por uma quinta, sexta e sétima estufa, antes de chegar ao último grupo trator e um acumulador de saída, dando por terminado o processo de impregnação da máquina ZELL. (Melo, 2013; Oliveira, 2015).

A máquina ZELL trabalha os 7 dias da semana, tendo uma pausa semanal, de 6 horas, para manutenção e limpeza do seu interior. Na figura 3.1 , pode-se observar um representação esquemática da máquina de impregnar a tela.

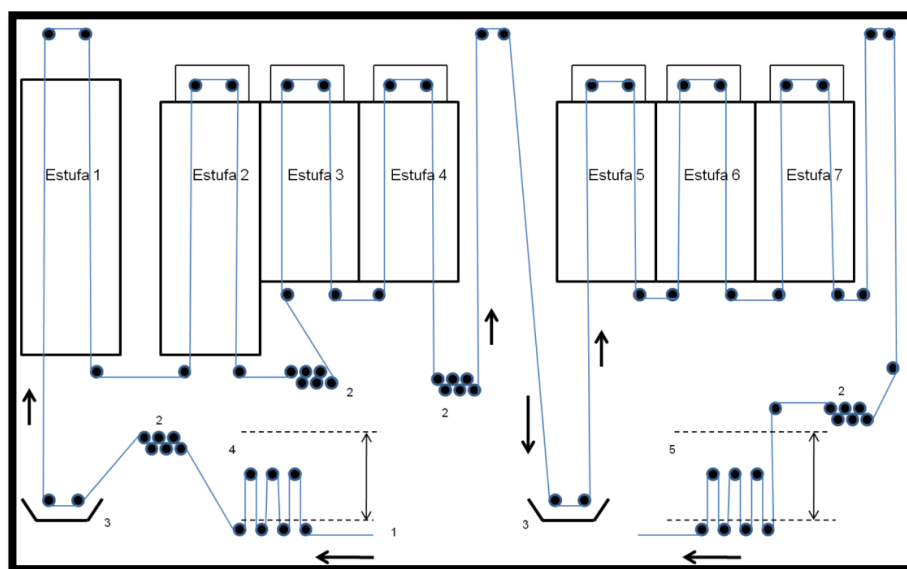


Figura 3. 1 Representação da máquina ZELL (Torrinha, 2011)

Legenda

- 1-Tela
- 2- Grupo tratores
- 3- Tanque de DIP
- 4-Acumulador de entrada
- 5- Acumulador de saída

3.1 Componentes principais da máquina de impregnação

Estufas

A ZELL é constituída por 7 estufas, em que cada uma, possui um queimador, exceto a primeira estufa que possui 2 queimadores, como se pode observar na figura 3.2. Cada queimador permite assegurar as condições de operação de cada estufa. As estufas operam entre 150 a 250°C dependendo das especificações necessárias à impregnação da tela.



Figura 3. 2 Queimadores da Estufas 1

Além dos queimadores, existem dois ventiladores por estufa, um em cima e um em baixo equipados com variador de frequência, que permitem a circulação dos gases quentes contribuindo para uma melhor uniformidade da temperatura interna da estufa e asseguram a injeção direta dos gases de combustão- *jet boxes*, contra a tela. Além dos ventiladores, existem um exaustor por estufa. Existem três chaminé, sendo uma para primeira estufa, outra para segunda, terceira e quarta estufas e por fim, uma terceira para assegurar a exaustão dos gases quentes para a quinta, sexta e sétima estufa. Os ventiladores e exaustores estão equipados com vários variadores de frequência para permitirem economizar energia mantendo as condições operatórias em cada estufa. Na figura 3.3, mostra-se um ventilador e um exaustor.



Figura 3. 3 Ventiladores e exaustor da Estufa 1

Como se pode ver na figura 3.4, cada estufa, possui na parte superior, tampas que são comandadas por um sistema pneumático. Estas devem estar normalmente fechadas durante o funcionamento da estufa, porém podem ser abertas caso seja necessário desdobrar o tecido ou promover uma maior libertação de gases. (Melo, 2013; Maia, 2014; Oliveira, 2015)



Figura 3. 4 Tampas das estufas

Grupos tratores

O transporte da tela ao longo da máquina ZELL é feito por tração, através de cinco grupos tratores. Estas máquinas são compostas por rolos que encaminham a tela ao longo da máquina, submetendo a tela a diferentes níveis de estiragem. Os grupos tratores são acionados por um motor elétrico e no interior dos rolos, circula água proveniente da torre de arrefecimento que permite o arrefecimento dos rolos. Na figura 3.5 apresenta-se a imagem de um dos grupos tratores. (Melo, 2013; Maia, 2014; Oliveira, 2015)



Figura 3. 5 Grupo Trator

Desenrolamento e enrolamento

O desenrolamento é a primeira etapa realizada na ZELL onde o tecido “verde” por impregnar é desenrolado no suporte para rolos para dar entrada na máquina. Existem sempre dois suportes para rolos para quando um dos rolos terminar o desenrolamento, outro esteja já preparado para dar início a novo processo. Sempre que se dá a troca de rolos, é utilizado a máquina de costura “*Sewing Machine*”, que realiza a emenda nos rolos. É um processo delicado e deve ser feito o mais breve possível, para que não haja paragens no sistema, e assim não se danifique a tela que se encontra ainda dentro nas estufas.

O processo de enrolamento é a última etapa da impregnação do tecido, como se pode observar na figura 3.6, e tem o intuito de enrolar o tecido impregnado e embalar para o cliente. (Melo, 2013; Maia, 2014; Oliveira, 2015)



Figura 3. 6 Enrolamento da tela

Acumuladores

O processo produtivo da ZELL inicia-se pela passagem da tela “verde” pelo acumulador de entrada, representado na figura 3.7, que tem função de acumular o tecido de forma a proporcionar uma produção sem interrupções. No fim do processo, existe também um acumulador de saída que vai acumular o tecido impregnado de modo a facilitar a retirada do rolo sem a necessidade de paragem da máquina. (Melo, 2013; Maia, 2014; Oliveira, 2015)



Figura 3. 7 Acumulador

Tinas de solução

Como se pode observar na figura 3.8, as tinas têm a função de conter as soluções de ativação e impregnação para o tecido será ser impregnado. Dependendo o material utilizado, a ordem das soluções será diferente, por exemplo, se o poliéster for o tecido a circular na ZELL, este terá a solução de ativação na primeira tina e a solução de impregnação na segunda. Fibras que não necessitam de uma ativação, utilizam as duas tinas com solução de impregnação. Já para nylon, só se utiliza a primeira tina com solução de impregnação. (Melo, 2013; Maia, 2014;



Figura 3. 8 Interior da Tina de solução

Oliveira, 2015)

Sistemas de Vácuo

Depois da passagem da tela pela solução de impregnação e/ou ativação, a tela passa por um sistema de vácuo que tem a função de retirar o excesso de fluido. Nesta secção existem dois sistemas de vácuo, mas normalmente só funciona um, estando o outro de prevenção para o substituir em caso de avaria ou entupimento. (Melo, 2013; Maia, 2014)

Sistema de arrefecimento dos rolos

Há vários rolos ao longo da impregnação que estão em contacto direto com ar quente ou com tela quente. Para evitar o sobreaquecimento destes rolos, existe no seu interior circulação de água de refrigeração proveniente da torre de arrefecimento. Este sistema de arrefecimento é constituído por dois tanques de água, quatro bombas, um ventilador, uma electroválvula e um doseador químico.

A água sai da torre de arrefecimento pelo primeiro tanque, tanque de armazenamento de água fria e entra nos rolos. Quando regressa à torre a uma temperatura mais alta, entra num segundo tanque, reservatório da água quente. A água deste reservatório segue para torre de arrefecimento e depois é reposta no primeiro tanque.

Estes equipamentos tem perdas de água devido à evaporação e ao arraste, e por isso, para manter o volume de água constante no sistema, é adicionado água de reposição através de uma corrente de make-up.

Os rolos são fabricados em aço carbono cromado e tem duas formas de escoamento. Existem rolos com uma única passagem e água de arrefecimento entra num extremidade e sai outra, como pode-se observar na figura 3.9. Já nos grupos tratores, na figura 3.10, estes possuem uma única extremidade para entrada e saída de água, sem existir qualquer mistura de

água de circulação com água que se encontra dentro do interior do rolo. (Maia, 2014; Melo, 2013; Oliveira, 2015)

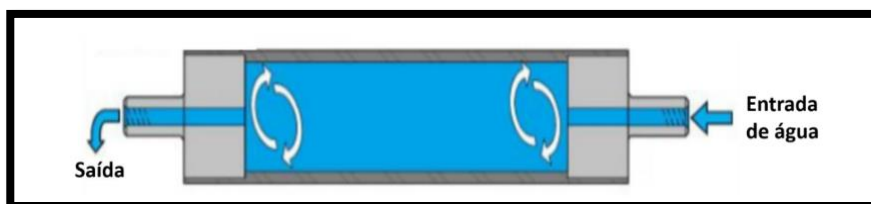


Figura 3. 9 Esquema de escoamento de rolos com duas extremidades (Maia, 2014)

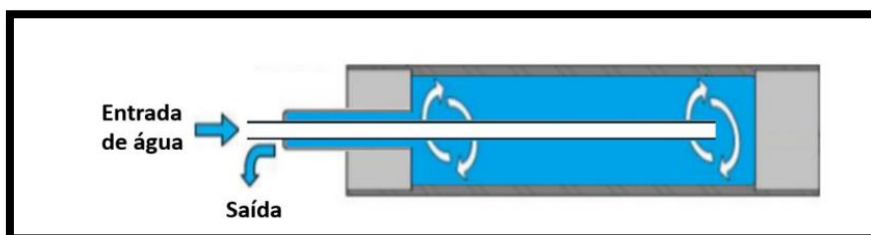


Figura 3. 10 Esquema de escoamento de rolos com única extremidade (Maia, 2014)

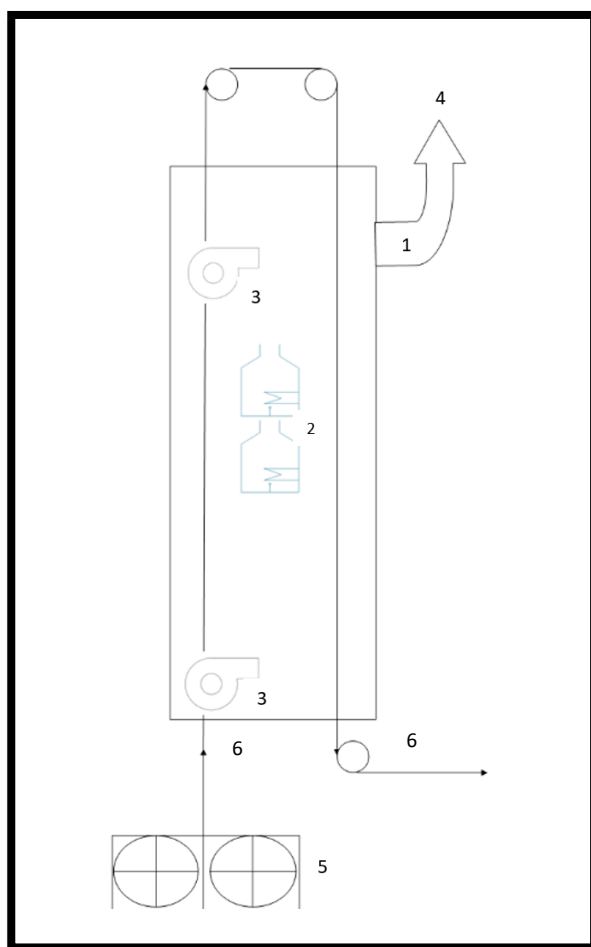
3.2 Caracterização da estufa 1

Sendo um dos principais objetivos do trabalho a análise do funcionamento da estufa 1 apresenta-se aqui uma descrição mais pormenorizada da referida estufa. Nesta mesma estufa, existem problemas relevantes como:

- Uma deficiente uniformização da temperatura ao longo da estufa;
- A baixa evaporação de água que conduz a uma secagem pouco eficiente;
- Verifica-se que nesta estufa há apenas um pré-aquecimento da tela.

Na figura 3.11 apresenta-se um esquema da estufa 1 da ZELL. Esta estufa possui vários componentes como:

- Ventiladores: piso 2 e piso 6;
- Exaustor: piso 6
- Queimadores: piso 5;
- Chaminé: piso 7;
- Entrada e saída da tela: piso 1
- Altura: 20m
- Área de entrada e saída de tela: $0,267m^2$



Legenda:

1. Exaustor;
2. Queimadores
3. Ventiladores
4. Chaminé
5. Vácuo
6. Entrada e saída da tela

Figura 3. 11 Esquema da Estufa 1

3.3 Utilidades energéticas

A máquina ZELL é a máquina que mais utilidades consome na C-ITA, como água, ar comprimido, gás natural e energia elétrica. As utilidades com maior consumo na máquina ZELL são o gás natural e a energia elétrica, e por isso, serão essas as utilidades estudadas no levantamento energético

Água

Como foi referido anteriormente, a água é utilizada no sistema de arrefecimento dos rolos, com intuito de não os sobreaquecer, devido ao contacto prolongado com gás das estufas e tecido quente. Como ocorre perdas de água por evaporação e por fugas, deve sempre existir uma corrente de reposição que é sempre introduzida na torre de arrefecimento, para que haja sempre um nível constante de água.

Ar comprimido

As tampas das estufas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 possuem um sistema pneumático. Para além do consumo de ar comprimido neste sistema também existe o consumo de ar comprimido no sistema de vácuo com o objetivo de retirar o excesso de soluto existente no tecido.

Gás natural

A queima de gás natural é a fonte de calor que permite manter as condições de operação para a impregnação e secagem da tela. A reação de combustão do gás natural ocorre dentro dos queimadores e os gases de combustão são injetados diretamente sobre tecido.

Energia elétrica

Os ventiladores e exaustores dentro das estufas e os grupos tratores são os maiores consumidores de energia elétrica dentro da ZELL.

4 Levantamento energético

A gestão da energia consumida assume um papel de enorme relevo junto das indústrias. Para que os objetivos propostos possam ser atingidos foi necessário avaliar primeiro o consumo energético da C-ITA e depois analisar o desempenho da máquina de impregnar tela relativamente às várias utilidades consumidas, mais concretamente, o gás natural e energia elétrica. Este levantamento foi feito para ano de 2021 entre meses de janeiro e dezembro e tem por base o funcionamento laboral da C-ITA.

4.1 Produção anual da ZELL

No ano de 2021 foram impregnadas, na máquina ZELL, telas de vários artigos de nylon, rayon e poliéster. Neste trabalho foram estudados dois artigos de nylon, N1 e N2 e dois de poliéster P1 e P2 num total de 8809,472 ton produzidas Na tabela 4.1 encontra-se a quantidade produzida dos artigos estudados.

Tabela 4. 1 Quantidade produzida dos vários artigos da máquina ZELL, ano de 2021

Artigo	Produção anual (kg)	%
N1	532827	6%
N2	1928730	22%
P1	3504219	40%
P2	2843696	32%
TOTAL	8809472	-----

É possível verificar que 72% da produção de telas foram de artigos em poliéster. Realçar que o artigo de Nylon mais produzido em 2021 foi o N2, enquanto o de poliéster foi o P1. No anexo A, encontra-se a produção mensal destes artigos.

4.2 Consumo energético

O consumo energético da ZELL foi determinado a partir das faturas de gás natural e de energia elétrica e os valores convertidos em tep de acordo com os fatores de conversão que se apresenta, na tabela 4.2. Foi também avaliada intensidade carbónica (IC) de acordo com os fatores de emissão para cada forma de energia:

Tabela 4. 2 Fatores de conversão de energia e fatores de emissão segundo SCGIE (Pilão, 2021)

Energia elétrica	0,000215 tep/kWh	0,002185 tonCO2e/kWh
Gás natural	1,077 tep/ton	2,68 tonCO2e/tep

De acordo com os valores apresentados no anexo A , tabela A.2, o consumo de energia elétrica e gás natural obtido na C-ITA e na ZELL é referido na tabela 4.3.

Tabela 4. 3: Consumo energético anual de 2021 e média mensal da empresa e da ZELL em tep

	Energia elétrica (tep)		Gás Natural (tep)		TOTAL(tep)	
	Empresa	ZELL	Empresa	ZELL	Empresa	ZELL
Média mensal	653,14	29,59	234,19	180,57	887,33	210,16
Total	7837,64	355,14	2810,29	2166,84	10647,93	2521,98

Pelos valores apresentados verifica-se 74% da energia consumida pela C-ITA é relativo à energia elétrica e 26% a gás natural. No entanto, para a máquina ZELL, 86% da energia consumida provém do gás natural e 14% corresponde a energia elétrica, representando o seu consumo de gás natural 78% do consumo de gás natural na C-ITA, todavia, quanto ao consumo de energia elétrica, esta só representa 5% do consumo elétrico da C-ITA. Quanto à avaliação da empresa, conclui-se que a C-ITA é considerada consumidora intensiva de energia, uma vez que o seu consumo anual excede os 500 tep.

Na Tabela 4.4, são apresentados os valores correspondentes às emissões de gases de efeitos de estufa consoante a energia consumida na empresa e na ZELL.

Tabela 4. 4: Emissões de gases de efeitos de estufa para consumo de gás natural e energia elétrica no ano de 2021 em tCO₂e

	Emissões de Energia elétrica (tCO ₂ e)		Emissões de Gás Natural (tCO ₂ e)		Emissões totais (tCO ₂ e)	
	Empresa	ZELL	Empresa	ZELL	Empresa	ZELL
Média mensal	1427,10	300,76	627,63	483,93	2054,73	784,69
Total	17125,23	3609,16	7531,57	5807,12	24656,80	9416,28

Através das tabelas 4.2 e 4.3, pode-se concluir que o consumo de energia elétrica é muito superior que a do gás natural, o que se reflete nas emissões de gases de efeito de estufa, sendo a ZELL responsável por 76,39% do consumo de gás natural da C-ITA, vai ser então a principal responsável pela libertação de gases de efeitos de estufa. Na tabela 4.5, encontram-se os custos associados a cada fonte energética para empresa e para máquina ZELL respetivamente.

Tabela 4. 5: Custo energético anual de 2021

	Energia elétrica		Gás Natural	
	Empresa	ZELL	Empresa	ZELL
Total	4 914 256,20 €	143 705,82 €	639 619,98 €	501 361,75 €

Através desta análise, conclui-se que que é muito importante avaliar o funcionamento da máquina de impregnar tela, ZELL, no que diz respeito às condições de operação e ao consumo de gás natural. Só assim será possível otimizar o seu consumo sem prejudicar o produto final.

4.3 Gás natural

Tal como se analisou anteriormente, a fonte de energia mais importante na ZELL é o gás natural, já que é utilizado no aquecimento das estufas, mas também é uma fonte de uso razoável na râmula e na caldeira de vaporização associado à produção de malhas.

A instalação de gás natural é composta por dois tipos de Postos de Regulação e Medida, a de uso de industrial que tem denominação PRM(A) e a de uso social de denominação PRM(B), utilizada nas cantinas e nos balneários da empresa. No gráfico 4.1 pode-se analisar o consumo de gás natural na C-ITA.

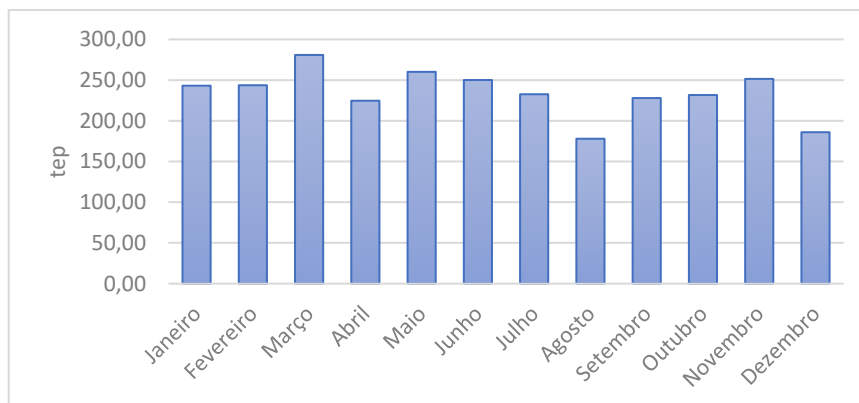


Figura 4. 1 Distribuição mensal de gás natural em tep

Como se pode observar na figura 4.1, não existem grandes variações de consumo exceto nos meses de agosto e dezembro, em que se consumiu 177,98 tep e 185,99 tep, respetivamente. Estes valores mais baixos estão relacionados aos meses de férias dos trabalhadores o que reflete numa diminuição de mão de obra e da produção e consequentemente do consumo. Para monitorizar os consumos de energia, a C-ITA recorre a contadores instalados nos equipamentos produtivos da empresa. Os valores registados ficam guardados numa base de dados.

Na figura 4.2, encontra-se representada a distribuição percentual de gás natural nos vários setores.

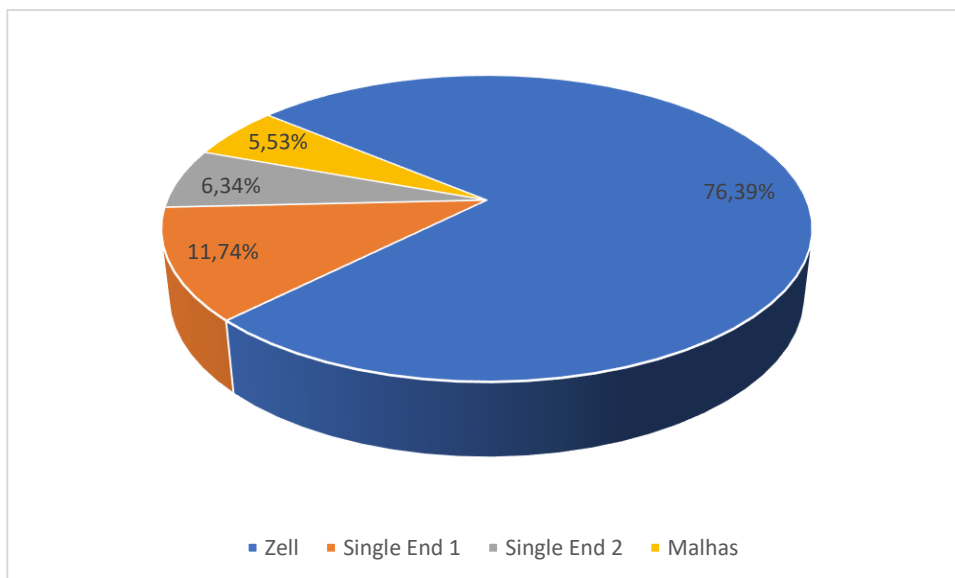


Figura 4. 2 Distribuição do consumo de gás natural de uso industrial

Tal como esperado, a máquina ZELL é a principal consumidora de gás natural com 76,39% do consumo total, seguido a *Single End 1* com 11,74% e da *Single End 2* com 6,34%. O consumo de gás natural de caráter social possui um valor muito baixo (rondar os 0,4%), significando que são desprezáveis relativamente ao de uso industrial. Na tabela A.4, do Anexo A, encontra-se os valores de gás natural que cada unidade fabril consome.

4.5 Energia elétrica

A seguir ao gás natural, a utilidade mais utilizada na empresa e na máquina ZELL é a energia elétrica. Esta é consumida em vários setores da unidade fabril, como grupos tratores, acumuladores, ventiladores, exaustores, compressores e iluminação. Tal como se fez com gás natural, realizou-se o levantamento energético da energia elétrica, tendo-se obtido a distribuição mensal observado na figura 4.3.

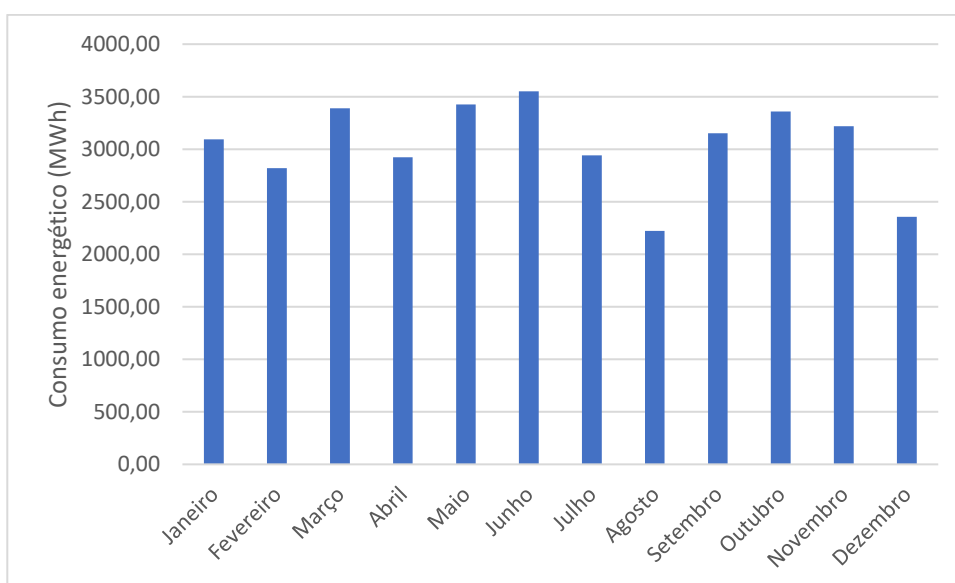
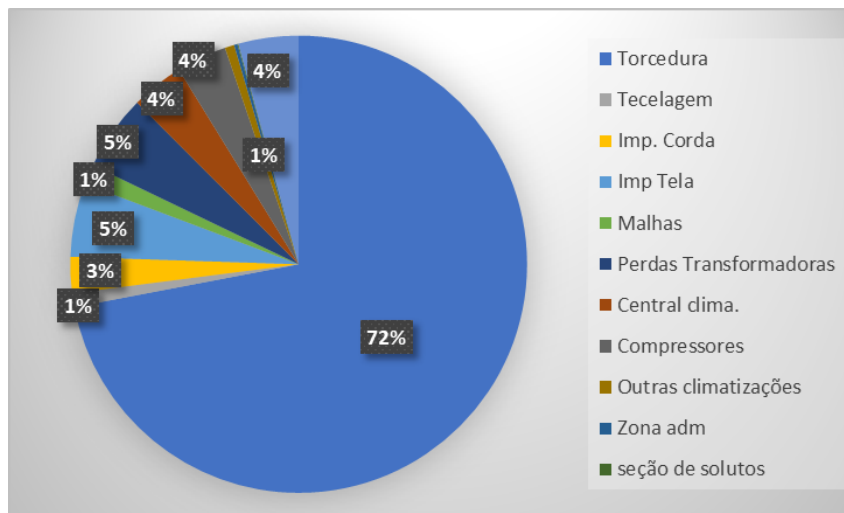


Figura 4. 3 Distribuição mensal do consumo de energia elétrica

Como previsto, os meses de agosto e dezembro, como estão associados às férias dos trabalhadores e consequente, diminuição da produção, apresentam menores consumos, tendo-se obtido os valores de 2221,84 e 2355,37 MWh, respetivamente. O mês de maior consumo é o mês de junho que corresponde 3552,00 MWh. Na figura 4.4, encontra-se percentagem de energia elétrica consumida por setores da C-ITA.



*Figura 4. 4 Distribuição percentual de energia elétrica de
unidade fabril*

Na C-ITA, devido ao grande número de torcedores existentes, a secção da Torcedura é a maior consumidora de energia elétrica, representando 72% da energia elétrica consumida na empresa. Quanto ao setor de impregnação da tela, este representa apenas 5% do consumo elétrico total.

5. Balanços de massa e de energia

Um dos principais problemas de estufa 1 é a baixa eficiência de secagem da tela. Como consequência, verifica-se uma grande evaporação da água na estufa 2 sendo então necessário manter aí uma exaustão bastante elevada. No caso da impregnação dos artigos de poliéster a exaustão ronda os 98% da capacidade máxima do exaustor, o que acarreta altos consumos de gás natural.

Tentando melhorar a eficiência de secagem na estufa 1, a otimização no consumo de gás natural na estufa 2 poderá ser conseguida à custa da diminuição da exaustão dessa estufa. Desta forma, começou por se realizar um balanço de massa à água na estufa 1 para poder avaliar a quantidade de água evaporada e verificar que atualmente apenas está a ocorrer um pré-aquecimento da tela e não uma secagem como seria desejável.

No anexo B apresentam-se as propriedades físicas do gás natural, do ar e das soluções de impregnação. Também neste anexo se encontra a análise aos gases de exaustão efetuada por uma empresa externa.

5.1 Balanço de massa à água

Na figura 5.1, encontra-se o esquema que identifica todas as das correntes de entrada e saída da estufa 1, bem como as perdas térmicas.

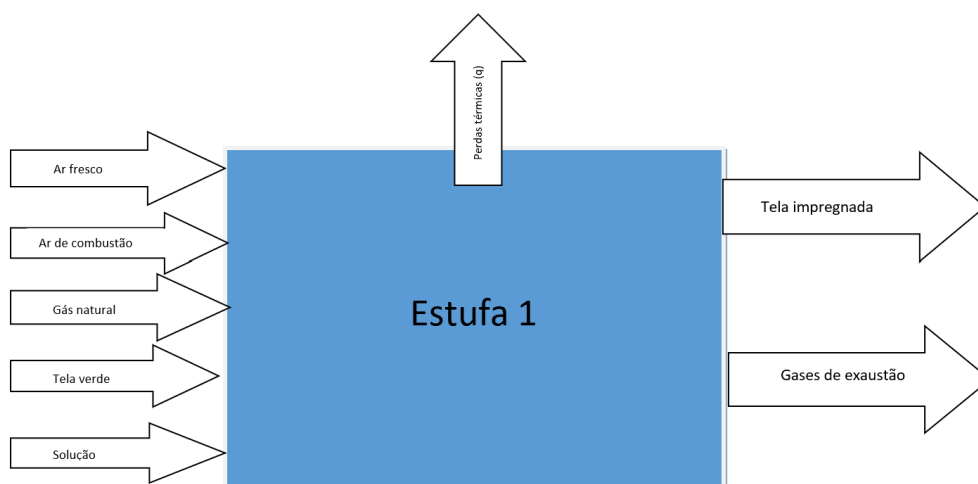


Figura 5. 1 Identificação das correntes de entrada e saída da estufa 1

Para a realização do balanço de massa foi necessário analisar para os vários artigos de poliéster e de nylon produzidos na ZELL no que respeita as condições de operação atuais, como:

- Caudais de ar fresco e de combustão;
- Humidade do ar;
- Quantidade de água na tela verde;
- Água produzida pela combustão do gás natural.

A partir das análises dos gases de exaustão, apresentados no anexo B.4, realizadas pelo INEGI, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, foi possível determinar a água na tela impregnada à saída da estufa 1.

Equipamento de medição

Para realizar as medições necessárias, utilizaram-se equipamentos típicos para medir temperaturas, humidade, pressão, caudais, entre outros.

Os medidores de caudais podem ser por leitura de pressão diferencial ou diretamente por leitura de velocidade. Neste caso, para realizar as medições dos caudais de ar fresco e ar de combustão usou-se um anemómetro. A medição do caudal de acordo com a velocidade tem em conta a passagem de ar na turbina do anemómetro. A medição do caudal de acordo com a leitura da pressão diferencial tem em conta a passagem de ar na turbina do anemómetro, em presença de um interruptor indutivo conta as rotações da turbina, levando à geração de impulsos que são, depois, transformados em valores de velocidade (Quintas, 2021).



Figura 5. 2 Anemómetro Testo 480

Tal como é necessário saber o caudal de ar que entra na estufa, é essencial conhecer a temperaturas e humidade do ar que entra. Para tal, utilizou-se um medidor de humidade e temperatura, que fornece sempre os dados da humidade relativa do local como também da temperatura seca do ar.



Figura 5. 3 Medidor de Humidade e temperatura Fluke 971

Ar de combustão

A estufa 1 da ZELL é a única que possui dois queimadores de gás natural e a velocidade de ar à entrada dos queimadores foi medida usando o anemómetro em 5 pontos da grelha. Na figura 5.4, encontra-se uma representação esquemática da grelha do queimador.

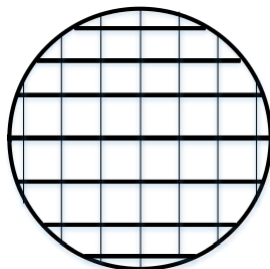


Figura 5. 4 Esquema esquemático da grelha dos queimadores da estufa 1

Após as medições em 5 pontos da grelha, realizou-se a média dos valores e representou-se na tabela 5.1, o valor médio da velocidade para cada queimador, A e B.

Tabela 5. 1 Valores médios do ar na entrada dos queimadores das estufas para diferentes artigos

Artigo	Queimador	$v_{\text{média}}(\text{m/s})$
N1	A	8,74
	B	9,00
N2	A	8,50
	B	9,26
P1	A	8,95
	B	9,65
P2	A	8,42
	B	9,59

Sabendo as dimensões da grelha dos ventiladores de entrada de ar nos queimadores, foi possível calcular o caudal mássico de ar de combustão, como se pode observar na tabela 5.2.

Tabela 5. 2 Caudais mássicos de ar admitido nos queimadores da estufa 1

Artigo	Queimador	$\dot{m}_{\text{ar de combustão húmido}}(\text{kg/s})$	$\dot{m}_{\text{ar de combustão húmido médio}}(\text{kg/s})$
N1	A	0,1671	0,1696
	B	0,1720	
N2	A	0,1625	0,1698
	B	0,1771	
P1	A	0,1711	0,1779
	B	0,1846	
P2	A	0,1610	0,1722
	B	0,1833	

Com auxílio do medidor de temperatura e humidade, foi possível calcular o caudal de ar seco e caudal de água que é admitido pelos ventiladores da queima No Anexo C.1.1, é possível ver exemplos de cálculo para valores apresentados na tabela 5.3.

Tabela 5. 3 Caudais mássicos de ar seco e água que entram nos queimadores da estufa 1

Artigo	$\dot{m}_{\text{ar combustão seco}} \text{ (kg/s)}$	$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ (kg/s)}$
N1	0,3364	0,002732
N2	0,3370	0,002531
P1	0,3532	0,002545
P2	0,3418	0,002519

Ar fresco

Além de ar que entra através dos queimadores, a estufa 1 possui duas aberturas de entrada e saída da tela por onde entra ar fresco. Na tabela 5.4, estão os valores médios da velocidade de ar fresco que entra nestas aberturas obtidos com auxílio do anemómetro

Tabela 5. 4 Velocidade média da entrada de ar fresco na estufa

Artigo	$v_{\text{médio}} \text{ (m/s)}$
N1	3,73
N2	3,49
P1	4,04
P2	3,72

Conhecendo as dimensões da entrada de ar da estufa, foi possível calcular o caudal de ar húmido que entra. A partir da leitura da temperatura do ar à entrada e da sua humidade determinou-se também o caudal de ar seco e o caudal de água no ar. Os valores são apresentados na tabela 5.5. Os cálculos associados aos valores da tabela 5.5 encontram-se no anexo C.1.2.

Tabela 5. 5 Caudais mássicos de ar fresco para cada artigo

Artigo	$\dot{m}_{\text{ar fresco húmido}} \text{ (kg/s)}$	$\dot{m}_{\text{ar seco}} \text{ (kg/s)}$	$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ (kg/s)}$
N1	2,37	2,35	0,0212
N2	2,21	2,19	0,0177
P1	2,56	2,54	0,0214
P2	2,36	2,34	0,0191

DIP e Tela verde

Antes de entrar na estufa 1, todos os artigos ainda em verde, são mergulhados numa solução de impregnação situado no setor DIP da ZELL. Cada artigo consome determinadas quantidades desta solução para ocorrer uma boa impregnação, com intuito de manter a qualidade do produto final.

Sabendo a velocidade de impregnação de cada artigo, na tabela 5.1, tal como a sua metragem, é possível calcular o valor de massa de água que existe por metro de tela, como também o caudal de água que é arrastado para interior da estufa 1 juntamente com a tela. Na tabela 5.6, apresentam-se os valores e no anexo C.1.3, estão os exemplos de cálculo.

Tabela 5. 6 Massa de água por metro de tela e caudal de água arrastado pela tela

Artigo	Velocidade de processo (m/min)	Caudal mássico de tela verde (kg/s)	kg água/m _{tela}	kg água/s
N1	105	0,33	0,0571	0,1000
N2	90	0,70	0,0764	0,1146
P1	85	1,11	0,1923	0,2725
P2	70	0,68	0,1554	0,1813

Consumo de gás natural

Para fazer o balanço à água é necessário contabilizar a que se forma devido à queima de gás natural. A estufa 1, como foi mencionado, possui dois queimadores, um queimador A e um queimador B. Estes dois queimadores trabalham à pressão manométrica de 10 mBar. O volume de gás medido tem de ser convertido para condições normais, utilizando-se um fator de correção que difere de mês para mês, todavia esta fator de correção é cerca de 1,7

Segundo os cálculos estequiométricos, e de acordo com composição do gás natural, apresentado no anexo C.4, por cada quilograma de gás natural consumido, há a formação de dois quilogramas de água. Na tabela 5.7, encontram-se os valores de consumo de gás natural e do caudal de água formado por reação. No anexo C.1.4, estão os cálculos associados a estes valores.

Tabela 5. 7 Consumo de gás natural e caudal de água de reação

Artigo	Caudal volumétrico de gás natural (m ³ .s ⁻¹)		Caudal mássico de água (kg.s ⁻¹)		Caudal total de água (kg.s ⁻¹)
	A	B	A.	B.	Total
N1	0,0112	0,0086	0,0182	0,0140	0,0322
N2	0,0113	0,0105	0,0183	0,0171	0,0354
P1	0,0152	0,0147	0,0248	0,0240	0,0488
P2	0,0139	0,0128	0,0227	0,0208	0,0435

Gases de exaustão- Caudal de água

A composição dos gases de exaustão, apresentados no anexo B.4, realizada pelo Laboratório de Caracterização de Ambiental, do INEGI, Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, realizado para C-ITA. Na figura 5.5, mostram-se as leituras efetuadas em 2019 pelo referido laboratório.

Fonte	Concen- tração de oxigénio	Concen- tração de dióxido de carbono	Humidade (percen- tagem volumica de vapor do gás húmido)	Tempera- tura	Pressão	Massa volumica	Massa molar do gás seco	Veloci- dade	Caudal volumico húmido para as condições da chaminé	Caudal volumico seco para as condições padrão
	[%]	[%]	[%]	[K]	[kPa]	[kg/m ³]	[kg/kmol]	[m/s]	[m ³ /h]	[m ³ N/h]
Impregna- ção Zell #1	19,48 ± 0,20	0,89 ± 0,32	3,57 ± 0,29	403,9 ± 0,5	101,249 ± 0,098	0,861 ± 0,002	28,93 ± 0,05	4,7 ± 0,3	12247 ± 966	7979 ± 630

Figura 5. 5 Leituras realizadas pelo INEGI em 2019 aos gases de exaustão

De acordo com a composição referida, foi possível determinar o caudal de água presente nos gases de exaustão. Os valores obtidos estão na tabela 5.8 e o exemplo de cálculo no anexo C.1.5.

Tabela 5. 8 Caudais mássicos dos gases de exaustão

Fonte	$\dot{m}_{GE,húmido} (kg \cdot h^{-1})$	$\dot{m}_{GE,seco} (kg \cdot h^{-1})$	$\dot{m}_{água \text{ na exaustão}} (kg \cdot h^{-1})$
Estufa 1	10545	10308	237

Balanço de massa final

Após obtenção de dados experimentais, tornou-se possível a realização do balanço de massa final, com intuito de perceber se então, o problema de secagem era recorrente em todos os artigos estudados. Na equação 5.1, encontra-se o balanço de água da estufa 1.

$$\dot{m}_{água \text{ no ar}} + \dot{m}_{água \text{ entrada na tela}} + \dot{m}_{H_2O \text{ reação}} = \dot{m}_{água \text{ nos gases}} + \dot{m}_{água \text{ tela à saída}}$$

Equação 5. 1

Desta forma pode-se determinar os caudais mássicos de água na tela e assim, a percentagem de água evaporada atualmente na estufa 1. Os valores encontram-se na tabela 5.9.

Tabela 5. 9 Percentagens de evaporação para cada artigo

Artigos	$\dot{m}_{água \text{ no ar}} (kg/s)$	$\dot{m}_{água \text{ na tela}} (kg/s)$	$\dot{m}_{água \text{ por combustão}} (kg/s)$	$\dot{m}_{água \text{ na exaustão}} (kg/s)$	$\dot{m}_{água \text{ na tela à saída}} (kg/s)$	Evaporação (%)
N1	0,02394	0,1000	0,0322	0,06583	0,0903	9,70
N2	0,02023	0,1146	0,0354		0,10440	8,90
P1	0,02390	0,2725	0,0488		-----	-----
P2	0,02160	0,1813	0,0435		0,1806	0,39

Como se pode verificar pelos valores apresentados na tabela 5.9, a percentagem de evaporação para os artigos de Nylon é cerca de 9%, enquanto que para os poliéster não há de secagem da tela.

5.2 Balanço de energia à estufa 1

Além do balanço de massa à estufa, realizou-se também um balanço de energia para determinar as perdas térmicas que atualmente ocorrem. Desta forma, o consumo de gás natural determinado, para qualquer medida de otimização que se proponha, vai partir da mesma equação de balanço energético sendo consideradas as mesmas perdas térmicas.

Segundo a 1ª Lei da termodinâmica para sistemas abertos:

$$q + W + \Sigma E_e - \Sigma E_s = \Delta U_{sistema} \quad \text{Equação 5. 2}$$

Considerando sistema aberto a operar em estado estacionário num determinado intervalo de tempo, com $W=0$, o balanço pode escrever-se:

$$q + \Sigma E_{ei} - \Sigma E_{si} = 0 \quad \text{Equação 5. 3}$$

Sendo

$$E_{e,i} = (E_{ci} + E_{p,i} + h_{e,i})\dot{m}_{e,i} \quad \text{Equação 5. 4}$$

E

$$E_{s,i} = (E_{c,j} + E_{p,j} + h_{s,j})\dot{m}_{s,j} \quad \text{Equação 5. 5}$$

Considerando que a energia potencial e cinética são desprezáveis, que não existe trabalho ao veio e que ocorre a reação química, então o calor perdido no sistema em é determinado por:

$$q = \Sigma H_{si} + \Delta H_{reação,298}^0 - \Sigma H_{ei} \quad \text{Equação 5. 6}$$

Para proceder à avaliação energética, recorreu-se novamente à figura 5.1 e considerou-se como estado de referência para a avaliação das entalpias das diversas correntes, a temperatura de 25° C e água líquida.

5.2.1 Potência térmica das correntes de saída

Potência térmica dos gases de exaustão

A análise dos gases de exaustão da estufa 1 é conhecida através do relatório fornecido pelo INEGI, como já referenciado. De acordo com essa análise, a sua composição pode ser aproximada à do ar. Deste modo a potência térmica dos gases de exaustão foi calculada utilizando a equação 5.7. Considerou-se como estado de referência a temperatura a 25°C e água líquida.

$$H_{\text{exaustão}} = (\Delta H_{\text{vaporização}, 25^{\circ}\text{C}} \times Y_e + ((0,24 + 0,45 \times Y_e) \times 4,18) \times (T_{\text{ex}} - T_{\text{ref}})) \times \dot{m}_{\text{GE, seco}}$$

Equação 5. 7

O caudal mássico dos gases de exaustão secos é 2,86 kg.s⁻¹. Já a humidade específica é de 0,023 e a temperatura de exaustão é a apresentada no relatório do INEGI de 130,9°C. Aplicando a equação 5.7, obtém-se uma potência térmica de 478,17 kW para gases de exaustão. No anexo C.2.1, apresenta-se o exemplo de cálculo.

Potência térmica da tela impregnada

A potência térmica da tela impregnada foi calculada pela equação 6.7

$$H_t = \dot{m}_t \times c_{p_t} \times (T_t - T_{\text{ref}})$$

Equação 5. 8

O caudal mássico da tela vai variar consoante o artigo analisar como também com a da temperatura da tela. Para temperatura da tela, utilizou-se como referência a temperatura média registada pela PT100 da posição 11, onde se verifica o retorno do ar do interior da estufa para ser reaproveitado. Assim, aplicando a equação 5.8, obtêm-se os valores que são apresentados na tabela 5.10

Tabela 5. 10 Potência térmica da tela para artigos

Artigos	$\dot{m}_{\text{tela}}(\text{kg/s})$	Potencia térmica (kW)
N1	0,33	29,24
N2	0,70	61,81
P1	1,10	92,95
P2	0,68	51,62

A potência térmica das correntes de saída é a soma das potencias térmicas da tela impregnada com a potência térmica das correntes dos gases de exaustão. Na tabela 5.11, estão os valores das potências térmicas de cada artigo, enquanto no anexo C.2.2, estão os exemplos de cálculo.

Tabela 5. 11 Potência térmica de saída

Artigos	Potencia térmica de saída (kW)
N1	507,41
N2	539,98
P1	571,12
P2	529,79

5.2.2. Potência térmica das correntes de entrada

Potência do gás natural

A potência do gás natural calculou-se pela equação 5.9, considerando a temperatura do gás igual a 30°C.

$$H_{gás\ natural} = \dot{m}_{gás} \times \int_{T_{ref}}^{T_{gás}} c_{p_{gás}} \times dT \quad \text{Equação 5. 9}$$

Sabendo o caudal mássico de gás natural, foi possível calcular a potencia que gás natural, como se pode verificar no Anexo C.2.3.

Tabela 5. 12 Potência térmica do gás natural para cada artigo

Artigos	Caudal de gás (kg.s ⁻¹)	Potencia térmica (kW)
N1	0,01611	0,167
N2	0,01771	0,183
P1	0,02439	0,252
P2	0,02174	0,225

Potência do ar de combustão

A potência térmica do ar de combustão foi determinada pela equação 5.7, tendo a temperatura de referência de 25°C.

O caudal de ar de combustão irá variar consoante o artigo que se encontra a impregnar e a temperatura do ar à entrada dos queimadores é de 30°C, tal como no gás natural. Na tabela 5.13, encontram-se os valores da potência térmica obtida para diferentes artigos enquanto no anexo C.2.4, é apresentado o exemplo de cálculo.

Tabela 5. 13 Potência térmica do ar de combustão

Artigos	Potencia térmica (kW)
N1	8,319
N2	7,835
P1	7,954
P2	7,833

Potência térmica do ar fresco

A potência térmica do ar fresco foi determinada pela equação 5.7. tendo como temperatura de referência a 25°C

O caudal molar do ar fresco vai variar consoante o artigo a impregnar. Na tabela 5.14 a estão os valores referentes à potência térmica referente ao ar fresco. No Anexo C.2.5, encontra-se um exemplo de cálculo.

Tabela 5. 14 Potência térmica do ar fresco

Artigos	Potencia térmica (kW)
N1	63,758
N2	54,399
P1	65,116
P2	58,511

Potência térmica da solução DIP e tela verde

As potências térmicas do DIP e da tela ver foram determinadas pela equação 5.10 e 5.11.

$$H_{DIP} = \dot{m}_{DIP} \times c_{pDIP} \times (T_{DIP} - T_{ref}) \quad \text{Equação 5. 10}$$

$$H_{Tela\ verde} = \dot{m}_{tela\ verde} \times c_{ptela\ verde} \times (T_{tela\ verde} - T_{ref}) \quad \text{Equação 5. 11}$$

Aplicando as equações e como a Temperatura do DIP e da tela verde é igual à temperatura de referência, a potencia térmica final vai ser igual 0 kW para duas correntes.

Na tabela 5.15, estão os valores das potências térmicas de entrada referentes de cada artigo e no anexo C.2.6, o exemplo de cálculo.

Tabela 5. 15 Potência térmica de entrada

Artigos	Potencia térmica de entrada (kW)
N1	72,24
N2	62,42
P1	73,32
P2	66,57

5.2.3 Perdas térmicas

O cálculo do calor de reação foi determinado através da equação 5.12.

$$\Delta H_{\text{reação},298}^0 = -PCS \times V_{\text{gásnatural}} \quad \text{Equação 5. 12}$$

Sabendo o calor da reação, que se encontra no anexo C.2.7, e através da equação 5.6, foi possível calcular as perdas associadas à estufa 1.

Tabela 5. 16 Perdas térmicas na estufa 1

Artigos	Perdas Térmicas (kW)
N1	-408,50
N2	-453,96
P1	-786,37
P2	-676,90

6. Estufa 1- Análise das condições operatórias

6.1 Caracterização dos artigos a analisar e condições operatórias

Como foi referido anteriormente, a ZELL impregna diversos artigos de tela que apresentam diferenças em alguns parâmetros como:

- Número de estufas usadas na impregnação;
- Velocidade de impregnação;
- Temperaturas de operação;
- Percentagem de gases de exaustão e recirculação;
- Receita de DIP utilizada.

NA tabela 6.1, encontram-se indicados os quatro principais artigos designados por N1, N2, P1 e P2 que serão analisados.

Tabela 6. 1 Composição dos artigos N1, N2, P1 e P2 e respetivas velocidades de produção

Classificação	Tipo de tecido	Decitex(g/10000m)	Velocidade de impregnação (m/min)
N1	Nylon	1400x2	105
N2	Nylon	2200x2	90
P1	Poliéster	1400x2	70
P2	Poliéster	470x2	85

Na tabela 6.2, estão apresentadas para os diversos artigos, as condições de operação da estufa 1 como: as temperaturas de operação, as percentagens de recirculação de ar pelos ventiladores de cima e de baixo, e ainda a percentagem de gases da exaustão.

Tabela 6. 2 Condições operatórias atuais na estufa 1da ZELL

Artigo	Temperatura de operação(°C)	Percentagem da Ventilação de cima	Percentagem da ventilação de Baixo	Percentagem da exaustão
N1	160	30%	28%	20%
N2	155	30%	28%	20%
P1	200	30%	28%	20%
P2	175	30%	29%	20%

6.2 Caraterização da ventilação

A máquina ZELL é constituído por 7 estufas, todavia, este trabalho teve como principal foco a estufa 1, onde a tela, após a passagem no primeiro tanque de DIP, sofre o primeiro processo de secagem. A estufa 1 é composta por duas *JET BOXs*, a *Left* e a *Central*, que possuem dezenas de *FLAPs*, que permitem a injeção dos gases quentes sobre a tela. Na figura 6.1, encontra-se esquematizado o interior da estufa um.

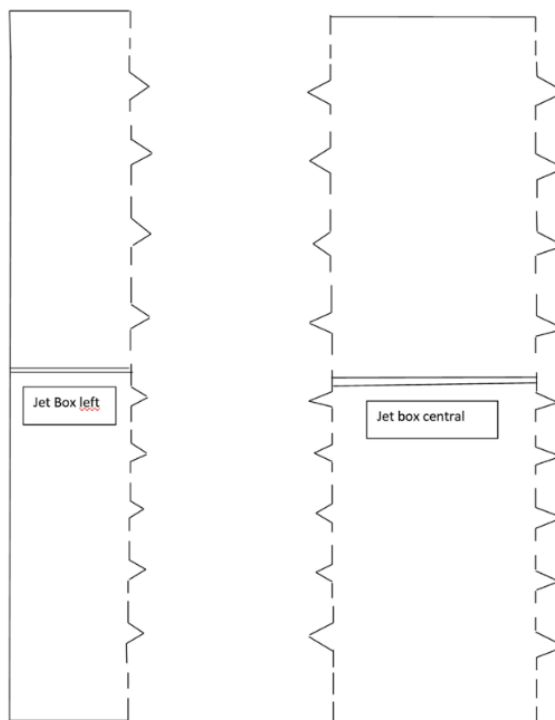


Figura 6. 1 Esquema da estufa 1 da ZELL

Com a finalidade de determinar a velocidade de injeção de ar quente na tela, utilizou-se um tubo de Pilot. No anexo, D, estão as várias medições feitas para capacidades de 15, 30 e 50 % da capacidade máxima dos ventiladores instalados. Na figura 6.2 e 6.3, apresenta-se os valores da velocidade do ar para 30 e 50% da capacidade máxima respetivamente, como também as localizações onde foram medidas.

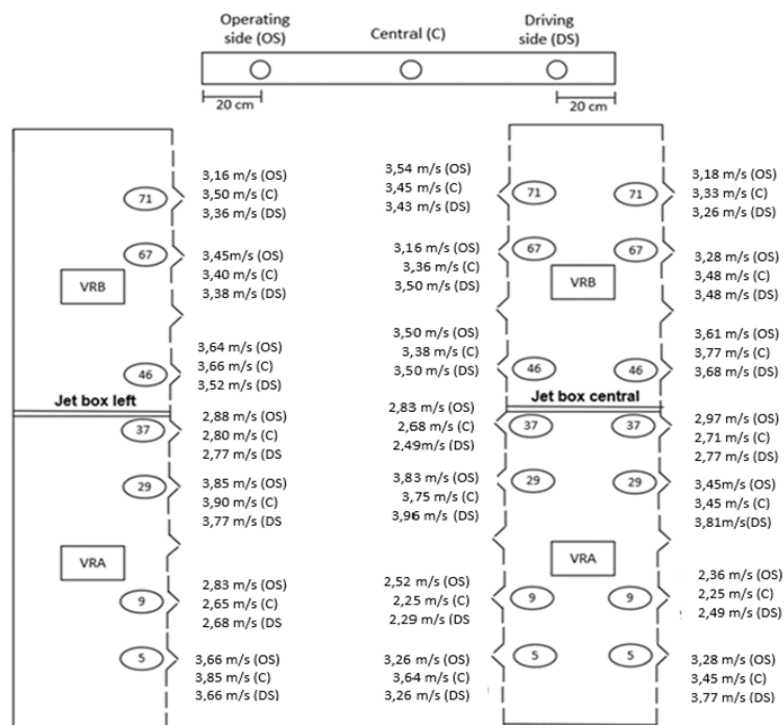


Figura 6. 2 Velocidade de injeção de ar a 30% da capacidade máxima dos ventiladores e posição das FLAPs

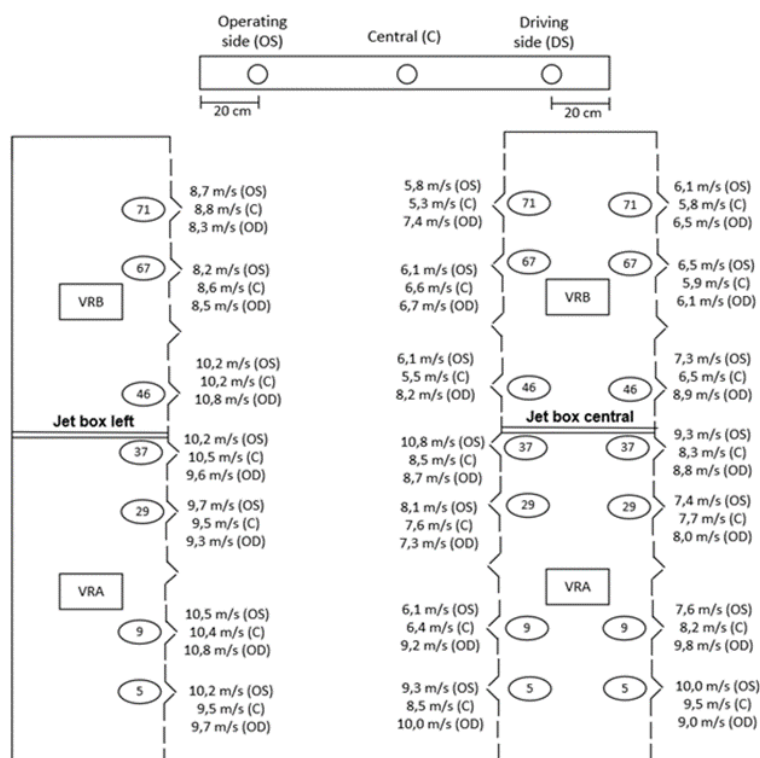


Figura 6. 3 Velocidade de injeção de ar a 50% da capacidade máxima dos ventiladores e posição das FLAPs

Para poder analisar melhor a relação entre a capacidade de ventilação e a velocidade de injeção do ar consoante a posição da FLAPs apresenta-se a figura 6.4 e no anexo D encontram-se os dados obtidos.

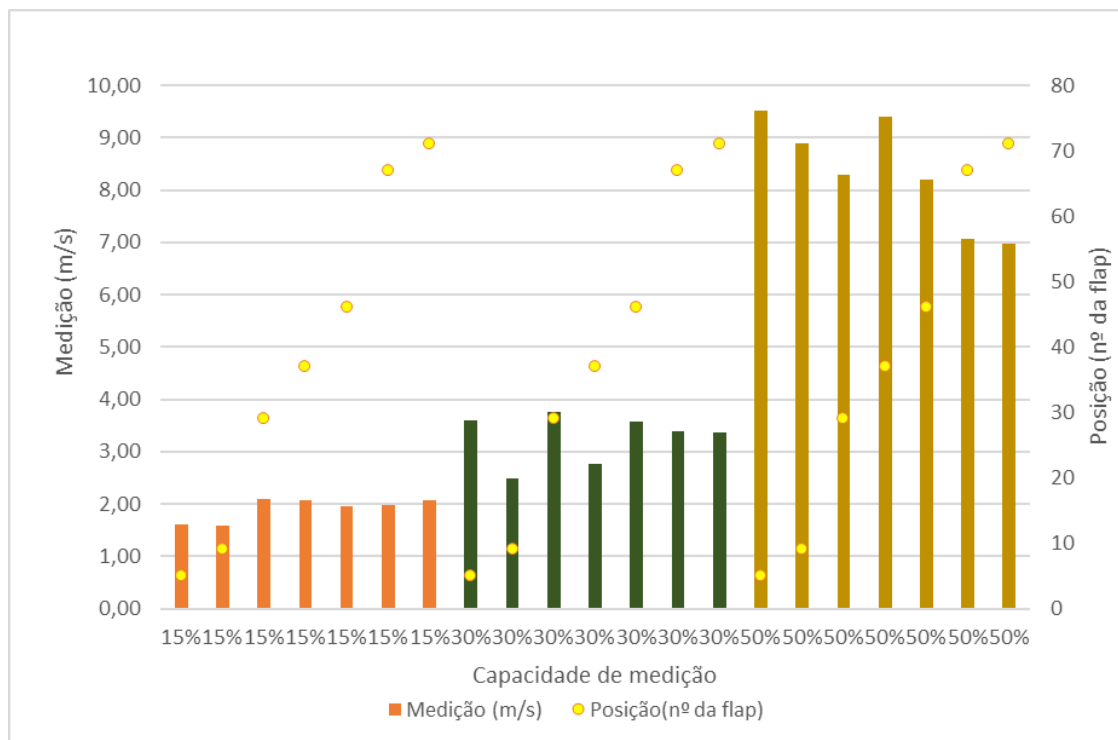


Figura 6. 4 Velocidade de injeção de ar em função da posição da FLAPs e percentagem de ventilação

Como seria de esperar, o aumento da percentagem de ventilação fará com que aumente a velocidade média de circulação do ar. Para garantir uma maior eficiência de secagem é importante garantir turbulência no escoamento e, por isso, desde que não ocorram problemas de agitação vigorosa da tela, uma maior percentagem de ventilação será favorável ao processo de secagem. No entanto, verificou-se que para maior percentagem de ventilação, maior será a diferença de velocidade em algumas FLAPs. De acordo com figura 6.4, constatou-se:

- Ventilação a 15% - Velocidade praticamente constante
- Ventilação a 30% - Velocidade é também praticamente constante à exceção da FLAPs 9 e 37 onde se verifica um decréscimo da velocidade;
- Ventilação a 50% - diminuição mais acentuada da velocidade no sentido ascendente da estufa à exceção da FLAP 37 onde se verifica um aumento de velocidade, sendo o valor praticamente o mesmo obtido na FLAP 5.

A variação de velocidade ao longo da estufa vai também influenciar o desenvolvimento do perfil de temperaturas internas relativamente à temperatura de operação fixada para cada artigo.

6.3 Variação da temperatura na estufa

Ao longo da estufa um, existem doze sondas de temperatura, *PT100*. Na figura 6.5, apresenta-se a localização das *PT100*. As sondas MP1 e MP2 representam as temperaturas do ar que é injetado ao longo da estufa, enquanto as sondas MP11 e MP12 representam as sondas que medem a temperatura do ar de retorno que vai ser reaproveitado para ser novamente injetado. O resto das sondas, MP3 a MP10, representam as medições internas da temperatura da estufa.

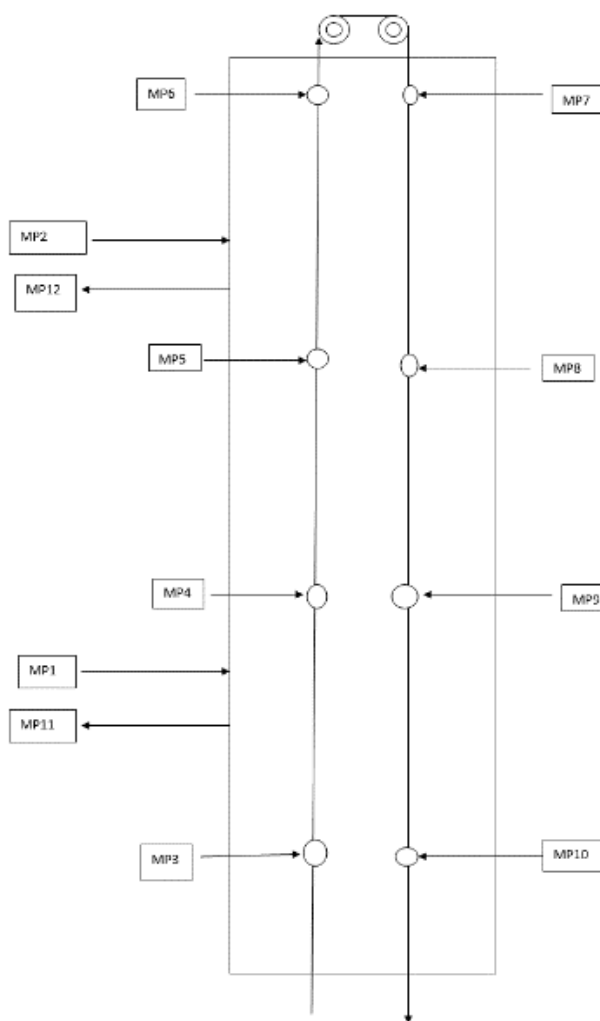


Figura 6. 5 Localização das PT100 ao longo da estufa 1

Na figura 6.6 apresenta-se a distribuição da temperatura ao longo da estufa para os diversos artigos estudados e para condições atuais de ventilação referidas na tabela 6.2. No anexo D.2, encontram-se os valores das temperaturas registadas.

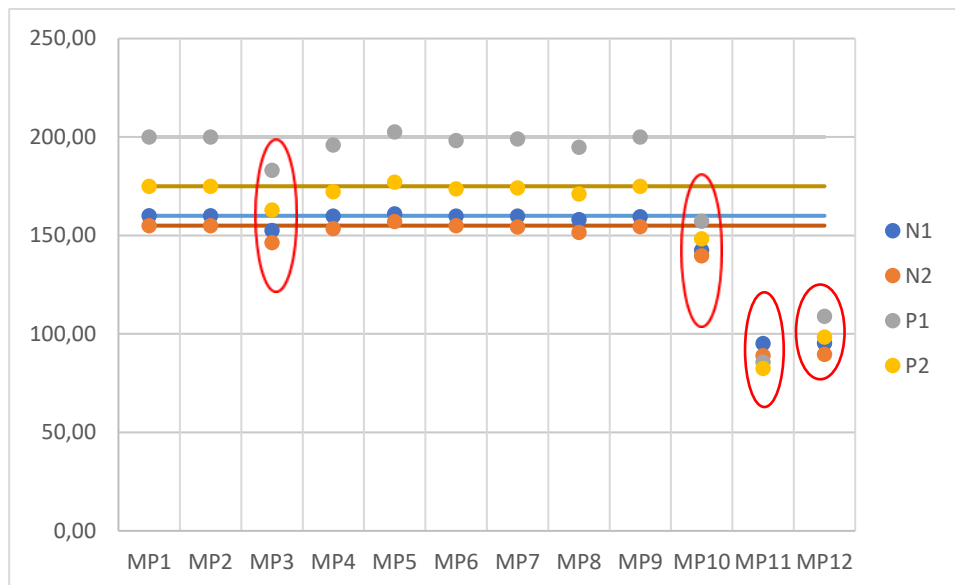


Figura 6. 6 Distribuição da temperatura ao longo da estufa nas condições operatórias atuais

As regiões mais críticas são as regiões onde se encontram as sondas do MP3, MP10, MP11 e MP12. No caso das sondas, MP3 e MP10, estas encontram-se próximas da entrada e saída de tela impregnada, o que possibilita a entrada de ar fresco para interior da estufa, o que faz com que haja uma diminuição da temperatura relativamente à temperatura de injeção do ar quente. As MP11 e MP12, registam temperaturas mais baixas devido ao facto de corresponderem a leituras da temperatura do ar de retorno que já permitiu o aquecimento e secagem da tela.

6.4- Análise de resultados

Para que o processo de secagem possa ser melhorado e assim conduzir à poupança de gás natural na máquina de impregnação de tela, ZELL, é necessário fazer uma análise dos resultados obtidos, relativamente às condições de operação da estufa 1.

O aumento da ventilação promove um grande aumento da velocidade média de injeção do ar. Este facto promove maior turbulência, favorecendo o processo de transferência de calor para a tela e assim aumentando a eficiência de secagem. Contudo, verifica-se que para a ventilação de 50%, a diminuição da velocidade na zona superior da estufa é mais acentuada que a verificada para as ventilações de 15 e 30%. Isto pode sugerir que os ventiladores não estão a “empurrar” devidamente o ar para baixo contrariando assim a convecção natural existente.

Quanto à variação da temperatura ao longo da estufa verificou-se para todos os artigos uma diminuição da temperatura junto à entrada da tela e na zona do ar de retorno.

7. Medidas de otimização da secagem da estufa e do consumo de gás natural

Tendo então concluído que na estufa 1 a taxa de evaporação de água se situa em valores muito baixos, cerca de 9%, valores apresentados no capítulo 5, e com base nos resultados apresentados no capítulo 6 no que se refere à variação de velocidade e de injeção de ar e à variação de temperatura ao longo da estufa, sugeriram-se três propostas com intuito de otimizar o processo de secagem e permitir assim uma poupança de gás natural a jusante da estufa 1 :

1. Aumentar a ventilação forçada começando por atuar na zona de cima das JETBOXs – forçar o movimento do ar para baixo contrariando assim a convecção natural;

A primeira proposta de otimização é baseada no processo físico de transferência de massa e de calor. Se a renovação de ar for mais baixa, o ar fica mais estagnado, o que implicará uma menor transferência de calor e consequentemente de massa, tornando o processo de secagem pouco eficiente. Por isso, é essencial a renovação de ar constante e uniforme sendo proposto o seguinte:

- Aumentar gradualmente a percentagem na ventilação na zona de cima e de baixo das JETBOXs;
- Observar se não há formação de dobras e se o produto cumpre os requisitos de qualidade da C-ITA;
- Registrar os consumos de gás natural e temperatura;

2. Aumentar a temperatura de injeção de ar quente na região de baixo e diminuir em cima.

O aumento de temperatura vai promover o aumento da transferência de calor, embora isso possa conduzir a um aumento do consumo de gás natural. No entanto, como a estufa 1 possui dois queimadores, pode-se aumentar a temperatura de operação na zona de baixo e diminuir na zona de cima, relativamente às condições de operação. Deste modo, pode não haver impacto no consumo de gás natural e conseguir-se um aumento da eficiência de secagem. Para avaliar o efeito desta medida é necessário registar os consumos de gás natural e analisar a variação da temperatura ao longo da estufa.

3. Aumentar a temperatura da solução de impregnação para valores próximos da temperatura húmida dos gases quentes, garantindo assim que o calor fornecido à tela promova logo a evaporação da água sem resultar no aquecimento da própria tela.

Para aquecer a solução de impregnação pode-se usar o potencial térmico dos gases de combustão. Para tal, utilizar-se-ia um permutador de fluxo cruzado gás -líquido. Uma parte do caudal dos gases quentes de exaustão seria usado para o aquecimento da solução de impregnação até uma temperatura de 60/65 °C. Embora não se consiga estimar com rigor a temperatura do termómetro húmido para gases tão quentes quantos estes, por extrapolação usando as cartas de humidade pode-se concluir que a temperatura húmida seja da ordem dos 60 a 70 °C, ver anexo E.

Com estas medidas pretende-se aumentar a eficiência de secagem na estufa 1 e por consequência diminuir a taxa de evaporação que está a ocorrer atualmente na estufa 2. Se assim for, não irá ser necessário uma exaustão tão alta na estufa 2, o que fará com que o consumo de gás natural possa diminuir substancialmente nesta estufa. Em situações anteriores, verificou-se que o aumento da exaustão de 85 para 98% na estufa 2, aumentou o consumo de gás natural em 20%, ou seja, se for possível uma diminuição da exaustão nesta estufa a poupança de gás natural seria com certeza significativa para C-ITA.

Por ultimo, e face ao grande aumento do preço do gás, , pensou-se em instalar nesta estufa painéis radiantes. Esta possibilidade poderia levar a poupanças energéticas na estufa 1 e assegurar um aumento da eficiência da secagem devido ao aumento da taxa de transferência de calor por radiação. Deste modo, na estufa 2 a poupança de gás natural seria com certeza evidente porque a exaustão atual nessa estufa podia ser baixada. Uma análise muito sumária desta medida é também aqui abordada.

7.1 Alteração da Ventilação para artigos Nylon

Tal como foi anteriormente referido, a proposta do aumento da ventilação, poderá promover uma maior renovação de ar quente sobre a tela impregnada como também aumentar a temperatura nas zonas mais críticas e uniformizar a temperatura de operação.

Realizou-se o estudo com velocidades de 35, 40 e 45% da capacidade máxima de ventilação das JETBOXs para artigos de Nylon, e verificou-se que o aumento da ventilação não alterava em demasiado a vibração da tela ao longo da estufa

Nas figuras 7.1 e 7.2 encontram-se apresentados gráficos com valores das temperaturas registadas ao longo da estufa 1 com diferentes ventilações consoante o artigo que se encontrava a passar na estufa. No anexo E.1, encontram-se os valores médios registados, como também o consumo de gás natural e consumo específico por artigo.

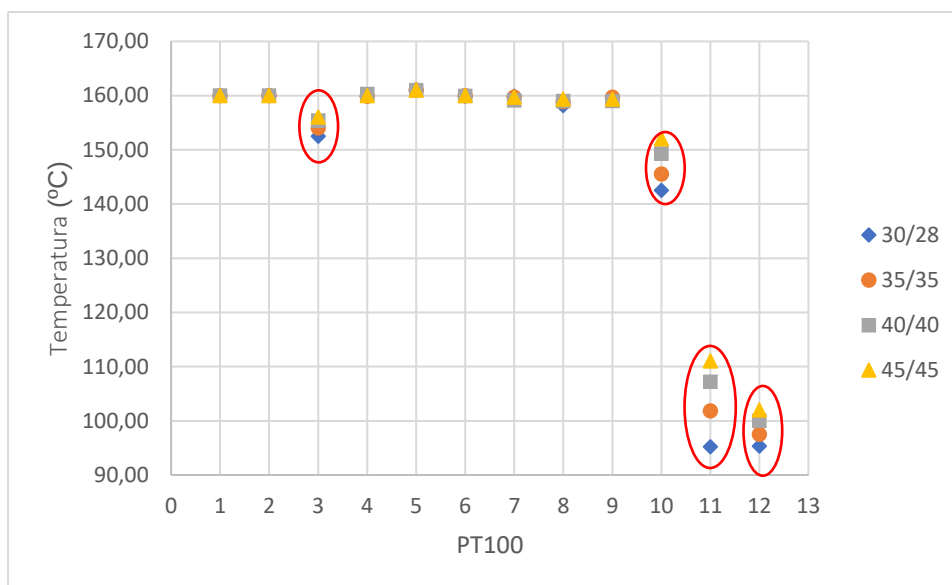


Figura 7. 1 Temperatura registada para artigo N1 em função da alteração da ventilação, $T_{SP} = 160^{\circ}\text{C}$

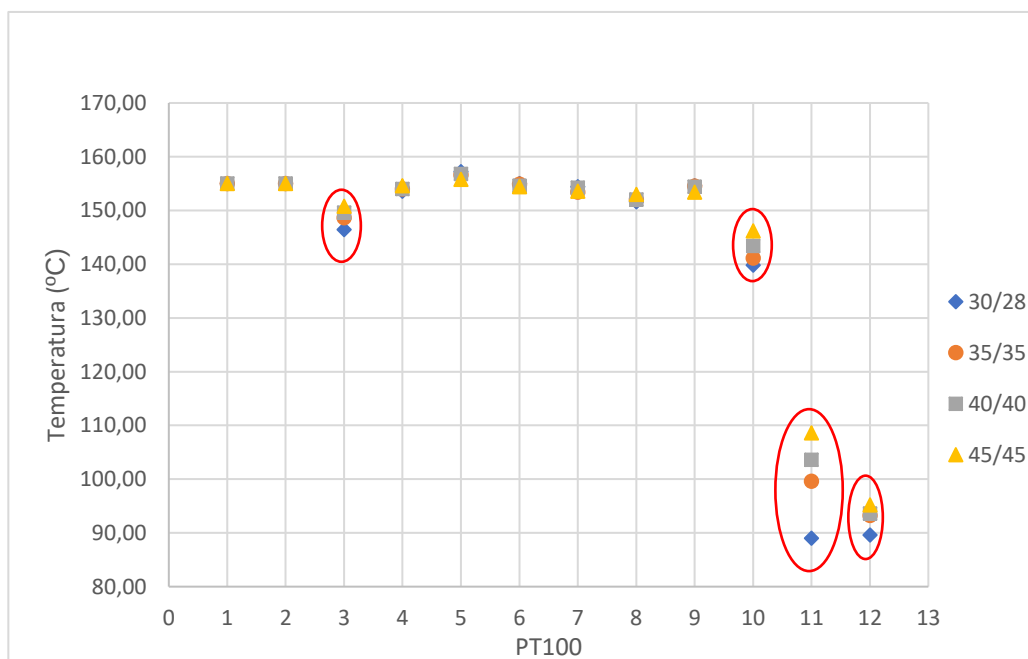


Figura 7. 2 Temperatura registada para artigo N2 em função da alteração ventilação, TSP = 155°C

Quanto maior a ventilação, maior será ao aumento de temperatura registada nas zonas críticas, de MP3, MP10, MP11 e MP12 e nos artigos Nylon, essa subida teve valores significativos. O aumento máximo da temperatura foi de 16°C para o N1 e 19°C para N2 na posição MP11. Foram medidos experimentalmente os consumos de gás natural para as condições atuais de ventilação e para alterações de ventilação feitas, tendo sido realizados seis ensaios para cada alteração imposta. Tendo em consideração a produção anual de 2021 para cada artigo de Nylon, valores apresentados na tabela 4.1, calcularam-se os custos anuais de gás natural, na estufa 1, para as diferentes condições de operação. Os valores médios obtidos são apresentados na tabela 7.1 e o exemplo de calculo é apresentado no anexo E.2.

Tabela 7. 1 Energia específica e custo gás natural na estufa 1 com alterações de ventilação para artigos de Nylon

Artigo	Produção anual em 2021 (ton)	% da Ventilação da estufa 1	Caudal volumétrico de Gás natural ($m^3.h^{-1}$)	Energia específica (kWh/kg)	Custo anual (€)	Aumento(%)
N1	532,827	30/28	71,236	0,710	37861,00	-----
		35/35	72,607	0,724	38589,28	1,92
		40/40	76,564	0,764	40692,83	7,47
		45/45	75,986	0,755	40224,64	6,24
N2	1928,730	30/28	78,317	0,335	64573,65	-----
		35/35	92,979	0,397	76662,54	18,72
		40/40	89,719	0,384	73974,49	14,56
		45/45	86,986	0,372	71720,60	11,07

Como se pode verificar, houve um ligeiro aumento nos custos anuais dos artigos, sendo o maior de 7,47% para ventilação de 40/40 do artigo N1 e de 18,72% para ventilação 35/35 do artigo N2. No Anexo E.2, encontra-se os consumos específicos associado a estas alterações.

Será previsível que a eficiência de secagem aumente com o aumento da ventilação. Então mediu-se o caudal de gás natural na estufa 2 mantendo as condições de exaustão a 40%(atual) e alterando o seu valor para 35%. Os resultados obtidos para potência e o consumo do gás natural e a energia específica da estufa 2 a uma exaustão de 40% encontram-se na tabela 7.2.

Tabela 7. 2 Energia específica de gás natural na estufa 2-exaustão a 40%- com alterações de ventilação na estufa 1 para artigos de Nylon

Artigo	Produção anual em 2021 (ton)	% da Ventilação da estufa 1	Caudal volumétrico de Gás natural ($m^3 \cdot h^{-1}$)	Energia específica (kWh/kg)	Custo anual (€)	Poupança (%)
N1	532,827	30/28	32,713	0,326	17386,09	-----
		35/35	28,832	0,288	15323,67	11,86
		40/40	28,628	0,286	15215,25	12,48
		45/45	28,628	0,286	15215,25	12,48
N2	1928,730	30/28	43,900	0,188	36196,04	-----
		35/35	39,352	0,168	32445,83	10,27
		40/40	37,414	0,160	30847,93	14,78
		45/45	36,659	0,157	30225,59	16,49

Uma vez que se constatou a diminuição de gás natural relativamente à ventilação atual de 30/28, à exceção do caso do N2 para ventilação de 45/45, então a eficiência de secagem aumentou pelo que, então será possível baixar também a exaustão da estufa 2. Realizou-se outro ensaio em que se diminuiu a exaustão da estufa 2 do valor atual para 35 %. Nestas condições mediu-se novamente os consumos de gás natural. Os valores obtidos apresentam-se na tabela 7.3.

Tabela 7. 3 Energia específica de gás natural na estufa 2 com alterações tanto na ventilação da estufa 1 como na exaustão da estufa 2 para artigos de Nylon

Artigo	Exaustão na estufa 2	Ventilação na estufa 1								
		35/35			40/40			45/45		
		Energia específica (kWh/kg)	Custo anual (€)	Poupança (%)	Energia específica (kWh/kg)	Custo anual (€)	Poupança (%)	Energia específica (kWh/kg)	Custo anual (€)	Poupança (%)
N1	35%	0,279	14871,91	14,46	0,275	14673,14	15,60	0,272	14510,51	16,53
N2	35%	0,148	28453,88	21,39	0,141	27108,28	25,11	0,136	26267,28	27,43

Para melhor se visualizar a poupança anual em gás natural, por aumento da ventilação da estufa 1 e por diminuição da exaustão na estufa 2, apresentem-se nas figuras 7.3 e 7.4.

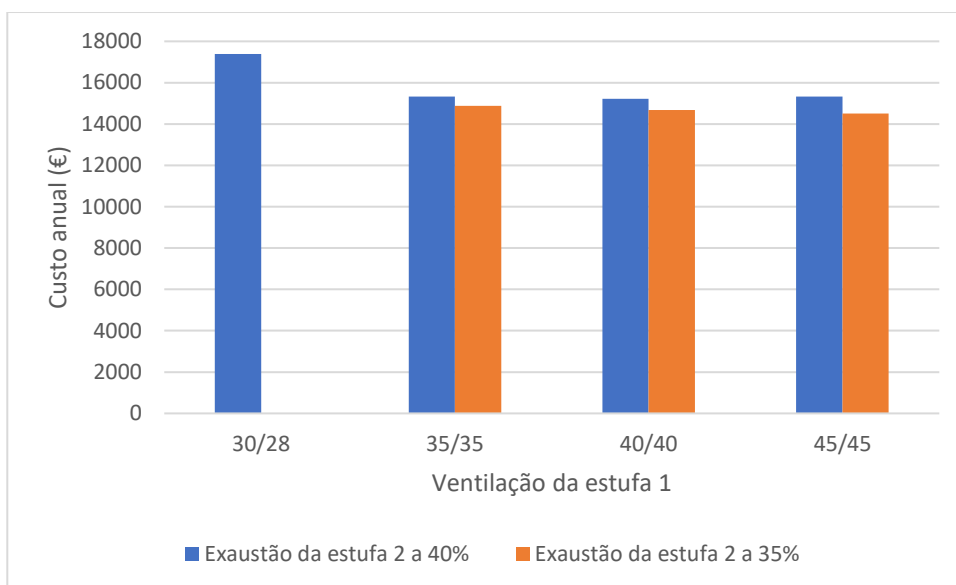


Figura 7. 3 Custos anuais na estufa 2 para o artigo N1

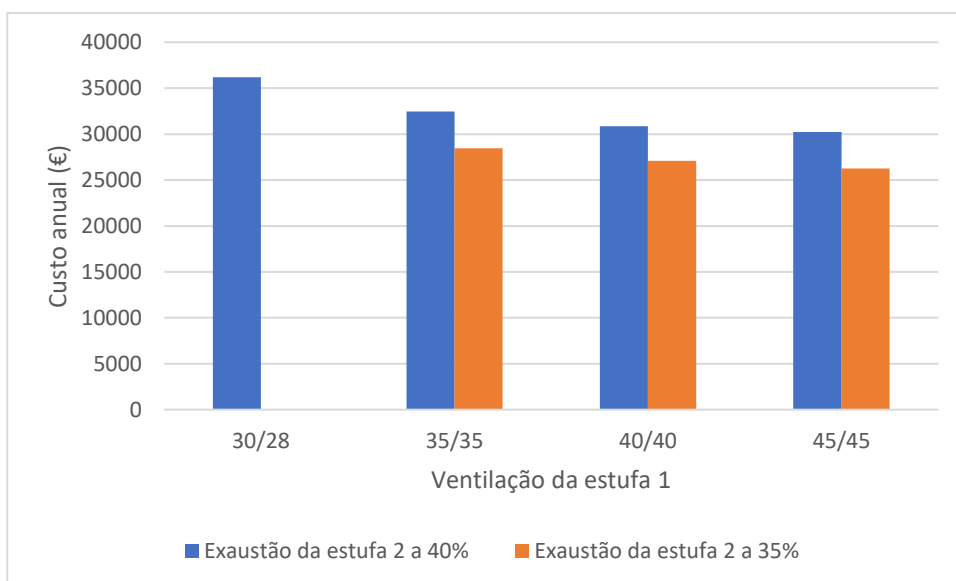


Figura 7. 4 Custos anuais na estufa 2 para o artigo N2

. Para verificar se estas alterações são eficazes e que se podem tornar permanentes, será necessário a realização de uma auditoria do INEGI, para confirmar a melhoria da eficiência da secagem na estufa 1. Pode ainda ser possível uma maior redução da exaustão da estufa 2.

7.2 Alteração da Ventilação para artigos Poliésteres.

Realizou-se ensaios com alteração da ventilação para dois artigos de poliéster a 32 e 33% da capacidade máxima das JETBOXs, pois esta proposta não teve aumentos significativos na velocidade de injeção, porque se verificou que a tela abanava muito o que conduzia à formação de dobras, que comprometiam as condições de qualidade exigidas.

Nas figuras 7.5 e 7.6, encontram-se apresentados gráficos com valores da temperatura registadas ao longo da estufa 1 com diferentes ventilações consoante o artigo que se encontrava na estufa. No anexo E.1, encontram-se os valores médios registados, como também o consumo de gás natural e consumo específico por artigo.

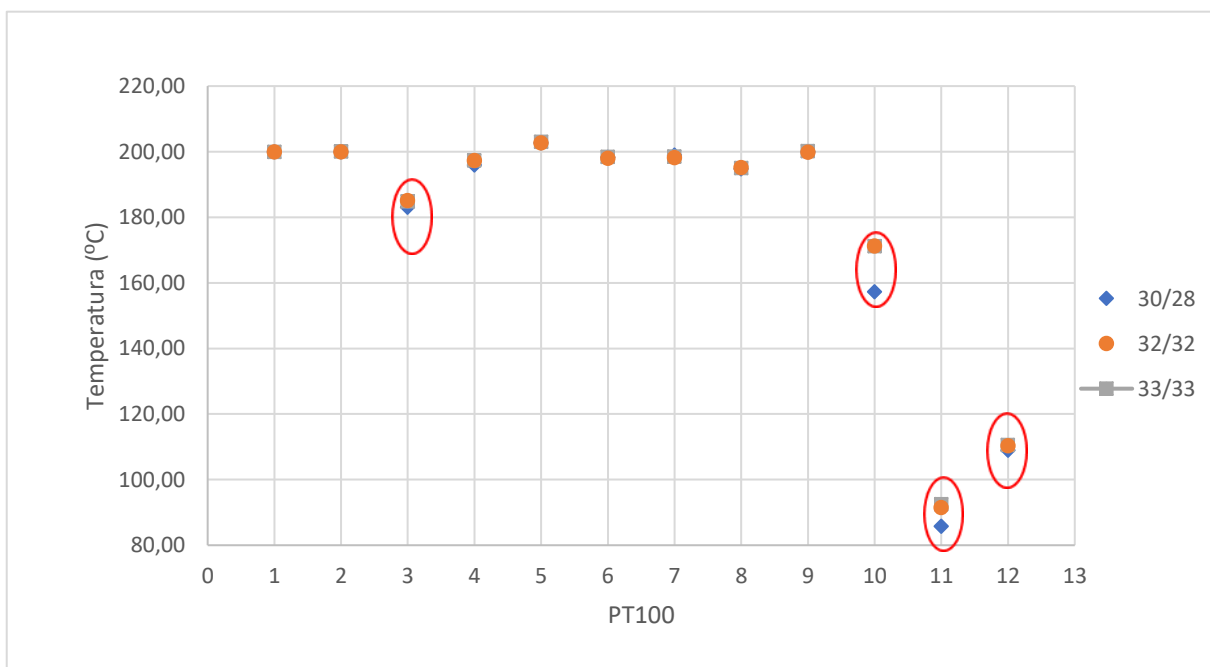


Figura 7. 5 Temperatura registada para artigo P1 em função da alteração ventilação

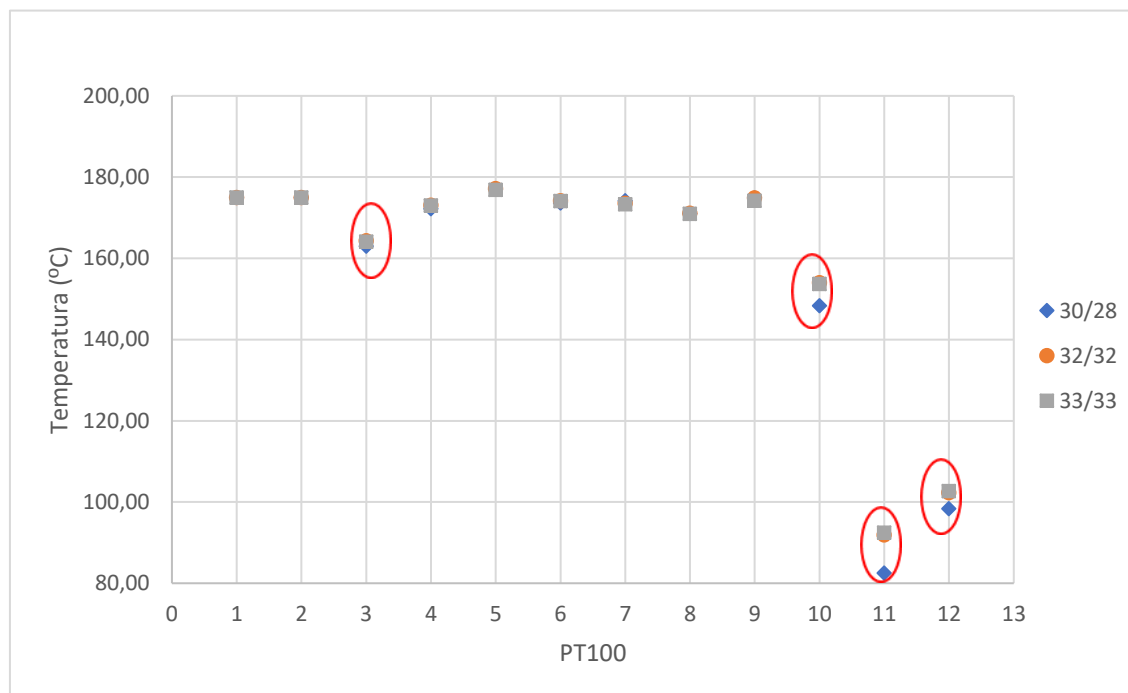


Figura 7. 6 Temperatura registada para artigo P2 em função da alteração da ventilação

Como se pode observar, quanto mais alta a ventilação, maior será ao aumento de temperatura registada nas zonas críticas, de MP3, MP10, MP11 e MP12. Nos artigos de poliéster o aumento máximo da temperatura foi de 7°C para o P1 e 6°C para P2 na posição MP10, sendo praticamente desprezável nas outras duas zonas críticas. Por outro lado, estes artigos de poliéster não aguentam uma capacidade maior de ventilação porque começam a abanar muito dentro da estufa. Na tabela 7.4, apresentam-se os consumos energéticos para condições atuais e também o consumo obtido para as diferentes ventilações testadas nos artigos de Poliésteres na estufa 1.

Tabela 7. 4 energia específica de gás natural na estufa 1 com alterações de ventilação para artigos de Poliéster

Artigo	Produção anual em 2021 (ton)	% da Ventilação da estufa 1	Caudal volumétrico de Gás natural ($m^3.h^{-1}$)	Energia específica (kWh/kg)	Custo anual (€)	Aumento(%)
P1	3504,219	30/28	107,852	0,3198	112075,57	-----
		32/32	114,732	0,340	119225,51	6,37
		33/33	119,134	0,353	123799,79	10,46
P2	2843,696	30/28	95,433	0,462	131367,82	-----
		32/32	95,657	0,463	131676,50	0,24
		33/33	99,518	0,482	136991,75	4,28

Tal como os artigos de Nylon, o aumento da ventilação, irá aumentar os custos associados ao consumo de gás natural, , sendo o maior de 10,46% para ventilação de 33/33 do

artigo P1 e de 4,28% para ventilação 33/33 do artigo P2. No Anexo E.2, encontra-se os consumos específicos e potência associado a estas alterações.

O aumento da ventilação que se pode impor é muito pequeno porque estes artigos começam a abanar muito dentro da estufa. Todavia, como estes artigos são produzidos em maior quantidade, exigem temperaturas de operação bastante mais altas e por isso conduzem a maiores consumos de gás natural, também se avaliou o consumo de gás natural na estufa 2, consoante o aumento da ventilação da estufa 1. Na tabela 7.5 apresentam-se os valores obtidos.

Tabela 7.5 Energia específica de gás natural na estufa 2 com alterações de ventilação na estufa 1 para artigos de Poliésteres.

Artigo	Produção anual em 2021 (ton)	% da Ventilação da estufa 1	Caudal volumétrico de Gás natural ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	Energia específica (kWh/kg)	Custo anual (€)	Poupança (%)
P1	3504,219	30/28	61,756	0,183	64182,05	-----
		32/32	55,998	0,166	58191,11	9,33
		33/33	54,621	0,162	56760,18	11,56
P2	2843,696	30/28	62,114	0,301	85503,05	-----
		32/32	43,112	0,209	59345,57	30,59
		33/33	42,558	0,206	58583,35	31,48

Nas figuras 7.9 e 7.10, apresentam-se os custos anuais de consumo de gás natural na estufa 2 consoante as ventilações da estufa 1.

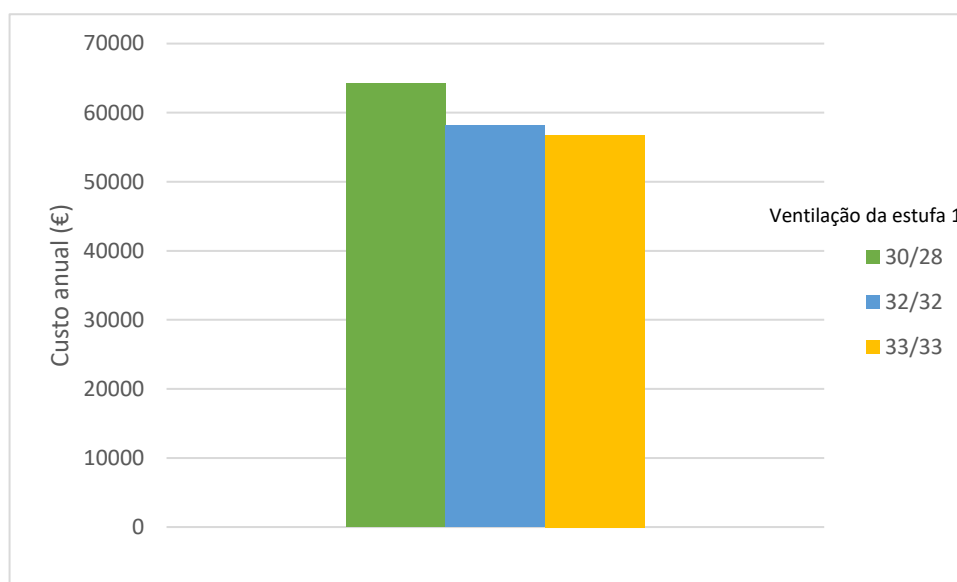


Figura 7.7 Custos anuais da estufa 2 do artigo P1 consoante a ventilação

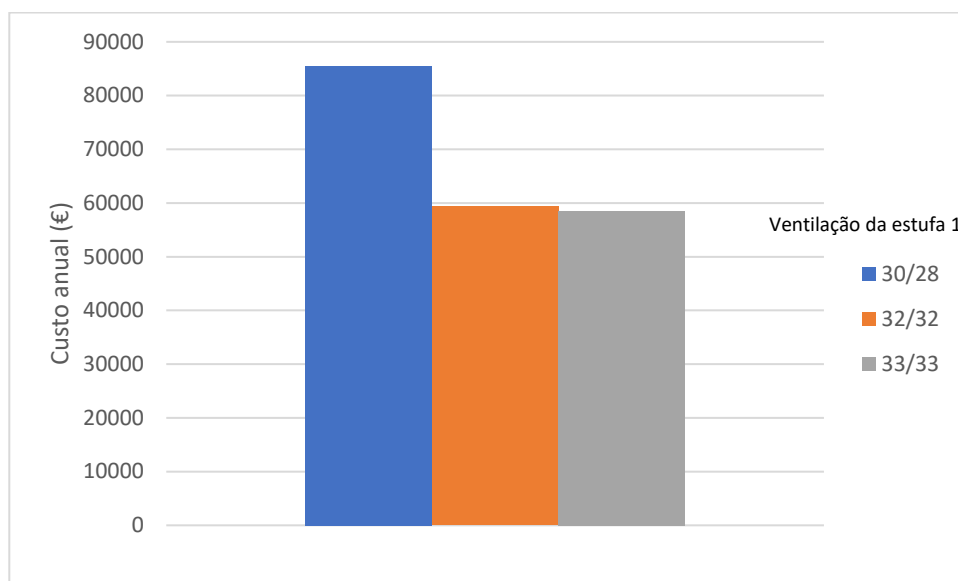


Figura 7. 8 Custos anuais da estufa 2 do artigo P1 consoante a ventilação

Tal como os artigos de Nylon, o aumento da ventilação da estufa 1 levou a redução significativa dos custos do consumo de gás natural, o que permite uma maior poupança em termos energéticos e económicos que podem favorecer a C-ITA.

Apesar do aumento da ventilação, para os artigos de poliéster, ser muito menor do que aquele que se consegue para os artigos de nylon, a poupança energética conseguida é bastante mais elevada, sobretudo para o artigo P2.

Não se realizou um estudo com diminuição da exaustão da estufa 2 como se fez para artigos nylons, para não afetar a qualidade final das telas. No entanto, sugere-se avaliar a humidade dos gases de exaustão, recorrendo a análises externas. Só assim será possível verificar o rendimento de secagem da estufa 1. Se efetivamente esse rendimento for melhorado pode diminuir-se a exaustão da estufa 2 tendo como consequência uma maior poupança de gás natural.

7.3 Apreciação Global da proposta da ventilação

Para ter uma noção se, em termos financeiros, existe uma poupança no custo das duas estufas, somou-se o valor despendido no consumo de gás natural das duas estufas. Em termos globais, nas tabelas 7.6 e 7.7 encontram-se os custo anual das 2 estufas consoante a ventilação da estufa 1 e da exaustão da estufa 2.

Tabela 7. 6 Custo anual consoante as alterações da ventilação e exaustão do Nylon

Artigo	% da Ventilação da estufa 1	Exaustão na estufa 2(%)	Custo anual (€)	Poupança (%)
N1	30/28	40	55247,09	-----
	35/35	40	53912,95	2,44
		35	52928,11	4,20
	40/40	40	55908,08	2,42
		35	53849,70	2,53
	45/45	40	55439,90	-1,20
		35	55819,37	-1,04
N2	30/28	40	100769,69	-----
	35/35	40	109108,37	-9,82
		35	93351,16	7,36
	40/40	40	104822,42	-8,28
		35	95033,16	5,69
	45/45	40	101946,19	-4,02
		35	97528,13	3,21

Tal como se pode verificar a maior poupança energética conseguida para o artigo N1 é de 4,2% que corresponde a uma ventilação de 35/35 na estufa 1 e uma exaustão de 35% na estufa 2. Já para artigo de N2, obtém-se uma poupança de 7,36%, para uma ventilação de 35/35 na estufa 1 e uma exaustão de 35% na estufa 2. de Todavia, como se pode verificar, um aumento da ventilação na primeira estufa acompanhado com diminuição da exaustão da estufa 2 irá sempre trazer benefícios económicos.

Tabela 7. 7 Custo anual consoante as alterações da ventilação dos artigos Poliésteres

Artigo	% da Ventilação da estufa 1	Exaustão na estufa 2 (%)	Custo anual (€)	Poupança (%)
P1	30/28	40	176257,63	-----
	32/32		177416,62	-0,658
	33/33		180559,97	-2,441
P2	30/28	40	216870,87	-----
	32/32		191022,06	11,92
	33/33		195575,10	9,820

Para Poliésteres, um aumento da ventilação não seria economicamente viável para artigo de P1, todavia, existe uma poupança de 11,92% máxima para P2, se a ventilação da estufa

1 for de 32/32. Estas poupanças poderão ser ainda incrementadas se for possível diminuir a exaustão na estufa 2.

7.4 Aquecimento da solução de impregnação

Para poder avaliar o impacto que esta medida possa ter é preciso saber qual a quantidade de solução de impregnação a aquecer tendo em conta as necessidades de cada artigo. Os valores determinados encontram-se no anexo E.4.

Por outro lado considerou-se o aquecimento da solução até: 60°C, 65 °C e 70 °C. Na tabela 7.8. apresentam-se as potências requeridas.

Tabela 7. 8 Potência térmica da solução DIP pré aquecida a 60°C, 65°C e 70 °C

Artigo	Potencia térmica a 60°C (kW)	Potencia térmica a 65°C (kW)	Potencia térmica a 70°C (kW)
N1	16,44	18,79	21,14
N2	18,85	21,54	24,23
P1	40,80	46,63	52,45
P2	27,15	31,02	35,74

Para assegurar esta potencia térmica pode-se usar um permutador de calor de fluxo cruzado em que o fluido quente corresponde aos gases de exaustão. Segundo os dados do INEGI, o caudal mássico dos gases de exaustão ronda os 2,92 kg/s e sendo a temperatura de 130,9°C.

Se for utilizado apenas 60 % do caudal dos gases de exaustão, a temperatura desta corrente à saída do permutador de calor , pode ser determinada através do balanço de energia da equação 7.1:

$$\dot{m}_{solução} \times cp \times (T_{fs} - T_{fe}) = \dot{m}_{GE} \times cp_{GE} \times ((T_{fe} - T_{fs})) \quad \text{Equação 7. 1}$$

Considerando apenas o aquecimento do fluido frio até 70°C, os valores obtidos para a temperatura de saída do fluido quente encontram-se na tabela 7.9.

Tabela 7. 9 Temperatura dos gases de exaustão à de saída do permutador

Artigo	T _{qs} (°C)
N1	118,87
N2	117,11
P1	101,05
P2	110,57

O projeto do permutador adequado, para este aquecimento, só será feito se esta medida tiver um impacto importante na fatura de gás natural.

7.2.1. Poupança de gás natural na estufa 1

Através do balanço de energia apresentado na equação 5.6, considerando a entalpia da solução de impregnação aquecida a 70 °C e admitindo o mesmo valor das perdas térmicas na estufa 1, é possível calcular o consumo de gás natural. Na tabela 7.10, apresentam-se os valores obtidos. No anexo E.3, encontra-se o exemplo de cálculo.

Tabela 7. 10 Caudal volumétrico do gás natural

Artigo	V _{Gás Natural atual} (m ³ /h)	V _{Gás Natural novo} (m ³ /h)
N1	71,237	69,45
N2	78,317	76,27
P1	107,852	103,43
P2	95,433	93,10

Na Tabela 7.11, apresenta-se a poupança obtida em termos de consumo de gás natural e também os valores da poupança anual, tendo em conta a produção anual de cada artigo que se apresentou na tabela 4.1.

Tabela 7. 11 Poupança associado ao aquecimento da solução de impregnação

Artigo	Poupança V _{gás natural} (m ³ /h)	Poupança final (€/ton _{artigo})	Poupança anual(€)	Poupança anual (%)
N1	1,78	1,78	947,93	2,50
N2	2,05	0,96	1 854,77	2,61
P1	4,43	1,32	4 641,70	4,10
P2	2,33	1,13	3 206,65	2,44

No anexo E.3, encontra-se o resto dos valores para poupança associado a um aquecimento até 60°C e os 65°C.

7.3. Painéis Radiantes

Os painéis radiantes constituem um sistema de climatização radiante que tem o objetivo de aquecer superfícies de um ambiente, como uma parede, piso ou um teto. Neste caso, a implementação deste sistema permitiria o aquecer a superfície da tela dentro da estufa, através da transferência direta de calor por radiação. Mesmo sendo uma nova tecnologia, segundo a literatura, apresenta baixos custos de instalação e manutenção e pode diminuir o consumo de gás natural para aquecimento da estufa.

Com intuito de fazer um estudo muito sumário sobre se a instalação de painéis na região da estufa que não apresenta FLAPs, fez-se os cálculos sobre a premissa que estes forneciam 5 a 10% de energia de radiação relativamente à energia de convecção fornecida à tela pelos gases quentes. Isto poderia levar a um abaixamento da temperatura de operação dentro da estufa 1, para os vários artigos, pois a transferência de calor por radiação permitiria o aumento da eficiência de secagem. Esta análise teria de ser efetuada com cuidado pois atualmente a tarifa elétrica e de gás natural são de 0,15 €/kWhe e de 0,1€/kWht respetivamente. Por outro lado, o aumento da temperatura da tela à saída da estufa 1, levaria à possibilidade de diminuição da exaustão na estufa 2 e assim, e como já se verificou nos ensaios efetuados, a uma poupança significativa de gás natural nesta estufa.

Tabela 7. 12 Comparação dos custos como o uso de nos painéis radiantes a diferentes

Artigo	Caudal de gás natural atual (m ³ .h ⁻¹)	Custo anual nas condições atuais (€/ano)	Painéis a 5% da potência elétrica		Painéis a 10% da potência elétrica	
			Caudal de gás natural (m ³ .h ⁻¹)	Total (€/ano)	Caudal de gás natural (m ³ .h ⁻¹)	Total (€/ano)
N1	71,237	37 861,00	67,675	38 807,52	64,113	39 754,05
N2	78,317	64 573,65	74,402	66 187,99	70,486	67 802,33
P1	107,852	112 075,57	102,459	114 877,46	97,067	117 679,35
P2	95,433	131 367,82	90,661	134 652,01	85,890	137 936,21

potências

Como se verifica pelos valores apresentados, apesar da diminuição do consumo de gás natural, não se verifica uma diminuição dos custos totais para a estufa 1 .

8. Conclusões finais e sugestões de trabalho futuros.

A máquina de impregnar tela, ZELL, é a principal consumidora de gás natural da secção de impregnação da tela da C-ITA, além de representar 76% do consumo geral de gás natural da empresa. Deste modo, a sua otimização energética é um assunto sempre atual e ainda de maior importância quando se verifica um aumento muito grande das tarifas energéticas.

O principal problema que motivou este trabalho foi a fraca capacidade de secagem da tela verificada na estufa 1, estando esta estufa a funcionar apenas como estufa de pré-aquecimento. Este facto leva a grandes consumos de gás natural a jusante uma vez que a percentagem de exaustão, nomeadamente da estufa 2, tem de ser muito elevada. Com esta informação, realizou-se um levantamento energético à máquina ZELL, para recolher os dados necessários ao desenvolvimento de propostas de otimização energética que passariam pelo aumento da eficiência de secagem na estufa 1. O estudo foi feito para quatro tipos de tela, com maior produção anual na empresa, dois artigos de Nylon e dois artigos de Poliéster

Começou-se por se analisar a eficiência de secagem, tendo em consideração os dados fornecidos pelo INEGI, relativamente à concentração de vapor de água nos gases de exaustão. Confirmou-se assim que para os artigos de Nylon a percentagem de evaporação da água é atualmente de 8 a 9% e para os artigos de poliéster praticamente não há evaporação.

De seguida, avaliou-se a percentagem de ventilação dentro da estufa, como também se analisou a variação de velocidade dos gases quentes e da temperatura ao longo da estufa 1. Mediram-se os caudais de entrada de ar e consumos de gás natural para se poderem estimar as perdas térmicas existentes.

Verificou-se que as zonas de entrada e saída de tela (MP3 E MP10), eram as zonas onde existe uma maior diferença entre a temperatura de operação e temperatura de *Set Point*, o que poderia provocar diminuição da eficiência da secagem. Por fim, sugeriram-se duas propostas de melhoria:

- Alteração da ventilação para contrariar a convecção natural existente e medir o consumo de gás natural;
- Alteração da temperatura de injeção de ar na região de baixo da estufa.

Contudo, só foi possível realizar o estudo da alteração da ventilação podendo a proposta da alteração da temperatura de injeção de ar ficar para trabalhos futuros.

O aumento da ventilação promoveu um grande aumento da velocidade média de injeção do ar, o que promoveu um aumento da uniformidade das temperaturas na estufa 1, melhorando o processo de transferência de calor e aumentando aí a eficiência de secagem.

Em termos dos consumos de gás natural, com este aumento de ventilação na primeira estufa, houve um aumento no consumo de gás natural de 7,47% para N1 e 18,72% para N2, mas uma poupança de 12,48% para N1 e 16,49% para N2 no consumo de gás natural da segunda estufa. Para o Poliéster, um aumento da ventilação da primeira estufa, fez com que consumo de gás natural desta aumentasse num máximo de 10,46% para P1 e 4,28% para P2, todavia, verificou-se uma poupança na segunda estufa de 11,56% para P1 e 31,48% para P2. Para o caso dos Poliésteres, se for possível corrigir os efeitos das dobras que ocorrem por aumento da ventilação, ainda se consegue uma poupança maior.

Posteriormente, como se verificou-se que existia a possibilidade de redução da exaustão na segunda estufa devido ao aumento da eficiência da secagem na primeira, fizeram-se ensaios de diminuição da exaustão de 40% para 35% nessa estufa para artigos de Nylon. Obtiveram-se poupanças de máximas de 16,53% para N1 e 27,43% para N2 no consumo de gás natural na segunda estufa. No global, existe um potencial de poupança financeiro na alteração da ventilação na primeira estufa, se esta for acompanhada por uma diminuição da exaustão na segunda estufa. Para Nylons, os artigos N1 e N2 teve um máximo de poupança de 4,20% e 7,36%, respetivamente, enquanto para Poliésteres, o artigo P2 teve uma poupança máxima de 11,92%, ao passo que o artigo P1 não teve poupanças, mas um aumento de custo de 2,44%.

Por fim, e tendo em consideração a temperatura de saída dos gases quentes da estufa 1, cerca de 130°C, avaliou-se também o impacto que um pré aquecimento da solução de ativação para cerca de 70 °C, no primeiro tanque de DIP, poderia ter no consumo de gás natural. Com um aproveitamento de apenas de 60 % do caudal dos gases de exaustão a poupança obtida foi de 2,5% para artigo N1, de 2,61% para N2, de 4,10% para P1 e 2,44% para P2.

Quanto à instalação de painéis radiantes, como não se possui informação necessária para retirar uma conclusão final, estes podem trazer o benefício de aumentar a energia que é transferido para tela e promover uma maior eficiência de secagem, o que poderá auxiliar na diminuição quer da exaustão quer na temperatura de operação e assim, conseqüente diminuição do consumo de gás natural.

Como sugestões para trabalhos futuros, sugere-se a avaliação da alteração da temperatura de injeção de ar, aumento da ventilação para artigos de Poliésteres com devida alteração da exaustão na segunda estufa e ainda uma análise detalhada à possibilidade de instalação de painéis radiantes.

Bibliografia

- Ambiente, R. d. (3 de Janeiro de 2022). Obtido de Portal do Estado do Ambiente: https://rea.apambiente.pt/dominio_ambiental/economia_e_ambiente
- Campos, P. (2006). *Aproveitamento sustentável da borracha proveniente dos pneus usados*. Porto: Universidade do Porto.
- GALP. (15 de Junho de 2022). Obtido de Distribuição de Gás natural GALP: <https://www.ggnd.pt/Centro-de-Informa%C3%A7%C3%A3o/Monitorizacao-do-gas-natural>
- Lopes, A. S. (2016). *Otimização energética e implementação do sistema ECO VAC na Máquina de impregnar tela para pneus*. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Maia, J. (2014). *Otimização Energética do Sistema de*. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Melo, J. A. (2013). *Otimização de consumo energético de equipamento de grande potência*. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Oliveira, S. P. (2015). *Otimização energética da máquina de impregnar telas para pneus*. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Pais, M. A. (2017). *Implantação de sistemas de gestão de consumos energéticos*. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Pilão, R. (2021). *Sebenta de Gestão de Energia e Reengenharia do Processo*. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Quintas, J. r. (2021). *Auditoria energética ao processo de acabamento de cordas para pneus*. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Restos de Coleção. (3 de janeiro de 2022). Obtido de <https://restosdecoleccion.blogspot.com/2013/02/industria-textil-do-ave-sa.html>
- Rodrigues, K. A. (2017). *Adhesion promoters for tire textile*. Braga: Universidade do Minho-Escola de Ciências.
- Sebenta de Termodinâmica Aplicada*. (2021). Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Silva, A. L. (2012). *Influência do processo de incorporação de argila sobre as propriedades de vulcanizados de borracha natural e borracha natural epoxidada*. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Staff, C. M. (15 de janeiro de 2022). *CREATIVE MECHANISMS*. Obtido de CREATIVE MECHANISMS: <https://www.creativemechanisms.com/blog/3d-printing-injection-molding-cnc-nylon-plastic-pa>
- Torrinha, Á. M. (2011). *Auditoria Energética à Indústria Têxtil do Ave*. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Anexos

Anexos A- Registo dos Valores do levantamento energético da empresa.

Neste anexo, encontram-se os valores registados para efetuar o levantamento energético à C-ITA. Na tabela A.1, encontra-se os valores mensais da produção dos artigos estudados.

Tabela A. 1 Produção mensal dos artigos estudados em kg

Artigo	N1	N2	P1	P2	Total
Janeiro	38724	240347	343690	39783	662544
Fevereiro	28224	162352	225851	53796	470223
Março	30631	210949	288752	51533	581865
Abril	37845	154650	305802	186102	684399
Maio	47709	166495	382269	304423	900896
Junho	57724	196400	312016	345999	912139
Julho	58206	107501	358050	387321	911078
Agosto	36526	86162	202593	220642	545923
Setembro	51040	106347	265294	304874	727555
Outubro	66674	194060	304935	416414	982083
Novembro	31088	192391	259782	303111	786372
Dezembro	48436	111076	255185	229698	644395
TOTAL	532827	1928730	3504219	2843696	8809472

Através de um fator de conversão, segundo SCGIE, foi possível calcular toneladas equivalentes de petróleo associado a cada fonte de energia utilizada na C-ITA. Na tabela A.2, encontra-se o consumo global mensal da empresa e da máquina ZELL.

Tabela A. 2 Consumo energético mensal C-ITA

Mês	Energia elétrica				Gás Natural			
	Total		ZELL		total		ZELL	
	tep	MWh	tep	MWh	tep	ton	tep	ton
Janeiro	665,53	3095,47	31,11	144,68	243,13	220,14	182,72	169,65
Fevereiro	606,26	2819,83	27,34	127,17	243,67	221,57	184,52	171,33
Março	728,55	3388,61	32,00	148,85	280,88	257,24	215,20	199,81
Abril	628,33	2922,47	28,86	134,22	224,67	207,14	175,16	162,64
Maio	736,66	3426,33	31,61	147,01	260,13	240,08	200,96	186,59
Junho	763,68	3552,00	31,67	147,31	250,08	231,12	194,07	180,20
Julho	632,70	2942,80	32,19	149,70	232,63	215,16	184,87	171,65
Agosto	477,70	2221,84	23,83	110,85	177,98	164,32	137,66	127,82
Setembro	677,82	3152,63	30,21	140,50	227,95	209,49	173,25	160,86
Outubro	721,91	3357,70	33,42	155,44	231,68	213,05	184,29	171,12
Novembro	692,10	3219,07	30,12	140,10	251,49	229,29	197,17	183,07
Dezembro	506,40	2355,37	22,78	105,95	185,99	168,73	136,96	127,17
TOTAL	7837,64	36454,12	355,14	1651,78	2810,28	2577,33	2166,83	2011,91

Quanto as emissões de gases de efeito de estufa, na tabela A.3, encontra-se as toneladas equivalentes de dióxido de carbono mensais por fonte de energia quer da empresa quer só da ZELL.

Tabela A. 3 Toneladas equivalentes de Dióxido de carbono mensais por fontes de energia

Mês	Energia elétrica		Gás Natural	
	Total	ZELL	total	ZELL
	tCO ₂ e	tCO ₂ e	tCO ₂ e	tCO ₂ e
Janeiro	1454,17	316,13	651,59	489,69
Fevereiro	1324,69	277,88	653,04	494,52
Março	1591,88	325,23	752,77	576,73
Abril	1372,90	293,27	602,10	469,44
Maio	1609,60	321,21	697,15	538,58
Junho	1668,64	321,87	670,22	520,11
Julho	1382,45	327,10	623,46	495,45
Agosto	1043,76	242,21	476,98	368,92
Setembro	1481,03	306,99	610,91	464,31
Outubro	1577,36	339,64	620,89	493,91
Novembro	1512,24	306,13	674,01	528,42
Dezembro	1106,49	231,51	498,46	367,05

Na tabela A.4, estão os valores mensais dos custos associados às fontes de energia de energia.

Tabela A. 4: Custos mensais associados às fontes de energia

Mês	Energia elétrica		Gás Natural	
	Empresa	ZELL	Empresa	ZELL
	€	€	€	€
Janeiro	330 262,84 €	12 587,42 €	74 967,86 €	57 291,80 €
Fevereiro	220 517,21 €	11 064,14 €	53 431,75 €	40 935,36 €
Março	315 720,81 €	12 949,69 €	61 522,51 €	47 476,99 €
Abril	318 744,05 €	11 677,23 €	50 473,02 €	39 469,38 €
Maio	367 802,55 €	12 789,61 €	57 671,11 €	44 661,23 €
Junho	431 436,89 €	12 815,71 €	55 520,77 €	43 153,08 €
Julho	383 812,06 €	13 024,16 €	52 324,92 €	41 623,05 €
Agosto	305 440,43 €	9 644,12 €	41 551,89 €	32 198,99 €
Setembro	560 345,93 €	12 223,50 €	51 042,15 €	38 989,52 €
Outubro	620 231,90 €	13 523,28 €	51 999,88 €	41 556,60 €
Novembro	579 918,34 €	12 188,96 €	55 559,04 €	43 879,11 €
Dezembro	480 023,19 €	9 218,00 €	40 402,66 €	30 126,63 €
Total	4 914 256,20 €	143 705,82 €	639 619,98 €	501 361,75 €

Na tabela A.5, estão os valores de gás natural que cada equipamento da unidade fabril consome, segundos os registos da C-ITA.

Tabela A. 5 Consumos mensais de cada unidade fabril

Meses	PRMA (m³)	PRMB(m³)	ZELL(m³)	Single End 1 (m³)	Single End 2 (m³)	Malhas (m³)	Total (m³)	Margem de erro
Janeiro	267733,54	2679,64	208395,66	31877,40	17392,40	19890,20	277555,66	3,54%
Fevereiro	269923,07	2239,00	210453,18	30633,90	17955,00	20602,00	279644,08	3,48%
Março	314274,61	1704,04	245438,78	36966,00	19467,80	22212,90	324085,48	3,03%
Abril	253737,02	700,54	199778,25	9159,80	15365,70	17632,70	241936,45	-4,88%
Maio	294211,89	693,25	229202,80	54528,20	18830,30	18205,51	320766,81	8,28%
Junho	283382,79	516,37	221343,80	34312,60	15481,40	18454,90	289592,70	2,14%
Julho	263898,10	399,89	210850,84	27730,30	15522,60	14846,60	268950,34	1,88%
Agosto	201401,44	444,43	157001,88	26056,30	11523,20	11006,60	205587,98	2,04%
Setembro	256291,27	1034,72	197597,70	34364,90	18572,70	11964,70	262500,00	2,37%
Outubro	260714,77	985,58	210192,41	31546,10	17724,40	7687,60	267150,51	2,41%
Novembro	281315,91	333,88	224878,74	36744,80	20383,80	6481,70	288489,04	2,49%
Dezembro	205357,50	1897,57	156205,59	29366,30	16395,30	10716,70	212683,89	3,44%

Utiliza-se um fator de correção médio para determinar os consumos mensais da ZELL e dos constituintes da produção que utilizam gás natural. Devido a isso, há sempre uma margem de erro associado entre consumo total que é apresentado nas faturas e consumo que se encontra notificado na base de dados da empresa.

Nas tabelas A.6 e A.7, estão os levantamentos energéticos e os custos associados aos PRMs.

Tabela A. 6 Levantamentos energéticos mensais associado aos PRMs

Meses	PRMA (m³)	PRMB(m³)	TOTAL	ton	PRMA(kWh)	PRMB(kWh)
Janeiro	267733,54	2679,64	270413,18	220,14	3177592,17	39004,19
Fevereiro	269923,07	2239	272162,07	221,57	3203578,58	32590,3
Março	314274,61	1704,04	315978,65	257,24	3729964,28	24803,51
Abril	253737,02	700,54	254437,56	207,14	3011474,65	10196,86
Maio	294211,89	693,25	294905,14	240,08	3491850,14	10090,83
Junho	283382,79	516,37	283899,16	231,12	3363325,1	7516,11
Julho	263898,1	399,89	264297,99	215,16	3132071,3	5820,73
Agosto	201401,44	444,43	201845,87	164,32	2390330	6468,99
Setembro	256291,27	1034,72	257325,99	209,49	3041789,74	15061,07
Outubro	260714,77	985,58	261700,35	213,05	3094289,99	14345,79
Novembro	281315,91	333,879	281649,79	229,29	3338794,36	22515,64
Dezembro	205357,5	1897,57	207255,07	168,73	2437282,92	27620,51

Tabela A. 7.Custos associados aos PRMs

Meses	PCS(PRMA)	PCS+fc(PRMB)	Custos PRMA (€)	Custos PRMB (€)	TOTAL (€)
Janeiro	11,86844875	14,55574	73 604,88 €	1 362,98 €	74 967,86 €
Fevereiro	11,86844875	14,55574	52 502,88 €	928,87 €	53 431,75 €
Março	11,86844875	14,55574	60 792,40 €	730,11 €	61 522,51 €
Abril	11,86844875	14,55574	50 129,80 €	343,22 €	50 473,02 €
Maio	11,86844875	14,55574	57 328,56 €	342,55 €	57 671,11 €
Junho	11,86844875	14,55574	55 248,17 €	272,60 €	55 520,77 €
Julho	11,86844875	14,55574	52 094,85 €	230,07 €	52 324,92 €
Agosto	11,86844875	14,55574	41 304,75 €	247,14 €	41 551,89 €
Setembro	11,86844875	14,55574	50 570,80 €	471,35 €	51 042,15 €
Outubro	11,86844875	14,55574	51 545,25 €	454,63 €	51 999,88 €
Novembro	11,86844875	14,55574	54 891,32 €	667,72 €	55 559,04 €
Dezembro	11,86844875	14,55574	39 606,32 €	796,34	40 402,66 €

Na tabela A.8, estão os valores associados aos consumos de gás natural nos PRM(A) e PRM(B)

Tabela A. 8. Valores associados aos consumos de Gás natural

Meses	€/MWh PRMA	€/MWhPRMA (energia)	€/MWh PRMA (tarifas)	€/kWh PRMB	Consumo PMRA (tep)	Consumo PMRB (tep)
Janeiro	23,16370 €	19,98600 €	3,17770 €	0,03494 €	234,74	8,39
Fevereiro	16,38800 €	13,35100 €	3,03700 €	0,02850 €	236,66	7,01
Março	16,29840 €	13,35100 €	2,94740 €	0,02944 €	275,55	5,33
Abril	16,64630 €	13,35100 €	3,29530 €	0,03366 €	222,47	2,19
Maio	16,41782 €	13,35100 €	3,06682 €	0,03395 €	257,96	2,17
Junho	16,42665 €	13,35100 €	3,07565 €	0,03627 €	248,47	1,62
Julho	16,63272 €	13,35100 €	3,28172 €	0,03953 €	231,38	1,25
Agosto	17,27994 €	13,51000 €	3,76994 €	0,03820 €	176,59	1,39
Setembro	16,62534 €	13,51000 €	3,11534 €	0,03130 €	224,71	3,24
Outubro	16,65818 €	13,35100 €	3,30718 €	0,03169 €	228,59	3,08
Novembro	16,44046 €	13,35100 €	3,08946 €	0,02966 €	246,65	4,84
Dezembro	16,25019 €	13,51000 €	2,74019 €	0,02883 €	180,05	5,94

Na tabela A.9, encontram-se os valores mensais de custos e consumos associados à eletricidade

Tabela A. 9 Consumos e custos associados à energia elétrica

Meses	Total(MWh)	Total com Iva (€)	Total s/IVA (€)	Preço médio (€/kWh)	Só energia (€)	Preço médio (€/kWh)	Só redes(€)	Preço médio (€/kWh)	Consumo (tep)
Janeiro	3095,47	330 262,84 €	268 506,77 €	86,74 €	180 393,26 €	58,28 €	88 113,51 €	28,47 €	665,52605
Fevereiro	2819,83	220 517,21 €	179 282,68 €	63,58 €	99 012,24 €	35,11 €	80 270,44 €	28,47 €	606,26345
Março	3388,61	315 720,81 €	256 683,98 €	75,75 €	161 202,50 €	47,57 €	95 481,48 €	28,18 €	728,55115
Abril	2922,47	318 744,05 €	259 141,90 €	88,67 €	177 728,41 €	60,81 €	81 413,49 €	27,86 €	628,33105
Maio	3426,33	367 802,55 €	299 026,86 €	87,27 €	208 023,37 €	60,71 €	91 003,49 €	26,56 €	736,66095
Junho	3552	431 436,89 €	350 762,09 €	98,75 €	255 198,12 €	71,85 €	95 563,97 €	26,90 €	763,68
Julho	2942,8	383 812,06 €	312 042,72 €	106,04 €	231 886,61 €	78,80 €	80 156,11 €	27,24 €	632,702
Agosto	2221,84	305 440,43 €	248 325,95 €	111,77 €	186 871,51 €	84,11 €	61 454,44 €	27,66 €	477,6956
Setembro	3152,63	560 345,93 €	455 566,19 €	144,50 €	370 443,43 €	117,50 €	85 122,76 €	27,00 €	677,81545
Outubro	3357,7	620 231,90 €	504 253,97 €	150,18 €	414 189,09 €	123,36 €	90 064,88 €	26,82 €	721,9055
Novembro	3219,07	579 918,34 €	471 478,72 €	146,46 €	382 799,56 €	118,92 €	88 679,16 €	27,55 €	692,10005
Dezembro	2355,37	480 023,19 €	390 263,15 €	165,69 €	325 078,13 €	138,02 €	65 185,02 €	27,68 €	506,40455

Anexo B- Propriedades físicas e análise dos gases de exaustão

B.1 Propriedades e caracterização do gás natural

O gás natural tem um papel fundamental no processo de transição para economia mais independente de fontes de energia poluentes, como petróleo, sendo alternativa natural ao carvão. Todavia é uma fonte não renovável e que vai servindo de suporte para mudança definitiva para utilização de eletricidade a partir de fontes renováveis. (GALP, 2022)

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos leves que são encontrados no subsolo, no qual o metano é o principal componente, como se pode observar na tabela B.1.

Tabela B. 1 Composição molar do Gás natural em % molar e calor específico

Componente	Composição molar	cp(kJ/kmol.°C)
CH ₄	87,885%	35,74
C ₂ H ₆	8,056%	52,74
C ₃ H ₈	1,378%	73,92
N ₂	1,088%	29,10
CO ₂	1,266%	37,14
OUTROS	0,327%	-----

Na tabela B.2, estão os valores do Poder calorífico, PCI e PCS.

Tabela B. 2 Dados relativos ao Poder calorífico do gás natural em condições PTN

	kWh/m ³
PCI	10,66
PCS	11,85

Na tabela B.3, encontram-se os valores relacionados com peso molecular, massa volúmica e densidade relativa

Tabela B. 3 Propriedades dos gás natural

Peso molecular (g/mol)	18,192
Massa volúmica (kg/m ³) (PTN)	0,8141
Densidade relativa	0,6297

A verificação das características do gás natural é efetuada pelo ORT - Operador da Rede de Transporte (REN Gasoduto) que divulga periodicamente os parâmetros sobre o gás natural de referência, distribuído em Portugal. (GALP, 2022)

Quanto ao calor específico do gás natural, este foi calculado através da equação B.1.

$$cp = \sum_i y_i cp_i = 0,87885 \times 35,74 + 0,08056 \times 52,74 + 0,01378 \times 73,92 + 0,01088 \times 29,10 + 0,01266 \times 37,14 = 37,464 \frac{kJ}{kmol.^{\circ}C} = 2,06 \frac{kJ}{kg.^{\circ}C} \quad \text{Equação B. 1}$$

B.2 Propriedades do ar

Na tabela B.4., encontra-se a composição do ar atmosférico

Tabela B. 4 Componentes do ar atmosférico

Componente	Composição
N ₂	78,084%
O ₂	20,946%
Ar	0,093%
CO ₂	0,038%
Ne	0,002%
Outros	0,837%

Na tabela B.5, encontram-se os valores relacionados com peso molecular, massa volúmica e densidade relativa

Tabela B. 5 Propriedades do ar atmosférico

Peso molecular	28,9
Massa volúmica (kg/m³) (25°C)	1,17
Capacidade calorífica (kJ/kg.°C)	1,01

B.3 Solução de impregnação

A tela atravessa uma solução de impregnação antes de circular no interior da estufa 1. No caso do Poliéster, esta atravessa duas soluções, uma solução de ativação antes da estufa 1, A, e outra solução de impregnação antes da estufa 5, B. Todavia, no âmbito deste trabalho só interessa a solução de ativação A. Apresentam-se na tabela B.6 a composição das duas soluções de ativação, para o caso do poliéster

Tabela B. 6 Composição da solução de ativação do Poliéster

Componente	Constituinte	%(m/m)
A	Água	95,70
	Epoxy	0,75
	IL 60%	2,54
B	Água	1,00
	Anti-espuma	0,01

A temperatura de entrada da solução de ativação situa-se nos 25°C. Como a solução possui na sua grande maioria água, e por não existir informação sobre os calores específicos dos componentes, considerou-se o calor específico da solução igual ao da água a 25°C, 4,18 kJ/kg°C.

Quanto aos artigos de nylon, só existe uma solução de impregnação que se situa antes da estufa 1. Na tabela B.7, estão indicadas as composições mássicas de cada componente na solução assim como calor específico de cada componente e da solução de impregnação. (Torrinha, 2011)

Tabela B. 7 Composição de cada componente na solução de impregnação da máquina ZELL

Constituinte	%(m/m)	cp (kJ/kg. °C)
Água	77,6	4,19
Latex	18,2	1,74
Amónia	0,28	4,61
Resina	3	---
Formaldeído	0,77	2,3
Solução de impregnação	-----	3,65

B.4 Análises dos gases de exaustão

Na figura B.1, encontra-se um excerto da análise dos gases de exaustão realizados na Continental-ITA, por parte do INEGI, no ano de 2019.

Fonte	Concen- tração de oxigénio	Concen- tração de dióxido de carbono	Humidade (percen- tagem volumica de vapor do gás húmido)	Tempera- tura	Pressão	Massa volumica	Massa molar do gás seco	Veloci- dade	Caudal volumico húmido para as condições da chaminé	Caudal volumico seco para as condições padrão
	[%]	[%]	[%]	[K]	[kPa]	[kg/m ³]	[kg/kmol]	[m/s]	[m ³ /h]	[m ³ N/h]
Impregnação Zell #1	19,48 ± 0,20	0,89 ± 0,32	3,57 ± 0,29	403,9 ± 0,5	101,249 ± 0,098	0,861 ± 0,002	28,93 ± 0,05	4,7 ± 0,3	12247 ± 966	7979 ± 630
Impregnação Zell #2	19,12 ± 0,21	1,12 ± 0,32	6,29 ± 0,46	470,9 ± 4,8	101,256 ± 0,098	0,731 ± 0,008	28,95 ± 0,05	9,8 ± 0,4	25131 ± 1534	13649 ± 847
Impregnação Zell #3	18,79 ± 0,20	1,26 ± 0,32	3,19 ± 0,36	490,3 ± 0,5	101,450 ± 0,099	0,712 ± 0,002	28,96 ± 0,05	7,2 ± 0,3	18413 ± 1198	9941 ± 648
Râmula	20,19 ± 0,21	0,62 ± 0,32	2,97 ± 0,14	320,8 ± 0,5	101,263 ± 0,099	1,085 ± 0,003	28,92 ± 0,05	4,8 ± 0,3	8638 ± 618	7129 ± 510
Impregnação Sec #1	20,52 ± 0,19	0,47 ± 0,29	2,86 ± 0,32	391,5 ± 7,6	100,981 ± 0,140	0,887 ± 0,017	28,91 ± 0,05	7,7 ± 1,5	17541 ± 3579	11845 ± 2428
Vácuo Sec #1	20,89 ± 0,19	< 0,37	2,62 ± 0,24	322,8 ± 1,3	101,003 ± 0,140	1,075 ± 0,005	28,86 ± 0,05	8,0 ± 0,3	4368 ± 262	3588 ± 216
Impregnação Sec #2	19,99 ± 0,20	0,51 ± 0,32	2,75 ± 0,25	392,3 ± 1,1	101,398 ± 0,140	0,889 ± 0,003	28,89 ± 0,05	4,6 ± 0,3	10276 ± 816	6961 ± 553
Vácuo Sec #2	20,81 ± 0,20	< 0,39	2,74 ± 0,31	316,1 ± 0,4	101,482 ± 0,140	1,103 ± 0,003	28,85 ± 0,05	23,1 ± 0,7	4090 ± 225	3441 ± 189
Caldeira	16,48 ± 0,25	2,95 ± 0,41	3,16 ± 0,25	377,0 ± 0,6	101,340 ± 0,098	0,931 ± 0,003	29,14 ± 0,07	7,6 ± 0,5	1340 ± 112	940 ± 78
Râmula - Caldeira de Alimentação	16,43 ± 0,19	4,56 ± 0,32	5,29 ± 0,47	465,4 ± 0,2	101,041 ± 0,140	0,752 ± 0,002	29,40 ± 0,05	4,1 ± 1,1	785 ± 212	435 ± 118

Figura B. 1 Composição dos gases de exaustão

Anexo C- Exemplos de cálculos. Balanço de massa e energia

C.1. Balanço de Massa

C.1.1. Ar de combustão

A velocidade média do ar de combustão foi obtida, pela média das velocidades do ar medidas junto à grelha dos ventiladores de admissão de ar. Para o artigo N1:

$$v_{ar\text{ combustão média}} = \frac{\sum v_{medida}}{n^{\circ} \text{ de medições}} \quad \text{Equação C. 1}$$

$$v_{ar\text{ combustão média}} = \frac{9,00+8,74}{2} = 8,87 \text{ m/s}$$

Para determinar a área de passagem livre de ar pelos queimadores das estufas, foi necessário realizar o diâmetro das grelhas, comprimento e larguras dos arames. Na tabela C.4 , encontra-se as dimensões características da grelha de admissão de ar na estufa 1

Tabela C. 1 Dimensões características da grelha de admissão de ar da estufa 1

<i>Diâmetro (D [m])</i>	<i>0,165</i>
<i>Lado do quadrado (L [m])</i>	<i>0,008</i>
<i>Espessura do aro (s [m])</i>	<i>0,0006</i>

Para a determinação da área de escoamento livre (área pela qual o ar escoar), calculou-se se primeiramente a área total (área interna da grelha) e a área externa do quadrado, a fim de se obter o número de quadrados presentes na grelha.

- Cálculo da área total da grelha

$$A_{total} = \pi \times \frac{D^2}{4} \quad \text{Equação C. 2}$$

$$A_{total} = \pi \times \frac{0,165^2}{4}$$

$$A_{total} = 0,0213 \text{ m}^2$$

- Cálculo da área externa dos quadrados

$$A_{externa} = (L \times s)^2 \quad \text{Equação C. 3}$$

$$A_{externa} = (0,008 + 2 * 0,0006)^2$$

$$A_{externa} = 8,464 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

- Número de quadrados

$$N^{\circ}_{\text{quadrados}} = \frac{A_{\text{total}}}{A_{\text{externa}}} \quad \text{Equação C. 4}$$

$$N^{\circ}_{\text{quadrados}} = \frac{0,0213}{8,464 \times 10^{-5}}$$

$$N^{\circ}_{\text{quadrados}} = 252$$

- Cálculo da grelha livre

$$A_{\text{grelhalivre}} = N^{\circ}_{\text{quadrados}} \times A_{\text{interna}} \quad \text{Equação C. 5}$$

$$A_{\text{grelhalivre}} = 252 \times 0,008^2$$

$$A_{\text{grelhalivre}} = 0,0161 \text{ m}^2$$

- Cálculo do caudal mássico do ar de combustão da estufa 1

$$\dot{m}_{\text{arcombustão}} = v_{\text{arcombustão}} \times A_{\text{livre}} \times \rho_{\text{arcombustão}} \quad \text{Equação C. 6}$$

$$\dot{m}_{\text{arcombustão}} = 8,87 \times 0,0161 \times 1,187$$

$$\dot{m}_{\text{arcombustão}} = 0,1696 \text{ kg/s}$$

Depois de ter o caudal mássico de ar de combustão, foi necessário calcular o caudal de ar seco e de água que entra no queimador. Na tabela C.2, está a Humidade relativa média do ar para os ensaios realizados, de acordo com os artigos estudados.

Tabela C. 2 Valores médios da humidade relativa do ar de combustão dos diferentes artigos

Artigo	Queimador	HR
N1	A	41,20%
	B	41,20%
N2	A	38,12%
	B	38,12%
P1	A	36,60%
	B	36,60%
P2	A	37,43%
	B	37,43%

Para calcular a massa de água no ar, calculou-se a humidade específica

- Cálculo da humidade específica

$$Y_r = \frac{p_v}{p_{sat \ 25^\circ C}} \quad \text{Equação C. 7}$$

$$Y_e = \frac{p_v}{P - p_v} \times \frac{18}{28,9} \quad \text{Equação C. 8}$$

P_{sat} a $25^\circ C = 3,166$ kPa

$$Y_e = \frac{Y_r \times 3,166}{101,33 - Y_r \times 3,166} \times \frac{18}{28,9}$$

$$Y_e = \frac{0,4120 \times 3,166}{101,33 - 0,4120 \times 3,166} \times \frac{18}{28,9}$$

$$Y_e = 0,0081 \text{ kg}_{H_2O}/\text{kg}_{ar seco}$$

- Cálculo do caudal de ar seco e de água para cada uma das grelhas de admissão

$$\dot{m}_{ar seco} = \frac{\dot{m}_{ar húmido}}{1 + Y_e} \quad \text{Equação C. 9}$$

$$\dot{m}_{ar seco} = \frac{0,1695}{1 + 0,0081}$$

$$\dot{m}_{ar seco} = 0,1682 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{ar seco total} = 0,3364 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{água} = \dot{m}_{ar seco} \times Y_e \quad \text{Equação C. 10}$$

$$\dot{m}_{água} = 0,3364 \times 0,0081$$

$$\dot{m}_{água} = 2,72 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

C.1.2. Ar fresco

A entrada de ar fresco dá-se por duas zonas da estufa correspondente à entrada e saída da tela. Estas duas seções tem a mesma área e para medir a velocidade de entrada de ar fresco pela parte de baixo da estufa, utilizou-se um anemómetro, em que se media a velocidade em 3 pontos. Na figura C.1, estão a localização dos pontos de medição de ar fresco representado pelos pontos negros. Na tabela C.3, estão as dimensões da entrada de tela da estufa.

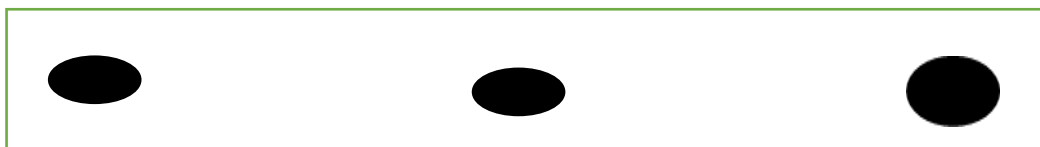


Figura C. 1 Localização dos pontos de medição de ar fresco

Tabela C. 3 Dimensões da seção da entrada e saída da tela da estufa 1

Estufa	Comprimento (m)	Largura(m)	Área(m ²)
1	1,78	0,15	0,267

Para determinar o caudal mássico de ar húmido, foi necessário calcular o caudal volumétrico de ar fresco e de seguida multiplicar pela massa volúmica do ar, para condições de P= 1atm e T=25°C, o valor é de 1,1870 kg.m⁻³. Tendo em atenção que entra ar nas duas seções de entrada e saída da tela, obtém-se na tabela C.5, os valores dos caudais mássicos de ar fresco húmido nas condições operatórias dos diversos artigos estudados.

- Cálculo da velocidade de ar fresco para artigo N1

$$v_{ar\ fresco} = \frac{\sum v_{medida}}{n^{\circ} de\ medições} \quad \text{Equação C. 11}$$

$$v_{ar\ fresco} = \frac{3,3+3,3+2,83+4,53+4}{5} = 3,73\ m/s$$

Tabela C. 4 Velocidade médias de ar fresco na região de entrada e saída da tela

Artigos	v médio(m/s)
N1	3,73
N2	3,49
P1	4,04
P2	3,72

- Cálculo do caudal volumétrico ar fresco húmido nas duas zonas correspondente à entrada e saída da tela.

$$V_{ar\ fresco\ húmido} = v_{média\ ar\ fresco} \times \text{Área}_{entrada/saída\ da\ tela}$$

Equação C. 12

$$V_{ar\ fresco\ húmido} = 3,73 \times 2 \times 0,267 = 1,99\ m^3/s$$

- Cálculo do caudal mássico de ar fresco húmido

$$\dot{m}_{arfrescohúmido} = V_{ar\ fresco\ húmido} \times \rho_{ar}$$

Equação C. 13

$$\dot{m}_{arfrescohúmido} = 1,99 \times 1,1870 = 2,37\ kg/s$$

Tabela C. 5 Caudais volumétricos e mássicos de ar fresco

Artigo	$V_{ar\ fresco\ húmido}\ (m^3/s)$	$\dot{m}_{ar\ fresco\ húmido}\ (kg/s)$
N1	1,99	2,37
N2	1,86	2,21
P1	2,16	2,56
P2	1,99	2,36

Conhecendo os valores de humidade relativa, foi possível calcular a humidade específica e consequentemente, os caudais mássicos de ar fresco seco e de água proveniente do ar fresco. Na tabela C.6, estão os valores dos caudais para diferentes artigos estudados. Para calcular estes valores, utilizou-se as equações C.7, C.8, C.9, C.10.

Tabela C. 6 Valores de humidade relativa e específica e caudais mássicos de ar seco e água

Artigo	HR	$Y_e(kg_{H_2O}/kg_{ar\ seco})$	$\dot{m}_{ar\ seco}\ (kg/s)$	$\dot{m}_{H_2O}\ (kg/s)$
N1	45,80%	0,0090	2,35	0,0212
N2	40,96%	0,0081	2,19	0,0177
P1	42,61%	0,0084	2,54	0,0214
P2	41,41%	0,0082	2,34	0,0191

C.1.3. Tela verde e DIP

Para saber o peso específico do rolo, realizaram-se 5 medições em que se mediu o peso do rolo em verde e a metragem da tela de cada artigo. Nas tabelas C.7, C.8, C.9 e C.10 apresentam-se os parâmetros do peso rolo em verde e a metragem.

Tabela C. 7 Parâmetros do N1

N1			
Nº ROLO	Peso rolo em verde (kg)	Metragem em verde(m)	Massa por metro de tela (kg/m)
1	430,6	2312	0,1862
2	430,6	2312	0,1862
3	430,6	2312	0,1862
4	430,6	2312	0,1862
5	430,6	2312	0,1862
6	430,6	2312	0,1862
Média	430,6	2312	0,1862

Tabela C. 8 Parâmetros do N2

N2			
Nº ROLO	Peso rolo em verde (kg)	Metragem em verde(m)	Massa por metro de tela (kg/m)
1	713	1525	0,4675
2	713	1525	0,4675
3	714	1525	0,4682
4	714	1525	0,4682
5	712	1525	0,4669
6	712	1525	0,4669
Média	713	1525	0,4675

Tabela C. 9 Parâmetros do P1

P1			
Nº ROLO	Peso rolo em verde (kg)	Metragem em verde(m)	Peso por metro de tela (kg/m)
1	933	1203	0,7756
2	936	1195	0,7833
3	932	1190	0,7832
4	932	1190	0,7832
5	932	1190	0,7832
6	939	1195	0,7858
Média	934	1193,833	0,7824

Tabela C. 10 Parâmetros do P2

P2			
Nº ROLO	Peso rolo em verde (kg)	Metragem em verde(m)	Peso por metro de tela (kg/m)
1	971	1670	0,5814
2	967	1675	0,5773
3	942	1637	0,5754
4	970	1670	0,5808
5	970	1670	0,5808
6	967	1675	0,5773
Média	964,50	1666,167	0,5789

De seguida, sabendo que cada artigo possui uma velocidade de passagem na estufa diferente, calculou-se o caudal mássico de cada artigo que circula no interior da estufa 1. O exemplo de cálculo é para artigo N1.

- Cálculo do caudal mássico da tela ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)

$$\dot{m}_{\text{telaverde}} = \frac{\text{Peso do rolo}}{\text{Metragem do rolo}} \times v_{\text{processo}} \quad \text{Equação C. 14}$$

$$\dot{m}_{\text{telaverde}} = \frac{\frac{430,6}{2312} \times 105}{60} = 0,33 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$$

Na Tabela C.11, apresentam-se os valores dos caudais mássicos de cada artigo.

Tabela C. 11 Velocidade da tela e caudal mássico da tela

Artigo	Velocidade de processo (m/min)	Caudal mássico da tela verde (kg/s)
N1	105	0,33
N2	90	0,70
P1	85	1,10
P2	70	0,68

No DIP, onde se encontra a solução de impregnação, cada artigo absorve uma certa quantidade de solução de ativação por rolo. Na tabela C.12, estão os valores que cada artigo absorve de solução e a percentagem de água que estas possuem.

Tabela C. 12 Quantidade de solução absorvida por rolo e percentagem de água por rolo

Artigo	Solução (kg/rolo)	Percentagem de água em solução (%)
N1	170,00	77,70%
N2	150,00	77,70%
P1	235,00	97,72%
P2	265,00	97,72%

Sabendo a percentagem de água em solução, foi possível calcular a água que entra na estufa 1, através da tela verde.

- Cálculo do caudal de água que entra pela tela verde para artigo N1.

$$\left[\frac{kg_{\text{água}}}{m_{\text{tela}}} \right] = \frac{\text{Solução} \left[\frac{kg}{\text{rolo}} \right]}{\text{Metragem do rolo [m]}} * [\%]_{H2O} \quad \text{Equação C. 15}$$

$$\left[\frac{kg_{\text{água}}}{m_{\text{tela}}} \right] = \frac{170}{2312} \times 0,7770$$

$$\left[\frac{kg_{\text{água}}}{m_{\text{tela}}} \right] = 0,0571$$

$$\left[\frac{kg_{\text{água}}}{s} \right] = \frac{\left[\frac{kg_{\text{água}}}{m_{\text{tela}}} \right] \times v_{\text{processo}}}{60} \quad \text{Equação C. 16}$$

$$\left[\frac{kg_{\text{água}}}{s} \right] = \frac{0,0571 \times 105}{60} = 0,10$$

Então os valores obtidos para o caudal de água que entra com a tela são apresentados na tabela C.13.

Tabela C. 13 Caudal de água que entra com a tela verde

Artigo	kg água /m tela	kg água/s
N1	0,0571	0,1000
N2	0,0764	0,1146
P1	0,1923	0,2725
P2	0,1554	0,1813

C.1.4. Formação de água na queima de gás natural

Como foi referido anteriormente, a estufa 1 é a única da máquina ZELL que possui dois queimadores, queimador A e o queimador B. Logo, possui dois contadores de gás natural para ler o consumo de gás. Durante a recolha de dados, realizaram-se ensaios de 10 em 10 minutos em que se retirou volume de gás natural consumido. O fator de correção utilizado no exemplo cálculo do queimador A para artigo N1, é do mês de abril, que está registado na base de dados da C-ITA.

- Caudal de gás natural em condições PTN para artigo N1 e para queimador A

$$Q_{gásnatural} = \frac{C_f - C_i}{\Delta t} \times f_c \quad \text{Equação C. 17}$$

$$Q_{gásnatural} = \frac{88581 - 88188}{600} \times 10^{-2} \times 1,7116134 = 0,01120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{gásnatural} = Q_{gásnatural} \times \rho_{gásnatural} \quad \text{Equação C. 18}$$

$$\dot{m}_{gásnatural} = 0,01120 \times 0,8141 = 0,00912 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Na tabela C.14 , estão os valores médios do consumo de gás natural dos dois queimadores para os diferentes artigos . Apresenta-se também o caudal total de água formada, considerando-se que se formam 2 kg de água por cada 1 kg de Gás natural queimado em condições de queima completa e estequiométrica .

Tabela C. 14 Caudais volumétricos e mássicos de gás natural

Artigo	Caudal volumétrico de gás natural (m ³ .s ⁻¹)			Caudal mássico de gás natural (kg.s ⁻¹)		
	A	B	Total	A	B	Total
N1	0,01120	0,00859	0,01979	0,00912	0,00699	0,01611
N2	0,01126	0,01049	0,02175	0,00917	0,00854	0,01771
P1	0,01524	0,01472	0,02996	0,01240	0,01199	0,02439
P2	0,01394	0,01276	0,02670	0,01135	0,01039	0,02174

C.1.5. Caudal de água nos gases de exaustão

Na tabela C.15, encontram-se os valores de caudais de água que entram no balanço de massa

Tabela C. 15 Caudal de água de entrada e da reação

Artigo	Caudal de água de entrada $\dot{m}_{\text{água}}$			Caudal de água da reação $\dot{m}_{\text{reação}}$
	Tela verde(kg.s ⁻¹)	Ar fresco(kg.s ⁻¹)	Ar de combustão(kg.s ⁻¹)	Combustão (kg.s ⁻¹)
N1	0,1000	0,0212	0,002732	0,0322
N2	0,1146	0,0177	0,002531	0,0354
P1	0,2725	0,0214	0,002545	0,0488
P2	0,1813	0,0191	0,002519	0,0435

Segundo os dados do laboratório de caracterização ambiental, do INEGI, num relatório realizado para C-ITA, no ano de 2019, que se encontram na figura B.1, estão os dados utilizados para calcular o caudal mássico que sai de água pela chaminé. De seguida, calculou-se água que se mantém na tela, após a passagem da estufa 1 e a percentagem da evaporação

- Cálculo da percentagem de água evaporada para N1

Correntes de entrada

$$\dot{m}_{\text{Arseco, combustão}} = 0,3363 \text{ kg.s}^{-1} = 1211 \text{ kg.h}^{-1}$$

$$\dot{m}_{\text{água tela à entrada}} = 0,1 \text{ kg.s}^{-1} = 360 \text{ kg.h}^{-1}$$

$$\dot{m}_{\text{tela verde}} = 0,33 \text{ kg.s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{\text{gás natural}} = 0,01611 \text{ kg.s}^{-1} = 57,99 \text{ kg.h}^{-1}$$

$$Y_e = 0,0090 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{arseco}}}$$

Correntes de saída

$$V_{\text{gás húmido}} = 12247 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$$

$$\rho_{\text{chaminé}} = 0,861 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$\dot{m}_{\text{gases de exaustão}} = 12247 \times 0,861 = 10545 \text{ kg.h}^{-1}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0357 \times 12247 = 437 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{101 \times 437,2}{8,314 \times 403,9} = 13,15 \text{ kmol.h}^{-1}$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O gases de exaustão}} = 237 \text{ kg.h}^{-1}$$

$$\dot{m}_{\text{GE,secos}} = 10545 - 237 = 10308 \text{ kg.h}^{-1} = 2,86 \text{ kg.s}^{-1}$$

Balanço de massa à água

$$\dot{m}_{\text{água no ar}} + \dot{m}_{\text{água entrada na tela}} + \dot{m}_{H_2O \text{ reação}} = \dot{m}_{\text{água nos gases}} + \dot{m}_{\text{água tela à saída}}$$

Equação C. 19

$$86,152 + 360 + 115,92 = 237 + \dot{m}_{\text{água tela}}$$

$$\dot{m}_{\text{água na tela}} = 325,07,0 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$\text{Evaporação (\%)} = \frac{\dot{m}_{\text{água entrada da tela}} - \dot{m}_{\text{água na tela na saída}}}{\dot{m}_{\text{água entrada da tela}}} \times 100 \quad \text{Equação C. 20}$$

$$\text{Evaporação (\%)} = \frac{360 - 325,07}{360} \times 100 = 9,7 \%$$

Por fim, na tabela C.16, encontram-se os valores finais da percentagem de evaporação.

Tabela C. 16 Evaporação na estufa 1

Artigos	Evaporação (%)
N1	9,70
N2	8,90
P1	-----
P2	0,39

C.2- Balanço de Energia

C.2.1 Potência térmica das correntes de saída

Gases de exaustão

Para calcular a potência térmica dos gases de exaustão, utilizou-se a equação 6.6. Para tal, utilizou-se um $\Delta H_{\text{vaporização}}$ de 25°C de 2442,5 kJ/kg (Sebenta de Termodinâmica Aplicada, 2021) e a temperatura de 130,9°C. Quanto à humidade específica, foi calculada de acordo com análise dos gases fornecidos pelo INEGI.

- Exemplo de cálculo da potência térmica dos gases de exaustão

$$Y_e = \frac{237}{10545 - 237} = 0,023$$

$$H_{\text{gases de exaustão}} = (2442,5 \times 0,023 + ((0,24 + 0,45 \times 0,023) \times 4,18) \times (130,9 - 25)) \times 2,86 = 478,17 \text{ kW}$$

Tela impregnada

Para calcular a potência térmica da tela impregnada, utilizou-se os caudais que se encontram na tabela C.11, as temperaturas médias registadas nos PT100 nas posição 11 e um calor calorífico tabelado em bibliografia de 1,3 kJ/kg.°C . (Oliveira, 2015)

Na tabela C.17, encontram-se essas temperaturas e os respetivos valores da potencia térmica.

- Exemplo de cálculo da potência térmica da tela impregnada

$$H_{\text{Tela impregnada}} = \dot{m}_{\text{tela impregnada}} \times cp_{\text{tela}} \times (T_{PT100} - T_{ref}) =$$

$$H_{\text{Tela impregnada}} = 0,33 \times 1,30 \times (94 - 25) = 29,24 \text{ kW}$$

Tabela C. 17 Potência térmica da tela impregnada

Artigo	Temperatura PT100 (°C)	Potência térmica (kW)
N1	94,00	29,24
N2	89,00	58,35
P1	86,17	87,47
P2	82,53	50,51

- Para o artigo N1:

$$\sum H_s = 478,17 + 29,24 = 507,41 \text{ kW}$$

Tabela C. 18 Potência térmica das correntes de saída

Artigo	H _s (kW)
N1	507,41
N2	539,98
P1	571,12
P2	529,79

C.2. Potência térmica das correntes de entrada

Gás natural

Na tabela C.19, encontram-se os caudais de gás natural.

Tabela C. 19 Caudais de gás natural

Artigo	Caudal de gás(kg/s)
N1	0,01611
N2	0,01771
P1	0,02439
P2	0,02174

Na tabela C.20 , encontram-se os valores das potencias térmicas consoante os artigos impregnados.

- Exemplo de cálculo para cálculo da potência térmica do gás natural

$$cp_{GN} = 2,07 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}$$

$$H_{GN} = 0,01611 \times 2,07 \times (30 - 25) = 0,167 \text{ kW}$$

Tabela C. 20 Potência térmica do gás natural

Artigo	Potência térmica (kW)
N1	0,167
N2	0,183
P1	0,252
P2	0,225

Ar de Combustão

Na tabela C.21, encontram-se os caudais associados ao ar de combustão.

Tabela C. 21 Caudal mássico do ar de combustão

Artigo	$\dot{m}_{\text{ar de combustão}} \text{ (kg/s)}$
N1	0,3364
N2	0,3370
P1	0,3532
P2	0,3418

O ar de combustão encontra-se a uma temperatura de 30°C e para calcular a humidade específica, utilizou-se a equação C.8, que difere de artigo para artigo, tendo na tabela C.22 os valores.

Tabela C. 22 Humidade específica do ar de combustão

Artigo	Y_e
N1	0,008122
N2	0,007507
P1	0,007205
P2	0,007369

A potência térmica do ar de combustão encontra-se na tabela C.23.

- Exemplo de cálculo para potência térmica do ar de combustão ($T=30^\circ\text{C}$)

$$Y_e = 0,008122$$

$$H_{\text{gases de exaustão}} = (2442,5 \times 0,008122 + ((0,24 + 0,45 \times 0,008122) \times 4,18) \times (30 - 25)) \times 0,3364 = 8,319 \text{ kW}$$

Tabela C. 23 Potência térmica do ar de combustão

Artigo	Potência térmica (kW)
N1	8,319
N2	7,835
P1	7,954
P2	7,833

Ar fresco

Na tabela C.24, encontram-se representados os valores do caudal mássico e molar do ar fresco.

Tabela C. 24 Caudal mássico e molar e ar fresco

Artigo	$\dot{m}_{\text{ar fresco}} \text{ (kg/s)}$
N1	2,37
N2	2,21
P1	2,56
P2	2,36

O ar de combustão encontra-se a uma temperatura de 30°C e para calcular a humidade específica, utilizou-se a equação C.8, que difere consoante o artigo, tendo na tabela D.25 esses respetivos valores, como também os valores da potência térmica do ar fresco que foram obtidos utilizando a equação 6.6.

- Exemplo de cálculo para potência térmica do ar fresco

$$Y_e = 0,009042$$

$$H_{\text{gases de exaustão}} = (2442,5 \times 0,009042 + ((0,24 + 0,45 \times 0,009042) \times 4,18) \times (30 - 25)) \times 2,37 = 63,758 \text{ kW}$$

Tabela C. 25 Humidade específica do e potencia térmica do ar fresco

Artigo	Y_e	Potência térmica (kW)
N1	0,009042	63,758
N2	0,008074	54,399
P1	0,008405	65,116
P2	0,008163	58,511

Solução DIP e tela verde

Na Tabela C.26, encontram-se associados os valores do caudal mássicos o calor específicos dos artigos de nylon e poliéster estudados, consultados na bibliografia. (Torrinha, 2011).

Tabela C. 26 Caudal mássico de DIP e calor específico dos artigos estudados

Artigo	$\dot{m}_{DIP}$ (kg/s)	cp (kJ/kg.K)
N1	0,13	3,65
N2	0,15	3,65
P1	0,28	4,18
P2	0,19	4,18

Na tabela C.27, são apresentados os valores do caudal mássico dos diferentes artigos para tela verde que circula na ZELL

Tabela C. 27 Caudal mássico de tela verde

Artigo	$\dot{m}_{tela\ verde}$ (kg/s)
N1	0,33
N2	0,70
P1	1,11
P2	0,68

Como foi medido que a temperatura tanto do DIP como da tela verde, se situava perto da temperatura de referência de 25°C (298K), a potência térmica destes será igual a 0.

- Exemplo de cálculo para DIP e tela verde

$$H_{DIP} = \dot{m}_{DIP} \times cp_{DIP} \times (T_{DIP} - T_{REF})$$

$$H_{DIP} = 0,13 \times 3,65 \times (298 - 298) = 0 \text{ kW}$$

$$H_{tela\ verde} = \dot{m}_{tela\ verde} \times cp_{tela\ verde} \times (T_{tela\ verde} - T_{REF})$$

$$H_{DIP} = 0,33 \times 1,3 \times (298 - 298) = 0 \text{ kW}$$

- Para Artigo N1:

$$\sum H_E = 0,167 + 8,319 + 63,758 = 72,24 \text{ kW}$$

Tabela C. 28 Potência térmica das correntes de saída

Artigo	H_e (kW)
N1	72,24
N2	62,42
P1	73,32
P2	66,57

C.3. Perdas térmicas

Na tabela C.29, a encontram-se os valores das perdas térmicas podem ser calculadas através da equação 5.6

- Exemplo de cálculo para perdas térmicas para o caso do artigo N1

$$\sum H_s = 507,41 \text{ kW}$$

$$\sum H_e = 72,24 \text{ kW}$$

Sabendo que PCS do gás natural = 11,85 kWh.m⁻³ em condições PTN, como se encontra no anexo B.1., e de acordo com os caudais volumétricos de gás natural, nas mesmas condições PTN, apresentados na tabela C.14, obtém-se:

$$\Delta H_{\text{reação},298}^0 = -PCS \times V_{\text{gás natural}} = -11,85 \times 0,01980 \times 3600 = -844,155 \text{ kW}$$

Equação C. 21

$$q = H_s + \Delta H_{\text{reação},298}^0 - H_e = 507,41 - 844,155 - 72,24 = -408,50 \text{ kW}$$

Tabela C. 29 Potência térmicas na estufa 1

Artigo	H _s (kW)	H _e (kW)	Calor de reação (kW)	Perdas térmicas (kW)
N1	507,41	72,24	-844,16	-408,50
N2	539,98	62,42	-928,06	-453,96
P1	571,12	73,32	-1278,04	-786,37
P2	529,79	66,57	-1139,02	-676,90

Anexo D- Caraterização da estufa 1.

Com utilização de um tubo de Pilot, realizou-se as medições de velocidade do fluido no interior da estufa 1, em três zonas distintas de cada *FLAPs*, como em várias posições das *JETBOXs*. Na tabela D.1, encontram-se as várias medições feitas para 15, 30 e 50 % da capacidade máxima de injeção de ar da estufa 1.

Tabela D. 1 Medições da ventilação do ar

Posição(nº da flap)	Medições(m/s)									Capacidade de ventilação
	LEFT			CENTRAL 1			CENTRAL 2			
	OS	C	OD	OS	C	OD	OS	C	OD	
5	1,51	1,34	1,76	1,62	1,71	1,89	1,81	0,99	1,81	15%
	3,66	3,85	3,68	3,26	3,64	3,75	3,28	3,45	3,77	30%
	10,20	9,50	9,70	9,30	8,50	10,00	10,00	9,50	9,00	50%
9	1,14	1,76	1,51	2,06	1,51	2,02	1,51	1,21	1,51	15%
	2,83	2,65	2,68	2,52	2,25	2,29	2,36	2,25	2,49	30%
	10,50	10,40	10,80	6,10	6,40	9,20	7,60	9,20	9,80	50%
29	2,32	2,14	2,29	2,18	1,94	2,10	1,85	2,14	1,81	15%
	3,85	3,90	3,77	3,83	3,75	3,96	3,45	3,45	3,81	30%
	9,70	9,50	9,30	8,10	7,60	7,30	7,40	7,70	8,00	50%
37	2,10	2,02	2,06	2,06	2,10	2,06	2,21	1,94	2,06	15%
	2,88	2,80	2,77	2,83	2,68	2,49	2,97	2,71	2,77	30%
	10,20	10,50	9,60	10,80	8,50	8,70	9,30	8,30	8,80	50%
46	2,10	2,06	2,02	1,98	1,76	2,06	2,02	1,67	1,89	15%
	3,64	3,66	3,52	3,50	3,38	3,50	3,61	3,77	3,68	30%
	10,20	10,20	10,80	6,10	5,50	8,20	7,30	6,50	8,90	50%
67	1,94	2,21	2,06	1,81	1,81	2,06	2,10	1,94	1,89	15%
	3,45	3,40	3,38	3,16	3,36	3,50	3,28	3,48	3,48	30%
	8,20	8,60	8,50	6,10	6,60	6,70	6,50	5,90	6,50	50%
71	1,89	2,14	2,21	1,81	2,21	1,85	2,39	1,81	2,29	15%
	3,16	3,50	3,36	3,54	3,45	3,43	3,18	3,33	3,26	30%
	8,70	8,80	8,30	5,80	5,30	7,40	6,10	5,80	6,50	50%

Na tabela D.2, encontram-se os valores médios das temperaturas registadas para cada PT100, para diferentes artigos.

Tabela D. 2 Temperaturas registadas nos PT100

Classificação	T _{operação} (°C)	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6	MP7	MP8	MP9	MP10	MP11	MP12
N1	160,00	160,00	160,00	152,50	159,83	161,00	159,83	159,83	158,17	159,50	142,50	95,17	95,33
N2	155,00	155,00	155,00	146,40	153,60	157,20	155,00	154,40	151,60	154,60	139,80	89,00	89,60
P1	200,00	200,00	200,00	183,14	196,00	202,71	198,29	199,00	194,86	200,00	157,29	85,71	109,00
P2	175,00	175,00	175,00	163,00	172,20	177,07	173,67	174,20	171,07	174,93	148,33	82,53	98,40

Anexo E- Temperatura na estufa 1 e consumo de gás natural

Neste anexo apresentam-se os resultados obtidos para as várias medidas de otimização assumidas. Apresentam-se também os exemplos de cálculo necessários.

Anexo E.1 Alteração da Ventilação- medição da temperatura

Nas tabelas E.1, E.2, E.3, E.4 e E.5, encontram os valores das temperaturas médias registadas para diferentes ventilações.

Tabela E. 1 Temperaturas médias registadas para ventilação a 32/32 para Poliésteres

Artigo	T _{operação} (°C)	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6	MP7	MP8	MP9	MP10	MP11	MP12
P1	200,00	200,00	200,00	185,13	197,38	202,75	198,00	198,25	195,25	199,88	171,25	91,50	110,38
P2	175,00	175,00	175,00	164,33	173,17	177,00	174,33	173,33	171,17	174,67	154,00	89,83	100,17

Tabela E. 2 Temperaturas médias registadas para ventilação a 33/33 para Poliésteres

Artigo	T _{operação} (°C)	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6	MP7	MP8	MP9	MP10	MP11	MP12
P1	200,00	200,00	200,00	184,83	197,33	203,00	198,33	198,50	195,00	200,17	171,17	92,50	110,50
P2	175,00	175,00	175,00	163,67	173,17	176,67	174,17	173,00	171,00	174,33	153,33	88,67	100,67

Tabela E. 3 Temperaturas médias registadas para ventilação de 35/35 para Nylons

Artigo	T _{operação} (°C)	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6	MP7	MP8	MP9	MP10	MP11	MP12
N1	160,00	160,00	160,00	154,00	160,00	161,00	160,00	160,00	159,00	160,00	145,67	101,67	98,00
N2	155,00	155,00	155,00	148,63	154,00	156,63	154,88	153,38	152,00	154,50	141,13	99,63	93,25

Tabela E. 4 Temperaturas médias registadas para ventilação de 40/40 para Nylons

Artigo	T _{operação} (°C)	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6	MP7	MP8	MP9	MP10	MP11	MP12
N1	160,00	160,00	160,00	155,38	160,38	161,00	159,88	159,13	159,00	159,00	149,38	107,50	100,38
N2	155,00	155,00	155,00	149,60	154,00	156,80	154,60	154,20	152,00	154,40	143,40	103,60	93,60

Tabela E. 5 Temperaturas médias registadas para ventilação 45/45 para Nylons

Artigo	T _{operação} (°C)	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6	MP7	MP8	MP9	MP10	MP11	MP12
N1	160,00	160,00	160,00	156,00	160,00	161,00	160,00	159,67	159,33	159,33	152,00	111,00	102,00
N2	155,00	155,00	155,00	150,80	154,60	155,80	154,40	153,60	153,00	153,40	146,20	108,60	95,20

Anexo E.2.- Caudal de Gás natural na estufa 1 em função da ventilação

O exemplo de cálculo que se apresenta é para artigo N1:

$$V_{GN} = 71,23 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$\dot{m}_{tela} = 0,33 \text{ kg/s}$$

$$\text{Produção anual} = 532,827 \text{ ton}$$

$$\text{Consumo Especifico} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right) = \frac{V \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)}{\dot{m}_{Tela} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)} \times \text{PCS} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right) = \frac{72}{0,33 \times 3600} \times 11,85 = 0,7105 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

Equação E. 1

$$\text{Preço GN} = 100 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

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

$$\text{Preço GN} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) = 0,7105 \times 532,827 \times 100 \times 10^{-3} = 37861,00\text{€}$$

Equação E. 2

Para os outros artigos, na tabela E.6, encontram-se os valores de caudais e consumo específico para condições de trabalho atuais.

Tabela E. 6 Caudal de gás natural e consumos específicos da estufa 1 nas condições atuais

Artigo	Produção Anual (ton)	Ventilação a 30/28		
		Caudal de gás natural (m³/h)	Consumo específico (kWh/kg)	Custo anual (€)
N1	532,827	71,24	0,711	37861,00
N2	1928,730	78,32	0,335	64573,65
P1	3504,219	114,73	0,320	112075,57
P2	2843,696	95,07	0,462	131367,83

Nas tabelas E.7. e E.8, encontram-se apresentados os valores de consumos de gás natural como também dos consumos específicos da estufa 1 para diferentes ventilações impostas.

Tabela E. 7 Caudal de gás natural e consumo específico da estufa 1 para Nylons em função da ventilação

Artigo	Produção Anual (ton)	Ventilação a 35/35			Ventilação a 40/40			Ventilação a 45/45		
		Caudal de gás natural (m³/h)	Consumo específico (kWh/kg)	Custo anual(€)	Caudal de gás natural (m³/h)	Consumo específico (kWh/kg)	Custo anual(€)	Caudal de gás natural (m³/h)	Consumo específico (kWh/kg)	Custo anual(€)
N1	532,827	72,61	0,724	38589,28	76,57	0,764	40692,83	75,68	0,755	40224,64
N2	1928,730	92,98	0,397	76662,54	89,72	0,384	73974,49	86,99	0,372	71720,60

Tabela E. 8 Caudal de gás natural e consumo específico da estufa 1 para Poliésteres em função da ventilação

Artigo	Produção Anual (ton)	Ventilação a 32/32			Ventilação a 33/33		
		Caudal de gás natural (m³/h)	Consumo específico (kWh/kg)	Custo anual(€)	Caudal de gás natural (m³/h)	Consumo específico (kWh/kg)	Custo anual(€)
P1	3504,219	114,73	0,340	119225,51	119,13	0,354	123799,79
P2	2843,696	95,07	0,463	131676,50	100,94	0,482	136991,75

Anexo E.3.- Caudal de Gás natural na estufa 2 para diferentes exaustões

Tabela E. 9 Consumo de gás natural da estufa 2- exaustão 40%- nas condições de ventilação atuais da estufa 1

Artigo	Produção Anual (ton)	Ventilação a 30/28		
		Caudal de gás natural (m³/h)	Consumo específico (kWh/kg)	Custo anual(€)
N1	532,827	32,713	0,326	17386,09
N2	1928,730	43,900	0,188	36196,04
P1	3504,219	61,763	0,183	64182,05
P2	2843,696	62,114	0,301	85503,05

Na tabela E.10 e E.11, encontram-se os valores do consumo de gás natural da estufa 2 para uma exaustão de 35% e para diferentes artigos e em função da ventilação da estufa 1 e o respetivo custo anual.

Tabela E. 10 Consumo de gás natural da estufa 2- exaustão 40%- para artigos de Nylon consoante a ventilação da estufa 1

Artigo	Produção Anual (ton)	Ventilação 35/35			Ventilação 40/40			Ventilação 45/45		
		Consumo de gás natural (m³/h)	Consumo específico (kWh/kg)	Custo anual(€)	Consumo de gás natural (m³/h)	Consumo específico (kWh/kg)	Custo anual(€)	Consumo de gás natural (m³/h)	Consumo específico (kWh/kg)	Custo anual(€)
N1	532,827	28,83	0,288	15323,67	28,63	0,286	15215,25	28,63	0,286	15215,25
N2	1928,730	39,35	0,168	32445,83	37,41	0,160	30487,93	36,66	0,157	30225,59

Tabela E. 11 Consumo de gás natural da estufa 2- exaustão 40%- para artigos de Poliésteres consoante a ventilação da estufa 1

Artigo	Produção Anual (ton)	Ventilação 32/32			Ventilação 33/33		
		Consumo de gás natural (m³/h)	Consumo específico (kWh/kg)	Custo anual(€)	Consumo de gás natural (m³/h)	Consumo específico (kWh/kg)	Custo anual(€)
P1	3504,219	55,998	0,166	58191,11	54,621	0,162	56760,18
P2	2843,696	43,112	0,209	59345,57	42,621	0,206	58583,35

Na tabela E.12, encontram-se os valores associados ao consumo de gás natural, consumo energético como também dos custos associados com alteração da exaustão da estufa 2 de 40% para 35%.

Tabela E. 12 Consumo de gás natural na estufa 2 com alteração da exaustão para 35%

Artigo	Produção Anual (ton)	Exaustão da estufa 2	Ventilação 35/35			Ventilação 40/40			Ventilação 45/45		
			Consumo de gás natural (m³/h)	Consumo específico (kWh/kg)	Custo anual(€)	Consumo de gás natural (m³/h)	Consumo específico (kWh/kg)	Custo anual(€)	Consumo de gás natural (m³/h)	Consumo específico (kWh/kg)	Custo anual(€)
N1	532,827	35%	27,98	0,279	14871,91	27,61	0,275	14673,14	27,302	0,272	14510,51
N2	1928,730	35%	34,50	0,148	28453,88	32,88	0,141	27108,28	31,858	0,136	26267,28

Anexo E.4 – Aquecimento da solução- cálculo do consumo de gás

Para calcular o consumo de gás natural, na situação em que se faz o aquecimento prévio da solução de impregnação, recorre-se ao balanço de energia da equação 5.6.

$$H_{DIP} = \dot{m}_{DIP} \times cp_{DIP} \times (T_{DIP} - T_{REF}) =$$

$$H_{DIP} = 0,13 \times 3,65 \times (70 - 25) = 21,35 \text{ kW}$$

$$V_{gás \text{ Natural}} = \frac{q - \sum H_s + \sum H_e + H_{dip}}{-PCS} = \frac{-408,50 - 507,41 + 72,24 + 21,35}{-11,85} = 69,45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

Tabela E. 13 Novos valores de caudal volumétrico do gás natural para T_{DIP} de 70°C

Artigo	$V_{Gás \text{ Natural}} (\text{m}^3/\text{h})$
N1	69,45
N2	76,27
P1	103,43
P2	93,10

Na tabela E.14, encontram-se os valores da poupança de gás natural com estes novos valores.

- Exemplo de cálculo das poupanças para artigo N1:

$$Custo \left(\left(\frac{\text{€}}{\text{ton}_{artigo}} \right) \right) = \frac{V \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)}{\dot{m}_{tela} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)} \times 1000 \times Custo \text{ GN} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \times PCS \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right) =$$

$$= \frac{69,65}{0,33 \times 3600} \times 1000 \times 100 \times 10^{-3} \times 11,85 = 69,48 \text{ €/ton}$$

Equação E. 3

$$Custo \left(\frac{\text{€}}{\text{ano}} \right) = Custo \left(\left(\text{€} \cdot \text{ton}_{artigo}^{-1} \right) \right) \times Produção \text{ anual} \left(\frac{\text{ton}}{\text{ano}} \right) = 69,48 \times 532,827 = 37018,40 \frac{\text{€}}{\text{ano}}$$

Equação E. 4

Tabela E. 14 Custos associados ao gás natural

Artigo	Produção Anual (ton)	Condições atuais		Novas condições		Poupança final(€)
		Custo (€/ton _{artigo})	Custo anual(€)	Custo (€/ton _{artigo})	Custo anual(€)	
N1	532,827	71,06	37 861,00 €	69,28	36 913,07	947,93
N2	1928,730	36,83	71 031,01 €	35,87	69 176,25	1 854,77
P1	3504,219	32,27	113 094,44 €	30,95	108 452,75	4 641,70
P2	2843,696	46,20	131 367,82 €	45,07	128 161,17	3 206,65

Na Tabelas E.15 e E.16. estão os valores associados ao aquecimento até 60°C e 65°C.

Tabela E. 15 Valores associados a solução DIP aquecida até 65°C

Artigo	V _{Gás Natural} (m ³ /h)	Novo custo (€/ton _{artigo})	Poupança final (€)
N1	69,65	69,48	842,60
N2	76,50	35,97	1 648,68
P1	103,92	31,10	4 125,95
P2	93,50	45,26	2 659,04

Tabela E. 16 Valores associados a solução DIP aquecida até 60°C

Artigo	V _{Gás Natural} (m ³ /h)	Novo custo (€/ton _{artigo})	Poupança final (€)
N1	69,85	69,67	737,28
N2	76,73	36,08	1 442,60
P1	104,41	31,24	3 610,21
P2	93,83	45,42	2 208,55