



# Otimização energética do processo de secagem de uma indústria têxtil

**INÊS MARIA DE SÁ ALVES**

Julho de 2023

# **OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DO PROCESSO DE SECAGEM DE UMA INDÚSTRIA TÊXTIL**

Dissertação Submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Química, área de especialização Energia e Biorrefinaria



**GRUPO COPO**  
MAKING THE DIFFERENCE

Autor: Inês Maria de Sá Alves

Orientadores:

Maria João Ramalhosa (ISEP)

Olga Freitas (ISEP)

Vitor Faria (Copo Têxtil)

Julho 2023



## Agradecimentos

Concluindo esta etapa do meu percurso académico, gostaria de agradecer a todos aqueles que de alguma forma possibilitaram e contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.

À Copo Têxtil Portugal S.A, pela oportunidade proporcionada para o desenvolvimento da dissertação de mestrado em âmbito profissional e a todos os colaboradores que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste projeto.

Ao Vitor Faria, pelo constante acompanhamento, orientação e confiança depositada ao longo do trabalho

Ao José Gouveia, pela disponibilidade contínua, conhecimento transmitido, atenção dedicada e incansável ajuda e preocupação.

Aos colegas do Departamento de Desenvolvimento, por todas as gargalhadas e boa disposição que contribuíram significativamente para a minha motivação diária.

Ao Departamento de Engenharia Química do ISEP e aos seus docentes, pelos conhecimentos transmitidos ao longo destes anos.

Às Engenheiras Orientadoras do ISEP Olga Freitas e Maria João Ramalhosa por terem aceitado ser novamente as minhas orientadoras, por toda a ajuda dispensada, desde o apoio bibliográfico disponibilizado, à orientação ao longo de todo o projeto e relatório.

Aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional, pelo apoio e por celebrarem comigo todas as vitórias, levo-vos comigo para a vida.

Ao Daniel, pelo amor incondicional, por ser o meu porto de abrigo e tornar os dias menos cinzentos.

Por último, dirijo um agradecimento especial aos meus pais e irmã, pelo apoio total, incentivo e paciência demonstrada e por fazerem tudo pela minha felicidade. Dedico a vocês os meus sucessos.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

O meu profundo obrigada!



## Resumo

A presente dissertação, integrada no segundo ano do Mestrado em Engenharia Química – Energia e Biorrefinaria do Instituto Superior de Engenharia do Porto, foi realizada na empresa Copo Têxtil Portugal. O objetivo principal do trabalho consistiu na otimização energética do processo de secagem do material têxtil.

O trabalho desenvolvido foi dividido em três partes: i) caracterização do processo atual de secagem, determinando-se a humidade de artigos de tecelagem e tricotagem 100% poliéster aplicados no setor têxtil automóvel, ii) realização de ensaios de otimização através da diminuição da temperatura e aumento da velocidade de acabamento e iii) caracterização do processo de secagem através de balanços de massa e energia, quantificando em termos mássicos e energéticos cada corrente.

Relativamente à caracterização do processo atual de secagem verificou-se que das dez referências analisadas, cinco (370244, 370246, 375593, 375595 e 375591) encontravam-se com excesso de secagem e as restantes referências (371034, 371035, 375519, 370195 e 375474) apresentavam valores de humidade final adequados à realidade da empresa.

A otimização da diminuição da temperatura e aumento da velocidade de acabamento foi realizada para as referências 370244, 375593, 375474, 375591 e 375519. Para a referência 370244 observou-se que o aumento da velocidade provoca um aumento da humidade do artigo de 2,4 e 5,3 vezes, quando a velocidade passa de 20 para 23 m/min e de 20 para 26 m/min, respetivamente. No caso do artigo 375474, um aumento na velocidade de 5 e 10 m/min promove um aumento na humidade do material de 1,3 e 1,8 vezes, respetivamente. A otimização da velocidade de 18 para 23 m/min para a referência 375519, aumentou a quantidade de água no material em 1,2 vezes. As restantes referências não apresentaram valores de humidade dentro do intervalo ótimo experimental (0,01 – 0,08%). Para a otimização da temperatura, realizaram-se dois ensaios para a referência 370244, diminuindo-se a temperatura em 10 e 15 °C, tendo-se obtido uma humidade final de 0,17 e 0,36 %, respetivamente. No que diz respeito aos testes físicos, no primeiro ensaio o limite máximo aceitável para a largura foi ultrapassado em 20 mm e no segundo ensaio, o limite foi excedido em 50 mm. Estes resultados não satisfazem os requisitos de controlo de qualidade impostos, pelo que as otimizações foram rejeitadas.

Através de balanços de massa e energia ao artigo 370244, na secagem de 251,1 kg/h de material têxtil (46,16 kg/h correspondem ao caudal mássico de água), utiliza-se um caudal de ar de secagem de 4 557,1 kg/h com um teor de água de 0,006 kg<sub>água</sub>/kg<sub>ar seco</sub>. Desta forma, o caudal de saída do material seco é de 251,01 kg/h, obtendo-se um teor de água de 0,00036 kg<sub>água</sub>/kg<sub>material seco</sub>. O ar de secagem sai da chaminé com uma humidade de 0,030 kg<sub>água</sub>/kg<sub>ar seco</sub>.

Em termos energéticos, da energia fornecida ao sistema pelo termofluido (370,6 kW), sabe-se que 92,5% (338,8 kW) é gasta no aquecimento do ar de secagem, 6,1% é perdida por radiação e convecção e a restante é utilizada para elevar a temperatura do material de 20 para 80°C. Além disso, constata-se que o processo de secagem do artigo 370244 não é eficiente, uma vez que consome 27 384 kJ/kg<sub>água evaporada</sub>.

Palavras-Chave: Indústria têxtil; Otimização energética; Secagem; *Foulard*; Râmola.



## Abstract

This dissertation, integrated in the second year of the master's in chemical engineering - Energy and Biorefinery of the Instituto Superior de Engenharia do Porto, was conducted in the company Copo Têxtil Portugal. The main objective of the work consisted in the energetic optimization of the textile drying process.

The work was divided into three parts: i) characterization of the current drying process, determining the moisture content of 100% polyester weaving and knitting articles used in the automotive textile sector, ii) optimization tests by decreasing the temperature and increasing the finishing speed and iii) characterization of the drying process through mass and energy balances, quantifying in terms of mass and energy each current.

Regarding the characterization of the current drying process, it was verified that from the ten references analyzed, five (370244, 370246, 375593, 375595 and 375591) had excessive drying and the remaining references (371034, 371035, 375519, 370195 and 375474) had final moisture values adequate to the company's reality.

The optimization of decreasing the temperature and increasing the finishing speed was performed for references 370244, 375593, 375474, 375591 and 375519. For reference 370244 it was observed that increasing the speed causes an increase in the moisture of the article by 2,4 and 5,3 times, when the speed is increased from 20 to 23 m/min and from 20 to 26 m/min, respectively. In the case of item 375474, an increase in speed from 5 and 10 m/min promotes an increase in the moisture of the material by 1,3 and 1,8 times, respectively. Optimizing the speed from 18 to 23 m/min for reference 375519 increased the amount of water in the material by 1,2 times. The remaining references did not show moisture values within the experimental optimum range (0,01 – 0,08%). For temperature optimization, two tests were performed for reference 370244, decreasing the temperature by 10 and 15 °C, obtaining a final humidity of 0,17 and 0,36%, respectively. As far as the physical tests are concerned, in the first test the maximum acceptable limit for width was exceeded by 20 mm, and in the second test the limit was exceeded by 50 mm. These results do not meet the imposed quality control requirements and the optimizations were therefore rejected.

Using mass and energy balances to article 370244, when drying 251.1 kg/h of textile material (46,16 kg/h corresponds to the mass flow of water), a drying air flow of 4 557.1 kg/h with a water content of 0,006 kg<sub>water</sub>/kg<sub>dry air</sub> is used. Thus, the output flow of dry material is 251.01 kg/h, giving a water content of 0,00036 kg<sub>water</sub>/kg<sub>dry material</sub>. The drying air comes out of the chimney with a humidity of 0,030 kg<sub>water</sub>/kg<sub>dry air</sub>.

In terms of energy, of the energy supplied to the system by the thermal fluid (370,6 kW), it's known that 92,5% (338,8 kW) is spent on heating the drying air, 6,1% is lost by radiation and convection, and the rest is used to raise the temperature of the material from 20 to 80°C. Furthermore, it is found that the drying process for article 370244 is not efficient, since it consumes 27 384 kJ/kg<sub>evaporated water</sub>.

Keywords: Textile Industry; Energy Optimization; Drying; Foulard; Branch.



## Índice

1	Introdução .....	1
1.1	Enquadramento e justificação do tema.....	1
1.2	Tema e objetivo da dissertação.....	5
1.3	Organização da dissertação .....	5
2	Caraterização da empresa acolhedora e processo produtivo.....	7
2.1	Instalações da empresa .....	8
2.2	Produtos base.....	9
2.3	Processo produtivo e produção do material têxtil .....	10
3	Fundamentos teóricos .....	17
3.1	Secagem.....	17
3.1.1	Tipos de secagem .....	18
3.1.2	Tipos de secadores de sólidos .....	18
3.1.3	Secagem de tecidos .....	21
3.1.4	Equações básicos de secagem .....	26
3.1.5	Condições que afetam a secagem.....	28
3.2	Combustão .....	29
3.2.1	Tipos de combustão.....	29
3.2.2	Estequiometria da reação .....	31
3.2.3	Combustíveis.....	32
3.2.4	Caldeiras.....	36
4	Equipamentos de secagem .....	37
4.1	Caldeira de termofluido .....	37
4.1.1	Termofluido.....	39
4.2	Râmolas .....	40
5	Desenvolvimento experimental .....	43
5.1	Materiais e métodos.....	43
5.1.1	Fase de recolha de dados .....	43
5.1.2	Fase de otimização energética.....	46

5.1.3	Balanços de massa e energia .....	47
6	Resultados Obtidos .....	49
6.1	Avaliação do processo de secagem .....	49
6.1.1	Otimização da velocidade de acabamento .....	50
6.1.2	Otimização da temperatura de acabamento.....	53
6.2	Balanços de massa e energia .....	56
7	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros .....	61
	Bibliografia.....	65
	Anexos.....	69
	Anexo A. Propriedades físicas.....	69
	Anexo A.1 Gás Natural.....	69
	Anexo A.2 Termofluido.....	70
	Anexo A.3 Ar.....	72
	Anexo B. Combustão do gás natural com o ar atmosférico .....	73
	Anexo C. Caraterização da corrente de material têxtil.....	77
	Anexo C.1 Humidade do material têxtil no processo atual .....	77
	Anexo C.2 Humidade do material têxtil após as otimizações .....	80
	Anexo C.3. Caudal mássico do material têxtil.....	85
	Anexo D. Balanços de massa e energia.....	87
	Anexo D.1 Balanço de massa ao azoto.....	87
	Anexo D.2 Balanço de energia à râmola 3 .....	90

## Índice de Figuras

Figura 1.1. Evolução das cotações médias anuais do Brent, entre 2019 e 2022 (Adaptado de [2]) .....	2
Figura 1.2. Variação do preço do petróleo bruto, janeiro/22 a abril/23 (€/barril) (Adaptado de [3]). .....	2
Figura 1.3. Distribuição do consumo de gás natural em Portugal, em 2021 por atividade (Adaptado de [4]). .....	3
Figura 1.4. Variação do preço de GN na empresa Copo Têxtil Portugal, durante 2022 (Adaptado de [6]). .....	4
Figura 2.1. Distribuição das empresas do Grupo Copo (Adaptado de [7]). .....	7
Figura 2.2. Logotipo da empresa Grupo Copo. .....	8
Figura 2.3. Fotografia aérea do complexo industrial da Copo Têxtil (Adaptado de [7]). .....	8
Figura 2.4. Processo produtivo da empresa Copo Têxtil. .....	10
Figura 2.5. Estrutura do tecido plano (A), malha de teia (B) e malha de trama (C). .....	11
Figura 2.6. Equipamento utilizado para o tingimento do poliéster na empresa. .....	12
Figura 2.7. Banho de acabamento. .....	14
Figura 2.8. Foulard presente na râmola 1. .....	14
Figura 3.1. Secador de bandejas (Adaptado de [17]). .....	19
Figura 3.2. Secador a vácuo (Adaptado de [17]). .....	20
Figura 3.3. Secador de leite fluidizado (Adaptado de [18]). .....	20
Figura 3.4. Secador de spray (Adaptado de [19]). .....	21
Figura 3.5. Secador de tambor, também conhecidos como secadores de cilindro ou secadores rotativos (Adaptado de [20]). .....	22
Figura 3.6. Râmola presente na Copo Têxtil. .....	23
Figura 3.7. Secador por infravermelhos [Adaptado de [18]). .....	24
Figura 3.8. Isotérmicas de adsorção máxima para algumas fibras (Adaptado de [23, 24]). .....	25
Figura 3.9 Tipos de humidade (Adaptado de [12]). .....	28

Figura 4.1. Exterior da caldeira a termofluido da Copo Têxtil. ....	38
Figura 4.2. Râmola 2, assinalado a amarelo o motor de ventilação nº1 e a vermelho o recuperador de calor. ....	41
Figura 4.3. Radiador nº3 presente no interior da râmola 2.....	41
Figura 5.1. Fases de controlo do material têxtil. ....	43
Figura 5.2. Provetes utilizados nos ensaios, onde (A) diz respeito à amostra no ponto em 2 e (B) à amostra em 3. ....	45
Figura 5.3. Corta-Rodelas, da Albrecht Equipamentos Industriais, Ltda .....	45
Figura 6.1. Variação da quantidade de água no material com o aumento da velocidade (os primeiros símbolos, os quadrados, dizem respeito às condições de série, enquanto os círculos correspondem às otimizações). ....	51
Figura 6.2. Variação da quantidade de água no material com a diminuição da temperatura (o primeiro símbolo, o quadrado, diz respeito às condições de série, enquanto os círculos correspondem às otimizações). ....	54
Figura 6.3. Diagrama global do processo.....	56
Figura 6.4. Diagrama global do processo com a respetiva caraterização das correntes.....	59
Figura A. 1. Curva de ajuste entre a massa volúmica e a temperatura do termofluido.....	70
Figura A. 2. Curva de ajuste a capacidade térmica e a temperatura do termofluido.....	71
Figura D. 1. Esquema representativo das correntes de N <sub>2</sub> . ....	87

## Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Tipos de secagem com base no mecanismo de transferência de calor associado (Adaptado de [16]).	18
Tabela 3.2. Humidade máxima que o material pode ter sem que existam alterações das propriedades físicas e químicas (Adaptado de [23, 24]).	25
Tabela 3.3. Tipos de humidade e respetivas equações (Adaptado de [17, 25]).	27
Tabela 3.4. Excesso de ar normalmente empregue para diferentes combustíveis (Adaptado de [29, 30]).	30
Tabela 3.5. Fator de emissão de vários combustíveis fósseis comparativamente ao gás natural (Adaptado de [33]).	34
Tabela 3.6. Parâmetros da reação completa e estequiométrica do Metano com O <sub>2</sub> (Adaptado de [31]).	35
Tabela 3.7 - Parâmetros de referência para a combustão de Gás Natural (Adaptado de [32]).	35
Tabela 4.1. Caraterísticas da Caldeira e do queimador (Adaptado de [36]).	39
Tabela 4.2. Caraterísticas físicas e químicas do termofluido (Adaptado de [37]).	39
Tabela 4.3 - Vantagens e desvantagens do óleo como fluido térmico (Adaptado de [37]).	40
Tabela 4.4. Caraterização das râmolas da empresa Copo Têxtil.	40
Tabela 5.1. Caraterísticas das amostras analisadas.	44
Tabela 5.2. Ensaios realizados para otimizar a velocidade de acabamento do material.	46
Tabela 5.3. Ensaios realizados para otimizar a temperatura de acabamento do material.	46
Tabela 6.1. Resultados obtidos na análise da quantidade de água no material têxtil.	49
Tabela 6.2. Valores da humidade obtidos após otimização dos resultados.	50
Tabela 6.3. Resultados dos testes físicos obtidos.	52
Tabela 6.4. Ensaios realizados para otimizar a temperatura de acabamento do material.	53
Tabela 6.5. Resultados dos testes físicos obtidos.	55
Tabela 6.6. Caraterização as correntes de entrada e saída da râmola 3 através de balanços de massa e energia.	57

Tabela 6.7. Balanço de massa e energia realizados ao processo de secagem do artigo 370244 na râmola 3.....	58
Tabela 6.8. Repartição da energia total pelos fluxos.....	58
Tabela A. 1 Composição volumétrica dos componentes do gás natural (Adaptado de [33]). .	69
Tabela A.2. Propriedades físicas do gás natural (Adaptado de [32])......	69
Tabela A. 3. Dados facultados pelo fornecedor do óleo térmico. ....	70
Tabela A. 4. Dados facultados pelo fornecedor do óleo térmico. ....	71
Tabela A. 5. Valores de temperatura e massa volúmica do ar. ....	72
Tabela B. 1. Medições feitas durante o mês de novembro relativas ao caudal de gás natural.	73
Tabela B. 2. Fatores de emissão carbónica para o gás natural (Adaptado de [32]). ....	74
Tabela C. 1. Valores recolhidos para a determinação da quantidade de água nos artigos têxteis. ....	77
Tabela C. 2. Valores utilizados para a determinação do caudal mássico do material à entrada e saída da râmola.....	79
Tabela C. 3. Valores recolhidos para a determinação da quantidade de água nos artigos têxteis nas diferentes otimizações da referência 370244.....	80
Tabela C. 4. Valores recolhidos para a determinação da quantidade de água nos artigos têxteis nas diferentes otimizações da referência 375593.....	82
Tabela C. 5. Valores recolhidos para a determinação da quantidade de água nos artigos têxteis nas diferentes otimizações da referência 375474.....	83
Tabela C. 6. Valores recolhidos para a determinação da quantidade de água nos artigos têxteis nas diferentes otimizações da referência 375591.....	84
Tabela C. 7. Valores recolhidos para a determinação da quantidade de água nos artigos têxteis nas diferentes otimizações da referência 375519.....	85
Tabela C. 8. Valores utilizados para a determinação do caudal mássico do material.....	85
Tabela D. 1. Caraterísticas dos gases de combustão da caldeira de termofluido.....	88
Tabela D. 2. Caudal volumétrico, $v_i$ , e mássico, $m_i$ , dos gases de combustão. ....	88
Tabela D. 3. Caraterísticas dos gases de exaustão da râmola 3. ....	89

Tabela D. 4. Caudal volumétrico,  $vN2$ , e mássico,  $mN2$ , dos gases de exautão da râmola 3. 89



# 1 Introdução

Neste capítulo faz-se uma breve introdução da empresa Copo Têxtil Portugal, explicitando os seus produtos e processos usados na produção dos materiais têxteis. Para além disso, faz-se referência à evolução da situação energética em Portugal, contextualizando assim a motivação da presente dissertação, referindo-se, por fim, os seus objetivos principais.

## 1.1 Enquadramento e justificação do tema

O estágio faz parte integrante do segundo ano do Mestrado em Engenharia Química no Ramo Energia e Biorrefinaria do Instituto Superior de Engenharia do Porto e teve como orientadores o Vítor Faria, Responsável pelo Departamento Técnico da Copo Têxtil Portugal S.A., e as Eng<sup>as</sup> Maria João Ramalhosa e Olga Freitas do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Segundo o Parlamento Europeu e do conselho, entende-se por Energia: *«todas as formas de energia disponíveis comercialmente, incluindo eletricidade, gás natural (incluindo gás natural liquefeito), gás de petróleo liquefeito, qualquer combustível para aquecimento e arrefecimento (incluindo sistemas urbanos de aquecimento e de arrefecimento), carvão e lignite, turfa, combustíveis para transportes (excluindo os combustíveis para a aviação e para o transporte marítimo) e a biomassa (...)*» [1].

Por outro lado, define-se eficiência energética como: *«o rácio entre o resultado em termos do desempenho e dos serviços, bens ou energia gerados e a energia utilizada para o efeito*» [2].

Em 2021, a cotação do *Brent* atingiu o valor médio de 59,9 €/barril representando, face a 2020, um aumento de 63,7% (Figura 1.1). Por outro lado, repara-se num aumento de 60% no preço do barril de petróleo desde 2021 até 2022. Deste modo, houve um aumento de 161,7 % desde 2020, ano do início da pandemia Covid-19 e antes do início da Guerra da Ucrânia, até 2022, ano após a Guerra [2].

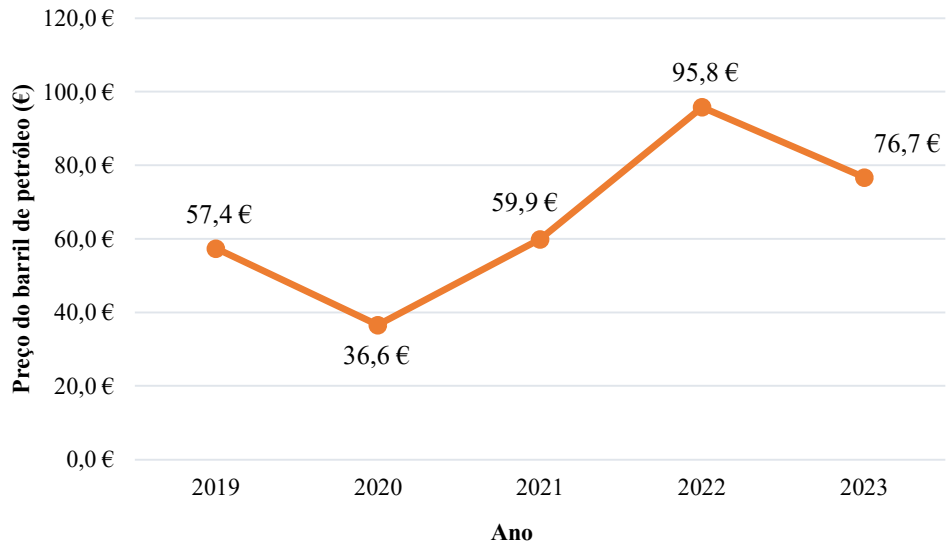


Figura 1.1. Evolução das cotações médias anuais do Brent, entre 2019 e 2022 (Adaptado de [2])

Relativamente a 2023, o valor apresentado diz respeito aos preços médios dos meses de janeiro e fevereiro, pelo que já é possível verificar uma diminuição do preço de cerca de 20%.

Analisando os dados obtidos referentes ao preço do petróleo bruto importado, apresenta-se na Figura 1.2 a variação do preço em euros por barril desde janeiro de 2022 a abril de 2023 [3].

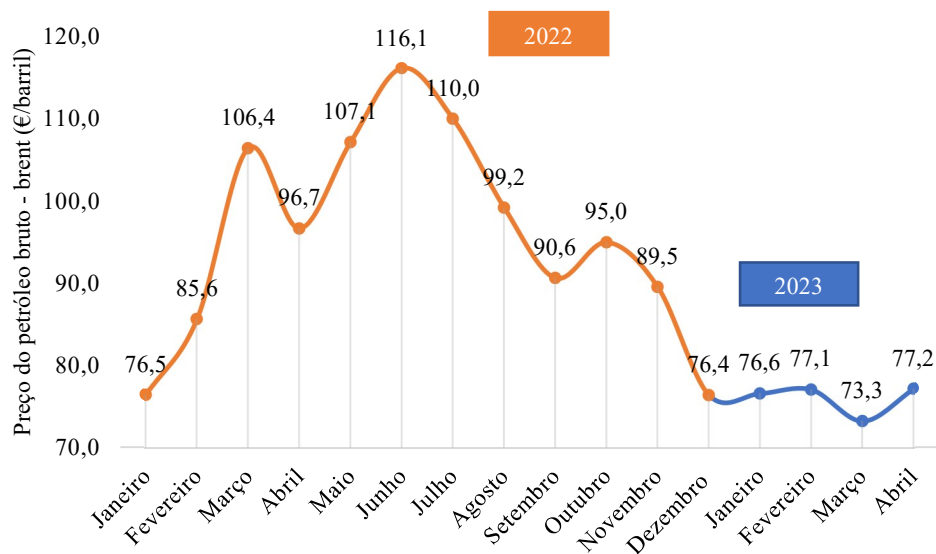


Figura 1.2. Variação do preço do petróleo bruto, janeiro/22 a abril/23 (€/barril) (Adaptado de [3]).

Pela análise da Figura 1.2 percebe-se que houve um aumento acentuado no preço do petróleo bruto de fevereiro (85,6 €/barril) para março (106,4 €/barril), refletindo o início da guerra entre a Ucrânia e a Rússia, no dia 20 de fevereiro de 2022. Após essa data, verifica-se que o preço do petróleo apresenta variações inconstantes, de subida e descida. No entanto, observa-se que o

preço do petróleo no final do ano toma valores de 76,4 €/barril, sendo este valor muito próximo do obtido no início do ano.

Relativamente ao ano de 2023, repara-se que não existe uma variação tão acentuada como a observada em 2022. No primeiro quadrimestre, o valor máximo obtido foi de 77,2 €/barril e o mínimo de 73,3 €/barril, o que corresponde a uma diferença de 3,9 €. Em 2022, esta diferença foi 10 vezes superior (39,7 €) [4].

Deste modo, é possível ter em conta o impacto que a guerra, entre dois grandes países, tem na economia energética. Por um lado, a Rússia é o principal exportador e o segundo maior produtor mundial de gás natural. Está entre os 5 maiores produtores de aço, níquel e alumínio e é o segundo maior exportador e terceiro maior produtor de petróleo no mundo, com 12% da oferta global. Por outro lado, a Ucrânia contribui com 12% das exportações mundiais de trigo e 15% das de milho, matérias-primas de elevada importância para a indústria alimentar e para a cadeia de criação de animais, como aves e porcos. Outro facto interessante consiste no facto de a Rússia e Ucrânia dominarem juntas, 30% de todo o comércio mundial de trigo, 17% da oferta de milho, 32% do mercado da cevada e 50% de óleo, sementes e farelo de girassol [5].

Assim, os reflexos nos mercados de energia e alimentar são especialmente notórios, uma vez que a Rússia e Ucrânia detêm fatias relevantes em ambos, que são a base para muitos outros setores da economia. Verifica-se também um aumento constante na inflação, observando-se preços exuberantes nos combustíveis fósseis, tais como no gasóleo (2,184 €/L) e gasolina *premium* (2,479 €/L), que atingiram valores máximos em 2022, refletindo-se nos preços da alimentação, da eletricidade, do gás natural, e de muitos outros sectores da economia [5].

Em Portugal o consumo de gás natural é utilizado, essencialmente, para a produção de eletricidade e na indústria, como é possível observar na Figura 1.3.

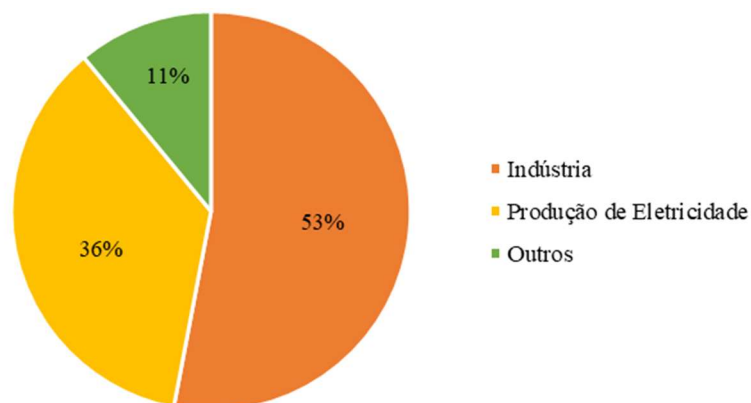


Figura 1.3. Distribuição do consumo de gás natural em Portugal, em 2021 por atividade (Adaptado de [4]).

Pela análise da Figura 1.3, percebe-se que, em 2021, o gás natural representou 24% do consumo de energia primária em Portugal, repartido por 53% nas indústrias, 36% para produção de eletricidade e 11% pelos restantes setores, tais como o doméstico, o dos transportes e o da agricultura e pescas [4].

O gás natural é, por isso, essencial para a segurança do aprovisionamento de eletricidade. Dado o elevado consumo de gás natural pelas indústrias, e tendo em conta o aumento do preço do gás natural, devido à guerra entre a Ucrânia e a Rússia, é de elevado interesse para as indústrias apostar na diminuição do consumo de energia e da diminuição das perdas de energia, quer seja através de isolamentos térmicos, quer seja a partir da otimização do processo produtivo [4].

Comparativamente à análise feita da variação do preço do petróleo, apresenta-se na Figura 1.4 o preço em €/kWh, do gás natural adquirido pela empresa Copo Têxtil Portugal, onde é possível verificar a instabilidade dos preços no ano de 2022.

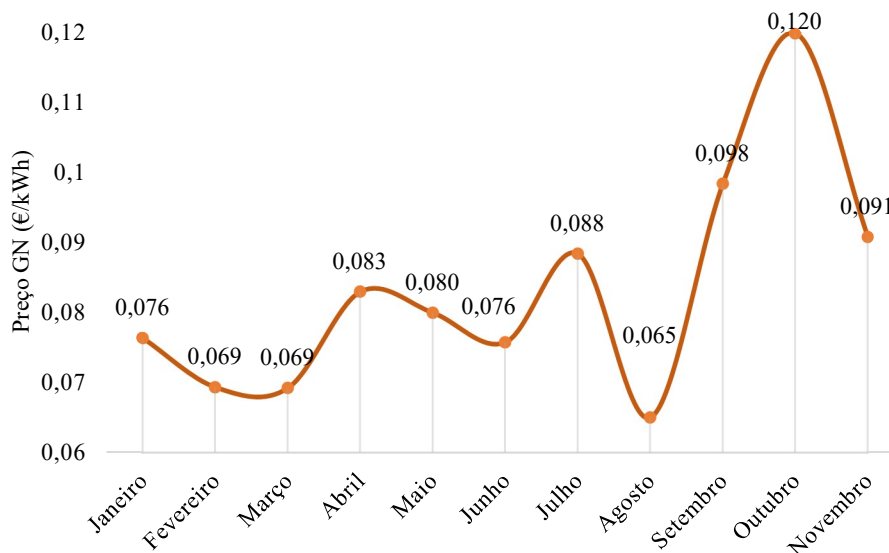


Figura 1.4. Variação do preço de GN na empresa Copo Têxtil Portugal, durante 2022 (Adaptado de [6]).

Deste modo, e tendo em conta a análise feita, é possível entender que o preço do petróleo, gás natural e eletricidade têm tido um aumento bastante significativo. Assim, entende-se que toda a cadeia de abastecimento e fornecimento fica comprometida, obtendo-se preços para as matérias-primas e faturas energéticas elevados. Ora, isto origina um efeito bola de neve, caracterizando-se pela instabilidade de preços praticados pelos fornecedores de matérias-primas, para além da sua escassez. Com o objetivo de diminuir os custos energéticos na empresa, pretende-se otimizar o processo de secagem de material têxtil através da diminuição da temperatura e aumento do caudal de material têxtil a tratar.

## 1.2 Tema e objetivo da dissertação

O principal objetivo da presente dissertação consiste na otimização energética do processo de secagem do material têxtil na fase de acabamento. Assim, pretende-se diminuir a energia e o tempo gastos na secagem de diversos artigos têxteis. Por outro lado, tenciona-se realizar balanços energéticos e mássicos de modo a quantificar as correntes do processo.

De forma a satisfazer o objetivo proposto, é importante realizar uma análise crítica ao processo atual, com a finalidade de identificar a estratégia mais eficiente a adotar.

Para atingir o objetivo final, estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos, que visam representar todas as etapas metodológicas do processo:

- caraterização das correntes de entrada e saída da râmola;
- seleção das variáveis do processo a otimizar, assim como os artigos têxteis;
- comparação das caraterísticas físicas dos artigos têxteis nos dois processos, tais como alongamentos estáticos, gramagem, entre outros;
- realização de balanços de massa e energia.

## 1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em 8 capítulos principais.

No **capítulo 1** apresenta-se um enquadramento do tema, indicando as motivações relacionadas com este estudo. Além do mais, referem-se os objetivos da presente dissertação e a organização do trabalho.

No **capítulo 2** faz-se uma apresentação da empresa acolhedora, **Copo Têxtil Portugal S.A.**, indicando o tipo de atividade que desenvolve e a sua organização.

No **capítulo 3** faz-se uma revisão dos conceitos principais que englobam o trabalho: secagem de sólidos e combustão. Apresentam-se as principais equações utilizadas no decorrer do trabalho, de forma a facilitar a compreensão da presente dissertação.

O **capítulo 4** inicia-se pela caraterização dos equipamentos em estudo: râmolas e caldeira de termofluido, fazendo-se referência às principais caraterísticas e respetivas equações necessárias à realização

No **capítulo 5** faz-se a descrição do desenvolvimento experimental, indicando os métodos adotados, os diferentes artigos têxteis analisados e as respetivas otimizações realizadas.

As medidas de otimização estudadas e respetivos resultados obtidos são apresentadas no **capítulo 6**, tendo como finalidade a poupança energética no processo de secagem do material têxtil. Além disso, apresentam-se os balanços de massa e energia realizados.

No **capítulo 7** apresentam-se as principais conclusões do trabalho, confrontando os objetivos iniciais com as metas alcançadas e referem-se sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Caracterização da empresa acolhedora e processo produtivo

A **Copo Têxtil Portugal** é uma empresa de indústria têxtil ligada ao ramo automóvel. Originalmente, a empresa era denominada Copo *Thierry* Portugal, nome de filiação dos sócios fundadores o grupo espanhol Copo e a multinacional francesa *Michel Thierry*. Em 2017, a empresa mudou de denominação social devido a uma reestruturação, passando a chamar-se **Copo Têxtil Portugal S. A** [7].

A empresa faz parte de um grupo espanhol, **Grupo Copo**, que tem várias empresas distribuídas por todo o mundo, como México, Brasil, Alemanha, República Checa, França, como é possível observar na Figura 2.1 [7].



Figura 2.1. Distribuição das empresas do Grupo Copo (Adaptado de [7]).

A empresa conta com duas unidades em Portugal, uma unidade localizada em São João da Madeira, dedicada exclusivamente aos processos de foamização, e outra unidade em Santo Tirso, onde se situa a sede da empresa, dedicada exclusivamente aos processos de conceção e acabamento de tecidos e malhas, sendo nesta última o local onde se desenvolveu o trabalho da presente dissertação [7].

O logotipo utilizado pelas empresas do **Grupo Copo** encontra-se apresentado na Figura 2.2.



*Figura 2.2. Logotipo da empresa Grupo Copo.*

A empresa iniciou a sua atividade em 1999, visando a produção de tecidos acoplados com espuma de poliuretano ou outro tipo de espuma técnica. Em setembro de 2008 abriu a unidade de tricotagem em Santo Tirso e em julho de 2010 concluiu-se o processo de tinturaria e acabamento na **Copo Têxtil**. Em janeiro de 2012 foi incluído o processo de tecelagem [7].

## 2.1 Instalações da empresa

As instalações da **Copo Têxtil** são constituídas pela área administrativa e pelos setores produtivos como mostra a fotografia aérea apresentada na Figura 2.3.



*Figura 2.3. Fotografia aérea do complexo industrial da Copo Têxtil (Adaptado de [7]).*

A empresa detém 11 departamentos que asseguram todo o processo que conceção e entrega do produto ao cliente, sendo eles: Logística, Produção, Desenvolvimento e Inovação, Manutenção, Qualidade, Contabilidade, Informática, Comercial, Recursos Humanos e Gestão de Sistemas de Ambiente, Saúde e Segurança Ocupacional (HSE) [7].

Em termos funcionais destacam-se os seguintes setores inerente à produção [7]

- Urdissagem;

- Tecelagem e tricotagem;
- Tinturaria
- Acabamento
- Inspeção
- Foamização (realizada em São João da Madeira e recentemente nas novas instalações em Santo Tirso)
- Embalagem

Para além dos setores associados à laboração dos produtos finais, existem alguns serviços auxiliares que são necessários ter em conta, uma vez que são igualmente consumidores de energia. Apesar de não estarem diretamente afetos à produção de material, são indispensáveis para que a mesma se processe nas condições desejadas. Estes serviços podem-se subdividir em central de ar comprimido, central térmica, sistemas de climatização, iluminação, escritórios e manutenção [7].

No que diz respeito a certificações, a empresa é certificada na foamização segundo a ISO/TS 16949 e segundo a norma internacional IATF 16949:2016, duas normas líderes na indústria automóvel e imprescindível para os fornecedores desta indústria que pretendem desenvolver, produzir e vender neste mercado produtos [7].

## 2.2 Produtos base

Os produtos base da Copo Têxtil Portugal são tecidos e malhas foamizadas destinados, fundamentalmente, ao setor automóvel, tendo diversas aplicações, tais como assentos, tetos, painéis de porta, entre outros. Os principais clientes da empresa são: *Volkswagen, Skoda, Seat, Audi, Man Truck, Stellantis, BMW, Daimler, Tesla, Ford, Renault e Hyundai*. No que concerne à *Man Truck* é de salientar que a empresa é fornecedora de primeiro nível da marca, algo difícil de se conseguir no mercado automóvel. No entanto, face aos constantes desafios de mercado e mudanças das conjunturas económicas mundiais, a empresa tem estado ativamente a expandir a sua área de negócios para fora do setor automóvel, entrando no ramo da moda, fornecendo material para o *Grupo Inditex*, por exemplo, e acessórios para cadeiras e carrinhos de bebés, para marcas como *Dorel Juvenile e Maclaren* [7].

### 2.3 Processo produtivo e produção do material têxtil

A empresa **Copo Têxtil** atualmente está a especializar-se na produção e conceção de artigos têxteis, sendo esta um tipo de indústria bastante ampla e composta por várias etapas produtivas inter-relacionadas. Na Figura 2.4 apresenta-se o processo industrial realizado na empresa deste a receção do fio até ao produto final e respetiva expedição.

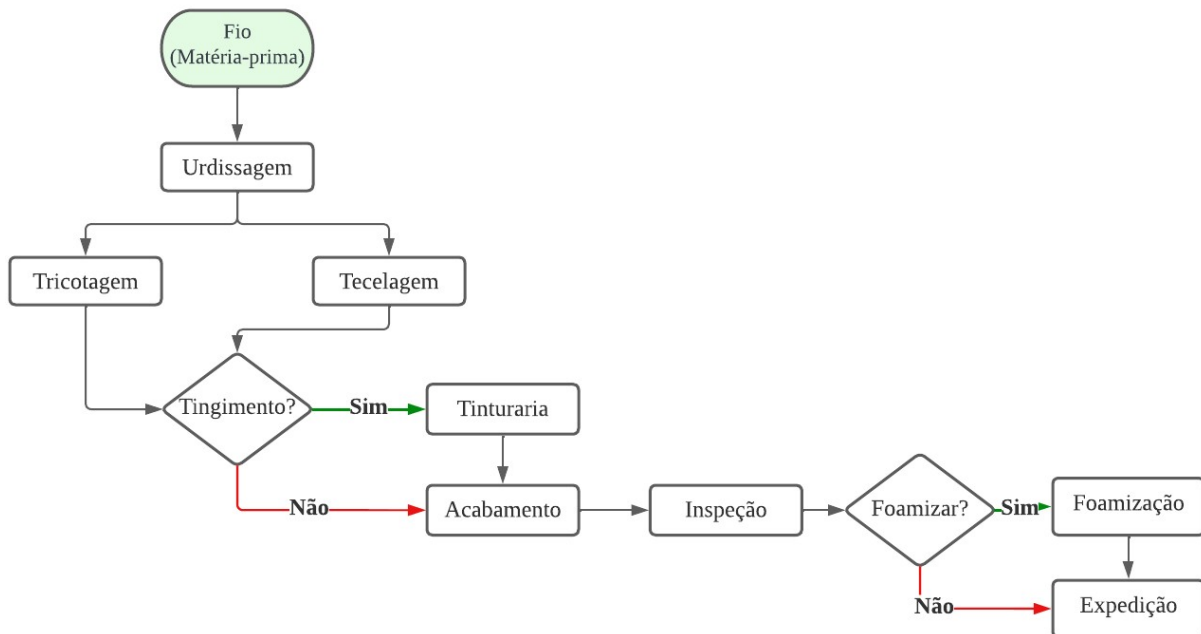


Figura 2.4. Processo produtivo da empresa Copo Têxtil.

O processo produtivo da empresa inicia-se com a chegada da matéria-prima, isto é, o fio, que sofre diversas alterações até atingir o produto pretendido. De seguida é explicado de forma sucinta as principais etapas do processo produtivo.

Na etapa da **Urdissagem** as bobines de fio são colocadas num suporte específico, designado de esquinadeira, onde os fios estão individualizados e paralelos uns aos outros e são posteriormente enrolados num órgão específico. Estes órgãos são usados na tricotagem ou na tecelagem. Neste processo todos os fios são enrolados com o mesmo comprimento e os seus objetivos principais são: reunir o nº de filamentos necessários para a largura do artigo, detetar e eliminar defeitos de processos produtivos anteriores (extrusão, fiação, entre outros) e uniformizar a tensão entre as fibras [8].

Se a tecnologia utilizada após a urdissagem for a tecelagem, usam-se teares teia e trama. Caso seja a tricotagem, usam-se teares *Ketten* e circulares [8].

A **Tecelagem ou tricotagem** foca-se na fabricação de tecidos (tecelagem) ou de malha e de tecnologia de não-tecidos (tricotagem) [8]. Na Copo Têxtil os têxteis à base de poliéster podem

ser produzidos a partir de três distintos métodos de manipulação mecânica dos fios, resultando em um tecido plano, malha de teia e malha de trama. As diferenças na estrutura são apresentadas na Figura 2.5.

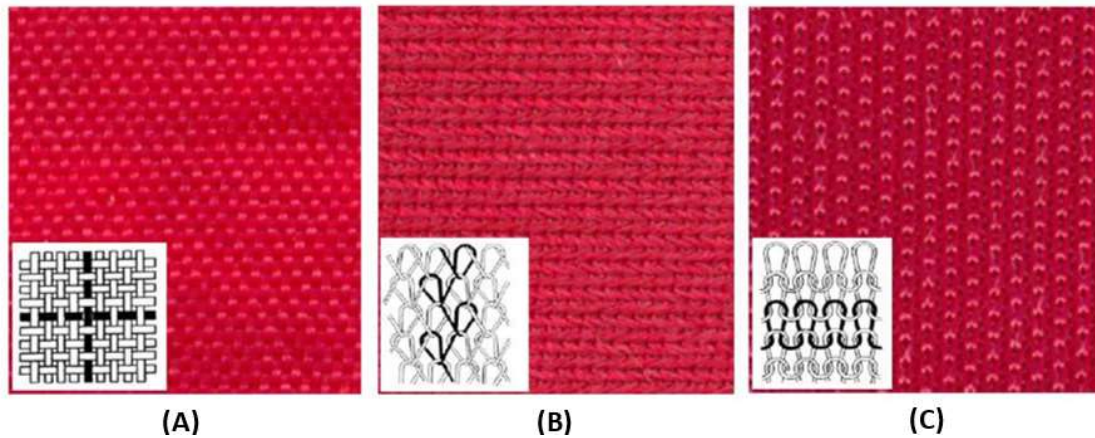


Figura 2.5. Estrutura do tecido plano (A), malha de teia (B) e malha de trama (C).

Os tecidos planos resultam do entrelaçamento de dois conjuntos de fios, que se cruzam em ângulo reto. Os seus pontos de ligação são rígidos, despromovendo o deslizamento de um fio sobre os outros quando o tecido é tensionado. Neste tipo de tecnologia, é usual designar os fios na horizontal por fios de trama e na transversal por fios de trama. Na **Copo Têxtil**, existem teares *Jacquard*, *Dobby*, de ar e de pinças [8].

No caso das malhas, os fios assumem a forma de laçada, sendo estas intercaladas de modo a tornar as ligações móveis e permitir o deslizamento quando tensionadas [7]. Por trama, obtém-se malhas a partir do entrelaçamento de um único fio no sentido transversal do material em formas retilíneas ou circulares, utilizando-se para o efeito teares circulares. Por urdume, isto é, teia, obtém-se malhas a partir de um ou mais conjuntos de fios colocados lado a lado e entrelaçados no sentido longitudinal. Nesta tecnologia utilizam-se teares *Ketten* [8].

Devido à explicação apresentada, e tendo em conta a estrutura dos materiais, outra principal diferença entre tecidos e malhas reside na sua elasticidade, isto é, os tecidos apresentam uma elasticidade inferior às malhas, sendo a sua aplicação preferencialmente para assentos [8].

O **Tingimento** é o processo durante o qual o material têxtil adsorve o corante quando é posto em contacto com a solução ou dispersão. O objetivo do tingimento é produzir uma coloração uniforme dos materiais têxteis. A cor deve ser uniforme em todo o material têxtil e ter uma tonalidade sólida, sem desnivelamento ou mudança na sombra [9, 10].

Na empresa, o tingimento do poliéster é realizado por esgotamento, isto é, o material têxtil é imerso num banho de tingimento onde permanece durante um determinado tempo, para que

ocorra esgotamento do corante. Neste tipo de tingimento há a possibilidade de corrigir a cor obtida caso esta não seja a pretendida, através da adição de uma certa quantidade de corante ao banho. É de notar que esta correção só é possível quando a quantidade de corante utilizada inicialmente estiver em defeito. Quando a cor não satisfaz os requisitos por excesso de corante, não é possível corrigir a cor, utilizando-se o material para rastilho ou para tingir o preto, num outro projeto [9, 11].

Os corantes utilizados para tingir o poliéster são denominados de corantes dispersos. Estes corantes são pouco solúveis em água, sendo aplicados na forma de dispersão. Como o poliéster é uma fibra hidrofóbica, corantes solúveis em água não iriam tingir o material de forma eficiente, daí os corantes não solúveis em água são os mais aconselháveis e que apresentam melhor rendimento [11].

O tipo de máquina utilizada na empresa **Copo Têxtil** designa-se por *Jet Soft Flow* e está apresentado na Figura 2.6.



Figura 2.6. Equipamento utilizado para o tingimento do poliéster na empresa.

Estes equipamentos recorrem aos circuitos de água fria, água quente e vapor existentes na empresa de modo a obter as temperaturas necessárias para se realizar o tingimento (135°C). Para atingir essas temperaturas elevadas e mantê-las durante todo o processo, utiliza-se vapor a uma pressão de 5 bar proveniente das duas caldeiras de vapor presentes na empresa.

Os condensados gerados são enviados para um depósito de condensados, sendo utilizados em processos como ‘lavagem de máquinas’ ou águas de lavagem. As águas de refrigeração vão para o depósito de água quente da instalação cuja temperatura média ronda os 50°C a 60°C.

O **Acabamento** baseia-se em operações feitas no material têxtil, tingido ou em cru, conferindo-lhe conforto, durabilidade, estabilidade, entre outras propriedades específicas. Existem vários tipos de acabamento, sendo os mais empregues na empresa os acabamentos físicos/mecânicos e químicos [12].

Na empresa, a secção de acabamento é constituída pelos seguintes equipamentos [13]:

- **Máquina de lavar**, com o objetivo de retirar impurezas, sujidade e óleos presentes no material que não passou pela secção da tinturaria. Caso o material seja tingido, esta etapa de lavagem é realizada no Jet. Utiliza-se água quente disponibilizada na rede de distribuição de água quente (água de refrigeração dos *jets*), sendo utilizado vapor direto a 5 bar para elevar a temperatura do banho para valores de 80 °C.
- **Tumblr**, com o objetivo de melhorar certas características do material, tais como aumentar os alongamentos, tendo como consequências a diminuição da largura do material ou alterações na cor. O *Tumbler* existente permite proporcionar um acabamento de alta qualidade, utilizando vapor indireto, à pressão de produção na central térmica, sendo o condensado encaminhado para o depósito de condensados.
- **Equipamento de impregnação por foulardagem** – tem como finalidade dar ao material uma característica específica (por exemplo, repelência a água e óleos).
- **Râmolas**, equipamentos que permitem secar e aplicar diversos acabamentos químicos ao artigo têxtil e definir a largura final.

Relativamente aos tipos de acabamento, estes podem ser: [12]

- **Acabamentos Químicos**

Os acabamentos químicos conferem ao tecido características finais como maior estabilidade, melhoria ao toque e aumento da resistência, permitindo dar ao material uma propriedade através da utilização de produtos químicos. Nesta fase, o material têxtil é colocado num banho denominado banho de acabamento que contém os produtos químicos capazes de conferir as propriedades pretendidas.

De modo a aplicar os produtos químicos no material, que vão desde amaciadores até retardantes de chama, faz-se passar o material pelo tanque representado na Figura 2.7. Neste tanque o banho de acabamento contém os produtos químicos em determinadas concentrações, de modo a obter o acabamento final pretendido. De seguida, o material tem de passar pelo *foulard* de modo a retirar o excesso de água que o material reteve. O *foulard*

(Figura 2.8) é constituído por 2 rolos que exercem uma determinada pressão sob o material têxtil, retirando o excesso de água. Este processo é importante, uma vez que funciona como uma pré-secagem, garantindo o valor estipulado de *wet pick-up* (quantidade de químico absorvido pelo material por quantidade de químico seco) [11].

O *wet pick up*, ou taxa de absorção, consiste na quantidade de líquido absorvido por um artigo têxtil depois de mergulhado no banho de acabamento e de passar pelo *foulard*. É influenciado pelo material do tecido, pela tecelagem/tricotagem e pelo peso, para além da pressão aplicada pelos rolos. Assim, pode-se aumentar ou diminuir a pressão entre os rolos com base na percentagem que se pretende que o material retenha de líquido. Em artigos 100% PES, e tendo em conta a realidade da empresa, é recomendável obter valores superiores a 60%, relativamente ao material seco [9].

Utiliza-se a Equação 2.1 para a determinação da taxa de absorção.

$$\text{Taxa de Absorção (\%)} = \frac{g_1 - g_0}{g_0} \times 100 \quad (2.1)$$

Onde,

$g_0$  – Massa do tecido antes do *Foulard* (g);  $g_1$  – Massa do tecido após o *Foulard* (g)



Figura 2.7. Banho de acabamento.



Figura 2.8. Foulard presente na râmola 1.

- **Acabamentos Mecânicos**

Os acabamentos mecânicos referem-se a técnicas que alteram as propriedades dos tecidos através de ações mecânicas, sem a utilização de produtos químicos. Incluem todas as operações que são efetuadas sobre o tecido seco, inclusive a própria secagem. São exemplos de acabamentos mecânicos, a cardação, a esmerilagem, a calandragem, entre outros [14].

- A **cardação** é um processo em que as fibras do tecido são penteadas, alinhadas e desembaraçadas, resultando em um tecido mais uniforme e com melhor aparência.
- A **esmerilagem** envolve o uso de um material abrasivo para remover a camada superficial do tecido, resultando em uma superfície mais suave e macia.
- A **calandragem** é um processo onde o material têxtil passa entre cilindros aquecidos e pressionados, o que proporciona um acabamento liso e brilhante.

Estes processos podem melhorar a aparência, a textura, a resistência e outras propriedades dos tecidos, sem a necessidade de produtos químicos adicionais [14].

A etapa de **Foamização** consiste na aplicação de uma espuma de revestimento sobre o material, obtendo-se um complexo de material têxtil com espuma [11].

No ramo automóvel é comum utilizarem-se espumas de poliuretano de base poliéster que se caracterizam pela capacidade de fusão quando sujeitas a calor e por isso destinam-se fundamentalmente à acoplagem a tecidos por contacto com a chama. O material espumado é utilizado na confecção de capas para bancos de automóveis, painéis de porta, pilares, entre outros [15].

É de notar que o material têxtil não passa obrigatoriamente por todas as etapas mencionadas anteriormente. No caso de materiais de tecelagem, isto é, tecidos, o material deixa a etapa de tecelagem e passa diretamente para a etapa de acabamento. Caso seja necessário obter um artigo de tecelagem tingido, pode-se efetuar internamente o processo. No entanto, o mesmo não é usual, uma vez que os materiais de tecelagem tingidos segundo o processo da empresa apresentam baixa solidez à luz. Deste modo, opta-se por tingir o fio antes da tecelagem, tecendo-se o fio já tingido [11].

Por outro lado, se a técnica aplicada for a tricotagem, obtendo-se então as ditas malhas, estas são normalmente tingidas e acabadas segundo os processos internos [11].

No que diz respeito ao processo de foamização, este não é sempre realizado, depende do pedido do cliente [11].



### 3 Fundamentos teóricos

Neste capítulo será apresentada uma secção teórica exploratória e descritiva de vários conceitos e métodos relevantes para uma compreensão clara e completa do trabalho desenvolvido.

#### 3.1 Secagem

A secagem pode ser definida como a vaporização e remoção de água ou outros líquidos de uma solução, suspensão, ou outra mistura sólido-líquido para formar um sólido seco. É um processo que envolve a transferência simultânea de calor e massa, acompanhado por transformações físico-químicas. A secagem ocorre como resultado da vaporização do líquido, pois fornece calor à matéria-prima húmida [16, 17].

Sendo uma operação unitária, a secagem de materiais sólidos é uma das mais comuns e importante nos processos químicos industriais, uma vez que é utilizado em diversas indústrias e instalações que manuseiam materiais sólidos [16, 17].

A secagem é amplamente utilizada para remover a humidade, como por exemplo [16, 18]:

- partículas cristalinas de sais inorgânicos e compostos orgânicos para produzir um produto de fluxo livre;
- materiais biológicos, incluindo alimentos, para evitar a deterioração e a decomposição de microrganismos que não podem viver sem água;
- produtos farmacêuticos;
- detergentes;
- madeira, papel e produtos de fibras;
- corantes;
- catalisadores sólidos;
- leite;
- películas e revestimentos;
- produtos onde um elevado teor de água implica custos excessivos de transporte e distribuição.

O termo secagem também descreve a remoção de vapor de um gás condensável por arrefecimento numa mistura gasosa e a remoção de humidade de um líquido ou gás por sorção (absorção e adsorção) [17].

### 3.1.1 Tipos de secagem

A secagem envolve a vaporização da água, sendo que há transferência de calor para o material a secar. Deste modo, é possível classificar o tipo de secagem com base no mecanismo de transferência de calor, como apresentado na Tabela 3.1 [16].

Tabela 3.1 – Tipos de secagem com base no mecanismo de transferência de calor associado (Adaptado de [16]).

Tipo de Secagem	Mecanismo de transferência de calor
Direta	Convecção
Indireta	Condução
Radiante	Radiação
Dielétrica ou por micro-ondas	Radiofrequência

A transferência de calor por convecção ocorre através do contacto de um gás quente com o material secar, por condução ocorre por contacto entre o material e uma superfície sólida, por radiação, o calor é transferido para o material utilizando um gás ou uma superfície quente e por radiofrequência, onde há geração de calor no interior do material [16].

Estes diferentes modos de transferência de calor podem por vezes ser usados simbioticamente, dependendo se a humidade a ser removida está na superfície ou no interior do sólido [16].

Para além da transferência de calor, a transferência de massa também é um aspeto crítico no processo de secagem. Enquanto na transferência de calor o calor é transferido para o sólido de modo a evaporar o líquido, na transferência de massa, ocorre a passagem de uma determinada quantidade de massa transferida como vapor para o gás circulante [16,17].

Em termos energéticos, a secagem pode ser considerada um processo com elevados consumos de energia, caso o material a ser seco contenha uma elevada quantidade de água a ser evaporada. Deste modo, para evaporar essa quantidade de água, é necessário fornecer energia, de modo a ter uma temperatura e velocidade do ar de circulação eficazes para secar o material. Assim, os custos energéticos associados a um processo de secagem podem ser considerados elevados, inclusive se houver perdas de calor significativas e se o processo não for otimizado [17].

### 3.1.2 Tipos de secadores de sólidos

A classificação mais importante no que diz respeito aos secadores de sólidos baseia-se no modo de funcionamento do secador: em **contínuo** ou em *batch* [17].

Quando se opera segundo o modo *batch*, os materiais são inseridos no equipamento de secagem e a secagem prossegue por um determinado período. No modo contínuo, o material é adicionado continuamente ao secador e o material seco é removido continuamente [17].

Os secadores contínuos são utilizados principalmente nas indústrias químicas e alimentar, devido ao grande volume de produto que precisa de ser processado. Os mais comuns são os secadores contínuos de leito fluido e os secadores por pulverização, sendo estes últimos os mais utilizados nas indústrias químicas, leiteira, agroquímica, cerâmica e farmacêutica [16, 18].

Apresentam-se de seguida os secadores mais utilizados nas diferentes indústrias.

### 3.1.2.1 Secadores de bandejas

Este tipo de secador opera passando ar quente sobre a superfície de um sólido húmido que está espalhado por tabuleiros dispostos em prateleiras. Os secadores de bandejas (Figura 3.1) são o tipo de secador mais simples e menos dispendioso, amplamente utilizado nas indústrias alimentares e farmacêutica [18].



Figura 3.1. Secador de bandejas (Adaptado de [17]).

A principal vantagem dos secadores de bandejas, para além do seu baixo custo inicial, é a sua versatilidade. Com exceção dos sólidos poeirentos, todos os restantes materiais podem ser secos. Os tempos de secagem são tipicamente longos (normalmente 12 a 48 h) [18].

### 3.1.2.2 Secadores a vácuo

Os secadores a vácuo (Figura 3.2) oferecem secagem a baixa temperatura de materiais termolábeis, isto é, substâncias que estão sujeitas a destruição, decomposição ou mudança, em resposta ao calor [18].

O calor é normalmente fornecido passando vapor ou água quente através de prateleiras ocas. As temperaturas de secagem podem ser cuidadosamente controladas e, durante a maior parte do ciclo de secagem, o material sólido permanece no ponto de ebulição da substância molhante. Os tempos de secagem são tipicamente longos, normalmente 12 a 48 h [18].

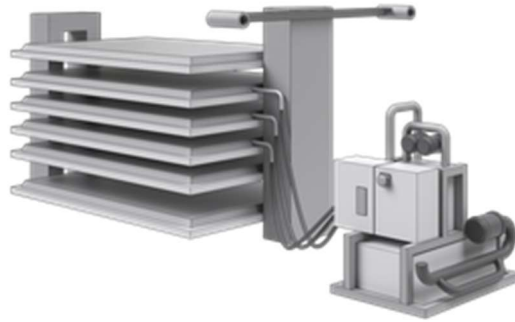


Figura 3.2. Secador a vácuo (Adaptado de [17]).

### 3.1.2.3 Secadores de leito fluidizado

Os secadores de leito fluidizado (Figura 3.3) são equipamentos utilizados na indústria para secagem de materiais em pó ou granulados, como grãos, açúcar, sal, produtos farmacêuticos, entre outros. O princípio de funcionamento deste tipo de secador consiste na passagem de um fluxo de ar aquecido por um leito de material a ser seco. O ar fluidiza o material, mantendo-o em suspensão e permitindo que o calor seja transferido de forma mais eficiente para a superfície do material, acelerando o processo de secagem [18].



Figura 3.3. Secador de leito fluidizado (Adaptado de [18]).

### 3.1.2.4 Secador por pulverização

Um secador de *spray* (Figura 3.4) é um equipamento utilizado na indústria para secar líquidos em forma de *spray*, como produtos químicos e farmacêuticos e alimentos. No secador de *spray*, uma solução líquida é pulverizada numa corrente de gás quente sob a forma de uma névoa de gotículas finas. A água é rapidamente vaporizada a partir das gotículas, deixando partículas de sólido seco, que estão separadas do fluxo de gás. O fluxo de gás e líquido na câmara de pulverização pode ser contracorrente, cocorrente ou uma combinação das duas [18].

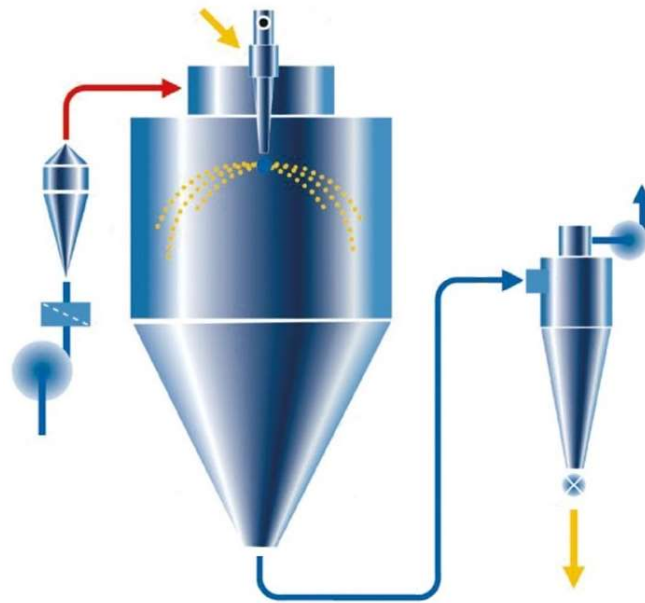


Figura 3.4. Secador de spray (Adaptado de [19]).

### 3.1.3 Secagem de tecidos

Para secar um artigo têxtil, é necessário recorrer à evaporação da água, podendo isto ser feito mecanicamente ou através de energia térmica.

#### 3.1.3.1 Métodos de secagem de tecidos

Na indústria têxtil é possível secar o material por condução, convecção ou radiação.

Na **secagem por condução**, o tecido é colocado em contato direto com uma superfície aquecida, geralmente um cilindro, que transfere o calor para o tecido, evaporando a água presente no material. Esta forma de secagem é mais eficiente energeticamente do que por

convecção e radiação, obtendo-se, portanto, um melhor rendimento energético devido ao contacto direto entre a superfície aquecida e o material [18].

É usual utilizarem-se **secadores de tambor**, também conhecidos como secadores rotativos, para este tipo de processo, como o apresentado na Figura 3.5 [18].

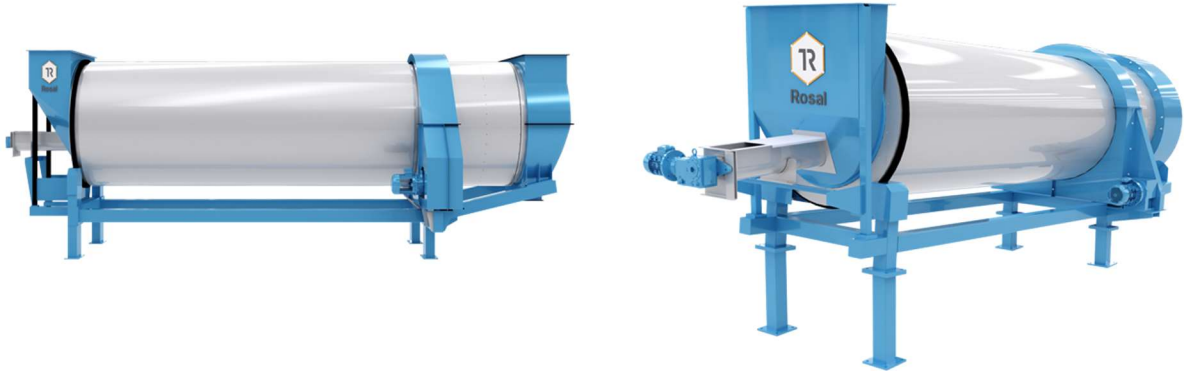


Figura 3.5. Secador de tambor, também conhecidos como secadores de cilindro ou secadores rotativos (Adaptado de [20]).

Este tipo de secador apresenta as seguintes desvantagens [18]:

- **Altos custos iniciais:** os secadores de cilindros tendem a ser caros de comprar e instalar em comparação com outros tipos de secadores.
- **Elevado consumo de energia**
- **Limitações de capacidade**
- Provocam a **migração de corantes** e produtos de acabamento.

Contudo, é necessário lembrar que a secagem por condução pode ser limitada pela capacidade de transferência de calor da superfície aquecida e pode ser menos adequada para materiais com alta densidade ou espessura [18].

Na **secagem por convecção** utiliza-se uma corrente de ar quente para remover a humidade do artigo que se pretende secar [18].

Neste tipo de secagem, a tensão sobre o tecido é menor do que no processo anterior, pois não há contacto direto com o material. Deste modo, há uma diminuição da possibilidade de migração de corantes e produtos de acabamento [18]. Este processo é utilizado na **Copo Têxtil**, em contínuo, através do equipamento presente na Figura 3.6 (rama ou râmola) [18].



*Figura 3.6. Râmola presente na Copo Têxtil.*

A **râmola** é o secador mais utilizado na indústria têxtil, pois permite a secagem do material têxtil em contínuo. Neste equipamento, o material é seco à medida que avança pela máquina através de transferências de calor e massa que ocorrem entre o ar e o tecido. É também possível controlar a largura e a gramagem do artigo final [18].

Por outro lado, é possível recuperar o calor gerado pelo processo de secagem do ar através da incorporação de **recuperadores de calor de ar**. Estes recuperadores de calor utilizam o ar como meio para a transferência de calor, sendo que o ar quente de saída da râmola é utilizado para pré-aquecer o ar frio de entrada. Dessa forma, é possível diminuir o consumo de energia e reduzir os custos associados. As râmolas devem apresentar um comprimento razoável de forma a permitir velocidades aceitáveis e que não comprometam o processo de secagem [18].

Por fim, a técnica da **secagem por radiação** é mais recente, sendo a secagem por infravermelho a mais conhecida (Figura 3.7) [18].

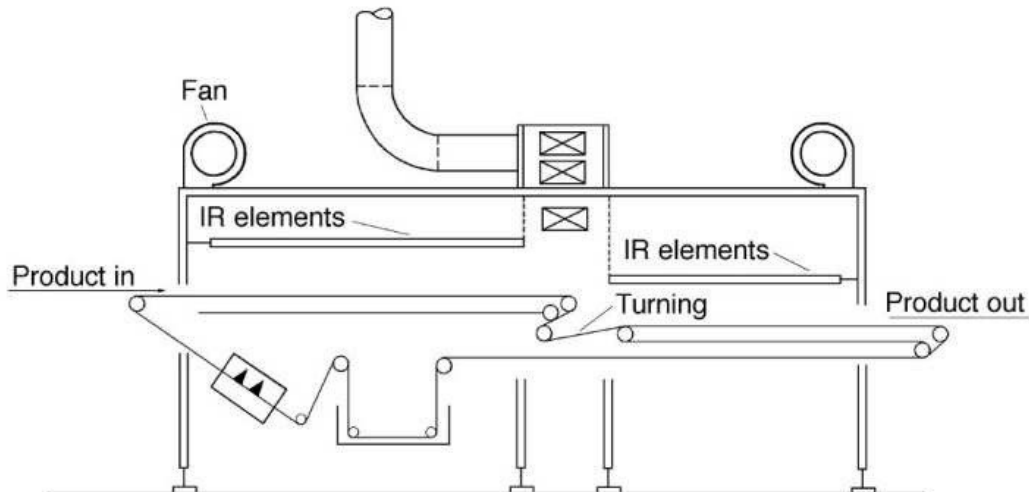


Figura 3.7. Secador por infravermelhos [Adaptado de [18]].

O principal inconveniente deste processo é o perigo de queima do tecido, sendo, por isso, somente utilizado para pré-secagem, não sendo aconselhável baixar além dos 30% de humidade, em base seca, no caso de tecidos de algodão [18].

### 3.1.3.2 Impactos da secagem na qualidade final do material

É importante entender como as fibras têxteis reagem ao vapor de água durante o processo de secagem, pois secagens excessivas podem levar à queima das fibras, o que pode resultar no amarelamento dos tecidos e aumento do consumo de energia [21, 22].

É importante destacar que a absorção de água pelas fibras têxteis pode afetar as propriedades físicas e químicas dos tecidos, como o encolhimento, a resistência e a estabilidade dimensional. Portanto, é essencial controlar cuidadosamente o processo de secagem para evitar danos nos tecidos [21, 22].

O controlo preciso do processo de secagem é especialmente importante em aplicações têxteis industriais, onde são processados grandes volumes de tecidos a alta velocidade. Nesses casos, a otimização do processo de secagem pode levar a uma redução significativa nos custos de energia e a uma melhoria na qualidade e na consistência dos tecidos produzidos [21, 22].

Na Figura 3.8 apresenta-se a capacidade máxima de absorção de vapor de água para fibras têxteis, desde fibras naturais (algodão e seda) até fibras sintéticas (poliéster) [23].

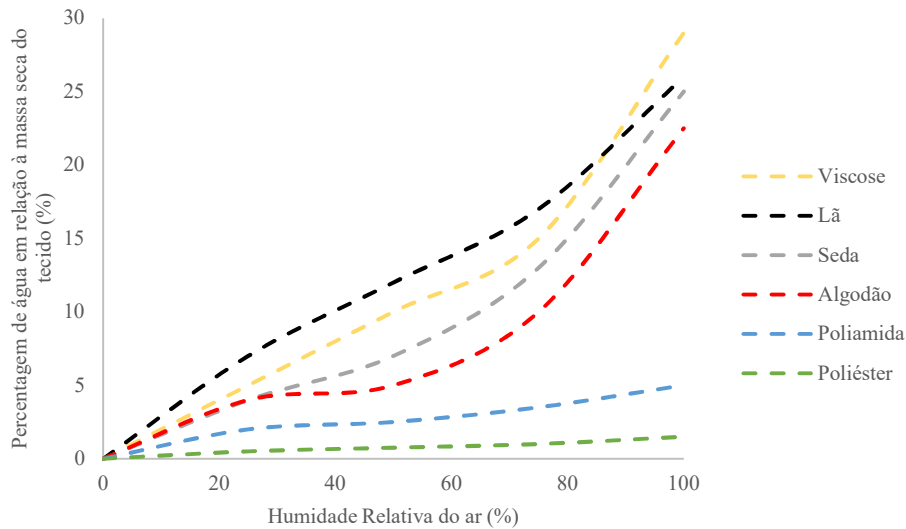


Figura 3.8. Isotérmicas de adsorção máxima para algumas fibras (Adaptado de [23, 24]).

Através da análise da Figura 3.8 é possível verificar que o poliéster é capaz de absorver uma percentagem máxima entre 1 e 1,5% de água relativamente à massa seca do artigo. Este valor não contabiliza se existe perda das propriedades químicas e físicas do material. No entanto, na Tabela 3.2 apresenta-se a variação percentual de água aceitável em alguns tecidos em relação às humidades relativas do ar envolvente de 65 e 95% [23, 24].

Para o poliéster, os valores variam de 0,3 a 0,8% de humidade interna em relação à massa seca do tecido. Esses valores indicam a quantidade máxima de humidade que um tecido pode reter sem perder as suas propriedades físicas e químicas [23, 24].

Tabela 3.2. Humidade máxima que o material pode ter sem que existam alterações das propriedades físicas e químicas (Adaptado de [23, 24]).

	Humidade relativa do ar	
	65 %	95 %
Tipo de Tecido	Humidade no tecido %	
Acetato	6,5	14,0
Algodão	8,0 – 8,5	16,0
Cânhamo	10,0	30,0
Poliamida	3,0 – 4,5	6,0 – 8,0
Poliéster	0,3 – 0,4	0,5 – 0,8

Deste modo, e tendo em conta a informação supracitada é considerado na Copo Têxtil (para uma humidade relativa de ar de 95%), que o valor máximo para humidade ótima experimental é de 0,8%. Através de conhecimentos transmitidos pelos técnicos responsáveis pela secção de

acabamento, definiu-se o limite inferior para a humidade de 0,1%. Assim, o intervalo ótimo de humidade do poliéster após a secagem é de 0,1 a 0,8 % [23, 24].

#### 3.1.4 Equações básicos de secagem

Na Tabela 3.3 apresentam-se os principais conceitos utilizados ao longo do presente trabalho, assim como as respetivas equações utilizadas nos parâmetros de cálculos (Tabela 3.3) [25].

Tabela 3.3. Tipos de humidade e respetivas equações (Adaptado de [17, 25]).

Tipo de Humidade	Equação
<b>Humidade de um sólido</b> <b>Massa de líquido contido na unidade de massa de sólido seco ou com água.</b>	$X = \frac{m - m_s}{m_s} \text{ (Base seca)} \quad (3.1)$
	$W = \frac{m - m_s}{m} \text{ (Base total)} \quad (3.2)$
<b>Humidade Relativa</b> <b>Humidade contida no ar uma determinada temperatura.</b>	$H_R(\%) = \frac{p_A}{p_{sat}} \times 100 \quad (3.3)$
<b>Humidade Absoluta</b> <b>Relação entre a massa de vapor de água e o volume ocupado pelo ar húmido.</b>	$X_A = \frac{MM_A p_A}{MM_{Ar} (P - p_A)} \quad (3.4)$
<b>Humidade de equilíbrio</b> <b>Atinge-se esta humidade quando a pressão parcial do vapor de água (<math>p_A</math>) iguala a pressão de vapor de água existente de sólido (<math>p_{sat}</math>).</b>	$X_e$
<b>Humidade Livre</b> <b>Humidade máxima que o sólido pode perder após UM contacto longo com o ar em determinadas condições mantidas constantes, consistindo, portanto na água que excede o teor de humidade de equilíbrio.</b>	$X_L = X_t - X_e \quad (3.5)$
<b>Humidade Ligada</b> <b>Humidade de equilíbrio quando o gás está saturado e representa a humidade contida no sólido nas diferentes formas: combinada quimicamente, presente em solução líquida no sólido e aprisionada na sua microestrutura em pequenos capilares.</b>	-
<b>Humidade Desligada</b> <b>Humidade livre quando o gás está saturado, que corresponde à humidade que o sólido possui em excesso em relação à humidade ligada.</b>	-

$m$  - massa antes de se iniciar a secagem [kg];  $m_s$  - massa depois do processo de secagem (massa do sólido seco) [kg];  $p_A$  - pressão parcial do vapor à temperatura de trabalho [Pa];  $p_{sat}$  - pressão de saturação do vapor à temperatura de trabalho [Pa];  $P$  - pressão total [Pa];  $p_A$  - pressão parcial do vapor à temperatura de trabalho [Pa];  $X_L$  - humidade livre [kg<sub>água</sub>/kg<sub>sólidoseco</sub>];  $X_t$  - humidade total, [kg<sub>água</sub>/kg<sub>sólidoseco</sub>];  $X_e$  - humidade de equilíbrio, [kg<sub>humidade de equilíbrio</sub>/kg<sub>sólidoseco</sub>];  $MM_A$  - massa molar da água, 18,015 [g/mol];  $MM_{Ar}$  húmido à massa molar de ar húmido, 28,97 [g/mol]

Na Figura 3.9 é possível observar a representação gráfica dos diferentes tipos de humidade referidos na Tabela 3.3 [25].

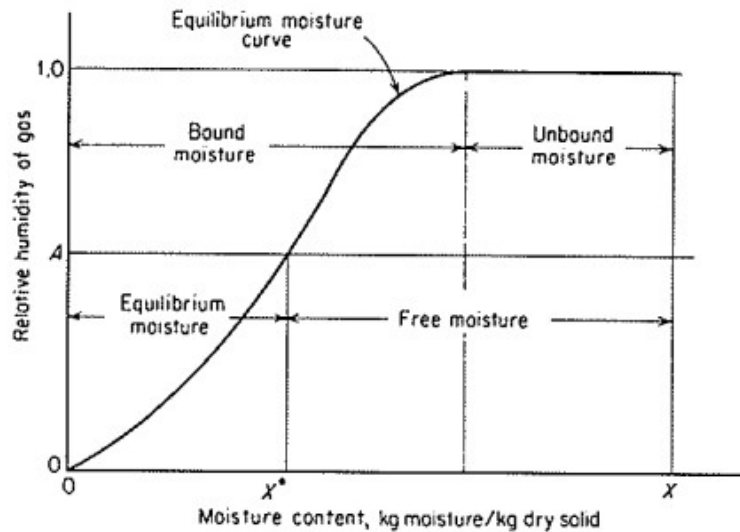


Figura 3.9 Tipos de humidade (Adaptado de [12]).

### 3.1.5 Condições que afetam a secagem

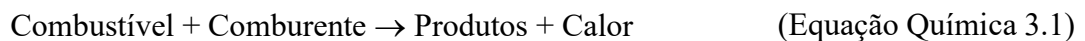
Existem condições que influenciam não só o tempo de operação, mas também a eficiência e o sucesso da secagem, tais como [17, 25]:

- **Temperatura** - quanto maior for a diferença de temperaturas entre a fonte de aquecimento e o sólido, maior será a transferência de calor e maior a velocidade de secagem. O aumento da temperatura provoca uma diminuição na humidade relativa do ar de secagem, isto porque quanto mais quente estiver o ar, maior é a migração das moléculas de água do interior do sólido para o ar.
- **Velocidade de ar** - um aumento na velocidade do escoamento do ar, provoca um aumento na taxa de transferência de massa, sendo que quanto maior for o caudal de ar, mais rapidamente é removido o vapor formado.
- **Humidade relativa do ar** - quanto menor for a humidade relativa do ar de secagem, maior será a rapidez de difusão do vapor no gás, logo maior será a velocidade de secagem.
- **Área por onde ocorre a secagem** - a evaporação é tanto maior quanto mais espalhada estiver a humidade nessa área. Assim, quanto maior for a área de sólido exposta à secagem, maior será a velocidade de evaporação da água no sólido.

## 3.2 Combustão

A combustão é um processo químico onde uma substância, chamada de combustível, reage rapidamente com um oxidante, por norma o oxigénio, e liberta calor. A combustão transforma a energia armazenada em ligações químicas em calor, podendo ser utilizada de várias formas [26, 27]. Durante esta reação química, para além dos produtos, também se liberta energia, sendo então uma **reação exotérmica** [27].

Para que estas reações ocorram, o combustível precisa de estar acima da sua temperatura de ignição. Trata-se, portanto, de uma reação exotérmica possível de ser representada pela equação química 3.1 [28].



O combustível pode ser um sólido, líquido ou gás, assim como o oxidante. No entanto, neste último, é usual utilizar-se um gás (ar) por motivos económicos [27].

Durante o processo de combustão, à medida que o combustível e o oxidante são transformados em produtos de combustão, é gerado calor. Curiosamente, é necessária uma fonte de calor para que se inicie a combustão. Por exemplo, no depósito do combustível automóvel temos presente gasolina (combustível) e ar (comburente), mas não ocorre combustão, uma vez que não existe uma fonte de calor [27].

Assim, e tendo em conta que o calor é simultaneamente necessário para iniciar a combustão e é em si mesmo um produto da combustão, pode-se perceber que se trata de um processo que se realiza rapidamente. Além disso, uma vez iniciada a combustão, não temos de fornecer continuamente uma fonte de calor, uma vez que o calor formado na combustão funciona como fonte de calor [27, 28].

Em resumo, para que a combustão ocorra, três coisas devem estar presentes: um combustível a ser queimado, uma fonte de oxigénio, e uma fonte de calor. É possível controlar ou parar o processo de combustão controlando a quantidade de combustível disponível, a quantidade de oxigénio disponível, ou a fonte de calor [27, 28].

### 3.2.1 Tipos de combustão

Uma combustão pode-se classificar como **combustão completa**, onde todo o combustível é oxidado a H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> ou **incompleta**, onde o combustível não é completamente oxidado

durante a combustão. Isto pode dever-se a fatores como: falta de oxidante, mistura deficiente, pouco tempo de contacto, entre outros fatores [29, 30].

Uma combustão completa pode ser ainda classificada de diferentes formas tendo em conta a quantidade de oxidante utilizada [29, 30].

### Combustão Completa com excesso ou défice de oxidante

Neste tipo de combustão, todo o hidrogénio e carbono no combustível são oxidados a H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>. Geralmente, para uma combustão completa, é necessário fornecer um excesso de oxigénio ou de ar para além da quantidade teoricamente necessária para oxidar o combustível [29, 30].

Por razões económicas e de segurança, a maioria dos equipamentos de combustão deve funcionar com algum excesso de ar. Isto assegura que o combustível não é desperdiçado e que a combustão é completa apesar das variações nas propriedades do combustível e nas taxas de fornecimento de combustível e ar [29, 30].

A quantidade de ar em excesso a fornecer a qualquer equipamento de combustão depende (1) das variações esperadas nas propriedades do combustível e nas taxas de fornecimento de combustível e ar, (2) da aplicação do equipamento e (3) da capacidade de combustão [30].

Na tabela 3.4 apresentam-se as percentagens de excesso de ar normalmente empregues para os diferentes combustíveis [29, 30].

*Tabela 3.4. Excesso de ar normalmente empregue para diferentes combustíveis (Adaptado de [29, 30]).*

<b>Combustível</b>	<b>% Excesso de ar</b>
<b>Carvão</b>	15 – 60
<b>Óleos Pesados</b>	5 – 20
<b>Madeira</b>	20 – 25
<b>Gás Natural</b>	5 – 10
<b>Propano</b>	20 – 30
<b>Butano</b>	10 – 20

### Combustão Completa e Estequiométrica

Na combustão completa e estequiométrica de um combustível hidrocarboneto, o combustível reage com a quantidade exata de oxigénio necessária para oxidar todo o carbono, hidrogénio e enxofre do combustível em CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e SO<sub>2</sub> [29, 31].

Por conseguinte, os gases de escape da combustão estequiométrica teoricamente não contêm constituintes do combustível incompletamente oxidados nem oxigénio que não tenha reagido (ou seja, não há monóxido de carbono nem excesso de ar ou oxigénio) [28, 29].

A percentagem de  $\text{CO}_2$  contida nos produtos da combustão estequiométrica é a máxima que pode ser atingida e é referida como  $\text{CO}_2$  estequiométrico,  $\text{CO}_2$  final ou percentagem teórica máxima de  $\text{CO}_2$  [29, 31].

A combustão estequiométrica raramente se realiza na prática devido a uma mistura imperfeita e a taxas de reação finitas [28].

### Combustão Incompleta

A combustão incompleta ocorre quando um elemento do combustível não é completamente oxidado durante a combustão. Por exemplo, um hidrocarboneto pode não se oxidar completamente em dióxido de carbono e água, mas pode formar compostos parcialmente oxidados, tais como monóxido de carbono, aldeídos e cetonas [29, 31].

As condições que promovem a combustão incompleta incluem [29, 31]:

- Mistura insuficiente de ar e combustível (causando zonas locais ricas em combustível e zonas pobres em combustível);
- Fornecimento insuficiente de ar à chama (fornecendo menos do que a quantidade necessária de oxigénio);
- tempo de permanência insuficiente do reagente na chama (impedindo a conclusão das reações de combustão);
- Impacto da chama numa superfície fria (extinguindo as reações de combustão);
- Temperatura da chama demasiado baixa (abrandando as reações de combustão).

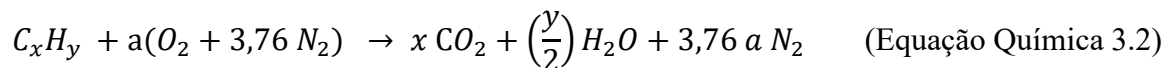
A combustão incompleta utiliza o combustível de forma ineficiente, pode ser perigosa devido à produção de monóxido de carbono e contribui para a poluição atmosférica [31].

### 3.2.2 Estequiometria da reação

A quantidade estequiométrica de oxidante define-se como a quantidade necessária para queimar completamente uma quantidade de combustível [28].

Quando se fornece uma quantidade de oxidante superior à quantidade estequiométrica, diz-se que a mistura é **pobre em combustível**, ou apenas pobre. Se, a quantidade fornecida for inferior, à quantidade estequiométrica, obtém-se uma **mistura rica em combustível**, designada por mistura rica [28].

Para um hidrocarboneto  $C_xH_y$ , a reação estequiométrica pode ser representada pela reação 3.2 [28].



Onde,

$$a = x + y/4 \quad (3.6)$$

Os gases de combustão provenientes da queima de combustíveis fósseis contêm geralmente dióxido de carbono ( $CO_2$ ), água e hidrogénio ( $H_2$ ) com algumas pequenas quantidades de monóxido de carbono (CO), óxidos de azoto ( $NO_x$ ), óxidos de enxofre ( $SO_x$ ) e hidrocarbonetos não queimados. No entanto, geralmente apenas o  $CO_2$  (ou  $O_2$ ) e o CO são medidos para determinar a plenitude da combustão e a eficiência [31].

### 3.2.3 Combustíveis

Os combustíveis industriais, na sua forma natural ou produzidos artificialmente, podem encontrar-se no estado sólido, líquido ou gasoso. A seleção do combustível mais adequado depende de vários fatores, tais como disponibilidade, armazenamento, manuseamento, poluição e custo do combustível [32].

Os combustíveis convencionais à base de hidrocarbonetos contêm principalmente hidrogénio e carbono, na forma elementar ou em vários compostos. A sua combustão completa produz principalmente dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e água ( $H_2O$ ). No entanto, podem formar-se pequenas quantidades de monóxido de carbono (CO) e constituintes dos gases de combustão parcialmente reagidos (gases e aerossóis líquidos ou sólidos) [31].

A maioria dos combustíveis convencionais também contém pequenas quantidades de enxofre, que é oxidado a dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) ou trióxido de enxofre ( $SO_3$ ) durante a combustão, e substâncias não combustíveis, como matéria mineral (cinzas), água e gases inertes [31].

Mencionam-se de seguida a classificação dos combustíveis com base no seu estado físico.

### 3.2.3.1 Combustíveis líquidos

Os combustíveis líquidos são frequentemente utilizados em aplicações industriais e alguns exemplos são o fuelóleo, o gasóleo, o querosene, as parafinas e os álcoois (como subprodutos) [32].

As principais propriedades dos combustíveis líquidos são a densidade, a viscosidade, o poder calorífico, inferior e superior, os teores de enxofre, de água e de sedimentos, o ponto de inflamação ou *flash point* e a toxicidade [32].

Os combustíveis líquidos são queimados em queimadores que os pulverizam e misturam com o ar. Quando se trata de combustíveis líquidos, muito viscosos à temperatura ambiente (como o fuelóleo), torna-se necessário aquecê-los previamente (a cerca de 70 – 80 °C), para os tornar suficientemente fluidos e permitir, assim, a sua alimentação aos queimadores e a sua pulverização [32].

### 3.2.3.2 Combustíveis sólidos

Os combustíveis sólidos habitualmente empregues nos processos industriais são o carvão, coque de petróleo, madeira, pó de cortiça e outros resíduos industriais sólidos [32].

As principais propriedades dos combustíveis sólidos são o poder calorífico, o teor de humidade, os teores de cinzas, de matéria volátil e de carbono fixo e a granulometria [32].

Os combustíveis sólidos são queimados frequentemente em grelhas, com alimentação de combustível e descargas das cinzas, manuais ou automáticas. Quando pulverizados queimam-se, por vezes, em câmaras específicas, que permitem a utilização duma vasta gama de combustíveis [32].

### 3.2.3.3 Combustíveis gasosos

Os combustíveis gasosos são misturas de hidrocarbonetos gasosos com H<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub> e outros gases em percentagem inferior. A nível industrial, é comum encontrar-se combustíveis gasosos como o gás natural, gases de petróleo liquefeitos (propano e butano, principalmente) e acetileno [32].

As principais características dos combustíveis gasosos são o poder calorífico, a densidade, o limite de inflamabilidade, a temperatura de ebulição à pressão atmosférica, o ponto de inflamação, o peso molecular, o calor de vaporização e o calor específico [32].

Os combustíveis gasosos são de utilização extremamente versátil, em particular nos aspetos de alimentação e controlo de combustão. No entanto, apresentam riscos de explosão e incêndio mais elevados comparativamente aos combustíveis líquidos e sólidos devido a possíveis fugas [32]. Podem ser transportados em *pipeline* à pressão próxima da atmosférica, ou comprimidos (ou liquefeitos) em recipientes capazes de suportar elevadas pressões [32].

O combustível utilizado nas caldeiras da empresa é o gás natural, sendo apresentado de seguida.

### 3.2.3.4 Gás Natural

O gás natural é um gás quase inodoro e incolor que se acumula nas partes superiores dos poços de petróleo e gás. O gás natural bruto é uma mistura de metano (55 a 98%), hidrocarbonetos superiores (principalmente etano) e gases não combustíveis. Alguns constituintes, principalmente vapor de água, sulfureto de hidrogénio, hélio e gases para gases de petróleo liquefeitos e gases liquefeitos de petróleo e gasolina são removidos antes da distribuição [31]. No Anexo A.1 apresentam-se as propriedades físicas do gás natural.

O gás natural consiste numa mistura de gases composta principalmente por metano (CH<sub>4</sub>), que geralmente está presente numa quantidade superior a 70%. Apresenta uma densidade inferior a 1, o que significa que é mais leve que o ar. Essa propriedade torna o gás natural mais seguro, pois ele tende a dissipar-se rapidamente em caso de vazamentos [33]

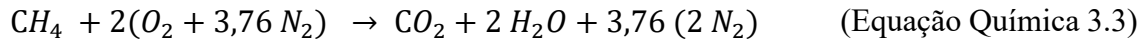
Quando o gás natural é queimado, principalmente em processos de combustão completa, as principais emissões resultantes são dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e vapor de água (H<sub>2</sub>O). Essas emissões são menos poluentes em comparação com outros combustíveis fósseis, como é possível observar na Tabela 3.5 [33].

Tabela 3.5. Fator de emissão de vários combustíveis fósseis comparativamente ao gás natural (Adaptado de [33]).

Combustível	Fator de emissão (tC/TJ) *
Gasolina	18,9
Gasóleo	20,2
Antracite	26,8
Fuel óleo	21,1
Gás Natural	15,3

\* (tC/TJ) - Teor de carbono do combustível por energia

Para efeitos de cálculo, assume-se que o gás natural é constituído essencialmente por metano, sendo que a reação química **completa e estequiométrica** do CH<sub>4</sub> com o ar atmosférico apresenta a seguinte forma (Equação Química 3.3): [31]



Além disso, assume-se também que a composição do ar atmosférico é 21% O<sub>2</sub> e 79% N<sub>2</sub>, isto é, por cada mol de O<sub>2</sub>, existem 3,76 moles de N<sub>2</sub> [28].

Tento em conta a reação apresentada, retirou-se da bibliografia dados sobre as quantidades de oxidante necessários para a queima do metano. Apresenta-se na Tabela 3.6 os dados utilizados [31].

Tabela 3.6. Parâmetros da reação completa e estequiométrica do Metano com O<sub>2</sub> (Adaptado de [31]).

Constituinte	Requisitos estequiométricos de O <sub>2</sub> e ar		Requisitos estequiométricos dos gases de combustão	
	[kg/kg <sub>combustível</sub> ]		[kg/kg <sub>combustível</sub> ]	
	O <sub>2</sub>	Ar	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
<b>Metano (CH<sub>4</sub>)</b>	3,99	17,24	2,744	2,246

Os cálculos da quantidade de ar necessária para a combustão e a quantidade de produtos de gases de combustão gerados durante a combustão são frequentemente necessários para o dimensionamento dos componentes do sistema e como entrada para os cálculos de eficiência [31].

Na Tabela 3.7 apresentam-se os principais parâmetros de referência para a combustão de gás natural, que serão mais tarde confrontados com os resultados obtido [32].

Tabela 3.7 - Parâmetros de referência para a combustão de Gás Natural (Adaptado de [32]).

Parâmetro	Valor de Referência
	Gás Natural
<b>Teor de O<sub>2</sub> (%)</b>	1,1 – 2,1
<b>Teor de CO<sub>2</sub> (%)</b>	11,4 – 10,9
<b>Excesso de ar de combustão (%)</b>	5 - 10

### 3.2.4 Caldeiras

Uma caldeira é um equipamento onde os gases quentes provenientes da combustão de um combustível fornecem calor a um fluido a aquecer (e/ou a vaporizar), através das paredes metálicas que o envolvem [32, 34].

Numa caldeira, também denominada por gerador de calor, existe uma zona destinada à combustão, onde se produzem os gases quentes que irão servir de fluido aquecedor, designado por câmara de combustão, e outra destinada à transmissão de calor, a caldeira propriamente dita [32, 34].

Existem várias classificações de caldeiras, tendo em conta a fonte de energia utilizada ou o tipo de combustível utilizado (sólido, líquido ou gasoso), o tipo de fluido produzido (água quente, vapor, termofluido), o tipo de câmara de combustão (fornalha, tubo de fogo ou câmara de combustão tubular), entre outros [32, 34].

O corpo do gerador é o local onde se dá a transferência de calor dos gases de combustão para o fluido a aquecer. Para além dos componentes referidos do gerador, existem ainda outros equipamentos auxiliares que permitem melhorar e vigiar o bom funcionamento do gerador, como, por exemplo, as bombas de alimentação, as válvulas de segurança, o quadro de controlo e comando, diversos manómetros, pressostatos, economizadores e muitos outros [32, 34].

A caracterização de uma caldeira pode ser efetuada através dos seguintes parâmetros [32, 34]:

- natureza do fluido a aquecer;
- timbre (pressão máxima que não pode ser excedida durante o funcionamento do gerador) e pressão de serviço;
- temperatura do fluido a aquecer;
- combustível a queimar;
- potência térmica a produzir;
- superfície de aquecimento (toda a parte metálica que é banhada, por um lado, pelo fluido quente ou sujeita à radiação da chama e, por outro, pelo fluido a aquecer);
- capacidade, que será o volume total de todas as partes internas da caldeira sujeitas a pressão;
- rendimento térmico.

Na empresa, a caldeira utilizada para alimentar o equipamento de secagem classifica-se como uma caldeira de termofluido, sendo explicado o seu funcionamento no Capítulo 4.

## 4 Equipamentos de secagem

Neste capítulo apresenta-se uma descrição dos equipamentos de secagem utilizados na **Copo Têxtil**.

### 4.1 Caldeira de termofluido

As caldeiras de termofluido apresentam um corpo de permuta através do qual circula um termofluido que recebe energia na forma de calor. Este calor provém da combustão de diferentes fontes de energia, tais como biomassa ou combustível fóssil [32, 35].

As caldeiras de termofluido são usadas em indústrias que exigem altas temperaturas, como na produção de plásticos, tintas, alimentos e bebidas, produtos químicos, entre outras. Apresentam várias vantagens em relação a outros tipos de caldeiras, incluindo a capacidade de fornecer temperaturas precisas e estáveis, serem mais seguras e confiáveis, terem baixo risco de explosão e serem mais fáceis de manter e operar [32, 35].

No entanto, as caldeiras de termofluido também apresentam algumas desvantagens, como a possibilidade de vazamento do fluido térmico e a necessidade de um sistema de tratamento de resíduos. Portanto, é importante considerar cuidadosamente as necessidades do processo ou aplicação antes de escolher o tipo de caldeira mais adequado [32, 35].

Estas caldeiras apresentam uma construção semelhante às caldeiras tubulares de uma só passagem, contudo elas não estão sujeitas a pressões elevadas como ocorre quando o fluido primário é a água [32, 35].

Existem fundamentalmente dois tipos de caldeiras: as de serpentina, com câmara de combustão circular, e as de câmara de combustão retangular, de desenvolvimento horizontal. Esta última está presente na empresa **Copo Têxtil** (Figura 4.1) [32, 35].



*Figura 4.1. Exterior da caldeira a termofluido da Copo Têxtil.*

A caldeira em estudo consiste numa caldeira de tubos de fluido, onde o óleo circula no interior dos tubos sendo aquecido por meio de combustão de gás natural. Esta caldeira apresenta um funcionamento simples, sendo o fluido térmico aquecido através da queima do gás natural. Em seguida, o fluido aquecido circula através do sistema de tubos e serpentinas para transferir calor para o processo. Após transferir calor, o fluido térmico retorna à caldeira para ser aquecido novamente [32, 35].

É importante notar que o fluido térmico usado nas caldeiras de termofluido precisa de ser selecionado cuidadosamente para garantir que seja compatível com os processos têxteis e não cause danos aos equipamentos ou ao meio ambiente. Além disso, as caldeiras de termofluido precisam de ser regularmente inspecionadas e mantidas para garantir que operam com segurança e eficiência [32, 35].

A caldeira tem acoplado um queimador responsável pela queima do gás natural com o ar atmosférico. As características da caldeira e do queimador apresentam-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Características da Caldeira e do queimador (Adaptado de [36]).

Caldeira - CSC, LM250 TA		Queimador – WEISHAAPT, G10/1-ZMD (1999)	
Combustível	Gás Natural	Potência máxima (kW)	4 100
Altura (m)	3,10	Potência elétrica (kW)	11
Comprimento (m)	1,42		
Largura (m)	2,40		
Termofluido	Heat Transfer Oil S2 S		

#### 4.1.1 Termofluido

O fluido térmico utilizado na empresa é o óleo térmico, sendo que as suas propriedades físicas e químicas se encontram apresentadas na Tabela 4.2. Notar que para o termofluido em questão, algumas características físicas e químicas dependem da temperatura. No Anexo A.2 encontram-se as curvas de ajuste que relacionam a massa volúmica e a capacidade térmica do óleo com a temperatura.

Tabela 4.2. Características físicas e químicas do termofluido (Adaptado de [37]).

Cor	Âmbar
Estado físico	Líquido à temperatura ambiente
Odor	Óleo mineral característico
Valor pH	Não aplicável
Ponto de ebulição inicial	Sem informação
Massa volúmica	870 kg/m <sup>3</sup> a 15°C
Ponto de inflamação	190°C
Viscosidade cinemática	17,5 mm <sup>2</sup> /s a 40°C
Temperatura de transição vítrea	-45°C

Na tabela 4.3 apresentam-se as principais vantagens e desvantagens da utilização do óleo como fluido térmico [16].

Tabela 4.3 - Vantagens e desvantagens do óleo como fluido térmico (Adaptado de [37]).

Vantagens	Desvantagens
Baixa pressão de vapor	Baixo coeficiente de transferência de calor
Não causa problemas de corrosão nos equipamentos e tubagens	Inflamável
	Viscosidade e densidade variam com a temperatura
	Exigem bomba de circulação
	Exige depósito de expansão
	Coloca problema de flexibilidade da tubagem para $\Delta T$ alto
	Custo elevado comparado com outros fluidos térmicos como ar e água.

No Anexo A.3 apresentam-se as propriedades físicas do ar atmosférico utilizado na queima com o gás natural, sendo que no Anexo B determina-se a quantidade de gás natural e ar atmosférico empregues na combustão de modo a aquecer o termofluido até à temperatura de trabalho.

## 4.2 Râmolas

As râmolas são máquinas largamente utilizadas na indústria têxtil com a finalidade de fazer os acabamentos ao produto, que pode ser um tecido ou uma malha [11].

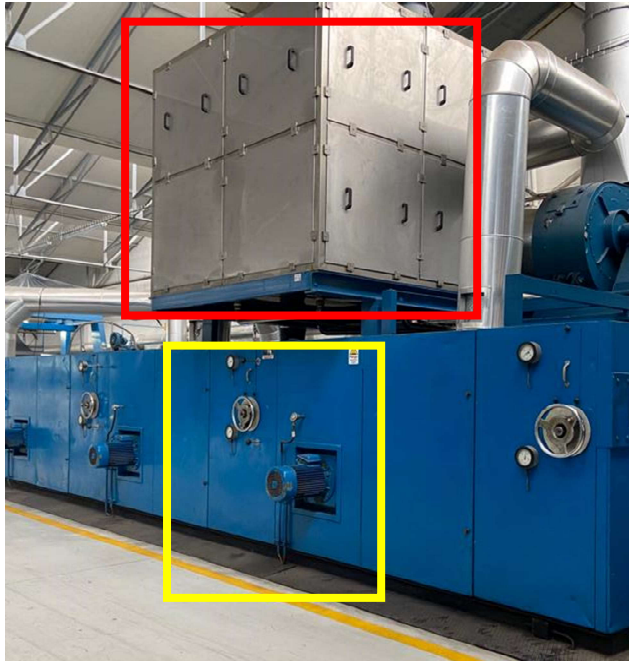
Na empresa Copo Têxtil existem 3 râmolas que se encontram caracterizadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Caracterização das râmolas da empresa Copo Têxtil.

Râmola	Nº de campos	Nº de Radiadores	Nº de Recuperadores de calor	Área (m <sup>2</sup> )
1	6	6	-	76,5
2	4	4	1	60,3
3	7	7	1	87,7

O número de campos de cada râmola diz respeito às secções de aquecimento do material, onde para cada secção existe um motor de ventilação do ar e um radiador, equipamentos responsáveis pela ventilação e aquecimento do ar, respetivamente. Os motores de ventilação de ar encontram-se no exterior da râmola, enquanto os radiadores estão presentes no interior (Figura 4.2 e 4.3, respetivamente). Estes equipamentos são importantes para a futura caracterização das perdas de calor que ocorrem e perceber os mecanismos de secagem associados ao processo [11].

Na Figura 4.2 é possível observar o exterior da râmola 2, destacado a amarelo o motor de ventilação de ar e a vermelho o recuperador de calor, e na Figura 4.3 está apresentado o radiador nº3 presente no interior da râmola. As râmolas 2 e 3 apresentam um sistema de recuperação de energia térmica do sistema de exaustão através da recirculação do calor produzido para o interior da máquina.



*Figura 4.2. Râmola 2, assinalado a amarelo o motor de ventilação nº1 e a vermelho o recuperador de calor.*



*Figura 4.3. Radiador nº3 presente no interior da râmola 2.*

Mediante o material têxtil a tratar, a temperatura dos campos irá ser diferente, encontrando-se entre os 140 e os 180 °C. A velocidade a que o material circula no interior dos campos também depende da tecnologia utilizada, tecelagem ou tricotagem, assim como parâmetros previamente estipulados pelos técnicos responsáveis [11].



## 5 Desenvolvimento experimental

Neste capítulo apresenta-se a descrição experimental adotada no desenvolvimento da presente dissertação.

### 5.1 Materiais e métodos

O presente estudo foi desenvolvido com materiais de tecelagem e tricotagem 100% poliéster. Os materiais foram secos num secador (râmola), sendo que as amostras eram recolhidas antes e após o secador, previamente ao material têxtil ser armazenado nos cavaletes.

A primeira fase, a **fase de recolha de dados**, dividiu-se em 3 etapas realizadas em simultâneo:

- Caraterísticas dos artigos analisados;
- Determinação da taxa de absorção do material;
- Análise da humidade do material.

Numa **segunda fase, a fase de otimização energética**, procedeu-se à otimização dos parâmetros de acabamento das amostras classificadas na fase 1 como ‘excesso de secagem’, assim como a realização de testes laboratoriais e comparação com os resultados obtidos no produto em série. Os testes foram realizados no laboratório de controlo de qualidade da empresa, segundo as normas estipuladas para cada artigo.

Na **terceira e última fase**, procedeu-se à realização de balanços de massa e energia para a referência 370244, utilizando os dados recolhidos na primeira e segunda fase.

#### 5.1.1 Fase de recolha de dados

Para a análise da taxa de absorção e excesso de secagem nos artigos da empresa, procedeu-se à análise de vários artigos de série. Para tal, foi necessário determinar o peso do material nas diferentes fases ilustradas na Figura 5.1.



Figura 5.1. Fases de controlo do material têxtil.

### 5.1.1.1 Caraterísticas dos artigos analisados

Na Tabela 5.1 apresentam-se as caraterísticas dos artigos analisadas, assim como os respetivos parâmetros de acabamento atuais.

Tabela 5.1. Caraterísticas das amostras analisadas.

Referência	Descrição	Râmola	Gramagem (g/m <sup>2</sup> )	Largura (mm)	Parâmetros de acabamento	
					T (°C)	v (m/min)
370244	ANMUT STORMGREY	3	135 ± 15	1500 – 1600	160 ± 10	20 ± 1
370246F	MICROPIQUET MISTRAL	3	≥ 140	≥ 1440	170 ± 10	21 ± 1
375593	CLIP SATINSCHWARZ	3	280 ± 15	1550 – 1610	150 ± 10	20 ± 1
375595	CLIP SOUL	1	220 ± 20	1840 – 1880	180 ± 10	15 ± 1
375591	CLIP REC SOUL	1	220 ± 20	1845 – 1875	170 ± 10	14 ± 1
371034B	GEMINI	1	300 ± 15	1600 – 1630	180 ± 10	14 ± 1
371035B	AIR SCHWARZ	3	127,5 ± 7,5	1670 – 1710	170 ± 10	20 ± 1
375519	CRISPIN SCHWARZ	2	370 ± 20	1850 – 1870	170 ± 10	18 ± 1
370195	FLOX GRIS CIEL HL	2	120 ± 5	≥ 1550	170 ± 10	13 ± 1
375474	CLIP TITANSCHWARZ	1	220 ± 20	1860 ± 15	180 ± 10	15 ± 1

### 5.1.1.2 Análise da taxa de absorção

A análise no primeiro equipamento, o *Foulard*, tem como objetivo verificar a taxa de absorção do material, sendo que para materiais 100% poliéster deve apresentar valores superiores a 60%.

Para a determinação da taxa de absorção, retiram-se 3 provetes da fase 1 e 2 e procede-se à sua pesagem. De seguida, e recorrendo à equação 2.1 apresentada na subsecção 2.3, é possível determinar a taxa de absorção do material.

Os provetes retirados apresentam um diâmetro de  $11,3 \pm 0,1$  cm, como os apresentados na Figura 5.2.

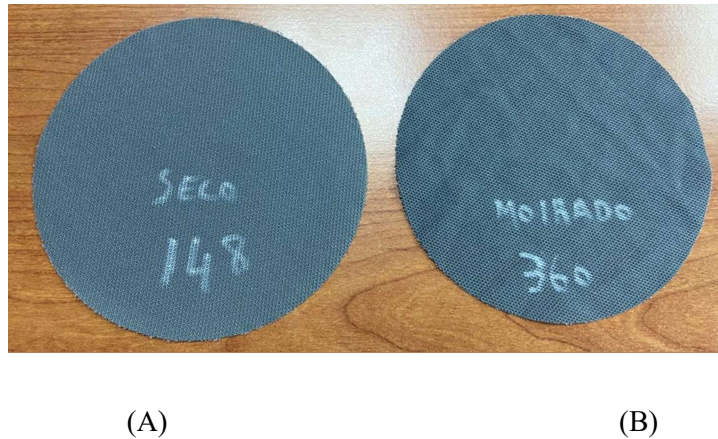


Figura 5.2. Provetes utilizados nos ensaios, onde (A) diz respeito à amostra no ponto em 2 e (B) à amostra em 3.

Na Figura 5.3 apresenta-se o Corta-Rodelas, que foi o equipamento utilizado para cortar os provetes.



Figura 5.3. Corta-Rodelas, da Albrecht Equipamentos Industriais, Ltda.

#### 5.1.1.3 Análise da humidade do material

A análise da humidade final do material foi realizada nas fases 3 e 4, tendo sido utilizado o seguinte procedimento:

- i. Retiraram-se 3 provetes do material na fase 3 (saída da râmola);
- ii. Anotaram-se a massa dos provetes;
- iii. Colocaram-se os provetes na estufa a 105°C durante 2 h e registaram-se os respetivos pesos;
- iv. Repetiu-se o passo (iii) até não haver variações significativas na massa.

Através da diferença de massas entre os pontos 3 e 4, é possível determinar a quantidade de água evaporada para o ar envolvente e, conseqüentemente, a humidade do material na posição 3. Para tal, utiliza-se a equação 3.1 apresentada no capítulo 3.

### 5.1.2 Fase de otimização energética

Para a otimização dos parâmetros de acabamento, numa primeira fase escolheu-se alterar a velocidade a que o material percorre a râmola. Desta forma, aumenta-se a produtividade. A diminuição dos parâmetros deve ser feita gradualmente, uma vez que o tempo que o material permanece dentro do equipamento influencia os testes físicos posteriores.

- Otimização da velocidade

Os ensaios para a otimização da velocidade foram realizados à escala piloto e encontram-se apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Ensaios realizados para otimizar a velocidade de acabamento do material.

Referência	Identificação	Parâmetros de referência		Novas condições
		T (°C)	v (m/min)	v (m/min)
370244	V1	160 ± 10	20 ± 1	23
	V2			26
375593	V1	150 ± 10	21 ± 1	25
	V2			30
375474	V1	180 ± 10	20 ± 1	25
	V2			30
375591	V1	170 ± 10	14 ± 1	20
	V2			25
375519	V1	170 ± 10	18 ± 1	23

- Otimização da temperatura

Na Tabela 5.3 apresentam-se os ensaios realizados para a otimização da temperatura.

Tabela 5.3. Ensaios realizados para otimizar a temperatura de acabamento do material.

Referência	Identificação	Parâmetros de referência		Novas Condições
		T (°C)	v (m/min)	T (°C)
370244	T1	160 ± 10	20 ± 1	150
	T2			145

### 5.1.3 Balanços de massa e energia

Para a realização de balanços de massa e energia, escolheu-se a referência 370244 para análise.

Os resultados serão apresentados e discutidos na secção 6.2.



## 6 Resultados Obtidos

Neste capítulo apresentam-se os principais resultados obtidos, assim como a respetiva discussão.

### 6.1 Avaliação do processo de secagem

Na Tabela 6.1 apresentam-se os resultados obtidos relativamente à quantidade de água no material após o processo de secagem. Os valores que deram origem aos resultados apresentados, assim como os respetivos exemplos de cálculo, encontram-se no Anexo C.1.

Tabela 6.1. Resultados obtidos na análise da quantidade de água no material têxtil.

Referência	$\bar{m}_1$ [g]	$\bar{m}_2$ [g]	kg <sub>água</sub> /kg <sub>material</sub>	$\bar{m}_3$ [g]	$\bar{m}_4$ [g]	kg <sub>água</sub> /kg <sub>material</sub> seco	%	Avaliação
370244	3,0748	3,6404	0,16	1,3268	1,3263	$3,77 \times 10^{-4}$	0,038%	Excesso de secagem
370246	2,0346	2,7501	0,11	1,5625	1,5623	$2,24 \times 10^{-4}$	0,022%	Excesso de secagem
375593	2,7702	5,1044	0,84	2,8641	2,8639	$8,73 \times 10^{-5}$	0,009%	Excesso de secagem
375595	1,9620	2,8299	0,44	2,1506	2,1504	$9,29 \times 10^{-5}$	0,009%	Excesso de secagem
375591	2,3970	3,6900	0,35	2,2971	2,2966	$2,32 \times 10^{-4}$	0,023%	Excesso de secagem
371034	3,0645	4,9322	0,60	3,0966	3,0932	$1,03 \times 10^{-3}$	0,10%	Secagem aceitável
371035	1,6940	2,5340	0,33	1,3230	1,3150	$5,91 \times 10^{-3}$	0,59%	Secagem aceitável
375519	-	-	-	3,6255	3,6182	$2,01 \times 10^{-3}$	0,20%	Secagem aceitável
370195	-	-	-	1,0877	1,0839	$3,53 \times 10^{-3}$	0,35%	Secagem aceitável
375474	-	-	-	2,1352	2,1316	$1,67 \times 10^{-3}$	0,17%	Secagem aceitável

Através da análise da Tabela 6.1, é possível perceber que dos 10 artigos analisados, cerca de 50% apresentam excesso de secagem. Considera-se que o intervalo ótimo de quantidade de água no material após a secagem é de 0,001 – 0,008 kg<sub>água</sub>/kg<sub>material</sub>.

Analisando os valores obtidos para as primeiras 5 referências, observa-se que apresentam uma quantidade de água no material entre  $9,29 \times 10^{-5}$  e  $3,77 \times 10^{-4}$ , valores inferiores ao limite mínimo estipulado em 91 e 62%, respetivamente. Deste modo, o processo de secagem destas referências é avaliado como ‘excesso de secagem’, constituindo um gasto desnecessário de energia na secagem. Por outro lado, as últimas 5 referências apresentam valores de água no material dentro do intervalo apresentado, sendo então avaliadas como referências com uma secagem aceitável.

A quantidade de água presente no material previamente à entrada na râmola também foi analisada. Isto deve-se ao facto de serem realizados balanços de energia e massa ao processo,

pelo que é necessário determinar os resultados apresentados. No entanto, este parâmetro não representa um aspeto de avaliação da presente dissertação.

De seguida, divide-se as otimizações por velocidade e temperatura de acabamento, uma vez que se tratam de duas variáveis que têm diferentes impactos na qualidade do material final. Os dados obtidos experimentalmente que deram origem aos resultados indicados apresentam-se no Anexo C.2.

### 6.1.1 Otimização da velocidade de acabamento

Na Tabela 6.2 apresentam-se os principais resultados obtidos após a otimização da velocidade de acabamento das referências classificadas com ‘excesso de secagem’. De referir que a otimização dos parâmetros está dependente do planeamento da produção, pelo que não foi possível analisar todas as referências indicadas.

Tabela 6.2. Valores da humidade obtidos após otimização dos resultados.

Referência	Identificação	Novas condições	$\bar{m}_3$ [g]	$\bar{m}_4$ [g]	kg <sub>água</sub> /kg <sub>material</sub>	%	Avaliação
		v (m/min)					
370244	V1	23	1,3701	1,3915	0,0010	0,10%	Secagem aceitável
	V2	25	1,3535	1,3508	0,0020	0,20%	Secagem aceitável
375593	V1	25	2,9109	2,8995	0,0040	0,40%	Secagem aceitável
	V2	30	2,9641	2,9254	0,0130	1,3%	<b>Secagem NOK</b>
375474	V1	25	2,1768	2,1721	0,0022	0,22%	Secagem aceitável
	V2	30	2,1772	2,1725	0,0021	0,28%	Secagem aceitável
375591	V1	20	2,9126	2,8990	0,0047	0,47%	Secagem aceitável
	V2	25	2,9302	2,9046	0,0091	0,91%	<b>Secagem NOK</b>
375519	V1	23	3,5240	3,5155	0,0024	0,24%	Secagem aceitável

Através da análise da Tabela 6.2, observa-se que existem 2 ensaios com uma avaliação negativa (Secagem NOK). Estes ensaios, 375593-V2 e 375591-V2, apresentam uma quantidade de água no material de 0,013 e 0,091 kg<sub>água</sub>/kg<sub>material</sub>, o que é cerca de 1,6 e 1,2 vezes superior ao limite máximo de 0,008 kg<sub>água</sub>/kg<sub>material</sub>. Desta forma, estas otimizações são classificadas como NOK, sendo então descartadas. As restantes otimizações, apresentam valores para a humidade final do artigo, em base seca, dentro do intervalo 0,1-0,8%, sendo consideradas aceitáveis.

De forma a fazer uma análise mais detalhada, construiu-se o gráfico da Figura 6.1, onde é possível observar o impacto da velocidade do material na quantidade de água presente no material têxtil após secagem.

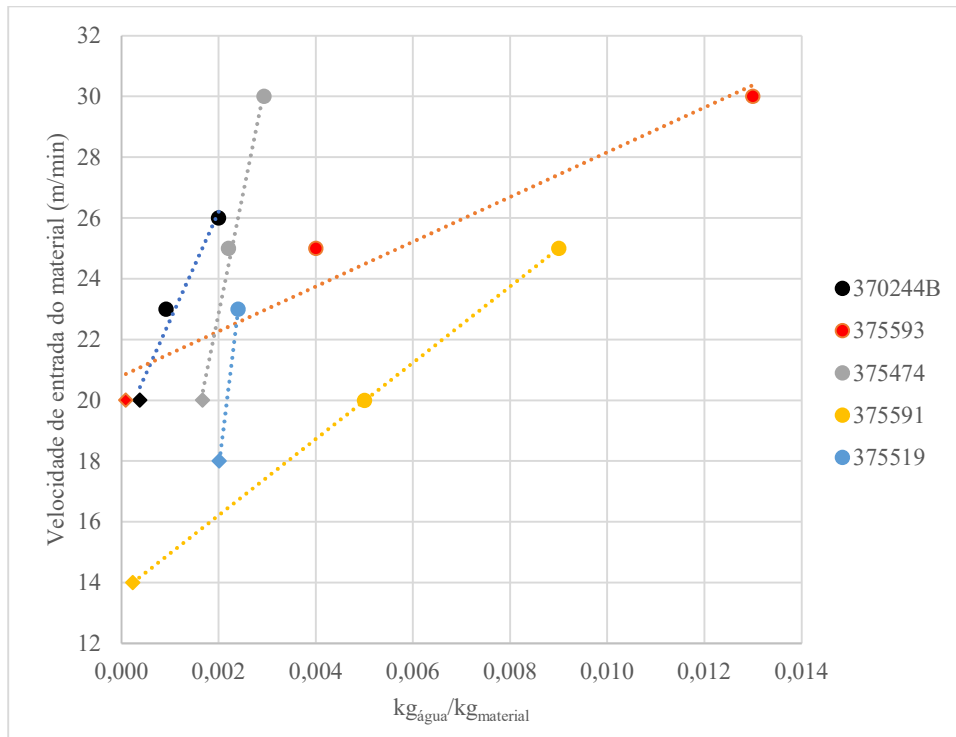


Figura 6.1. Variação da quantidade de água no material com o aumento da velocidade (os primeiros símbolos, os quadrados, dizem respeito às condições de série, enquanto os círculos correspondem às otimizações).

Pela Figura 6.1 é possível verificar que a quantidade de água presente no material aumenta com o aumento da velocidade a que o material passa no acabamento, como era expectável. Isto deve-se ao facto de o material estar menos tempo em contacto com o ar quente de secagem, o que permite que haja uma menor transferência de massa da água presente no material para o ar. Assim, o material sai com uma maior quantidade de água e os gases de exaustão apresentam um teor de água inferior, comparativamente aos dados iniciais.

Analisando os valores obtidos para a referência 370244, verifica-se um aumento na quantidade de água no material de 2,4 e 5,3 vezes quando se aumenta a velocidade do material de série (20 m/min) para 23 e 26 m/min, respetivamente.

Relativamente à otimização efetuada para a referência 375593, aumentando a velocidade do material de 20 m/min para 25 m/min, observa-se um aumento da massa de água no material de 0,0039 kg<sub>água</sub>/kg<sub>material</sub>, ou seja, obteve-se um valor 39 vezes superior. Quando se aumenta a velocidade para 30 m/min, obtêm-se uma humidade de 1,3%, o que não satisfaz os critérios

impostos. Assim, esta otimização não é viável tendo em conta os parâmetros definidos atualmente.

No que diz respeito à referência 375474, um aumento de 5 e 10 m/min na velocidade do material provoca um aumento na quantidade de água no material de 1,3 e 1,8 vezes, respetivamente.

Para a referência 375591, aumentou-se a velocidade do material de 14 para 20 e 25 m/min, obtendo-se uma quantidade de água no material 21,6 e 38,8 vezes superior, respetivamente, quando comparado com os resultados de série. Observa-se o aumento na quantidade de água de cerca de 38,8 vezes quando se aumenta a velocidade do material de 14 para 25 m/min.

Por fim, a otimização da velocidade na referência 357519 aumentou a quantidade de água no material em 1,2 vezes.

Deste modo, e após os resultados e constatações feitas, comprova-se que um aumento no caudal do material na fase de acabamento permite um aumento da quantidade de água no final da etapa, podendo esta relação ser mais acentuada conforme a estrutura do artigo. No entanto, a análise do sucesso das otimizações é realizada com base nos resultados dos testes físicos no material, confrontando-os com os resultados de série.

Na Tabela 6.3 apresentam-se os principais resultados obtidos para as referências otimizadas.

Tabela 6.3. Resultados dos testes físicos obtidos.

	375593		370244			375591			375519	
	Série	150°C 25 m/min	Série	160°C 23 m/min	160°C 25 m/min	Série	170°C 25 m/min	170°C 30 m/min	Série	170 °C 23 m/min
<b>Largura (mm)</b>	1550-1610	<b>1550</b>	1550-1600	<b>1580</b>	<b>1570</b>	1845-1875	<b>1870</b>	<b>1860</b>	1850 - 1870	<b>1865</b>
<b>Gramagem (g/m<sup>2</sup>)</b>	265-295	<b>302,3</b>	120 - 150	<b>136,6</b>	<b>135,7</b>	200-240	<b>221,6</b>	<b>220,9</b>	350 - 390	<b>354,8</b>
<b>Espessura (mm)</b>	NA*	NA	0,6-0,7	<b>0,64</b>	<b>0,63</b>	0,3-0,7	<b>0,51</b>	<b>0,53</b>	0,6 - 1,0	<b>0,86</b>
<b>Alongamentos estáticos</b>										
<b>Comprimento</b>	≥ 15	<b>24</b>	≥ 20	<b>40</b>	<b>39</b>	6 - 10 %	<b>8,8</b>	<b>8,8</b>	6 - 9 %	<b>7,2</b>
<b>Largura</b>	≥ 15	<b>23</b>	≥ 35	<b>52</b>	<b>53</b>	6 - 10 %	<b>5,00</b>	<b>5,3</b>	4 - 7 %	<b>5,2</b>
<b>Alongamentos dinâmicos</b>										
<b>Comprimento</b>	NA	NA	≥ 300	<b>321,98</b>	<b>327,95</b>	NA	NA	NA	NA	NA
<b>Largura</b>	NA	NA	≥ 301	<b>429,15</b>	<b>451,25</b>	NA	NA	NA	NA	NA

\*NA – Teste não realizado ao artigo em questão.

Através da análise da Tabela 6.3, e focando a atenção na otimização da referência 375593, verifica-se que a gramagem do material se encontra fora do limite superior estipulado em 7,3 unidades. Isto deve-se ao facto de o material sair com uma quantidade de água elevada, fazendo com que a gramagem não satisfaça os critérios impostos. Assim, verifica-se que a velocidade de acabamento desta referência tem de ser inferior a 25 m/min de modo a satisfazer os critérios de qualidade definidos do artigo após acabamento.

Relativamente à referência 375591, verifica-se que se obtêm resultados satisfatórios nos testes físicos com um aumento na velocidade de acabamento 20 para 30 m/min. No entanto, e com base no *know-how* transmitido pelos técnicos de acabamento, não é aconselhável aumentar a velocidade em mais de 5±1 m/min. Isto deve-se ao facto de o processo de acabamento, para além de secar o material, permitir também fixar a estrutura do poliéster. Esta fixação da estrutura é de extrema importância no ramo automóvel, uma vez que o material deve passar nos testes de abrasão *martindale*. Os testes de abrasão simulam o desgaste físico do uso do material têxtil durante 10 anos. Se o material não estiver tempo suficiente no interior da râmola, a fixação da estrutura não será suficiente, obtendo-se resultados classificados como NOK (*not ok*). Assim, e tendo em conta os testes físicos atuais, verifica-se que a velocidade ótima de acabamento do artigo 375591 é de 25 m/min.

Relativamente às restantes otimizações, verificam-se que todas satisfazem os critérios de qualidade, sendo consideradas otimizações viáveis, não interferindo na qualidade do produto final e tornando o processo mais produtivo e eficiente.

### 6.1.2 Otimização da temperatura de acabamento

No que diz respeito à otimização da temperatura de acabamento, apresenta-se na Tabela 6.4 os ensaios realizados.

Tabela 6.4. Ensaios realizados para otimizar a temperatura de acabamento do material.

Referência	Identificação	Novas condições	$\bar{m}_3$ [g]	$\bar{m}_4$ [g]	kg <sub>água</sub> /kg <sub>material</sub>	%	Avaliação
		T (°C)					
370244	T1	150	1,3799	1,3775	0,0017	0,17%	Secagem aceitável
	T2	145	1,3724	1,3700	0,0036	0,36%	Secagem aceitável

Pela análise da Tabela 6.4, verifica-se que as otimizações efetuadas apresentam resultados positivos, sendo avaliadas como secagens aceitáveis. Isto porque a quantidade de água no

material têxtil toma valores de 0,0017 e 0,0036  $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{material}}$ , que se encontram dentro do intervalo estipulado de 0,001 – 0,008  $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{material}}$ .

Para uma análise mais pormenorizada, construiu-se a Figura 6.2 de modo a entender a influência da temperatura no processo de secagem do material.

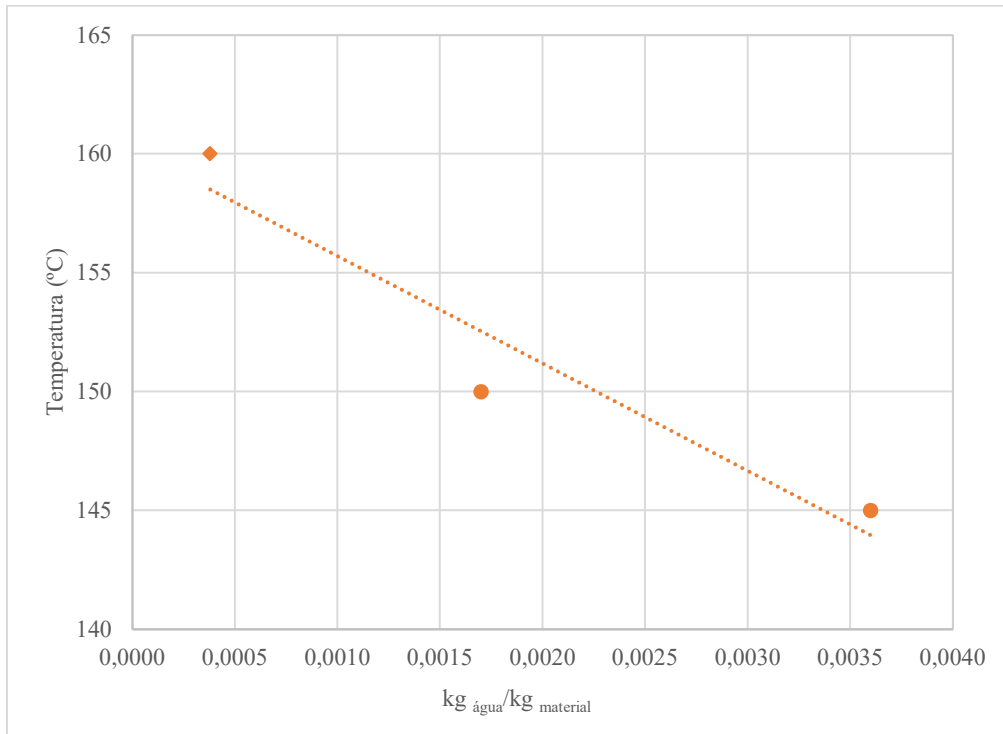


Figura 6.2. Variação da quantidade de água no material com a diminuição da temperatura (o primeiro símbolo, o quadrado, diz respeito às condições de série, enquanto os círculos correspondem às otimizações).

Pela análise da Figura 6.2 é possível verificar que a quantidade de água presente no material aumenta com a diminuição da temperatura no interior da râmola. Nota-se que diminuindo a temperatura de 160°C para 150°C, mantendo a velocidade constante, obtêm-se uma quantidade de água no material têxtil 4,5 vezes superior. Aumentando a diferença de temperaturas para 15°C, a massa de água no material têxtil é cerca de 9,5 vezes superior.

Este aumento da humidade do ar deve-se ao facto de que à medida que se diminui a temperatura do ar, fornece-se menos quantidade de calor ao ar e, conseqüentemente, o material têxtil demorará mais tempo a secar. Como o artigo permanece na râmola durante o mesmo período em todos os ensaios (velocidade constante) é expectável o material sair com uma quantidade de água superior para temperaturas mais baixas e os gases de exaustão apresentarem um teor de água inferior, comparativamente aos dados iniciais.

No entanto, a temperatura na secção de acabamento não tem como objetivo principal secar o material, mas sim termo fixar o poliéster, controlar a largura final, melhorar testes físicos, entre

outros. Através do *know-how* adquirido pelos técnicos de acabamento, sabe-se que uma diminuição considerável na temperatura de acabamento pode traduzir-se numa fixação insuficiente do poliéster, o que vai resultar numa qualidade inferior do produto final.

De modo a constatar a informação supracitada, realizou-se testes físicos nas amostras acabadas com uma temperatura inferior à utilizada em série. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 6.5.

Tabela 6.5. Resultados dos testes físicos obtidos.

370244			
	160 °C 20 m/min*	150°C 20 m/min	145°C 20 m/min
<b>Largura (mm)</b>	1550-1600	<b>1620</b>	<b>1650</b>
<b>Gramagem (g/m<sup>2</sup>)</b>	120 - 150	<b>137,1</b>	<b>139,1</b>
<b>Espessura (mm)</b>	0,6-0,7	<b>0,65</b>	<b>0,64</b>
<b>Alongamentos estáticos</b>			
<b>Comprimento</b>	≥ 20	<b>31</b>	<b>41</b>
<b>Largura</b>	≥ 35	<b>52</b>	<b>54</b>
<b>Alongamentos estáticos</b>			
<b>Comprimento</b>	≥ 300	<b>359,1</b>	<b>312,4</b>
<b>Largura</b>	≥ 301	<b>430,4</b>	<b>440,4</b>

\* Parâmetros de acabamento de série

Pela análise da Tabela 6.5, é possível verificar que os ensaios realizados com a diminuição da temperatura não satisfazem os requisitos estipulados. Nenhum dos ensaios realizados apresentam valores considerados aceitáveis para a largura, o que faz com que o material seja rejeitado.

Numa análise mais pormenorizada, quando se diminui a temperatura de acabamento atualmente utilizada em série em 10 °C, o limite máximo aceitável para a largura é ultrapassado em 20 mm, correspondendo a um aumento de 1,25%. Por outro lado, quando o a diferença de temperaturas toma valores de 15 °C, o limite máximo aceitável é excedido em 3,1%.

Os resultados obtidos são explicados pelo facto de que uma diminuição na temperatura de acabamento, não permite uma Termo fixação do poliéster tão eficaz, não existe uma temperatura suficiente para estabilizar a estrutura do poliéster de modo a obter a largura pretendida, fazendo com que o material à saída da râmola apresenta uma largura superior.

Assim, é possível constatar que a temperatura de 160 °C utilizada para acabar o artigo 370244 é a temperatura ótima de acabamento.

## 6.2 Balanços de massa e energia

O **balanço de massa** é um dos cálculos mais utilizados na engenharia química, e consiste na descrição de fluxos de massa de entrada e saída de um processo, sendo o seu fundamento no princípio da conservação da massa.

Por outro lado, o **balanço de energia** tem o seu fundamento no princípio da conservação de energia, isto é: de toda a energia fornecida a um processo, uma parte é usada nele, e outra parte é dissipada para o exterior do sistema. A forma mais completa de conhecer um equipamento é efetuar um balanço mássico e energético.

Para os balanços de massa e energia, é necessário, numa primeira fase, definir a fronteira a que os balanços dizem respeito. Deste modo, apresenta-se na Figura 6.3 o esquema representativo do processo de secagem.

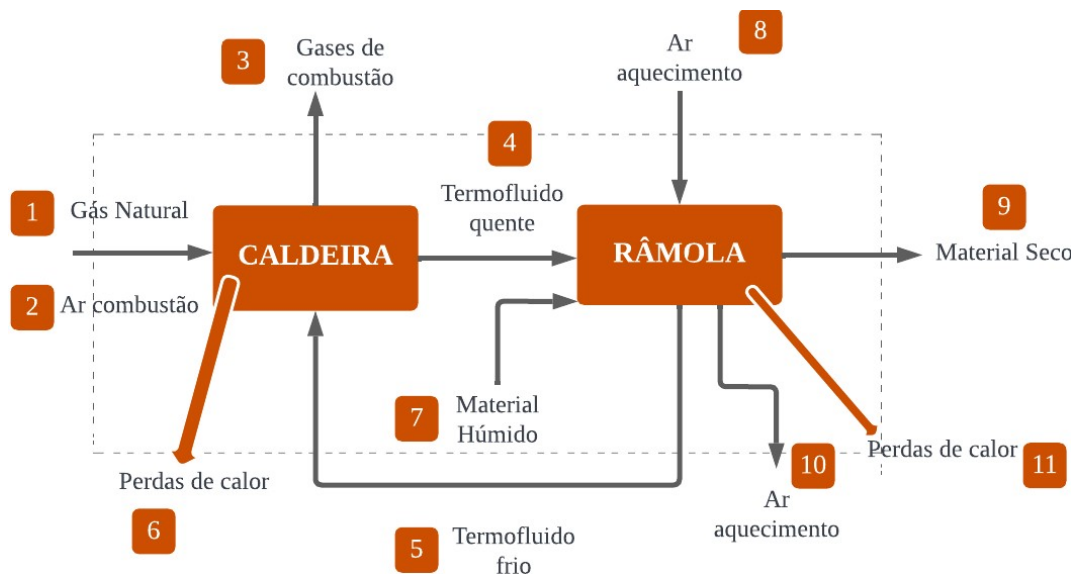


Figura 6.3. Diagrama global do processo.

De modo a quantificar cada corrente do processo, começa-se por limitar a área de trabalho às correntes de entrada e saída da **râmola**. Na Tabela 6.6 apresenta-se a caracterização das correntes de material têxtil (Anexo C.3), ar de secagem (Anexo D.1) e do termofluido (Anexo D.2).

Tabela 6.6. Caracterização as correntes de entrada e saída da râmola 3 através de balanços de massa e energia.

Descrição dos Fluxos	Massa Seca [kg/h]	Massa de água [kg/h]	Temperatura [°C]	Teor de água [kg água/kg seco]	Coefficiente de transferência de calor [kJ/h m <sup>2</sup> °C]	Calor específico [kJ/kg °C]
Material à entrada	204,91	46,19	25	0,23	-	1,5*
Material à saída	251,01	0,09	80*	0,00036	-	1,5*
Ar de secagem à entrada	4 493,86	63,28	25	0,006*	-	1*
Ar de secagem à saída	4 447,8	109,4	136,82	0,030*	-	1*
Termofluido à entrada	18 893		255*	-	-	2,5*
Termofluido à saída	18 893		240*	-	-	2,5*
Paredes laterais	-	-	-	-	29,3*	-
Cobertura	-	-	-	-	33,0*	-

\*Valor retirado de [30].

Conjugados os valores obtidos, estes foram trabalhados através das equações básicas dos balanços de massa e energia, com a finalidade de se obterem as potências térmicas correspondentes aos caudais assinalados. Após a determinação dos fluxos de energia (Anexo D.2), os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7. Balanço de massa e energia realizados ao processo de secagem do artigo 370244 na râmola 3.

Descrição dos Fluxos	Velocidade [kg/h]				Potência térmica [kJ/h]	Energia envolvida [kW]
	Passagem			Passagem do termofluido		
	Material	Água	Ar			
Material à entrada	+251,1	+46,19	-	-	+12 511	-4,9
Material à saída	-251,1	-0,090	-	-	-30 151	
Ar de secagem à entrada	-	+63,28	+6 972,2	-	+337 053	-325,1
Ar de secagem à saída	-	-109,4	-6 972,2	-	-1 507 537	
Perdas por radiação e convecção	-	-	-	-	-77 009*	-21,4
Termofluido à entrada	-			+16 944	+21 507 265	+351,4
Termofluido à saída	-			-16 944	-20 242 132	
<b>Total</b>	0	0	0	0	0	0

\*Valor retirado de [30].

De forma a entender a repartição da energia utilizada, apresenta-se na Tabela 6.8 a distribuição percentual da energia fornecida ao sistema pelo termofluido pelos diferentes fluxos.

Tabela 6.8. Repartição da energia total pelos fluxos.

Designação	Percentagem
Material	1,4%
Ar de secagem	92,5%
Perdas de radiação e convecção	6,1%
Termofluido	100%

100% = 1 298 695 kJ/h (energia que entra no sistema através do termofluido)

Através da Tabela 6.8, percebe-se que 92,5% da energia fornecida ao sistema pelo termofluido é utilizada para aquecer o ar de secagem. Este valor é coerente com o previsto teoricamente, uma vez que o objetivo do termofluido é aquecer o ar para o processo de secagem do material têxtil. Em termos de perdas de energia, sabe-se que 6,1% da energia fornecida é perdida por radiação e convecção, não representando um valor muito significativo. No entanto, recomenda-se a realização de uma verificação dos isolamentos e das tubagens por onde circula o termofluido de modo a eliminar perdas evitáveis de energia. A restante energia é utilizada para elevar a temperatura do material têxtil desde 20 até 80 °C.

De modo a compilar a informação supracitada, construiu-se o diagrama da Figura 6.4, onde se apresentam todos os dados obtidos através dos balanços mencionados.

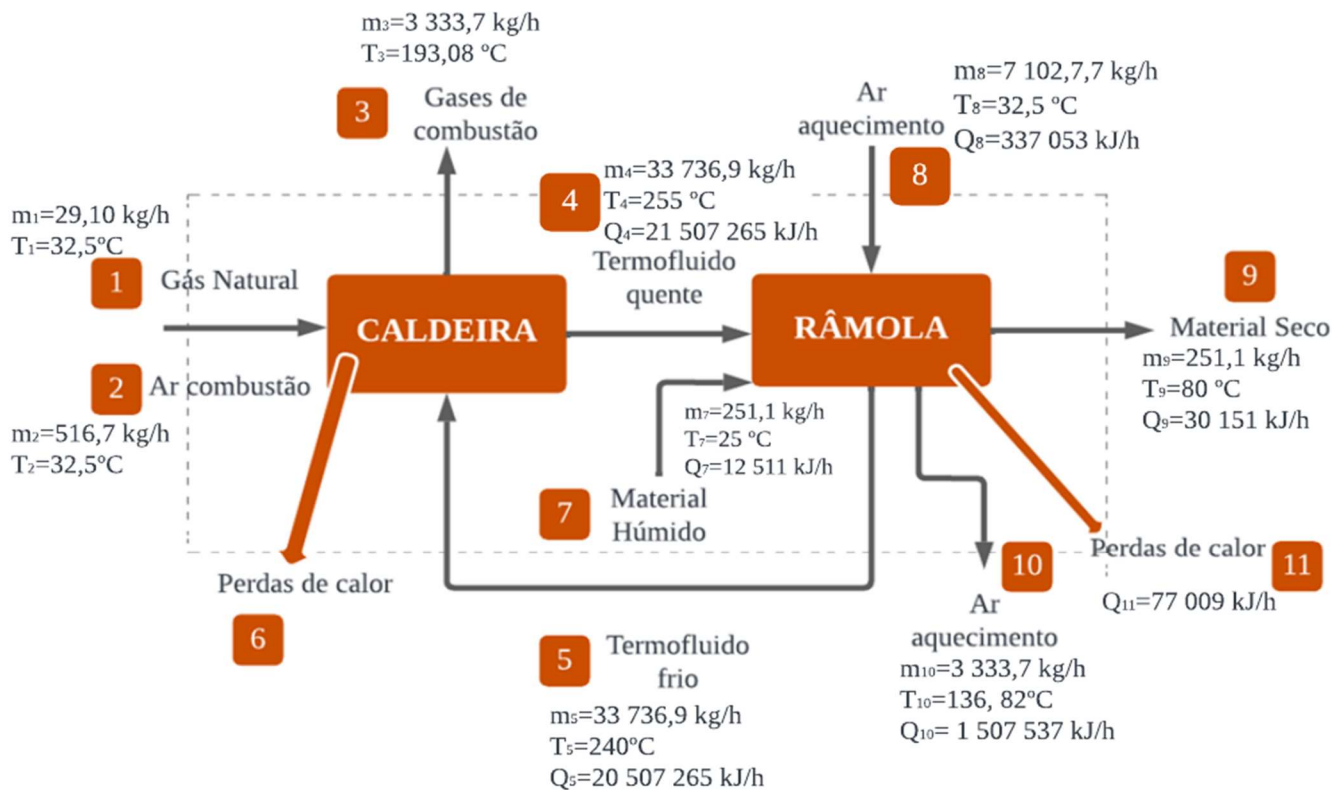


Figura 6.4. Diagrama global do processo com a respetiva caracterização das correntes.

Tendo em conta os resultados apresentados, é possível fazer uma análise ao processo de secagem do material 370244. Assim, constata-se o seguinte:

- Através da pesagem da amostra recolhida depois do *foulard*, verificou-se que o teor de humidade da malha era de 18,4% (relativamente ao material seco). Como foi indicado no Capítulo 3 – Fundamentos teóricos, para operações de acabamento recomenda-se um valor superior a 60%. Assim sugere-se que seja revisto o processo de foulardagem de modo a obter um teor de humidade à entrada da râmola de 60%;
- O teor de água no material têxtil à saída é considerado zero, sendo que o material se encontra em excesso de secagem. Assim, confirma-se, mais uma vez, que se está a consumir mais energia do que aquela realmente necessária, podendo-se aumentar a produtividade do processo e diminuir custos associados através do aumento da velocidade de acabamento.
- Os gases de exaustão são rejeitados para a atmosfera a temperaturas elevadas (obtidas à custa do termofluido), mas apresentam ainda uma grande capacidade de absorver humidade

e com elevado interesse a nível térmico. Deste modo, sugere-se a **incorporação de um recuperador de calor**

Um recuperador de calor permitir recuperar o calor excedentário dos gases de combustão para efetuar o pré-aquecimento do ar de aquecimento. Contudo, é importante que a temperatura dos gases de exaustão se mantenha sempre acima da temperatura do ponto de orvalho para se evitar condensações de água na instalação e na chaminé.

- d) O processo de secagem do artigo 370244 não é considerado eficiente, uma vez que consome 1 265 133 kJ para evaporar 46,2 kg de água (27 384 kJ/kg<sub>água evaporada</sub>), sendo normalmente considerada como meta atingir valores inferiores 4 000 kJ/kg<sub>água evaporada</sub>. Este consumo não está a ser atingido devido essencialmente às constatações apresentadas nos pontos a), b) e c).

## 7 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

A presente dissertação foi realizada na empresa Copo Têxtil Portugal, S.A. tendo como objetivo a otimização energética do processo de secagem do material têxtil. A atividade desta empresa consiste na produção de tecidos e malhas com aplicação no ramo automóvel, envolvendo um elevado consumo de energia.

De modo a atingir o objetivo proposto, estabeleceram-se os objetivos específicos, entre os quais: (i) avaliação da humidade do material têxtil no processo de secagem atual, identificando possíveis melhorias, (ii) comparação dos testes físicos obtidos no processo atual e no processo otimizado e (iii) quantificação das correntes a nível mássico e energético no processo de secagem atual.

Tendo em conta os objetivos específicos, o trabalho desenvolvido consistiu na determinação da humidade de artigos 100% poliéster após o processo de secagem na secção de acabamento. Com base nos resultados obtidos, avaliou-se o processo de secagem, procedendo-se à otimização da velocidade e/ou temperatura de acabamento das referências avaliadas em ‘excesso de secagem’. Estudou-se o impacto das otimizações através de testes físicos realizados ao material, avaliando-se parâmetros como largura, gramagem e alongamentos do material. Para uma análise mais detalhada, realizaram-se balanços de massa e energia à referência 370244.

Como principais resultados, constatou-se que as referências 370244, 370246, 375593, 375595 e 375591 encontram-se em excesso de secagem, obtendo-se valores para a humidade (base seca) inferiores a 0,1% e iguais a 0,0038, 0,022, 0,009, 0,009 e 0,023 %, respetivamente.

Por outro lado, as referências 371034, 371035, 375519, 370195 e 375474 apresentam valores de humidade final, em base seca, de 0,10, 0,59, 0,20, 0,35 e 0,17 %, respetivamente, não existindo excesso de secagem. Os parâmetros de secagem dos artigos supracitados são adequados à realidade da empresa.

A otimização das referências 370244, 375593, 375474, 375591 e 375519 teve como princípio o aumento da velocidade de acabamento. Os principais resultados são os seguintes:

- (i) **370244:** aumentando a velocidade de acabamento de 20 m/min para 23 m/min, obtém-se um aumento na humidade do artigo, em base seca, de 2,4 vezes. Para um aumento de 6 m/min, isto é, de 20 para 26 m/min, a humidade do artigo toma valores

5,3 vezes superiores. Ambos os valores de humidade obtidos encontram-se dentro do intervalo ótimo experimental (0,01 – 0,08%).

- (ii) **375593:** um aumento na velocidade do material de 20 m/min para 25 m/min provoca um aumento na massa de água no material de 0,0039 kg<sub>água</sub>/kg<sub>material seco</sub>. Um aumento para 30 m/min traduz-se numa humidade em base seca final do artigo de 1,3%, superior ao limite máximo aceitável, não sendo considerada uma otimização viável.
- (iii) **375474:** a otimização da velocidade do material em 5 e 10 m/min provoca um aumento na quantidade de água no material de 1,3 e 1,8 vezes, respetivamente. Os valores da humidade encontram-se dentro do intervalo ótimo experimental.
- (iv) **375591:** aumentando-se a velocidade de 14 para 20 m/min, obtém-se uma quantidade de água no material 21,6 vezes superior e dentro do intervalo ótimo experimental estipulado. Pelo contrário, um aumento para 25 m/min traduz-se numa humidade final em base seca de 0,91%, sendo esta otimização descartada.
- (v) **375519:** a otimização da velocidade de 18 para 23 m/min aumentou a quantidade de água no material após secagem em 1,2 vezes. O valor da humidade encontra-se dentro do intervalo ótimo experimental.

Em termos de controlo de qualidade, através da realização de testes físicos ao material, verifica-se que as otimizações efetuadas satisfazem os requisitos definidos, com exceção dos ensaios 375593 a uma velocidade de 20 m/min e 375591 a uma velocidade de 30 m/min. No artigo 375593, obteve-se um valor de gramagem fora do limite superior em 7,3 g/m<sup>2</sup>, não sendo considerada uma otimização viável. No artigo 375591, um aumento da velocidade em 10 m/min não é aconselhável devido à possibilidade de não existir uma fixação da estrutura do poliéster adequada. Assim, não se considera viável a otimização referida nas condições do presente estudo.

Após as otimizações efetuadas e respetivos testes físicos, verifica-se que as otimizações mais vantajosas para a empresa são as seguintes:

- (i) **Ref. 370244:** aumentar a velocidade de 20 para 25 m/min;
- (ii) **Ref. 375591:** aumentar a velocidade de 20 para 25 m/min;
- (iii) **Ref. 375519:** aumentar a velocidade de 18 para 23 m/min.

A caracterização das correntes de entrada e saída da râmola foi efetuada tendo em conta o processo de acabamento do artigo 370244, onde foi possível quantificação os caudais mássicos,

temperatura e humidade das correntes de entrada e saída do material têxtil, ar de secagem e termofluido utilizando balanços de massa. Através dos balanços de massa, apura-se que a secagem de 251,1 kg/h do artigo 370244, que contem, no processo atual, 46,16 kg/h de água, emprega 4 557,1 kg/h de ar de secagem com um teor de água de  $0,006 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$ . Após o processo de secagem, o teor de água no material é  $0,0036 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{material seco}}$ , obtendo-se então um caudal de saída do material seco de 251,01 kg/h. O ar de secagem abandona a chaminé com uma humidade de  $0,030 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$ .

Numa análise pormenorizada ao artigo 370244, verificou-se que para além do excesso de secagem obtido, o material não entra na râmola com a humidade definida pela Copo Têxtil. Constatou-se que, depois do *foulard*, o teor de humidade da malha era de 18,4% (relativamente ao material seco), sendo o valor recomendado superior a 60%.

Através dos balanços de energia ao artigo 370244, verifica-se que o termofluido fornece ao sistema uma energia de 351,4 kW, sendo que 325,1 kW é gasta no aquecimento do ar utilizado na secagem, 21,4 kW é perdida por radiação e convecção e 4,9 kW é utilizada para aquecer o material de 20°C para 80°C. Por outro lado, concluiu-se que o processo de secagem do artigo 370244 não é eficiente, uma vez que consome 27 384 kJ/kg<sub>água evaporada</sub>.

Como propostas para trabalhos futuros aconselha-se a revisão do processo de *foulardagem* do artigo 370244 de modo a obter um teor de humidade à entrada da râmola de pelo menos 60%, a realização de um ensaio industrial de 100 metros lineares nas otimizações consideradas vantajosas para a empresa e estudos energéticos aos vários artigos de série noutras râmolas e noutras secções da fábrica, como por exemplo na tinturaria, de modo a otimizar o consumo de energia. Paralelamente, sugere-se a realização de testes de abrasão ao material nas novas condições otimizadas para garantir a correta fixação da estrutura do poliéster.

Em suma, os objetivos da presente dissertação foram cumpridos, obtendo-se resultados satisfatórios e benéficos para a empresa. A nível pessoal, esta dissertação foi um desafio, uma vez que foi necessário conciliar a minha atividade profissional realizada na empresa com o cumprimento de prazos e objetivos definidos pela parte académica. Apesar de todas as dificuldades, o presente trabalho permitiu aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo do mestrado, o que potencializou a minha aprendizagem e evolução profissional.



## Bibliografia

- [1] Direção Geral de Energia e Geologia, «Diário da República - Despacho n.º 17313/2008», 2008.
- [2] Direção Geral de Energia e Geologia, «Fatura Energética Portuguesa», 2022. Disponível em: [www.dgeg.gov.pt](http://www.dgeg.gov.pt)
- [3] Direção Geral De Energia e Geologia, «Preços de eletricidade e gás natural», 12 de fevereiro de 2022. <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/precos-de-energia/precos-de-eletricidade-e-gas-natural/> (acedido 14 de dezembro de 2022).
- [4] ADENE, «Plano de Poupança de Energia 2022-2023», 2022.
- [5] Coface, «Consequências económicas do conflito Rússia Ucrânia: rumo à estagflação», 2022. <https://www.coface.pt/Noticias-e-Publicacoes/Noticias/Consequencias-economicas-do-conflito-Russia-Ucrania-rumo-a-estagflacao> (acedido 5 de dezembro de 2022).
- [6] R. Dias, «Fatura Energética Copo Têxtil», 2022.
- [7] J. A. R. Estévez, «Manual de acolhimento CTP 2021». 2021.
- [8] A. Sousa, «Formação básica de malhas de teia», Santo Tirso, agosto 2022.
- [9] J. N. Chakraborty, *Fundamentals and practices in colouration of textiles*. Woodhead Publishing Limited, 2010. Doi: 10.1533/9780857092823.
- [10] A. Ketema e A. Worku, «Review on Intermolecular Forces between Dyes Used for Polyester Dyeing and Polyester Fiber», *J Chem*, vol. 2020, 2020, Doi: 10.1155/2020/6628404.
- [11] Grupo ADI, «Formação Copo Têxtil», Santo Tirso, 2018.
- [12] A. N. A. Cristina e D. Ferreira, «Estudo e otimização de processos de acabamentos têxteis», 2018.

- [13] V. Faria, «Formação Secção Acabamento», 2022.
- [14] C. C. Correia, «Estudo de alternativa aos fluorcarbonos como agentes de repelência à água e óleos na indústria têxtil», 2019.
- [15] A. A. C. e Silva, «Caracterização dos modos operatórios do setor da espumação», 2018.
- [16] D. Parikh, «Solids Drying: Basics and Applications», *Chemical Engineering -New York-Mcgraw Hill Incorporated then Chemical Week Publishing Llc*, vol. 121, Abr. 2014.
- [17] C. J. Geankoplis, *Transport Processes and Unit Operations*, vol. 3. 1993.
- [18] W. L. McCabe, J. C. Smith, e P. Harriott, *Unit Operations of Chemical Engineering*, McGraw Hil., vol. Fifth Edit. 1993.
- [19] Xiandao, «Secado por atomización, secado por lecho fluidizado, Granulación, Procesos de aglomeración y recubrimiento». <http://industrial-dryer.com/spray-dryer-with-closed-circulation-drying.html> (acedido 5 de julho de 2023).
- [20] Rosal, «Secador cilíndrico». <https://rosal-feedmills.com/pt-br/maquinaria/secado/secador-tambor/> (acedido 5 de julho de 2023).
- [21] A.: Waldízia, M. Souza De Albuquerque, J. Carlos, C. Dutra, J. Recarte, e H. Guerrero, «Estudo da secagem de tecido jeans», 2011.
- [22] L. H. C. S. Dutra, «Estudo da secagem de materiais têxteis», Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2003.
- [23] L. H. C. D. Sousa, O. C. Motta Lima, e N. C. Pereira, «Analysis of drying kinetics and moisture distribution in convective textile fabric drying», *Drying Technology*, vol. 24, n. 4, pp. 485–497, 2006, Doi: 10.1080/07373930600611984.
- [24] K. Gurudatt, V. M. Nadkarni, e K. C. Khilar, «A study on drying of textile substrates and a new concept for the enhancement of drying rate», *Journal of the Textile Institute*, vol. 101, n. 7, pp. 635–644, Jul. 2010, Doi: 10.1080/00405000902732776.
- [25] R. E. Treybal, *Mass Transfer Operations*, vol. Third Edition. 1981.

- [26] E. V. Jithin, G. K. S. Raghuram, T. V. Keshavamurthy, R. K. Velamati, C. Prathap, e R. J. Varghese, «A review on fundamental combustion characteristics of syngas mixtures and feasibility in combustion devices», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 146, p. 111178, Ago. 2021, Doi: 10.1016/j.rser.2021.111178.
- [27] S. R. Turns, *An Introduction to Combustion*, vol. 2. 1996.
- [28] R. Pilão, «Combustão - Fontes e Conversão de Energia», 2021.
- [29] C. Mallol, S. M. Mentzer, e C. E. Miller, «Combustion Features», em *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology*, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2017, pp. 299–330. Doi: 10.1002/9781118941065.ch31.
- [30] ISQ, «Relatório de auditoria energética e PReN», 2017.
- [31] C. H. Bemisderfer *et al.*, *The Fundamentals*. 2001.
- [32] ADENE, «Manual de Auditorias Energéticas na Indústria», 2019.
- [33] Floene, «O que é o Gás Natural?» <https://portal.floene.pt/pt-pt/gas-natural/o-que-e> (acedido 15 de dezembro de 2023).
- [34] M. Loureiro, «Caldeiras», 2019.
- [35] B. Rafael, G. Couto, D. Carlos, M. Coutinho, e T. De Pinho, «Dimensionamento de uma caldeira a termofluido», 2009.
- [36] Sugimat, «Caldeiras de Termofluido», 2016. <https://www.sugimat.com/pt-pt/products/caldeiras-de-termofluido/> (acedido 5 de dezembro de 2022).
- [37] Shell, «Ficha de Segurança Shell Thermal Fluid S 1», 2008.



## Anexos

### Anexo A. Propriedades físicas

No presente anexo apresentam-se as propriedades físicas do gás natural, termofluido e ar atmosférico.

#### Anexo A.1 Gás Natural

Na Tabela A.1 apresentam-se os valores da percentagem molar do gás natural usado na queima [33].

*Tabela A. 1 Composição volumétrica dos componentes do gás natural (Adaptado de [33]).*

Componente	% molar
Metano (CH <sub>4</sub> )	87,885
Etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	8,056
Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	1,378
Azoto (N <sub>2</sub> )	1,088
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	1,266
Outros	0,327

Na Tabela A.2 apresentam-se os valores do calor específico, poder calorífico inferior e superior e massa volúmica do Gás Natural.

*Tabela A.2. Propriedades físicas do gás natural (Adaptado de [32]).*

Combustível	Calor específico [kJ/kg°C]	PCS		PCI		Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]
		[kJ/kg]	[kWh/m <sup>3</sup> ]	[kJ/kg]	[kWh/m <sup>3</sup> ]	
Gás Natural	2,0	51 174	18,8	45 100	10,66	0,8141

## Anexo A.2 Termofluido

### Massa volúmica

Na Tabela A.3 apresenta-se os dados facultados pelo fornecedor para a determinação da reta de ajuste de modo a obter uma relação entre a temperatura e a **massa volúmica** do óleo térmico.

Tabela A. 3. Dados facultados pelo fornecedor do óleo térmico.

Temperatura (°C)	Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
0	870
20	857
40	844
100	805
150	772
200	740
250	707
300	675
340	649

Na Figura A.1 apresenta-se a curva de ajuste entre a massa volúmica e a temperatura.

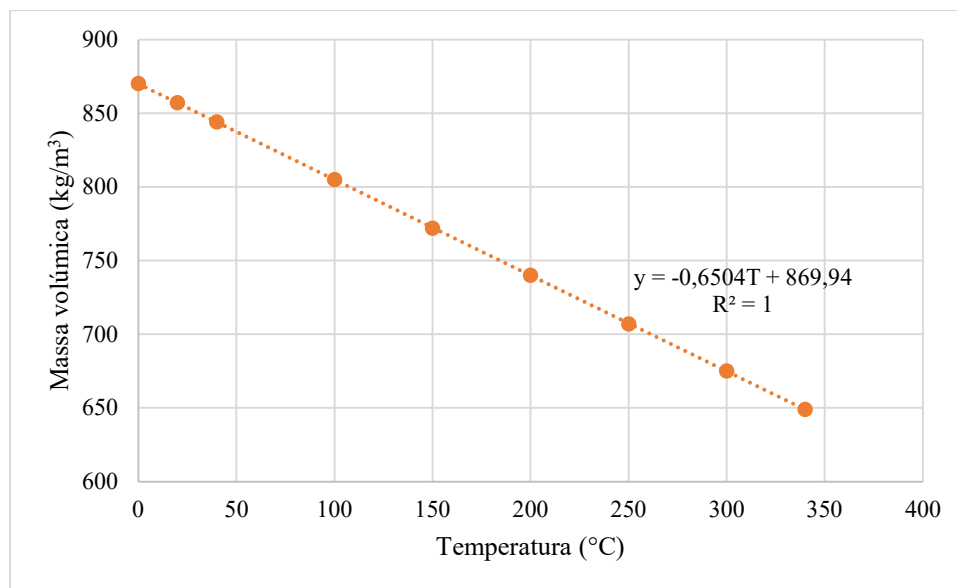


Figura A. 1. Curva de ajuste entre a massa volúmica e a temperatura do termofluido.

### Capacidade térmica

Na Tabela A.3 apresenta-se os dados facultados pelo fornecedor para determinação da reta de ajuste de modo a obter uma relação entre a temperatura e **capacidade térmica** do óleo térmico.

Tabela A. 4. Dados facultados pelo fornecedor do óleo térmico.

Temperatura (°C)	Capacidade Térmica (kJ/kg. K)
0	1,962
20	2,049
40	2,137
100	2,4
150	2,619
200	2,838
250	3,058
300	3,277
340	3,452

Na Figura A.2 apresenta-se a curva de ajuste entre a capacidade térmica e a temperatura do termofluido.

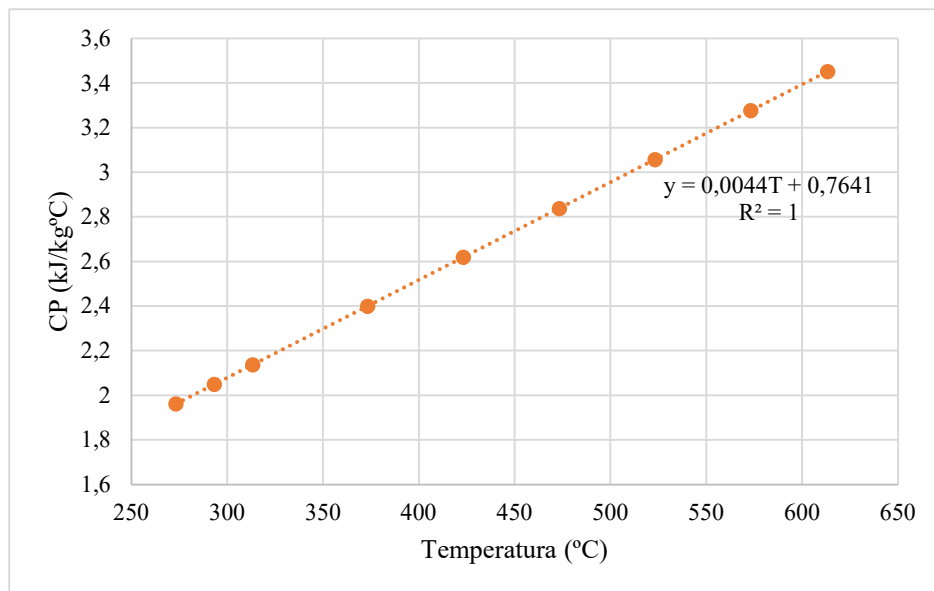


Figura A. 2. Curva de ajuste a capacidade térmica e a temperatura do termofluido.

### Temperatura de trabalho

Para a determinação da temperatura de operação do termofluido, utilizaram-se dados obtidos numa auditoria energética realizada à empresa [30]. Deste modo, a temperatura de entrada do termofluido na râmola é de 255 °C e a temperatura de saída toma valores de 240°C.

**Anexo A.3 Ar**

Na Tabela A.5 apresentam-se os valores da temperatura e massa volúmica do ar atmosférico.

*Tabela A. 5. Valores de temperatura e massa volúmica do ar.*

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Massa volúmica (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>0</b>	1,293
<b>10</b>	1,246
<b>37,8</b>	1,137
<b>65,6</b>	1,043
<b>93,3</b>	0,964
<b>121,1</b>	0,895
<b>148,9</b>	0,838
<b>176,7</b>	0,785
<b>204,4</b>	0,740
<b>232,2</b>	0,700
<b>260</b>	0,662

## Anexo B. Combustão do gás natural com o ar atmosférico

De modo a determinar a quantidade de gás natural utilizada na queima, durante o mês de novembro foram efetuadas medições diárias do caudal de gás natural presente no Contador da empresa. Na Tabela B.1 apresentam-se os valores obtidos.

Tabela B. 1. Medições feitas durante o mês de novembro relativas ao caudal de gás natural.

Dia de medição	Valor lido no contador [m <sup>3</sup> ]	Consumo GN/dia		
		[m <sup>3</sup> ]	[tep]	[kgCO <sub>2</sub> e]
28/10/2022	304 174,0	852,7	0,77	2 071,25
02/11/2022	305 026,7	760,6	0,69	1 847,53
03/11/2022	305 787,3	962,7	0,87	2 338,44
04/11/2022	306 750,0	798,6	0,72	1 939,84
07/11/2022	307 548,6	746,3	0,68	1 812,80
08/11/2022	308 294,9	778,2	0,70	1 890,28
09/11/2022	309 073,1	770,6	0,70	1 871,82
10/11/2022	309 843,7	832,4	0,75	2 021,94
11/11/2022	310 676,1	872,0	0,79	2 118,13
12/11/2022	311 548,1	323,0	0,29	784,58
14/11/2022	311 871,1	894,6	0,81	2 173,02
15/11/2022	312 765,7	947,6	0,86	2 301,76
16/11/2022	313 713,3	963,1	0,87	2 339,41
17/11/2022	314 676,4	983,2	0,89	2 388,24
18/11/2022	315 659,6	992,1	0,90	2 409,86
19/11/2022	316 651,7	388,6	0,35	943,93
21/11/2022	317 040,3	750,1	0,68	1 822,03
22/11/2022	317 790,4	1 007,4	0,91	2 447,02
23/11/2022	318 797,8	931,6	0,84	2 262,90
24/11/2022	319 729,4	831,2	0,75	2 019,02
25/11/2022	320 560,6	912,8	0,83	2 217,23
28/11/2022	321 473,4	886,7	0,80	2 153,83
29/11/2022	322 360,1	928,0	0,84	2 254,15
30/11/2022	323 288,1	831,0	0,75	2 018,65
01/12/2022	324 119,1	-	-	-
	<b>Média</b>	831,0	0,75	2 018,7

### Exemplos de cálculo:

- Determinação do volume de gás natural para o dia 02/11/2022:

$$V_{GN} = 305\,026,7 - 304\,174,0 = 852,7 \text{ m}^3/\text{dia}$$

- Determinação do caudal médio de gás natural, por dia, no mês de novembro:

$$\dot{V}_{GN} = \frac{\sum V_{GN}}{23 \text{ dias}} = 831,0 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Sabendo que 1 dia tem 24 horas:

$$\dot{V}_{GN} = \frac{831,0}{24 \text{ horas}} = 34,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

Foi também possível calcular o consumo de gás natural nas unidades estudadas durante o mestrado. Para isso, recorreu-se à seguinte Tabela B.2, onde se apresentam os valores dos fatores de emissão (FE) de gases com efeito de estufa.

Tabela B. 2. Fatores de emissão carbónica para o gás natural (Adaptado de [32]).

	FE	
	kgCO <sub>2</sub> e/tep	kgCO <sub>2</sub> e/GJ
Gás Natural	2 683,7	64,1

Exemplo de cálculo para o consumo de gás natural nas unidades seguintes:

- [tep/dia]

$$Consumo_{GN} \left[ \frac{\text{tep}}{\text{dia}} \right] = \frac{V_{GN} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \right] \times PCI \left[ \frac{\text{tep}}{\text{t}} \right] \times \rho \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{N}} \right]}{1000} = \frac{852,7 \times 1,077 \times 0,8404}{1000} = 0,77 \text{ tep/dia}$$

- [kg CO<sub>2</sub>/dia]

$$Consumo_{GN} \left[ \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{tep}} \right] = Consumo_{GN} \left[ \frac{\text{tep}}{\text{dia}} \right] \times FE \left[ \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{tep}} \right] = 0,77 \times 2\,683,7 = 2\,071,25 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

Por outro lado, e com a finalidade de determinar a quantidade de ar atmosférico empregue na combustão, utilizou-se valores retirados da bibliografia, apresentados no Capítulo 3.2.3.4 – Gás Natural.

Sabendo que os requisitos estequiométricos de ar utilizado na queima do metano ( $m_{ar \text{ estq}}$ ) é de 17,24 kg/kg combustível e que existe um excesso de ar (E) de 29%, tem-se que;

$$m_{ar \text{ queima}} = m_{ar \text{ estq}} \times (1 + E) = 17,24 \times (1 + 0,29) = 647,2 \text{ kg/h}$$

Assim, sabe-se que a combustão do gás natural requer **647,2 kg/h** de ar atmosférico de modo a garantir que o termofluido chegue à câmara à temperatura necessária para aquecer o ar.



### Anexo C. Caraterização da corrente de material têxtil

No presente anexo apresentam-se os principais resultados obtidos para a determinação do caudal mássico de material têxtil.

#### Anexo C.1 Humidade do material têxtil no processo atual

Na Tabela C.1 é possível observar os dados recolhidos experimentalmente para a determinação da quantidade de água no material têxtil, onde  $m_1$  diz respeito ao peso do material antes do *foulard*,  $m_2$  depois do *foulard*,  $m_3$  após a râmola e  $m_4$  após deixar a amostra na estufa até não haver variação da massa.

Tabela C. 1. Valores recolhidos para a determinação da quantidade de água nos artigos têxteis.

Râmola	Artigo	Amostra	$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	$m_3$ (g)	$m_4$ (g)
3	370244	1.1	3,128	-	-	1,785
		1.2	3,022	-	-	1,769
		2.1	-	3,647	-	1,804
		2.2	-	3,634	-	1,807
		3.1	-	-	1,331	1,330
		3.2	-	-	1,323	1,322
	<b>Média</b>		<b>3,075</b>	<b>3,640</b>	<b>1,327</b>	<b>1,326</b>
3	370246	1.1	2,038	-	-	2,031
		1.2	2,031	-	-	2,023
		2.1	-	2,173	-	2,032
		2.2	-	2,327	-	2,016
		3.1	-	-	1,567	1,567
		3.2	-	-	1,558	1,557
	<b>Média</b>		<b>2,035</b>	<b>2,250</b>	<b>1,563</b>	<b>1,562</b>
3	375593	1.1	2,763	-	-	2,762
		1.2	2,778	-	-	2,777
		2.1	-	5,097	-	2,805
		2.2	-	5,111	-	2,795
		3.1	-	-	2,870	2,869
		3.2	-	-	2,859	2,858
	<b>Média</b>		<b>2,770</b>	<b>5,104</b>	<b>2,864</b>	<b>2,864</b>
3	375595	1.1	1,972	-	-	1,918
		1.2	1,952	-	-	1,927
		2.1	-	2,833	-	1,935
		2.2	-	2,827	-	1,934
		3.1	-	-	2,147	2,146

		3.2	-	-	2,155	2,154
		<b>Média</b>	<b>1,962</b>	<b>2,830</b>	<b>2,151</b>	<b>2,150</b>
<b>1</b>	375591	1.1	2,411	-	-	-
		1.2	2,383	-	-	-
		2.1	-	3,690	-	-
		2.2	-	3,690	-	-
		3.1	-	-	2,257	2,256
		3.2	-	-	2,337	2,337
		<b>Média</b>	<b>2,397</b>	<b>3,690</b>	<b>2,297</b>	<b>2,297</b>
<b>3</b>	371034B	1.1	<b>3,065</b>	-	-	-
		1.2	3,033	-	-	-
		1.3	3,074	-	-	-
		2.1	-	4,932	-	2,796
		2.2	-	4,953	-	2,822
		2.3	-	4,797	-	2,812
		3.1	-	-	3,033	3,031
		3.2	-	-	3,099	3,096
		3.3	-	-	3,097	3,093
		<b>Média</b>	<b>3,065</b>	<b>4,932</b>	<b>3,097</b>	<b>3,093</b>
<b>3</b>	371035B	1.1	1,693	-	-	-
		1.2	1,688	-	-	-
		1.3	1,700	-	-	-
		2.1	-	2,562	-	-
		2.2	-	2,501	-	-
		2.3	-	2,539	-	-
		3.1	-	-	1,321	1,311
		3.2	-	-	1,323	1,315
		3.3	-	-	1,326	1,321
		<b>Média</b>	<b>1,694</b>	<b>2,534</b>	<b>1,323</b>	<b>1,315</b>
<b>3</b>	375519	3.1	-	-	3,654	3,639
		3.2	-	-	3,601	3,598
		3.3	-	-	3,622	3,618
		<b>Média</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>3,626</b>	<b>3,618</b>
<b>3</b>	370195	3.1	-	-	1,089	1,084
		3.2	-	-	1,074	1,071
		3.3	-	-	1,100	1,097
		<b>Média</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>1,088</b>	<b>1,084</b>
<b>3</b>	375474	3.1	-	-	2,136	2,133
		3.2	-	-	2,134	2,130
		3.3	-	-	2,136	2,132
		<b>Média</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>2,135</b>	<b>2,132</b>

Exemplo de cálculo para a determinação da quantidade de água no artigo 370244 à entrada e saída da râmola 3:

**Entrada da râmola 3:**

$$\frac{m_{\text{água evaporada}}}{m_{\text{material seco}}} = \frac{\bar{m}_2 - \bar{m}_1}{\bar{m}_1} = \frac{3,6404 - 3,0748}{3,0748} = 0,18 \frac{\text{kg água}}{\text{kg material seco}}$$

**Saída da râmola 3:**

$$\frac{m_{\text{água evaporada}}}{m_{\text{material seco}}} = \frac{\bar{m}_3 - \bar{m}_4}{\bar{m}_4} = \frac{1,3268 - 1,3263}{1,3263} = 3,8 \times 10^{-4} \frac{\text{kg água}}{\text{kg material seco}}$$

Através do cálculo da quantidade de água presente no material, é possível determinar o caudal mássico do material seco. Assim, apresenta-se na Tabela C.2 os caudais mássicos de entrada e saída da râmola.

Tabela C. 2. Valores utilizados para a determinação do caudal mássico do material à entrada e saída da râmola.

Referência	$\dot{m}_{total}$ (kg/h)	Entrada			Saída		
		kg água/kg material seco	$\dot{m}_{material\ seco}$ (kg/h)	$\dot{m}_{\text{água}}$ (kg/h)	kg água/kg material seco	$\dot{m}_{material\ seco}$ (kg/h)	$\dot{m}_{\text{água}}$ (kg/h)
370244	251,1	0,18	212,1	39,0	0,04	251,0	0,09
370246F	254,0	10,6	227,1	26,9	0,02	254,0	0,06
375593	530,9	84,3	83,6	447,3	0,01	530,8	0,05
375595	368,3	44,2	205,3	162,9	0,01	368,2	0,03
375591	343,7	35,0	223,3	120,5	0,02	343,6	0,08
371034B	407,0	-	-	-	0,11	406,5	0,44
371035B	258,6	-	-	-	0,59	257,0	1,53
375519	743,3	-	-	-	0,20	741,8	1,50
370195	145,1	-	-	-	0,35	144,6	0,51
375474	368,3	-	-	-	0,17	367,7	0,62

Exemplo de cálculo para a determinação do caudal mássico de material têxtil que entra na râmola para a referência 370244:

$$\text{Caudal mássico material seco} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 251,1 \times (100 - 15,5) = 204,8 \frac{\text{kg tecido}}{\text{h}}$$

$$\text{Caudal mássico água} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 251,1 - 204,8 = 46,3 \frac{\text{kg água}}{\text{h}}$$

Relativamente à temperatura do material têxtil à entrada e saída do material, não se dispõe de equipamentos necessários para a medição correta da temperatura. Desta forma, utilizaram-se os

dados obtidos numa auditoria energética à empresa em 2017, admitindo-se que a temperatura de entrada do material é de 20°C e de saída de 80°C [30].

### Anexo C.2 Humidade do material têxtil após as otimizações

Apresenta-se de seguida os principais resultados obtidos na determinação da humidade do material têxtil nas otimizações efetuadas.

- **Referência 370244**

Na Tabela C.3 apresentam-se os principais resultados obtidos nas otimizações energéticas efetuadas na referência 370244.

*Tabela C. 3. Valores recolhidos para a determinação da quantidade de água nos artigos têxteis nas diferentes otimizações da referência 370244.*

150°C e 20 m/min					
Amostra	m <sub>3</sub>	Média	m <sub>4</sub> (g)	Média	Humidade (%)
A1	1,3893	1,3993	1,3862	1,3966	0,224%
	1,4092		1,4069		0,163%
150°C e 23 m/min					
Amostra	m <sub>3</sub>	Média	m <sub>4</sub> (g)	Média	Humidade (%)
A1	1,3746	1,3752	1,3736	1,3734	0,13%
	1,3756		1,3732		
	1,3755		1,3734		
A2	1,3841	1,3843	1,383	1,3829	0,10%
	1,3845		1,3829		
	1,3843		1,3827		
A3	1,3809	1,3803	1,3764	1,3763	0,38%
	1,381		1,3765		
	1,3789		1,3761		
<b>Média</b>		<b>1,3799</b>		<b>1,3775</b>	<b>0,17%</b>
160°C e 23 m/min					
Amostra	m <sub>3</sub>	Média	m <sub>4</sub> (g)	Média	Humidade (%)
A1	1,3735	1,3681	1,3723	1,3669	0,087%
	1,3626		1,3614		0,088%
<b>Média</b>					<b>0,088%</b>
160°C e 25 m/min					
Amostra	m <sub>3</sub>	Média	m <sub>4</sub> (g)	Média	Humidade (%)
A1	1,3532	1,3543	1,3519	1,3519	0,18%

	1,3534		1,3520		
	1,3563		1,3518		
A2	1,3468	1,3475	1,3437	1,3433	0,31%
	1,3480		1,3433		
	1,3476		1,3430		
A3	1,3589	1,3589	1,3570	1,3572	0,12%
	1,3590		1,3573		
	1,3587		1,3574		
Média		1,3535		1,3508	0,20%
<b>145°C e 20 m/min</b>					
<b>Amostra</b>	<b>m<sub>3</sub></b>	<b>Média</b>	<b>m<sub>4</sub> (g)</b>	<b>Média</b>	<b>Humidade (%)</b>
A1	1,381	1,3766	1,3729	<b>1,3725</b>	<b>0,30</b>
	1,3743		1,3723		
	1,3745		1,3724		
A2	1,3735	1,3732	1,3693	<b>1,3695</b>	<b>0,27</b>
	1,3735		1,3695		
	1,3726		1,3696		
A3	1,3717	1,3751	1,3678	<b>1,367</b>	<b>0,52</b>
	1,3761		1,3679		
	1,3775		1,3680		
Média		1,3724		<b>1,3700</b>	<b>0,36</b>

- **Referência 375593**

Na Tabela C.4 apresentam-se os principais resultados obtidos nas otimizações energéticas efetuadas na referência 375593.

Tabela C. 4. Valores recolhidos para a determinação da quantidade de água nos artigos têxteis nas diferentes otimizações da referência 375593.

<b>150°C e 25 m/min</b>					
<b>Amostra</b>	<b>m<sub>3</sub></b>	<b>Média</b>	<b>m<sub>4</sub> (g)</b>	<b>Média</b>	<b>Humidade (%)</b>
<b>A1</b>	2,9095	<b>2,9078</b>	2,9022	<b>2,9024</b>	<b>0,19%</b>
	2,9068		2,9021		
	2,9072		2,9029		
<b>A2</b>	2,9150	<b>2,9140</b>	2,8954	<b>2,8966</b>	<b>0,60%</b>
	2,9140		2,8956		
	2,9130		2,8988		
<b>Média</b>		2,9109		2,8995	<b>0,39%</b>
<b>150°C e 30 m/min</b>					
<b>Amostra</b>	<b>m<sub>3</sub></b>	<b>Média</b>	<b>m<sub>4</sub> (g)</b>	<b>Média</b>	<b>Humidade (%)</b>
<b>A1</b>	2,9541	2,9534	2,9042	2,9044	1,7%
	2,9534		2,9045		
	2,9527		2,9045		
<b>A2</b>	2,9756	2,9749	2,9465	2,9464	0,97%
	2,9740		2,9460		
	2,9750		2,9468		
<b>Média</b>		2,9109		2,8995	<b>0,39%</b>

- **Referência 375474**

Na Tabela C.5 apresentam-se os principais resultados obtidos nas otimizações energéticas efetuadas na referência 375474.

Tabela C. 5. Valores recolhidos para a determinação da quantidade de água nos artigos têxteis nas diferentes otimizações da referência 375474.

<b>180°C e 25 m/min</b>					
<b>Amostra</b>	<b>m<sub>3</sub></b>	<b>Média</b>	<b>m<sub>4</sub> (g)</b>	<b>Média</b>	<b>Humidade (%)</b>
<b>A1</b>	2,1793	2,1792	2,1719	2,1725	0,31%
	2,1798		2,1725		
	2,1786		2,1732		
<b>A2</b>	2,1782	2,1784	2,1729	2,1733	0,23%
	2,1786		2,1734		
	2,1784		2,1736		
<b>A3</b>	2,173	2,1728	2,1702	2,1706	0,10%
	2,1731		2,1708		
	2,1724		2,1708		
<b>Média</b>		<b>2,1768</b>		<b>2,1721</b>	<b>0,22%</b>
<b>180°C e 30 m/min</b>					
<b>Amostra</b>	<b>m<sub>3</sub></b>	<b>Média</b>	<b>m<sub>4</sub> (g)</b>	<b>Média</b>	<b>Humidade (%)</b>
<b>A1</b>	2,1715	2,1719	2,1657	2,1659	0,28%
	2,172		2,1660		
	2,1721		2,1659		
<b>A2</b>	2,183	2,1832	2,1789	2,1788	0,20%
	2,1832		2,1785		
	2,1833		2,1789		
<b>A3</b>	2,1761	2,1766	2,1672	2,1679	0,40%
	2,1771		2,1681		
	2,1766		2,1684		
<b>Média</b>		<b>2,1772</b>		<b>2,1708</b>	<b>0,22%</b>

- **Referência 375591**

Na Tabela C.6 apresentam-se os principais resultados obtidos nas otimizações energéticas efetuadas na referência 375591.

Tabela C. 6. Valores recolhidos para a determinação da quantidade de água nos artigos têxteis nas diferentes otimizações da referência 375591.

<b>180°C e 25 m/min</b>					
<b>Amostra</b>	<b>m<sub>3</sub></b>	<b>Média</b>	<b>m<sub>4</sub> (g)</b>	<b>Média</b>	<b>Humidade (%)</b>
<b>A1</b>	2,9030	2,9036	2,8860	2,8930	0,37%
	2,9045		2,8980		
	2,9032		2,8950		
<b>A2</b>	2,9050	2,9107	2,8905	2,8938	0,58%
	2,9140		2,8900		
	2,9130		2,9010		
<b>Média</b>		<b>2,9071</b>		<b>2,8934</b>	<b>0,47%</b>
<b>180°C e 30 m/min</b>					
<b>Amostra</b>	<b>m<sub>3</sub></b>	<b>Média</b>	<b>m<sub>4</sub> (g)</b>	<b>Média</b>	<b>Humidade (%)</b>
<b>A1</b>	2,9071	2,9070	2,9048	2,9048	0,08%
	2,9071		2,9046		
	2,9071		2,9049		
<b>A2</b>	2,9071	2,9534	2,9042	2,9045	1,68%
	2,9071		2,9045		
	2,9071		2,9047		
<b>A3</b>	2,9071	2,9749	2,9465	2,9464	0,97%
	2,9071		2,9460		
	2,9071		2,9468		
<b>Média</b>		<b>2,9451</b>		<b>2,9186</b>	<b>1,32%</b>

- **Referência 375591**

Na Tabela C.7 apresentam-se os principais resultados obtidos nas otimizações energéticas efetuadas na referência 375519.

Tabela C. 7. Valores recolhidos para a determinação da quantidade de água nos artigos têxteis nas diferentes otimizações da referência 375519.

150°C e 23 m/min					
Amostra	m <sub>3</sub>	Média	m <sub>4</sub> (g)	Média	Humidade (%)
A1	3,525	3,5253	3,5198	3,5192	0,17%
	3,5255		3,5188		
	3,5253		3,5190		
A2	3,521	3,5228	3,5119	3,5119	0,31%
	3,5286		3,5115		
	3,5188		3,5122		
<b>Média</b>		3,5240		3,5155	0,24%

### Anexo C.3. Caudal mássico do material têxtil

As correntes de entrada do material têxtil variam conforme o material a analisar. Desta forma, apresenta-se na Tabela C.8 os valores utilizados para a determinação do caudal mássico do material.

Notar que na empresa é usual trabalhar-se num intervalo de valores para os parâmetros de gramagem e largura. Deste modo, optou-se por utilizar o valor médio dos intervalos indicados no Capítulo 5.1.1 – Fase de recolha de dados.

Tabela C. 8. Valores utilizados para a determinação do caudal mássico do material.

Referência	Velocidade (m/min)	Gramagem (g/m <sup>2</sup> )	Largura (m)	Caudal mássico total (kg/h)
370244	20	135	1,55	251,1
370246	21	140	1,44	254,0
375593	20	280	1,58	530,9
375595	15	220	1,86	368,3
375591	14	220	1,86	343,7
371034	14	300	1,615	407,0
371035	20	127,5	1,69	258,6
375519	18	370	1,86	743,3
370195	13	120	1,55	145,1
375474	15	220	1,86	368,3

Exemplo de cálculo para a determinação do caudal mássico total do material da referência **370244**:

$$\begin{aligned} \text{Caudal mássico total } \left(\frac{kg}{h}\right) &= 20 \frac{m}{min} \times 138 \frac{g}{m^2} \times 1,55 m \times \frac{60 min}{1 h} \times \frac{1 kg}{1000 g} = \\ &= \mathbf{251,1 kg/h} \end{aligned}$$

## Anexo D. Balanços de massa e energia

Apresentam-se de seguida os balanços de massa e energia efetuados ao processo de secagem.

### Anexo D.1 Balanço de massa ao azoto

Para a determinação da quantidade de ar utilizada no processo de secagem, procedeu-se a um balanço de massa ao azoto, sendo que se apresenta na Figura D.1 o esquema representativo das correntes de azoto que entram e saem do sistema.

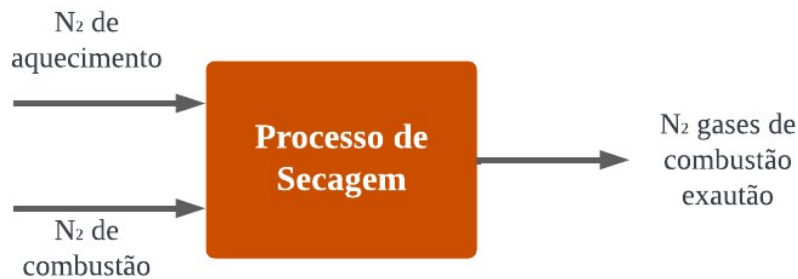


Figura D. 1. Esquema representativo das correntes de  $N_2$ .

Tendo em conta a Figura D.1, é possível determinar o caudal de ar utilizado para secar o material têxtil utilizou-se a equação D.1.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{N_2 \text{secagem}} + \dot{m}_{N_2 \text{combustão}} &= \dot{m}_{N_2 \text{gases}} \leftrightarrow \\ \leftrightarrow \dot{m}_{N_2 \text{secagem}} &= \dot{m}_{N_2 \text{gases}} - \dot{m}_{N_2 \text{combustão}} \end{aligned} \quad (D.1)$$

### Determinação do caudal de gases, $\dot{m}_{N_2 \text{gases}}$

Para a determinação o caudal de azoto dos gases de combustão e exaustão, é necessário dividir o cálculo, como está apresentado na equação D.2.

$$\dot{m}_{N_2 \text{gases}} = \dot{m}_{N_2 \text{gases de exaustão}} + \dot{m}_{N_2 \text{gases de combustão}} \quad (D.2)$$

### **Determinação do caudal de gases de combustão, $\dot{m}_{N_2 \text{gases de combustão}}$**

Sendo que a empresa tem de garantir o cumprimento do estipulado no artigo 15º, do Decreto-Lei nº 39/2018, de 11 de junho, é necessário que se faça a monitorização pontual das emissões gasosas. Esta monitorização é feita por uma empresa externa, sendo depois o relatório partilhado com a Copo Têxtil.

Na Tabela D.1 apresentam-se os valores obtidos no ano de 2021.

Tabela D. 1. Características dos gases de combustão da caldeira de termofluido.

	Parâmetro	Unidade	Valor
	Pressão	bar	1,0131
	Temperatura	°C	193,08
	Densidade	kg/m <sup>3</sup>	0,78
	Caudal efetivo	m <sup>3</sup> /h	4274
	Massa Molar	g/mol	29,7
Composição Gases Combustão	O <sub>2</sub>	%(v/v)	3,7%
	CO <sub>2</sub>	%(v/v)	9,7%
	H <sub>2</sub> O	%(v/v)	11,0%
	NO <sub>x</sub>	kg/h	0,79
	SO <sub>2</sub>	kg/h	0
	CO	kg/h	8,50x10 <sup>-3</sup>

Com os valores da Tabela D.1, construiu-se uma tabela resumo (Tabela D.2) com a informação necessária ao cálculo do caudal de azoto nos gases de combustão.

Tabela D. 2. Caudal volumétrico,  $\dot{v}_i$ , e mássico,  $\dot{m}_i$ , dos gases de combustão.

Componente	$\dot{v}_i \left( \frac{m^3}{h} \right)$	$\dot{m}_i \left( \frac{kg}{h} \right)$
O <sub>2</sub>	158,14	123,35
CO <sub>2</sub>	414,58	323,3
H <sub>2</sub> O	470,14	366,71
NO <sub>x</sub>	-	0,79
SO <sub>2</sub>	-	0
CO	-	8,50x10 <sup>-3</sup>
<b>Total</b>	<b>1 042,86</b>	<b>814,2</b>

#### Exemplo de cálculo para o componente O<sub>2</sub>:

$$\dot{v}_{O_2} \left( \frac{m^3}{h} \right) = 4\,274 \frac{m^3}{h} \times 0,037 = 158,14 \frac{m^3}{h}$$

$$\dot{m}_{O_2} \left( \frac{kg}{h} \right) = 158,14 \frac{m^3}{h} \times 0,78 \frac{kg}{m^3} = 123,36 \frac{kg}{h}$$

#### Determinação do caudal de N<sub>2</sub>:

$$\dot{m}_{N_2 \text{ gases de combustão}} \left( \frac{kg}{h} \right) = \dot{m}_{efetivo} - \sum \dot{m}_i = 4274 - 814,2 = 2\,519,5 \text{ kg/h}$$

### Determinação do caudal de gases de exaustão, $\dot{m}_{N_2 \text{ gases de exaustão}}$

Apresenta-se na Tabela D.3 os valores obtidos pela empresa externa no ano de 2021 referentes às emissões gasosas da râmola 3. Assume-se que os gases de exaustão dizem respeito ao ar que sai da râmola 3 (corrente de saída de ar após secagem).

Tabela D. 3. Características dos gases de exaustão da râmola 3.

	Parâmetro	Unidade	Valor
	Pressão	bar	1,0131
	Temperatura	°C	136,82
	Densidade	kg/m <sup>3</sup>	0,86
	Caudal efetivo	m <sup>3</sup> /h	5 299
	Massa Molar	g/mol	28,83
Composição Gases Combustão	O <sub>2</sub>	%(v/v)	20,7%
	CO <sub>2</sub>	%(v/v)	0,1%
	H <sub>2</sub> O	%(v/v)	2,4%
	Outras partículas	kg/h	0,033

Com os valores da Tabela D.3, construiu-se uma tabela resumo (Tabela D.4) com a informação necessária ao cálculo do caudal de azoto nos gases de exaustão.

Tabela D. 4. Caudal volumétrico,  $\dot{v}_{N_2}$ , e mássico,  $\dot{m}_{N_2}$ , dos gases de exaustão da râmola 3.

Componente	$\dot{v}_i \left( \frac{m^3}{h} \right)$	$\dot{m}_i \left( \frac{kg}{h} \right)$
O <sub>2</sub>	1 096,89	943,33
CO <sub>2</sub>	5,30	4,56
H <sub>2</sub> O	127,18	109,37
Outros	-	0,033
<b>Total</b>	<b>1 042,86</b>	<b>1 057,3</b>

$$\dot{m}_{N_2 \text{ gases exaustão R3}} = 5\,299 \times 0,86 - 1\,057,3 = 3\,499,9 \text{ kg/h}$$

Assim, tem-se que:

$$\dot{m}_{N_2 \text{ gases exaustão+comb R3}} = 2\,519,5 + 3\,499,9 = \mathbf{6\,019,3 \text{ kg/h}}$$

### Determinação do caudal de N<sub>2</sub> usado na combustão, $\dot{m}_{N_2 \text{ g combustão}}$

Para a determinação da quantidade de N<sub>2</sub> usado na combustão, utilizou-se valores obtidos no Anexo B.

$$\dot{m}_{N_2 \text{ queima}} = 516,7 \times 0,79 = \mathbf{408,2 \text{ kg/h}}$$

Assim, para a râmola 3 obteve-se os seguintes valores:

- $m_{N_2 \text{ usado na combustão}} = 408,2 \text{ kg/h}$
- $m_{N_2 \text{ gases de combustão}} = 2\,519,5 \text{ kg/h}$
- $m_{N_2 \text{ gases de exaustão}} = 3\,499,9 \text{ kg/h}$

Utilizando a equação D.1, tem-se que:

$$\dot{m}_{N_2 \text{ aquecimento}} = (2\,519,5 + 3\,499,95) - 408,2 = 5\,611,1 \text{ kg/h}$$

Sabendo que o ar é constituído por 79% de azoto e 21% de oxigénio, tem-se que:

$$\dot{m}_{ar \text{ aquecimento}} = \frac{5\,611,1}{0,79} = \mathbf{7\,102,7 \text{ kg/h}}$$

Logo, o caudal **mássico de ar utilizado no aquecimento** na râmola 3 é de **7 102,7 kg/h**.

### Anexo D.2 Balanço de energia à râmola 3

Para a determinação do caudal mássico de termofluido, procedeu-se a um balanço de energia à râmola 3, tendo em conta os valores obtidos para a referência 370244.

Apresentam-se nas equações D.2 e D.3 os balanços utilizados.

$$Q_{entrada} = Q_{saída} \leftrightarrow \tag{D.3}$$

$$\tag{D.4}$$

$$q_{material e} + q_{ar e} + q_{termofluido e} = q_{material s} + q_{perdas} + q_{ar saída} + q_{termofluido s}$$

Os exemplos de cálculo das potências térmicas apresentadas acima encontram-se apresentados de seguida.

#### Corrente de material têxtil

$$Q_{material} = (m_{material} \times cp_{material} + m_{água} \times cp_{água}) \times T_{material}$$

Onde,

$m_{material}$  - Caudal mássico do material seco, kg/h

$T_{material}$  - Temperatura do material à entrada da râmola, °C

$cp_{material}$  - Calor específico material = 1,50 kJ/kg °C

$m_{água}$  - Caudal mássico de água, kg/h

$$c_{p\acute{a}gua} = 4,18 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$$

Assim, tem-se que:

$$Q_{material\ entrada} = (240,91 \times 1,50 + 46,19 \times 4,18) \times 25 = \mathbf{12\ 511\ kJ/h}$$

$$Q_{material\ sa\acute{d}a} = (251,1 \times 1,50 + 0,090 \times 4,18) \times 80 = \mathbf{30\ 151\ kJ/h}$$

### Corrente de Ar de secagem

$$Q_{ar} = m_{ar\ seco} \times [c_{p\ ar\ seco} \times T_{ar} + W (1,9 \times T_{ar} + 2\ 480)]$$

Onde,

$m_{ar\ seco}$  – Caudal de ar seco, kg/h

$c_{p\ ar\ seco}$  - Calor específico do ar seco = 1 kJ/kg $^\circ$ C

$T_{ar}$  – Temperatura do ar,  $^\circ$ C

$W$  – Teor de humidade do ar, kg  $\acute{a}$ gua/kg ar seco. É de notar que os valores utilizados para esta variável foram retirados das medições efetuadas na auditoria energética. [30].

$$c_{p\ vapor\ de\ \acute{a}gua} = 1,85 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$$

Assim, tem-se que:

$$\begin{aligned} Q_{ar\ entrada} &= 7\ 102,7 \times (1 - 0,006) \times [1,0 \times 32,5 + 0,006 (1,85 \times 32,5 + 2\ 480)] \\ &= \mathbf{337\ 053\ kJ/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{ar\ sa\acute{d}a} &= 7\ 102,7 \times (1 - 0,030) \times [1,0 \times 136,82 + 0,030 (1,85 \times 136,82 + 2\ 480)] \\ &= \mathbf{1\ 507\ 537\ kJ/h} \end{aligned}$$

### Perdas por radiação e convecção

O valor para as perdas por radiação e convecção não foi possível de calcular devido à impossibilidade de medir a temperatura das paredes e cobertura da râmola. Assim, admitiu-se o valor obtido na auditoria energética de **77 009 kJ/h** [30].

Voltando à equação D.2, tem-se que:

$$q_{\text{termofluido } e} - q_{\text{termofluido } s} = -12\,511 + 30\,151 - 377\,053 + 1\,507\,537 + 77\,009 \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow q_{\text{termofluido } e} - q_{\text{termofluido } s} = \mathbf{1\,265\,133\,kJ/h}$$

Sabendo que

$$q_{\text{termofluido}} = \dot{m}_{\text{termofluido}} \times c_{p_{\text{termofluido}}} \times T_{\text{termofluido}}$$

Tem-se que

$$\dot{m}_{\text{termofluido}} = \frac{1\,265\,133}{2,5 \times (255 - 240)} = \mathbf{33\,737\,kg/h}$$

Assim,

$$q_{\text{termofluido } e} = 33\,737 \times 2,5 \times 255 = 21\,507\,265\,kJ/h$$

$$q_{\text{termofluido } s} = 33\,737 \times 2,5 \times 240 = 20\,242\,132\,kJ/h$$