



# Otimização energética e implementação do sistema ECO VAC na Máquina de impregnar tela para pneus

**ANA SOFIA LIMA LOPES**

Novembro de 2016

Mestrado em Engenharia Química – Otimização Energética na Indústria Química

# ***Otimização energética e implementação do sistema ECO VAC na Máquina de impregnar tela para pneus***

Tese de mestrado

de

**Ana Sofia Lima Lopes**

**Desenvolvido no âmbito da unidade curricular de Dissertação/Estágio**

realizado em

**Continental- Indústria Têxtil do Ave, S.A.**



*Orientador no ISEP:* Doutora Anabela Guedes

Doutora Paula Neto

*Orientador na C-ITA:* Engenheiro José Ricardo Osório

Engenheiro Joaquim Rocha

**Departamento de Engenharia Química**



Novembro de 2016

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

## Agradecimentos

A realização deste estágio só foi possível graças ao apoio e contribuição de diversas pessoas e entidades envolvidas. Gostaria de a todos eles expressar a minha gratidão e apreço, pelo facto de terem contribuído para a elaboração da presente dissertação.

À Continental - Indústria Têxtil do Ave, S.A., pela oportunidade da realização desta dissertação nas suas instalações.

Aos meus orientadores na empresa, Eng<sup>o</sup> Joaquim Rocha e Eng<sup>o</sup> José Ricardo Osório, por todo apoio e atenção dispensada ao longo do estágio.

Às minhas orientadoras no ISEP, Eng<sup>a</sup> Anabela Guedes e Eng<sup>a</sup> Paula Neto, por toda a sua exigência e espírito crítico que contribuíram para o alcance dos objetivos propostos.

À Ana Martins, à Diana Pinto, ao Hélder Ribeiro e ao Raul Falcão, agradeço toda a ajuda, disponibilidade e bons momentos que me proporcionaram. À Joana Ferreira agradeço toda a dedicação e ajuda para a elaboração deste relatório.

Ao Eng<sup>o</sup> Rafael Castro e ao Eng<sup>o</sup> Diogo Nunes pelo apoio, incentivo e por todos os ensinamentos. Aos operadores da máquina de impregnar tela e do laboratório de Qualidade agradeço a boa disposição, gentileza e disponibilidade.

À minha Família, em especial à minha mãe e ao meu pai por todo o afeto, educação, dedicação, incentivo, exigência e esforço.

Ao meu irmão e à Sandra pelo carinho e preocupação demonstrada.

Aos meus afilhados Miguel e Rafael, por me fazerem acreditar que nada é impossível.

Aos meus padrinhos, Mercedes e João, por todo o amor e coragem. À Carla e ao Luís por todo o incentivo e atenção.

À Ana Marta e à Patrícia, pela amizade, companhia e pela animação que nunca faltou.

Aos meus amigos, agradeço pelo companheirismo e carinho ao longo desta jornada, apesar de alguns estarem longe mas, no entanto, sempre presentes.

A todos os que não foram mencionados, mas que de igual forma estiveram do meu lado nesta jornada.

O meu muito Obrigado.

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

## Sumário

O consumo de energia de forma irracional não só acarreta problemas ambientais, como a poluição e a escassez de recursos naturais, mas também desvantagens a nível económico para o consumidor. A otimização energética na indústria torna-se, assim, uma indispensável forma de racionalização de energia contribuindo para a viabilidade das indústrias.

O presente trabalho foi elaborado na Indústria Têxtil do Ave, S.A., sendo que os principais objetivos foram: implementar do sistema ECO VAC de maneira a diminuir o consumo de gás natural na máquina de impregnar tela para pneus, efetuar uma otimização energética à mesma máquina e sugerir alternativas de forma a reduzir o consumo energético da mesma.

O ECO VAC consiste num sistema de ajuste automático da percentagem de exaustão a partir de um valor de pressão diferencial fixado. Para averiguar qual seria a resposta do ECO VAC os primeiros ensaios realizados utilizaram um tecido de limpeza, tendo-se seguido o estudo em dois artigos de poliéster (P1 e P2) e dois artigos de *nylon* (N1 e N2). Verificou-se que nas estufas 1 e 3 não foi possível otimizar a exaustão com o sistema ECO VAC, sendo a percentagem de exaustão fixada manualmente. No caso das estufas 6 e 7, uma vez que os valores de exaustão não eram os mais adequados, o valor de *set point* definido levou a valores de exaustão ligeiramente superiores aos atualmente praticados. Para as estufas 2,4 e 5, foi possível diminuir a percentagem de exaustão. Contudo, para os artigos P1, P2, N1 e N2 a poupança anual obtida tendo por base a produção do ano de 2015 foi de 1.163 €, 3.064 €, 3.789 € e 306 € respetivamente, traduzindo-se numa poupança global para os artigos em estudo de 8.323 €/ano.

Estudou-se, ainda, a possibilidade de aumentar a percentagem de ventilação no interior das estufas. A poupança global obtida com esta medida foi de 3.067€/ano.

No que respeita ao consumo elétrico da máquina de impregnar, analisou-se o consumo de ar comprimido antes e depois da reparação de fugas. Após a reparação de fugas, obteve-se uma poupança anual de energia elétrica de 2.430 € e um período de retorno do investimento de 0,8 anos. Relativamente à iluminação do edifício, efetuou-se um levantamento às luminárias presentes e propôs-se a troca para LED's. Estas alterações traduziram-se numa poupança de 5.792 €/ano e um período de retorno de 2,2 anos.

Palavras-chave: ECO VAC, gás natural, otimização energética.

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

## Abstract

Irrational energy consumption not only causes environmental problems such as pollution and the shortage of natural resources, but also economic disadvantages for the consumer. The energy optimization in the industry, thus becomes an indispensable form of rationalization of energy contributing to the viability of the industries.

The main objectives were: to implement the ECO VAC system to reduce the consumption of natural gas in the fabric dipping machine for tires, to make an energy optimization to the same machine, and to suggest alternatives to reduce the energy consumption of the same.

The ECO VAC consists in an automatically system that adjust the percentage of exhaustion according to a differential pressure value setting. To evaluate the response of ECO VAC, the firsts tests were carried out using a cleaning fabric followed by two polyester articles (P1 and P2) and two nylon articles (N1 and N2). It was verified that in ovens 1 and 3 it was not possible to optimize the exhaustion with the ECO VAC system, being so the percentage of exhaust air was fixed manually. In the case of ovens 6 and 7, since the exhaust values were not the most adequate, the defined set point led to values of exhaustion slightly higher than those currently practiced. For ovens 2, 4 and 5, it was possible to decrease the percentage of exhaustion. However, for articles P1, P2, N1 and N2, the annual savings obtained based on the production for the year 2015 were 1.163 €, 3.064 €, 3.789 and 306 € respectively, resulting in a global saving for the articles in study of 8,323 €/year.

It was also studied the possibility of increasing the percentage of ventilation inside the ovens. The overall savings obtained with this measure was 3.067 €/ year.

Regarding the electric consumption of the fabric dipping machine, the consumption of compressed air was analyzed before and after the repair of leaks. After repairing the leaks, there was a 2.430 €/year in electricity savings with a payback period of 0,8 years. About the lighting of the building, a survey was carried out on the present luminaires and changes were proposed to modify type of bulbs to LED. These changes suggest a saving of 5.792 €/year and a payback period of 2,2 years.

Key words: ECO VAC, natural gas, energy optimization.



# Índice

1. Introdução .....	1
1.1. Continental - Indústria Têxtil do Ave, S.A. ....	1
1.2. Enquadramento do trabalho .....	4
1.3. Objetivos do trabalho .....	6
1.4. Organização do relatório .....	6
2. Processo produtivo .....	9
2.1. Produção das cordas .....	9
2.2. Produção da tela.....	10
2.3. Produção das malhas .....	11
3. Máquina de impregnar tela para pneus.....	13
3.1. Impregnação da tela .....	13
3.2. Características e descrição das estufas .....	18
3.2.1. Estratégia de controlo implementada.....	19
3.3. Sistema ECO VAC .....	21
3.3.1. Dados climatéricos locais .....	22
4. Avaliação energética .....	25
4.1. Levantamento energético.....	25
4.2. Máquina de impregnar tela - Energia Elétrica.....	28
4.3. Máquina de impregnar tela - Gás Natural .....	30
4.3.1. Balanços de energia .....	35
5. Implementação do Sistema ECO VAC.....	45
5.1. Características do Sistema .....	45
5.2. Dados experimentais.....	45
6. Otimização energética .....	55
6.1. Otimização do consumo de energia elétrica.....	55
6.2. Implementação do sistema ECO VAC e alteração das exaustões .....	56
6.3. Alteração dos caudais de ventilação superior e inferior.....	61

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

7. Conclusões e propostas para trabalhos futuros .....	67
8. Bibliografia.....	69
Anexos .....	71
Anexo A. Consumos energéticos de eletricidade .....	71
Anexo B. Vista em corte da Máquina de impregnar tela.....	72
Anexo C. Condições e dados experimentais.....	73
Anexo D. Exemplos de cálculo .....	76
Anexo E. Otimização energética .....	90
Anexo F. Composição dos gases de exaustão .....	94

## Índice de figuras

Figura 1.1 - Vista exterior da máquina de impregnar tela. [2].....	2
Figura 1.2 - Máquina de impregnar corda “Single-End”.....	3
Figura 1.3 - Atuais instalações da C-ITA.....	4
Figura 2.1 – Secção de torcedura.....	9
Figura 2.2 - Secção de tecelagem.....	10
Figura 2.3 – Secção de tricotagem.....	11
Figura 2.4 – Secção de ramulagem.....	11
Figura 3.1- Produção anual da máquina de impregnar tela relativa aos artigos em estudo.....	14
Figura 3.2 - Representação esquemática da máquina de impregnar tela.....	14
Figura 3.3 - Desenrolamento da tela “em verde”.....	15
Figura 3.4 - Tina de soluto.....	16
Figura 3.5 - Grupo trator.....	16
Figura 3.6- Facas” existentes nos grupos tratores.....	17
Figura 3.7 – Secção de enrolamento.....	17
Figura 3.8 – Quadro de comando da máquina de impregnar tela (HMI).....	17
Figura 3.9- Queimador, Motor ventilador e Jet Box's (da esquerda para a direita).....	18
Figura 3.10- Diagrama de blocos para o controlo por retroação da temperatura.....	19
Figura 3.11- Sistema de controlo de temperatura no interior da estufa.....	20
Figura 3.12- Sistema de controlo da exaustão ECO VAC [9].....	21
Figura 3.13- Variação da temperatura máxima e mínima no ano de 2015.....	22
Figura 3.14- Variação da pressão atmosférica e da temperatura máxima no ano de 2015.....	22
Figura 3.15- Variação da pressão atmosférica e da humidade relativa para o ano de 2015.....	23
Figura 3.16- Comparação entre os registos de pressão atmosférica de 2015 com 2016.....	23
Figura 4.1- Distribuição dos consumos de energia da C-ITA.....	25
Figura 4.2- Distribuição dos consumos de energia eléctrica.....	26
Figura 4.3- Distribuição dos consumos de gás natural.....	27

Figura 4.4- Distribuição dos consumos de energia da máquina de impregnar tela referentes ao ano de 2015.....	28
Figura 4.5- Representação esquemática de todas as correntes de entrada e saída do sistema.....	33
Figura 5.1- Valores de pressão diferencial obtidos em função da percentagem de exaustão.....	46
Figura 5.2- Influência da pressão atmosférica na percentagem de exaustão no artigo P1 a operar com o sistema ECOVAC.....	50
Figura 5.3- Influência da pressão atmosférica na percentagem de exaustão para cada estufa utilizada no artigo P2 a operar com o sistema ECOVAC.....	51
Figura 5.4- Influência da pressão atmosférica na percentagem de exaustão para cada estufa utilizada no artigo N1 a operar com o sistema ECOVAC.....	51
Figura 5.5- Influência da pressão atmosférica na percentagem de exaustão para cada estufa utilizada no artigo N2 a operar com o sistema ECOVAC.....	52
Figura 6.1- Variação do caudal de gás natural (m <sup>3</sup> /h) sem e com otimização dos caudais de exaustão para o artigo P1.....	57
Figura 6.2- Variação do caudal de gás natural (m <sup>3</sup> /h) sem e com otimização dos caudais de exaustão para o artigo P2.....	57
Figura 6.3- Variação do caudal de gás natural (m <sup>3</sup> /h) sem e com otimização dos caudais de exaustão para o artigo N1.....	58
Figura 6.4- Variação do caudal de gás natural (m <sup>3</sup> /h) sem e com otimização dos caudais de exaustão para o artigo N2.....	58
Figura 6.5- Custos anuais com e sem otimização das exaustões.....	60
Figura 6.6- Custos anuais com e sem as otimizações de ventilação estudadas.....	65

## Índice de tabelas

Tabela 3.1- Produção anual dos artigos em estudo face à produção anual total. .....	13
Tabela 3.2- Dimensões das estufas. ....	18
Tabela 4.1- Consumos de energia e custos associados referentes ao ano de 2015. ....	25
Tabela 4.2- Energia elétrica relativa ao ar comprimido. ....	26
Tabela 4.3- Distribuição dos consumos de energia da máquina de impregnar tela no ano de 2015.....	27
Tabela 4.4 – Consumo anual de energia e respetiva percentagem dos diversos consumidores de eletricidade.....	29
Tabela 4.5- Consumo de ar comprimido na máquina de impregnar tela.....	29
Tabela 4.6- Condições de operação para cada um dos artigos estudados.....	31
Tabela 4.7- Valores obtidos para o calor de combustão. ....	36
Tabela 4.8– Valores obtidos para a potência térmica do ar fresco.....	37
Tabela 4.9- Valores obtidos para a potência térmica da solução de impregnação.....	39
Tabela 4.10- Valores obtidos para a potência térmica da tela em “verde”. ....	40
Tabela 4.11- Valores obtidos para a potência térmica dos gases de exaustão. .....	41
Tabela 4.12- Valores obtidos para a potência térmica da tela húmida. ....	42
Tabela 4.13 – Valores obtidos para a potência térmica da tela em “verde”. ....	42
Tabela 4.14 – Valores obtidos para as perdas térmicas. ....	43
Tabela 5.1- Condições utilizadas no ensaio utilizando Linner. ....	46
Tabela 5.2- Condições em que foram efetuados os ensaios.....	48
Tabela 5.3- Condições ótimas de pressão diferencial e de exaustão. ....	49
Tabela 6.1- Levantamento efetuado à iluminação e respetivos custos associados. ....	56
Tabela 6.2- Proposta de otimização da iluminação.....	56
Tabela 6.3- Análise económica para o artigo P1.....	59

Tabela 6.4- Análise económica para o artigo P2.....	59
Tabela 6.5- Análise económica para o artigo N1.....	60
Tabela 6.6- Análise económica para o artigo N2.....	60
Tabela 6.7- Resultados obtidos para a temperatura simulando um aumento no coeficiente convectivo. ....	62

## Nomenclatura

**A<sub>abertura</sub>** - Área de abertura (m<sup>2</sup>)

**A<sub>livre</sub>** - Área livre (m<sup>2</sup>)

**C<sub>p</sub>** – Calor específico (kJ/(kg.°C))

**c<sub>rolo</sub>**- Comprimento da tela em “verde” (m)

**E<sub>entrada</sub>** – Energia por unidade de tempo de entrada no sistema (kW)

**E<sub>saída</sub>** – Energia por unidade de tempo de saída do sistema (kW)

**H<sub>entrada</sub>** - Entalpia de entrada no sistema (kW)

**H<sub>saída</sub>** - Entalpia de saída do sistema (kW)

**ṁ** - Caudal mássico (kg/s)

**m** - Massa (kg)

**PCI** - Poder Calorífico Inferior (kWh/m<sup>3</sup>)

**PTN** – Condições de Pressão e Temperatura Normais (1 atm e 20 °C)

**q̇** - Potência térmica (kW)

**T** - Temperatura (°C)

**T<sub>ref</sub>** - Temperatura de referência (°C)

**v̇** - Caudal volumétrico (m<sup>3</sup>/h)

**v** - Velocidade de impregnação (m/s)

**v<sub>ar fresco</sub>** - Velocidade do ar fresco (m/s)

**W** –Potência (kW)

**y<sub>Dip</sub>** - Fração de solução de impregnação

## Letras Gregas

$\Sigma$  - Somatório

$\Delta H_{298}^0$  - Calor de combustão (kW)

$\rho$  - Massa específica (kg/m<sup>3</sup>)

## Siglas

**AE** - Auditoria Energética

**APCER** - Associação Portuguesa de Certificação

**BK** - Benecke Kaliko

**CEE** – Consumo específico de eletricidade (kWh/m<sup>3</sup>)

**CIE** – Consumidor Intensivo de Energia

**C-ITA** – Continental- Indústria Têxtil do Ave, S.A.

**Gc** - Função transferência do controlador

**GL** - Função transferência da perturbação

**Gm** - Função transferência da variável manipulada

**Gp** - Função transferência do processo

**GS** – Corrente de gás natural

**Gv** - Função transferência do atuador

**HMI** – *Human Machine Interface*

**IPMA** – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

**Km**- Ganho da função de transferência do elemento de medida

**L**- Perturbação ao sistema

**PLC** – *Programmable Logic Controller*

**TC** – Controlador de temperatura

**TT** – Transmissor de temperatura

**PRen** – Plano de Racionalização de Energia

**Set point** – Valor desejado

**SGCIE** – Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia

**Tep** - Toneladas equivalentes de petróleo

**Ton** – Toneladas

**URE** – Utilização Racional de Energia

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

# 1. Introdução

Este relatório foi elaborado no âmbito da unidade curricular de Dissertação do mestrado em Engenharia Química – Otimização Energética na Indústria Química.

Este trabalho foi proposto pela empresa Continental – Indústria Têxtil do Ave, S.A. (C-ITA), devido à necessidade de realizar uma otimização energética à Máquina de impregnar tela para pneus e estudar a implementação do sistema ECO VAC, já existente, na mesma. Esta é uma máquina complexa, de grande dimensão (36 metros de altura) com mais de 20 anos de funcionamento e como tal, ao longo dos anos sofreu várias alterações por forma a melhorar, automatizar e simplificar a sua utilização. Com a necessidade crescente de tornar a máquina de impregnar tela energeticamente eficiente surgiu este tema proposto pela C-ITA.

## 1.1. Continental - Indústria Têxtil do Ave, S.A.

A Continental - Indústria Têxtil do Ave, S.A., situa-se em Lousado e foi fundada oficialmente a 16 de dezembro de 1948 no cartório notarial de Santo Tirso. A 4 de Agosto de 1950, iniciou a sua atividade com a entrada em funcionamento do primeiro torcedor de fio, sendo que a 20 de agosto do mesmo ano entregou à Manufatura Nacional de Borracha, Mabor, as primeiras amostras de cordas para pneus. Nesta fase inicial a C-ITA, era denominada por INTEX, abrangia uma área coberta de 12.000 m<sup>2</sup>, e produzia telas de algodão para fabrico de pneus.

Em 1958 a principal matéria-prima na construção de pneus deixa de ser o algodão e passou a ser utilizado o rayon de alta tenacidade, impondo assim a primeira grande mudança tecnológica e de processos. Esta mudança implicou um acabamento final nas telas de rayon (*dip and dry*), para garantir a adesão dos compostos de borracha ao tecido.

Entre 1962 e 1963 foram impostas mudanças na matéria-prima, com base em produtos de síntese nomeadamente a poliamida de alta tenacidade (*nylon*), como base dos tecidos de reforço para a construção de pneus, provocando na INTEX uma nova mudança nas suas técnicas de fabrico ao nível da torcedura e tecelagem. Esta mudança permitiu completar o esquema, Torcedura/Tecelagem/Acabamentos.

## OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

Na década de 70/80 a INTEX iniciou um projeto de inovação tecnológica e o aumento da capacidade produtiva da fábrica. Entre as medidas que se sucederam destaca-se a renovação da secção de torcedura e instalação de uma segunda máquina de impregnar. No seguimento dos investimentos efetuados, em 1982 a capacidade produtiva da empresa atingiu as 350 ton/mês. Em setembro de 1987 foi encerrada a área de fiação e tecelagem de algodão pois esta matéria-prima deixou de ser utilizada na indústria dos pneus.

Ainda em 1987, na sequência dos maus resultados da General Tire, a Continental, comprou essa empresa e passou por esse motivo a integrar o conselho de administração da INTEX. Em 1988, o Banco Borges & Irmão vendeu ao Grupo Amorim a sua participação nesta indústria, passando a partir desse momento a ser designada por Indústria Têxtil do Ave (ITA).

No ano de 1992 ocorreu uma reestruturação da empresa e uma otimização dos recursos humanos. Nesse ano foi adquirida a máquina de impregnar tela para pneus, figura 1.1, a máquina mais importante de todo o processo produtivo.



**Figura 1.1** - Vista exterior da máquina de impregnar tela. [2]

A fim de se obter a certificação do Sistema de Gestão da Qualidade e de Gestão Ambiental, desenvolveu-se um esforço nesse sentido, sendo que em 1993 a ITA torna-

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

se numa das primeiras empresas têxteis a nível nacional a obter certificação segundo a norma ISO 9002 (Sistemas de qualidade – Modelo para Garantia de Qualidade em Produção e Instalação). Ainda em 1993, 95% do capital da ITA é adquirido pela Continental AG passando a ser designada por C-ITA. Ainda nesse ano foi-lhe atribuído o prémio EDP de gestão racional de energia. Em 1998 tornou-se a segunda empresa portuguesa a ser certificada pela APCER (Associação Portuguesa de Certificação) segundo a norma ISO 14001 (Sistemas de Gestão Ambiental – Especificação e Diretrizes para Uso).

Entre 2000 e 2004, a C-ITA investiu em novos torcedores e teares aumentando ainda mais a sua capacidade produtiva. No ano 2008 foi adquirida a máquina de impregnar corda Single-End representada na figura 1.2.



**Figura 1.2** - Máquina de impregnar corda “Single-End”.

O ano de 2012 constitui outro marco importante na história desta empresa pois é instalada uma nova linha de produção – as malhas. Este projeto resultou da estratégia de duas empresas do Grupo Continental de diferentes divisões: a ITA e uma empresa produtora de materiais de revestimento sintético para interiores de automóveis a Benecke-Kaliko (BK). Esta nova linha de produção provocou um aumento da dimensão da Continental e permitiu à BK uma maior segurança no fornecimento e um controlo mais efetivo do ponto de vista tecnológico, de custos e de produção de tecidos.

A partir do ano 2013 a ITA mudou o seu nome passando este a ser Continental – Indústria Têxtil do Ave, S.A. (C-ITA).

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

Atualmente a C-ITA, possui uma área total de 52.329 m<sup>2</sup> sendo que 30.153 m<sup>2</sup> são de área coberta (figura 1.3), tem cerca de 200 colaboradores e apresenta uma produção anual de 14.000 ton de telas e corda para pneus, usando diversas matérias-primas como por exemplo o *rayon*, *nylon*, poliéster e aramida [1].



**Figura 1.3** - Atuais instalações da C-ITA.

## 1.2. Enquadramento do trabalho

Com a necessidade crescente de reduzir os impactos ambientais para proteção da natureza assim como, para proteção da saúde humana, e uma vez que a ameaça de esgotamento dos combustíveis fósseis tem vindo a intensificar-se, surge o conceito de Utilização Racional de Energia (URE). O conceito de URE visa um crescimento da produção sem aumentar os consumos energéticos e sem afetar a qualidade da produção, para tal é necessária uma gestão de energia.

Esta problemática e conceito alteraram a forma como as indústrias encaram os consumos de energia, levando-as a dar uma maior atenção aos seus gastos energéticos e assim desenvolverem e implementarem programas e medidas de otimização e gestão energética.

Tendo em conta o consumo anual de energia da C-ITA, esta é considerada como consumidora intensiva de energia (CIE) de acordo com o Decreto-Lei nº71/2008 de 15 de abril de 2008, pois apresenta um consumo energético superior a 1000 tep/ano. Este decreto-lei regula o Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE) visando a promoção da eficiência energética e monitorização dos consumos energéticos

das instalações consumidoras intensivas de energia. Com isto, a C-ITA tem obrigatoriedade de realizar auditorias energéticas periódicas de 6 em 6 anos [3].

Uma Auditoria Energética (AE), segundo o Decreto-Lei n.º 71/2008 “consiste num levantamento detalhado de todos os aspetos relacionados com o uso da energia, ou que de alguma forma contribuam para a caracterização dos fluxos energéticos”. Como objetivos são definidos a caracterização energética dos diferentes equipamentos, e sistemas existentes numa instalação consumidora intensiva de energia e a identificação das medidas com viabilidade técnico-económica que sejam possíveis de implementar para que a eficiência energética aumente ou, para que haja uma redução na fatura energética associadas às atividades da instalação. A auditoria energética deverá:

- Quantificar os consumos energéticos e a sua importância no custo final dos produtos;
- Efetuar uma inspeção visual dos equipamentos e ou sistemas consumidores de energia, complementada pelas medições necessárias;
- Esclarecer como é transformada a energia e quais os seus custos;
- Verificar a existência do bom funcionamento dos aparelhos de controlo e regulação do equipamento de conversão e utilização de energia;
- Determinar consumos específicos de energia durante o período de realização da auditoria;
- Identificar e quantificar as possíveis áreas onde as economias de energia são viáveis;
- Definir as linhas orientadoras para a implementação ou melhoria de um esquema operacional de Gestão de Energia [4].

A última Auditoria Energética (AE) feita na C-ITA foi realizada pela entidade Auditene, entregue em 2012, referente ao período 2010-2016. Como consequência desta, resultou a elaboração do Plano de Racionalização do Consumo de Energia (PREn). A próxima auditoria energética será entregue no ano de 2017 tendo como referência o ano 2016.

Uma das medidas estabelecidas no Pren tinha como objetivo o aquecimento do 2º Piso da máquina de impregnar tela. Esta medida, inicialmente preconizada para o ano de 2014, não foi implementada, pois este aquecimento punha em causa as condições ótimas de trabalho dos operadores. Assim, a C-ITA solicitou a autorização para substituir esta medida por uma outra, que se baseia no sistema ECO VAC instalado na máquina de impregnar em dezembro de 2014.

Este sistema consiste num controlo automático das exaustões das estufas, tendo como *input* a pressão diferencial que existe entre o interior da estufa (menor pressão) e a atmosfera (maior pressão). A diminuição do caudal de exaustão implica uma diminuição no caudal de entrada de ar fresco, pois a quantidade de ar necessário a repor no sistema é menor levando assim a uma diminuição no consumo de gás natural.

Com a implementação do sistema ECO VAC, estima-se uma poupança energética que supera o valor estimado na aplicação da medida anteriormente proposta no Pren [5].

### 1.3. Objetivos do trabalho

O presente trabalho teve como objetivos a otimização energética à máquina de impregnar tela para pneus e a implementação do sistema ECO VAC, já instalado, na mesma. Desta forma para atingir os objetivos definidos foi necessário:

- Avaliar impacto em termos energéticos de alguns dos artigos produzidos;
- Analisar o desempenho da máquina de impregnar tela relativamente às várias utilidades consumidas:
  - Gás natural;
  - Energia elétrica;
  - Ar comprimido;
- Avaliar as exaustões das estufas no consumo energético de gás natural e implementar o sistema ECO VAC;
- Avaliar o impacto energético da implementação do sistema ECO VAC;
- Efetuar uma análise económica;
- Desenvolver propostas para poupança energética.

### 1.4. Organização do relatório

O presente relatório é composto por 8 capítulos.

O 1º capítulo é introdutório e aborda a história da empresa onde o trabalho decorreu, o enquadramento do tema proposto e os seus objetivos. No capítulo 2 aborda-se todo o processo produtivo da C-ITA.

## OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

No capítulo 3 apresenta-se a máquina em estudo (Máquina de impregnar tela para pneus), assim como o seu processo de impregnação e o sistema ECOVAC sob o qual vai incidir o objetivo principal do trabalho.

No 4º capítulo apresenta-se a avaliação energética efetuada e a distribuição das utilidades consumidas.

No 5º capítulo é apresentada a implementação do sistema ECO VAC e os seus dados experimentais.

No 6º capítulo apresentam-se todas as medidas de otimização energética.

Por fim, no capítulo 7 faz-se uma análise conclusiva ao trabalho desenvolvido e apresentam-se sugestões para trabalhos futuros.

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

## 2. Processo produtivo

Na C-ITA são produzidas cordas e telas para a indústria dos pneus e malhas para revestimento sintético de interiores de automóveis. As matérias-primas utilizadas para a produção da corda e da tela são: a aramida, o *nylon*, o poliéster ou rayon. No caso da râmula, onde se produz as malhas, utiliza-se algodão ou poliéster. A C-ITA labora 24horas por dia durante 355 dias por ano.

Neste capítulo descreve-se de forma sucinta o processo produtivo de cada um dos produtos.

### 2.1. Produção das cordas

O processo produtivo da C-ITA inicia-se com a produção de cordas. Estas são produzidas através da torção de fio (“matéria-prima”). Esta operação tem como objetivo aumentar a resistência do material ao desgaste por fricção. As bobines de fio são colocadas em torcedores (figura 2.1) que podem torcer dois ou mais fios por corda.



**Figura 2.1** – Secção de torcedura.

Como é de esperar, devido ao entrelaçamento dos fios, a corda produzida possui um peso superior ao do fio para um mesmo comprimento. Para definir esta propriedade surge uma nova unidade de medida, decitex, que corresponde ao peso da corda por cada 10.000 metros produzida.

A seguir à torção, as bobines de corda “em verde” (estágio antes da impregnação), podem ser logo impregnadas ou passar para a secção seguinte onde será produzida a tela – secção de tecelagem. A impregnação dos componentes têxteis permite conferir

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

adesão dos componentes à borracha (através de uma solução de impregnação) e conferir estabilidade dimensional através de tratamento térmico efetuado nas estufas.

A secção de impregnação de corda é constituída por duas máquinas que funcionam em conjunto, a máquina de impregnar corda *Single-End* e a *Sahm*.

Na *Single-End* ocorre a impregnação da corda permitindo até um máximo de 100 cordas. Esta máquina é constituída por quatro estufas horizontais sobrepostas, pela tina que contém a solução de impregnação, e pelos grupos tratores. A corda em “verde” passa pelo primeiro grupo trator antes de ser mergulhada numa primeira tina de solução de impregnação seguindo então, para o segundo grupo trator após o qual entra na primeira estufa. Segue assim para a segunda estufa sendo, seguidamente, mergulhada na segunda tina de solução de impregnação para seguir para as estufas 3 e 4.

A *Sahm* tem como função bobinar a corda impregnada. Assim, a corda encontra-se pronta para ser testada pelo laboratório de qualidade. Se a corda estiver dentro da especificação reúne condições para ser expedida para o cliente.

## 2.2. Produção da tela

Após um período de estabilização, a corda “em verde” encontra-se em condições para passar à secção de tecelagem (figura 2.2). Nesta secção alinham-se as bobines em série e em paralelo sendo a corda de cada bobine presa ao tear. Na produção de um rolo de tela são necessárias 1.100 a 2.600 cordas, consoante o artigo a produzir. Para que as cordas fiquem alinhadas com igual distância umas das outras utiliza-se um fio de algodão transversalmente às cordas, produzindo-se a tela. Ainda nos teares a tela produzida é enrolada. Esta tela “em verde” encontra-se em condições para ser impregnada na máquina de impregnar tela. Esta impregnação da tela será abordada mais à frente no capítulo 3



**Figura 2.2** - Secção de tecelagem.

## 2.3. Produção das malhas

O processo de produção das malhas é composto pela tricotagem (figura 2.3) e ramulagem (figura 2.4).

A tricotagem (1ªetapa) consiste na interligação de “laços” feitos por agulhas em gancho. Nesta técnica as malhas são classificadas em duas categorias:

- Tecido tricotado em tecnologia de teia: a alimentação do fio às agulhas é efetuada na vertical;
- Tecido tricotado em tecnologia de trama: a alimentação do fio às agulhas é efetuada na horizontal [6];

A ramulagem (2ªetapa), corresponde à fase onde o produto é termofixado através de diferentes tensões aplicadas a temperaturas elevadas. A termofixação permite conferir estabilidade dimensional de acordo com as especificações e exigências do cliente. O equipamento utilizado para este fim é a râmula, que permite obter a largura e comprimento de malha pretendido pelo cliente. Quanto à temperatura de operação, esta é próxima da temperatura de transição vítrea para que as fibras possam ser moldadas conforme as condições finais pretendidas. O tempo de exposição varia também de acordo com os requisitos pretendidos [7].



**Figura 2.3** – Secção de tricotagem.



**Figura 2.4** – Secção de ramulagem.



### 3. Máquina de impregnar tela para pneus

A impregnação da tela, decorre na máquina de impregnar tela para pneus, vulgarmente conhecida por máquina Zell. Esta é constituída por sete pisos, onde são distribuídas sete estufas, cinco grupos tratores, duas tinas de solução de impregnação (*Dip*) e dois acumuladores. Neste capítulo descreve-se o processo de impregnação da tela assim como os componentes mais relevantes das estufas.

#### 3.1. Impregnação da tela

Como referido anteriormente, o processo de impregnação da tela ocorre na máquina de impregnar.

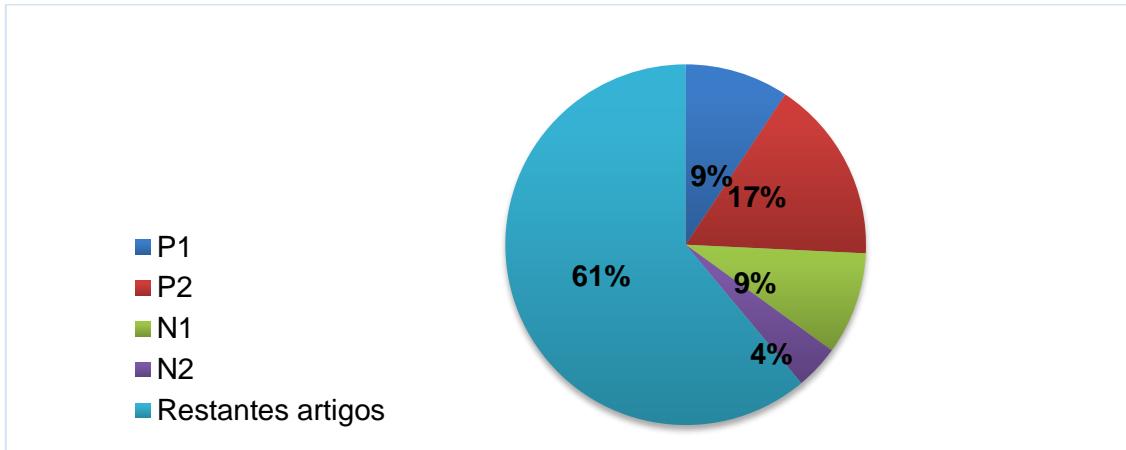
Este processo difere de acordo com as características desejadas para o artigo a produzir. Neste estudo, selecionaram-se dois artigos de poliéster identificados como P1 e P2 e dois artigos de *nylon*, N1 e N2 respetivamente. A escolha destes artigos deveu-se ao facto de possuírem diferentes matérias-primas, decitex e número de cordas e também por constituírem os artigos de poliéster e *nylon* mais impregnados. Assim, no caso dos artigos de poliéster o artigo P1 possui um decitex de 1.440 e 121 cordas enquanto que, o artigo P2 possui um decitex de 2.200 e 94 cordas. Para os artigos de *nylon*, o artigo N1 é constituído por 80 cordas e um decitex de 940 e o artigo N2 110 cordas e um decitex igual a 1.440. A produção anual destes artigos face à produção anual total encontra-se apresentada na tabela 3.1.

**Tabela 3.1-** Produção anual dos artigos em estudo face à produção anual total.

Artigo	Produção (ton/ano)
P1	1 265,3
P2	2 232,2
N1	1 248,6
N2	537,1
Restantes	8 291,5
<b>Total</b>	<b>13 574,7</b>

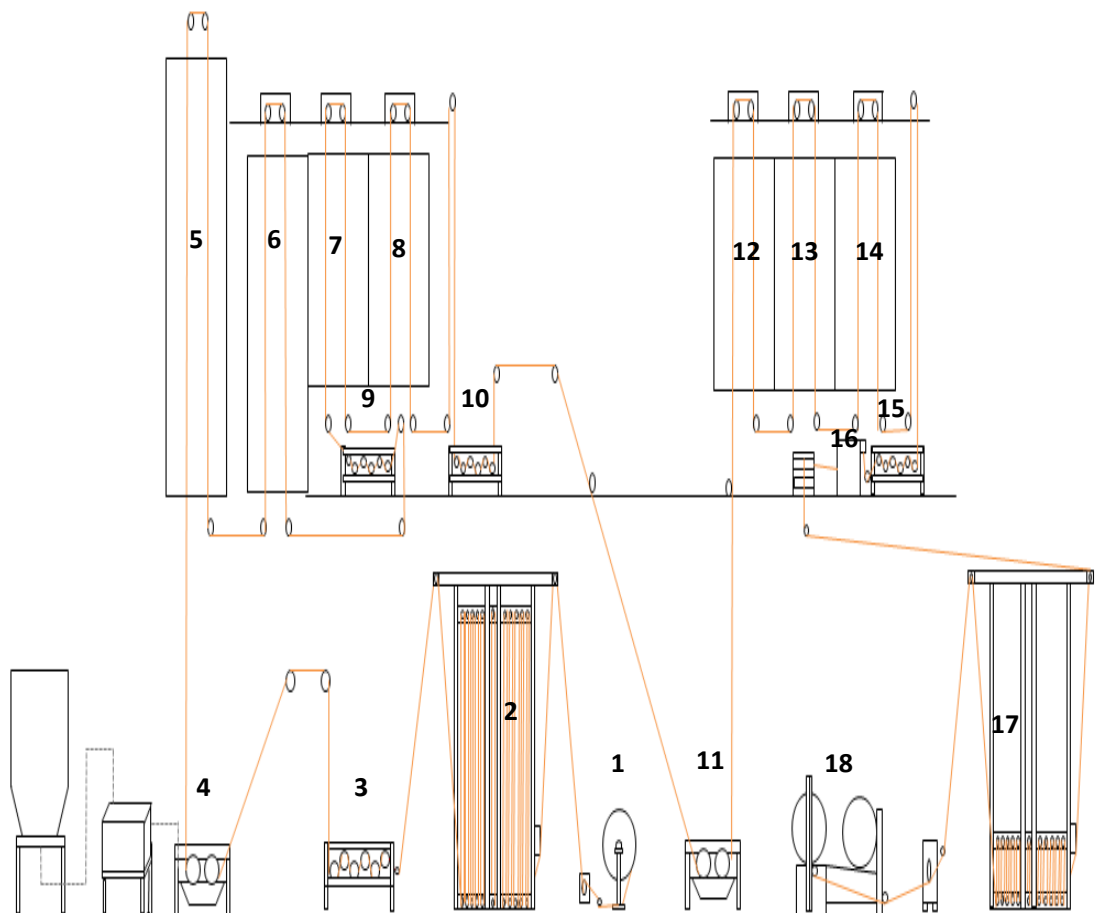
Na figura 3.1 apresenta-se a distribuição da produção anual destes artigos face à produção total.

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS



**Figura 3.1-** Produção anual da máquina de impregnar tela relativa aos artigos em estudo.

Na figura 3.2 apresenta-se uma representação esquemática da máquina de impregnar tela.



**Figura 3.2 -** Representação esquemática da máquina de impregnar tela.

**Legenda:**

- 1- Secção de desenrolamento
- 2- Primeiro acumulador
- 3- Primeiro grupo trator
- 4- Primeira tina de solução de impregnação
- 5- Estufa 1
- 6- Estufa 2
- 7- Estufa 3
- 8- Estufa 4
- 9- Segundo grupo trator
- 10- Terceiro grupo trator
- 11- Segunda tina de solução de impregnação
- 12- Estufa 5
- 13- Estufa 6
- 14- Estufa 7
- 15- Terceiro grupo trator
- 16- Quarto grupo trator
- 17- Segundo acumulador
- 18- Secção de enrolamento

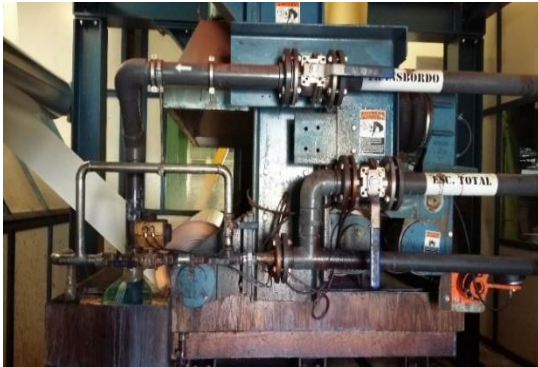
A tela “em verde” é desenrolada (figura 3.3) num suporte designado de *Let-off* e passa no rolo travão, que permite encravar a tela depois do desenrolamento e antes do acumulador, para que se possa proceder à mudança de rolo em segurança. Quando o rolo travão é acionado, o acumulador desce gradualmente e o final de um rolo é cosido ao início de outro numa máquina de costura. Após este procedimento, o rolo travão desencrava a tela e o acumulador sobe gradualmente. O acumulador permite reter a tela, possibilitando assim que o processo continue mesmo quando se procede à mudança de rolo.



**Figura 3.3** - Desenrolamento da tela “em verde”.

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

Depois de passar no acumulador, a tela segue para o primeiro grupo trator dirigindo-se de seguida para a primeira tina de solução de impregnação (*Dip*), (figura 3.4) onde é mergulhada numa solução de impregnação composta essencialmente por água, resina e latex. Os grupos tratores permitem a estiragem positiva ou negativa, conforme se pretenda, esticar ou encolher a tela (figura 3.5).



**Figura 3.4** - Tina de soluto.



**Figura 3.5** - Grupo trator.

Seguidamente a tela sobe até ao Piso 1 onde passa pela primeira caixa de vácuo a fim de retirar o excesso de solução de impregnação. Depois, sobe até ao Piso 2, entra na estufa 1 e continua o seu percurso até ao Piso 7, inverte o sentido e regressa novamente ao Piso 2, onde entra na estufa 2 e faz o mesmo percurso. Após a saída da estufa 2 segue para o segundo grupo trator.

Depois de percorrer o segundo grupo trator entra na estufa 3 no Piso 3, e percorre em sentido ascendente toda a estufa, invertendo o sentido no Piso 7. Entra de seguida na estufa 4 no Piso 3 e ascende ao topo da mesma onde inicia a sua descida até ao Piso 2 no qual irá inverter sentido até ao Piso 7 e descerá ao Piso 2 fora de estufas para arrefecer um pouco antes da sua entrada no terceiro grupo trator.

Quando sai do terceiro grupo trator a tela desce até ao Piso 0, local este onde se encontra a segunda tina, que pode ou não conter solução de impregnação conforme o artigo a produzir. A tela continua o seu percurso e sobe até ao Piso 1 e, no caso de ter sido impregnada na segunda tina será acionado um novo vácuo. Continua a subir até ao Piso 3 onde entra na estufa 5, no interior da qual ascende ao Piso 7 e regressa ao Piso 3 onde entra na estufa 6. Este movimento repete-se no interior da estufa 6 e estufa 7. Quando a tela sai da estufa 7, no Piso 3, continua o seu movimento descendente até

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

ao Piso 2, e ascende novamente ao Piso 7 e desce até ao Piso 2 para arrefecimento antes de entrar no quarto grupo trator.

No quarto grupo trator existem “facas” que têm como função amaciar a tela (figura 3.6). Assim, a tela desce até ao Piso 1, onde percorre o quinto grupo trator. A tela é encaminhada para um acumulador, e segue em seguida para a secção de enrolamento (figura 3.7).



**Figura 3.6-** Facas” existentes nos grupos tratores.



**Figura 3.7 –** Secção de enrolamento.

Ao longo de toda a máquina existem equipamentos para alinhar a tela que evitam que esta se dobre durante o seu percurso.

O controlo das condições de operação da máquina de impregnar é efetuado no quadro de comando HMI (*Human Machine Interface*) que se apresenta na figura 3.8.

Assim termina o percurso da tela na máquina de impregnar, obtendo-se por fim a tela impregnada.



**Figura 3.8 –** Quadro de comando da máquina de impregnar tela (HMI).

### 3.2. Caraterísticas e descrição das estufas

Como já descrito anteriormente, a máquina de impregnar tela é constituída por sete estufas verticais cujas dimensões se encontram na tabela 3.1.

**Tabela 3.2-** Dimensões das estufas.

Estufas	Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)
1	3,28	3,48	19,77
2	3,33	3,24	17,74
3	2,76	3,24	14,03
4	3,28	3,24	14,03
5	3,23	3,24	14,03
6	3,04	3,24	14,03
7	3,04	3,24	14,03

No interior das estufas, existe um queimador, um ventilador de circulação de ar superior e um inferior, um exaustor, *Jet Box's*, sondas de temperatura (PT-100) e um sistema ECO VAC. A estufa 1 difere das restantes pelo facto de possuir dois queimadores em vez de um e não possuir um sistema ECO VAC instalado.

Ao nível dos queimadores dá-se a combustão do gás natural, com o objetivo de fornecer o calor necessário para criar as condições de temperatura desejadas no interior das estufas. Assim, os gases quentes resultantes do processo de queima são postos a circular pelos ventiladores e lançados contra a tela através das *Jet Box's* permitindo homogeneizar a temperatura no interior da estufa (figura 3.9). Os gases são então extraídos do interior da estufa através do exaustor que possui dois modos de funcionamento. No modo dito normal de funcionamento, o exaustor extrai os gases de dentro das estufas de forma controlada e no modo de emergência, extrai os gases de dentro das estufas de forma rápida. Este último modo tem lugar no caso de falha/avaria ou acionamento das cordas de emergência.



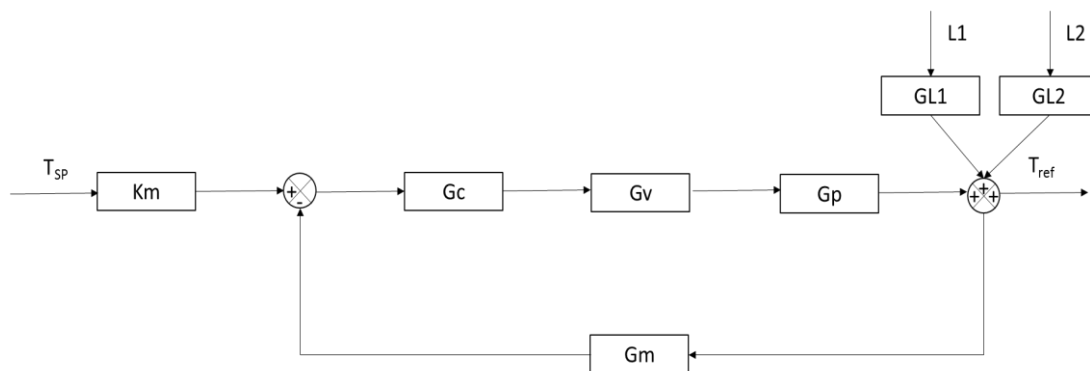
**Figura 3.9-** Queimador, Motor ventilador e *Jet Box's* (da esquerda para a direita).

### 3.2.1. Estratégia de controlo implementada

A impregnação da tela passa por um processo de secagem e termofixação no interior das estufas, requerendo a temperatura utilizada especial atenção.

Para se controlar a temperatura no interior das estufas encontra-se instalada uma estratégia de controlo por retroação. Neste caso o controlador não será mais do que um instrumento para alterar a dinâmica do processo. Este processo é efetuado em anel fechado e despreza os efeitos das perturbações através da medida dos seus efeitos na saída da instalação.

O diagrama de blocos para a estratégia de controlo implementada apresenta-se na figura 3.10 e o esquema do sistema de controlo de temperatura no interior da estufa na figura 3.11.



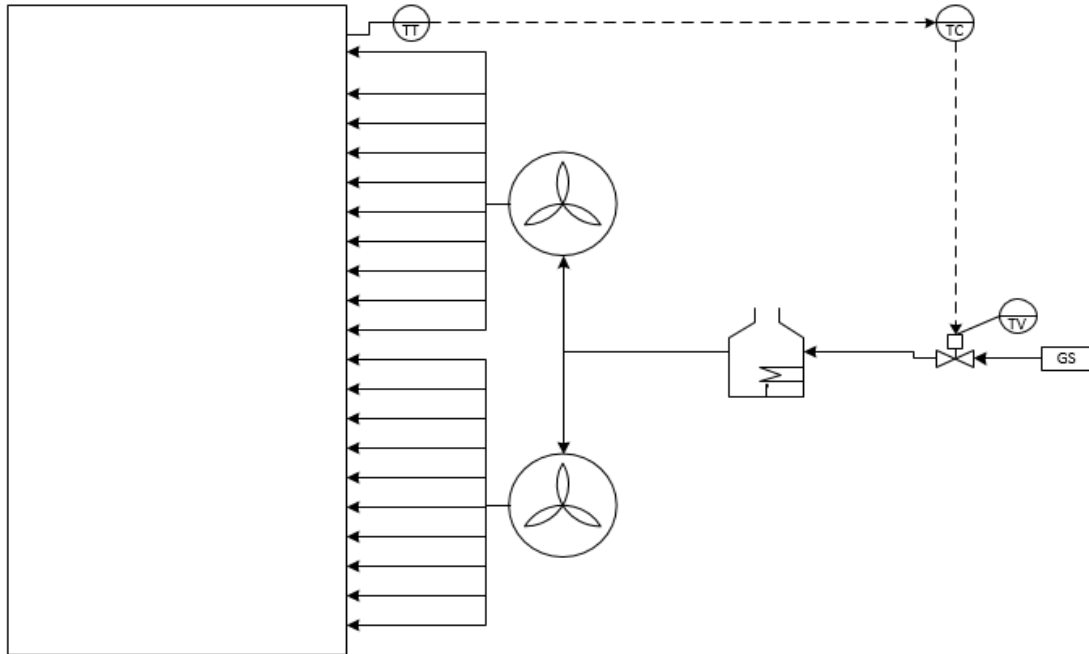
**Figura 3.10-** Diagrama de blocos para o controlo por retroação da temperatura.

**Legenda:**

- Gc-** Função transferência do controlador
- GL1-** Função transferência da perturbação 1
- GL2-** Função transferência da perturbação 2
- Gm-** Função transferência da variável manipulada
- Gp-** Função transferência do processo
- Gv-** Função transferência do atuador
- Km-** Ganho da função de transferência do elemento de medida
- L1-** Perturbação 1
- L2-** Perturbação 2

$T_{ref}$ - Temperatura à saída do sistema (variável controlada)

$T_{SP}$ - Temperatura desejada (valor do *set point*)



**Figura 3.11-** Sistema de controlo de temperatura no interior da estufa.

No interior da estufa, existe uma sonda de temperatura designada por transmissor (TT) que se encontra ligada a um controlador de temperatura (TC). Por sua vez, o TC encontra-se ligado a uma válvula elétrica que controla o caudal de gás natural (GS) à entrada da câmara de combustão necessário para que a temperatura no interior da estufa atinja o valor desejado. Para que a combustão ocorra é necessária a existência de ar na câmara. Este ar é inserido à temperatura ambiente, temperatura esta que varia ao longo do dia e ao longo do ano sendo por isto considerada como uma perturbação ao sistema de controlo. Os gases quentes, provenientes da combustão, são postos a circular nos ventiladores de circulação forçada que, os direcionam para o interior das *Jet Box's*. Assim, as *Jet Box's* encontram-se em condições para insuflar os gases quentes para o interior da estufa, fazendo com que esta atinja o valor de temperatura desejado. Pela entrada e saída da tela da estufa também entra ar a uma temperatura não controlada que influencia a dinâmica do processo sendo por isso mais uma perturbação ao sistema [8].

### 3.3. Sistema ECO VAC

Com o aumento da preocupação ambiental, surge a necessidade de se desenvolverem tecnologias que permitam a redução dos consumos energéticos primários. Deste modo, a *Benninger-Zell* desenvolveu um sistema que permite o controlo do volume dos gases de exaustão tendo como base o diferencial de pressão existente entre o interior da estufa e a atmosfera.

O ar entra nas estufas pelas aberturas de entrada e saída da tela, uma vez que o interior da estufa se encontra em subpressão. Quando o sistema de exaustão se encontra ligado força-se a saída de gases, provocando uma maior subpressão no interior da estufa e conseqüentemente o aumento do diferencial de pressão. Se for admitida uma percentagem de exaustão constante, verifica-se que o diferencial de pressão apenas aumenta se houver aumento da pressão atmosférica, uma vez que se está a fixar a pressão no interior da estufa.

O sistema ECO VAC permite fixar o diferencial de pressão no interior da estufa. Este sistema é constituído por dois tubos, um encontra-se no interior da estufa e o outro no seu exterior. Estes tubos estão ligados a um transmissor de pressão que envia a informação do diferencial de pressão ao PLC (*Programmable Logic Controller*) que controla o caudal de exaustão (figura 3.12) [9].

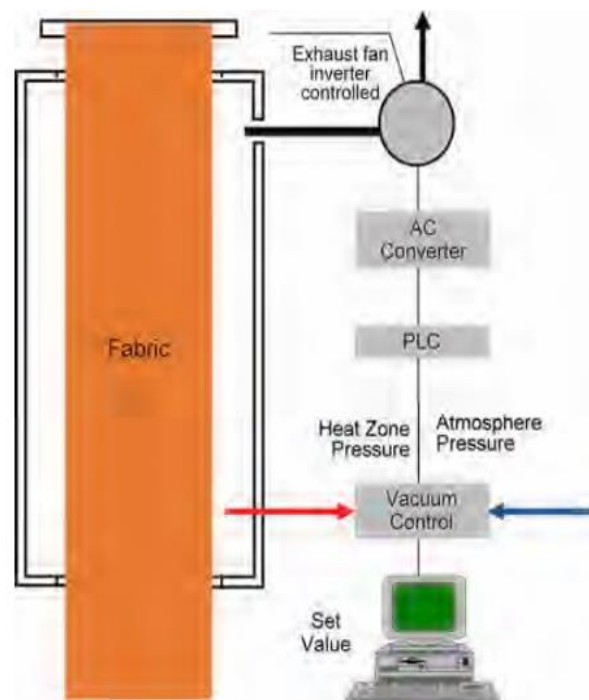
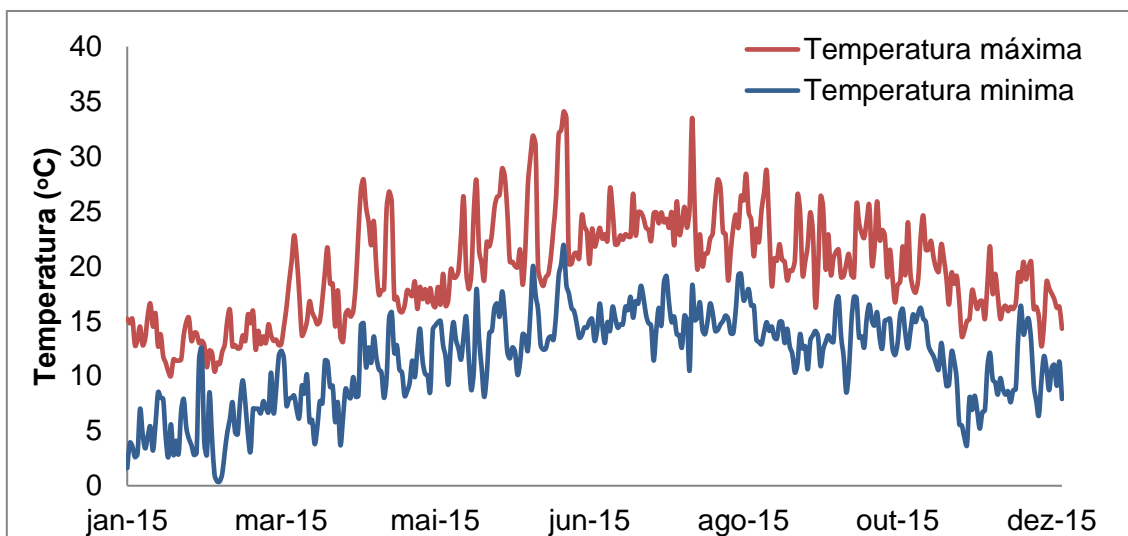


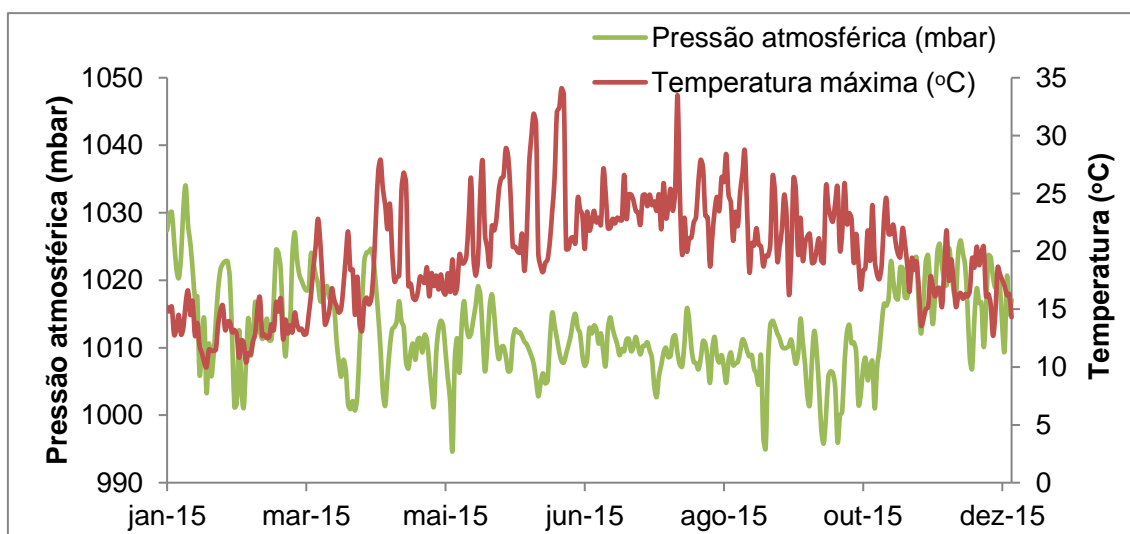
Figura 3.12- Sistema de controlo da exaustão ECO VAC [9].

### 3.3.1. Dados climatéricos locais

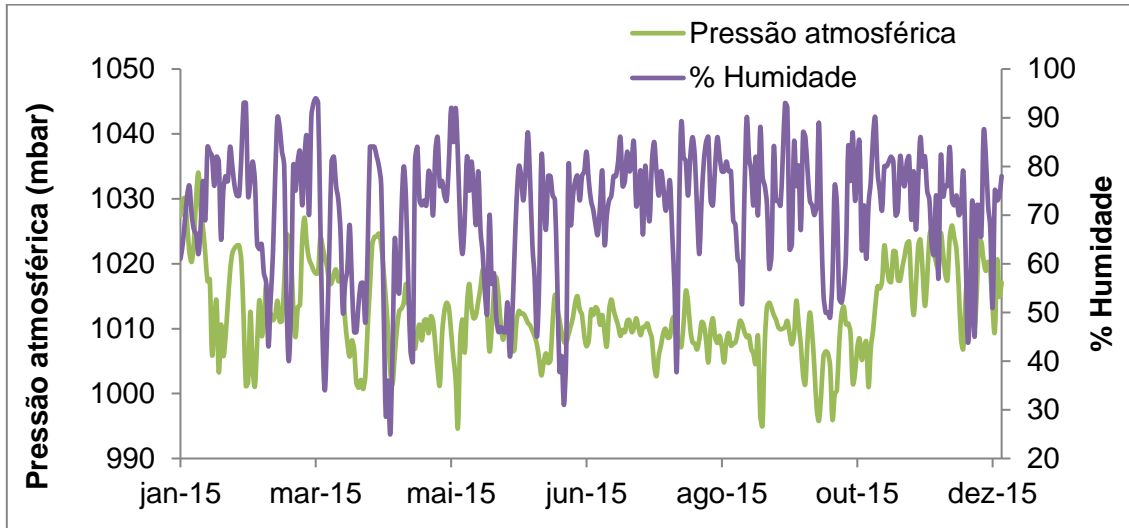
Para poder implementar o sistema ECO VAC, que já está instalado na máquina de impregnar tela, foi necessário conhecer as condições climatéricas de temperatura, pressão e humidade relativas ao ano de 2015 e para a zona de Lousado. Solicitou-se então ao IPMA (Instituto Português do Mar e da Atmosfera) um levantamento dos dados climatéricos referentes ao ano de 2015 bem como de alguns meses, janeiro a agosto, de 2016. Os dados fornecidos pertencem à estação meteorológica de Pedras Rubras pela proximidade da estação a Lousado. Da análise dos desses dados construíram-se os gráficos apresentados nas figuras 3.13, 3.14, 3.15 e 3.16.



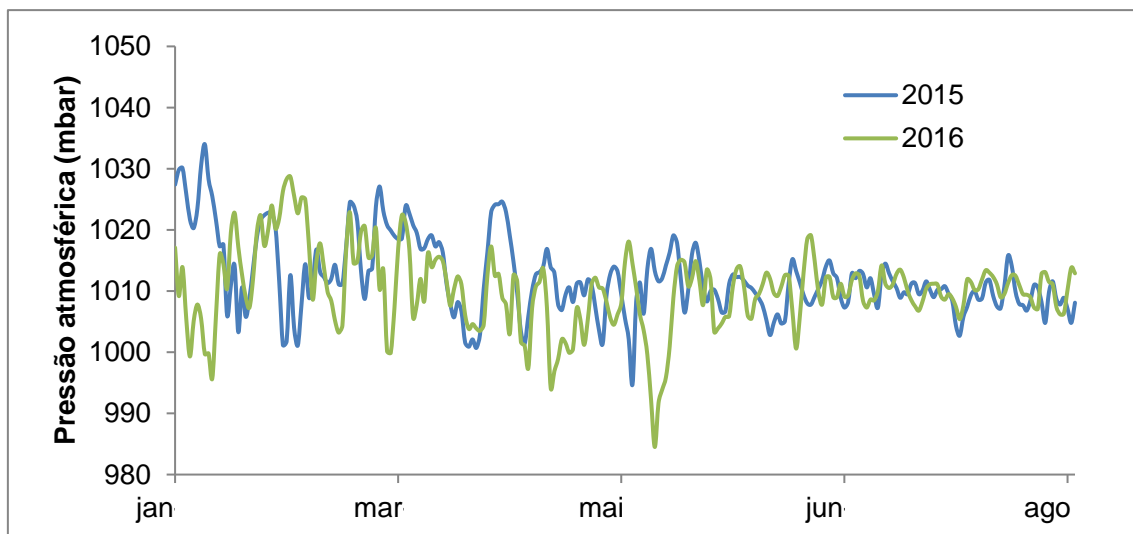
**Figura 3.13-** Variação da temperatura máxima e mínima no ano de 2015.



**Figura 3.14-** Variação da pressão atmosférica e da temperatura máxima no ano de 2015.



**Figura 3.15-** Variação da pressão atmosférica e da humidade relativa para o ano de 2015.



**Figura 3.16-** Comparação entre os registos de pressão atmosférica de 2015 com 2016.

Analisando a figura 3.13 verifica-se que, a temperatura mínima oscilou entre os 0,4 °C e os 21,9 °C e a temperatura máxima entre o 10 °C e os 33,5 °C.

Na figura 3.14 observa-se que com o aumento da temperatura a pressão atmosférica diminui pois o ar quente torna-se menos denso.

A humidade relativa corresponde ao quociente entre massa de vapor no ar e a correspondente à saturação nas condições a que está o ar. Na figura 3.15 verifica-se

que, com o aumento da humidade relativa a pressão atmosférica diminui. Isto deve-se ao facto da humidade relativa aumentar com o aumento da temperatura, pois com o aumento da temperatura o ar tem a capacidade de reter mais água sem que haja condensação [10].

Pela análise da figura 3.16 verifica-se que a variação da pressão atmosférica foi semelhante para o ano de 2015 e 2016. É de notar que nos meses de maio a agosto amplitude dessa oscilação foi menor.

## 4. Avaliação energética

A gestão da energia consumida assume um papel de grande relevo junto das indústrias. Para que os objetivos propostos possam ser atingidos foi necessário avaliar primeiro o consumo energético da C-ITA e depois analisar o desempenho da máquina de impregnar tela relativamente às várias utilidades consumidas:

- Energia elétrica;
- Gás natural;

### 4.1. Levantamento energético

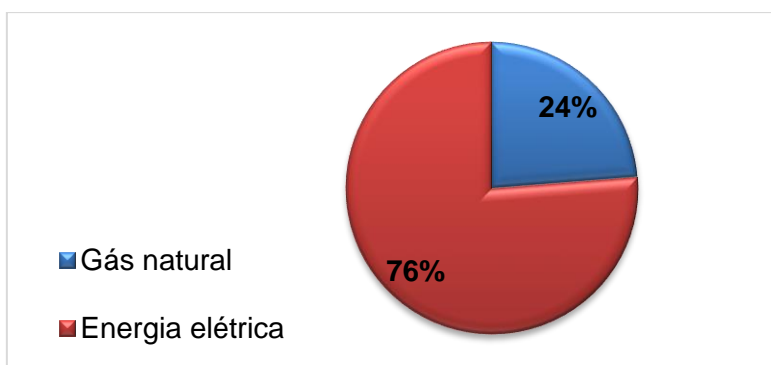
As figuras e as tabelas apresentadas neste capítulo foram construídas com base nos arquivos da C-ITA relativos ao ano de 2015. Os cálculos feitos dizem respeito a 3 turnos de trabalho, 350 dias por ano e 8 horas por dia.

Na tabela 4.1 apresentam-se os consumos de energia e os custos associados referentes ao ano de 2015. Os fatores de conversão apresentados foram obtidos a partir do Despacho n.º 17313/2008, de 26 de junho.

**Tabela 4.1-** Consumos de energia e custos associados referentes ao ano de 2015.

	Consumo kWh/ano	Fator de conversão tep/kWh	Consumo tep/ano	Custo (€/ano)
<b>Gás natural</b>	$2,84 \times 10^7$	$7,73 \times 10^{-5}$	$2,20 \times 10^3$	991.517
<b>Energia elétrica</b>	$3,28 \times 10^7$	$2,15 \times 10^{-4}$	$7,05 \times 10^3$	2.904.800
<b>Total</b>	---	---	$9,24 \times 10^3$	3.896.317

Na figura 4.1 apresenta-se a distribuição dos consumos de energia da C-ITA.

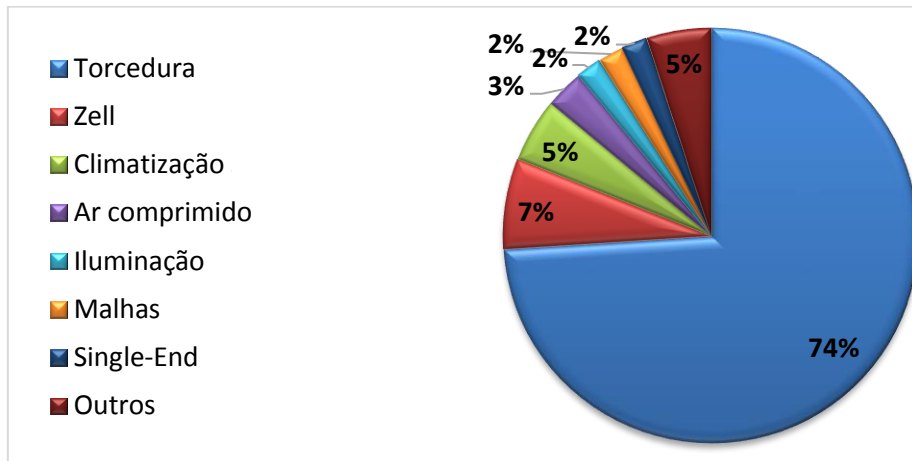


**Figura 4.1-** Distribuição dos consumos de energia da C-ITA

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

A energia elétrica é utilizada pela secção de tecelagem, torcedura, malhas, impregnação, iluminação, climatização, produção de ar comprimido e outros dispositivos, como computadores e impressoras.

Na figura 4.2 apresenta-se um gráfico com a divisão percentual da energia elétrica pelos vários consumidores na C-ITA. Os dados da figura foram obtidos nos arquivos da C-ITA.



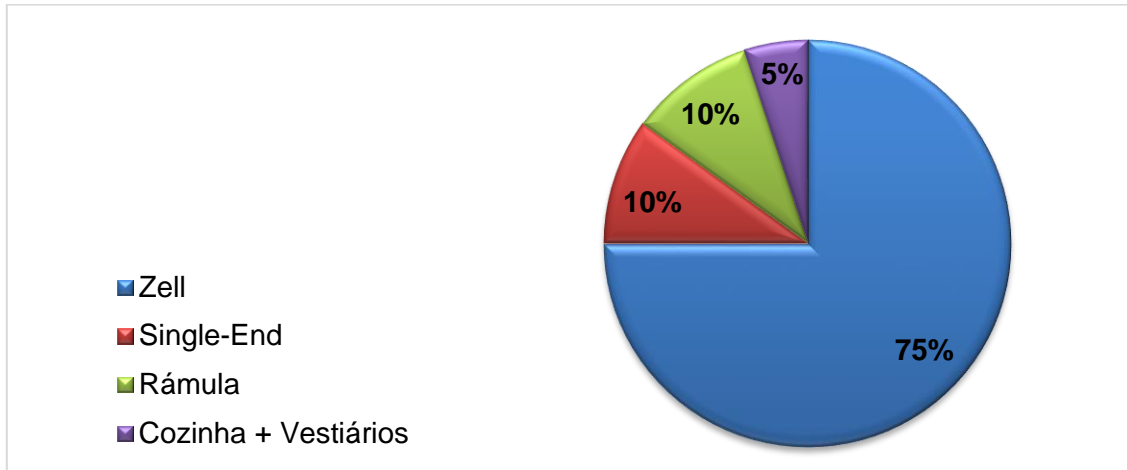
**Figura 4.2-** Distribuição dos consumos de energia elétrica.

Na tabela 4.2 apresentam-se os dados referentes ao ar comprimido recolhidos a partir dos arquivos da C-ITA

**Tabela 4.2-** Energia elétrica relativa ao ar comprimido.

Produção m <sup>3</sup> /min (PTN)	CEE kWh/m <sup>3</sup>	Energia kWh/ano
13,19	0,139	9,619×10 <sup>6</sup>

Os consumidores de gás natural são: a máquina de impregnar tela, a máquina de impregnar corda, a râmula, a cozinha e os vestiários. Na figura 4.3 apresenta-se a distribuição destes consumos em percentagem face ao consumo total de gás natural.

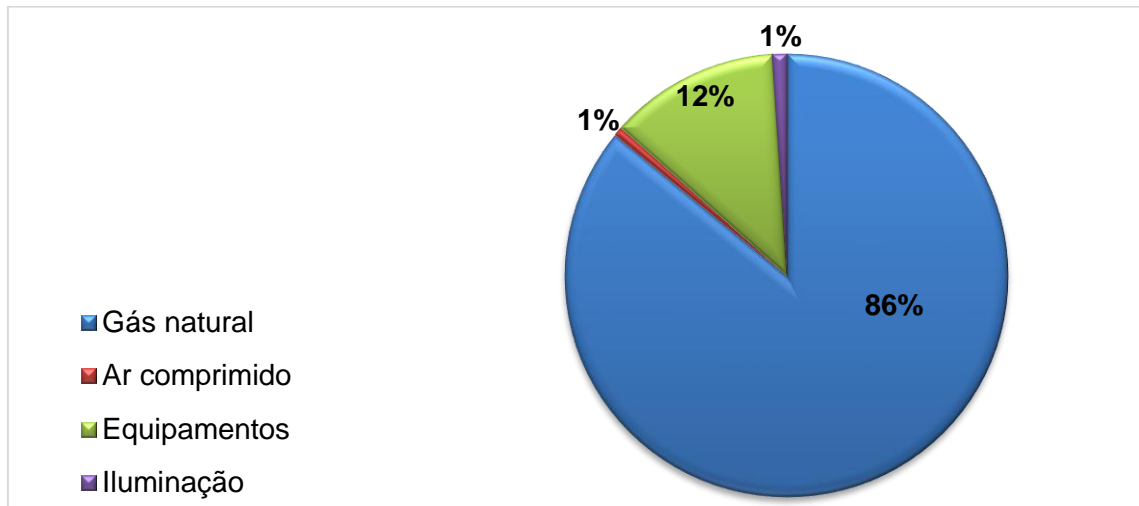


**Figura 4.3-** Distribuição dos consumos de gás natural.

Relativamente aos consumos energéticos da máquina de impregnar tela verificou-se que o consumo de gás natural é de  $2,36 \times 10^7$  kWh/ano e o de energia elétrica é de  $1,39 \times 10^6$  kWh/ano correspondendo a um custo de 821.847 €/ano e 126.227 €/ano respetivamente. Nos consumos de energia elétrica destaca-se os consumos com a iluminação, produção de ar comprimido e dos equipamentos como é o caso dos ventiladores, exaustores e grupos tratores. Os dados relativos ao consumo energético da máquina de impregnar apresentam-se na tabela 4.3 e a distribuição dos consumos de energia apresentam-se na figura 4.4.

**Tabela 4.3-** Distribuição dos consumos de energia da máquina de impregnar tela no ano de 2015.

	Consumo (kWh/ano)	Consumo (tep/ano)
<b>Gás natural</b>	$2,36 \times 10^7$	1.822
<b>Ar comprimido</b>	$6,47 \times 10^4$	14
<b>Equipamentos</b>	$1,22 \times 10^6$	263
<b>Iluminação</b>	$9,99 \times 10^4$	21,5
<b>Total</b>	---	2.120



**Figura 4.4-** Distribuição dos consumos de energia da máquina de impregnar tela referentes ao ano de 2015.

Com o intuito de se saber como está a ser utilizada a energia procedeu-se a uma avaliação energética à máquina de impregnar tela, que consistiu num levantamento aprofundado de consumos e dados energéticos, nos quais se identificaram e quantificaram os fluxos de energia elétrica e térmica referentes ao processo de impregnação.

## 4.2. Máquina de impregnar tela - Energia Elétrica

Como consumidores de energia elétrica para o normal funcionamento da máquina de impregnar identificaram-se:

- Compressores;
- Ventiladores superiores e inferiores;
- Exaustores;
- Grupos tratores;
- Luminárias.

Na tabela 4.4 apresenta-se a distribuição de energia elétrica pelos diversos consumidores. Entende-se por equipamento os ventiladores, exaustores e os grupos tratores.

**Tabela 4.4** – Consumo anual de energia e respetiva percentagem dos diversos consumidores de eletricidade.

Equipamento	Consumo anual (kWh/ano)	Percentagem (%)
<b>Compressores</b>	$6,47 \times 10^4$	5
<b>Equipamentos</b>	$1,22 \times 10^6$	88
<b>Iluminação</b>	$9,99 \times 10^4$	7
<b>Total</b>	$1,39 \times 10^6$	100

No que diz respeito ao consumo de ar comprimido produzido nos compressores, este é utilizado para:

- Abertura/fecho do Let-off, dos rolos travão e espremedores, das flaps do vácuo, das válvulas das tinas e das tampas das estufas;
- Lubrificação dos grupos tratores;
- Bombeamento do soluto;
- Acionamento do raspador;
- Equipamentos de alinhamento da tela.

Relativamente ao ano de 2015, a energia elétrica consumida pela máquina de impregnar correspondente à produção de ao ar comprimido foi de 7%. Neste valor, inclui-se o caudal de fugas, sendo que algumas eram facilmente identificadas auditivamente ao longo de toda a máquina, podendo-se destacar os cilindros pneumáticos para abertura/fecho das tampas das estufas e os equipamentos de alinhamento da tela.

Em 2016, após reparação das fugas detetadas, verificou-se um consumo médio de 4%, resultando numa poupança de 2.430 €/ano em energia elétrica associada à produção de ar comprimido. Esta reparação teve um custo de investimento associado de 1.972 €, o que resulta num período de retorno de 0,8 anos.

Na tabela 4.5 apresenta-se a poupança anual obtida após reparação das fugas de ar comprimido.

**Tabela 4.5-** Consumo de ar comprimido na máquina de impregnar tela.

	Consumo específico (kWh/ano)	% Ar comprimido consumido	Custo (€/ano)
<b>2015</b>	$6,474 \times 10^4$	7%	5.737
<b>2016</b>	$3,732 \times 10^4$	4%	3.308
<b>Poupança</b>	$2,742 \times 10^4$	3%	2.430

O consumo de eletricidade associado aos ventiladores, exaustores e grupos tratores varia de acordo com as especificações do artigo a produzir e representa cerca de 88% do consumo elétrico da máquina de impregnar tela. Quanto à energia elétrica consumida pelos ventiladores e exaustores, esta pode ser analisada tendo em conta as respetivas curvas de potência. Para isso, foram construídas as curvas de potência em função velocidade do motor que se encontram no anexo A.

No que toca às luminárias o seu consumo elétrico corresponde a 7% do consumo de eletricidade da máquina. Constatou-se que existem luminárias com diferente número de lâmpadas e lâmpadas de diferentes potências. O levantamento efetuado das luminárias encontra-se no anexo A. O consumo elétrico devido à iluminação tem um custo associado de 8.853 €/ano.

### 4.3. Máquina de impregnar tela - Gás Natural

A máquina de impregnar utiliza gás natural nos queimadores como fonte de energia térmica. Na câmara de combustão dá-se a mistura comburente-combustível. O comburente é o ar e provém de um ventilador presente junto do queimador que direciona o ar para a câmara de combustão. Para saber se a combustão se dá adequadamente é necessário proceder à realização de balanços de massa aos queimadores ou então à análise química dos gases de exaustão. O consumo de gás natural também depende da especificação do artigo a ser produzido pois as temperaturas do interior das estufas variam.

Na tabela 4.6 apresentam-se as condições de operação nas estufas para os artigos em estudo. Os artigos P1 e P2 correspondem a artigos em poliéster e N1 e N2 a artigos em *nylon*.

**Tabela 4.6-** Condições de operação para cada um dos artigos estudados.

		Poliéster		Nylon	
		P1	P2	N1	N2
<b>Estufa 1</b>	<i>Temperatura (°C)</i>	175	175	160	155
	<i>% Exaustão</i>	20	20	20	20
	<i>% Ventilação Superior</i>	30	30	30	30
	<i>% Ventilação Inferior</i>	28	28	28	28
<b>Estufa 2</b>	<i>Temperatura (°C)</i>	175	175	140	155
	<i>% Exaustão</i>	100	100	50	50
	<i>% Ventilação Superior</i>	75	70	70	70
	<i>% Ventilação Inferior</i>	65	65	65	65
<b>Estufa 3</b>	<i>Temperatura (°C)</i>	250	250	235	235
	<i>% Exaustão</i>	99	99	95	95
	<i>% Ventilação Superior</i>	85	85	85	85
	<i>% Ventilação Inferior</i>	60	60	60	60
<b>Estufa 4</b>	<i>Temperatura (°C)</i>	250	250	235	235
	<i>% Exaustão</i>	20	20	20	20
	<i>% Ventilação Superior</i>	65	65	65	65
	<i>% Ventilação Inferior</i>	65	65	65	65
<b>Estufa 5</b>	<i>Temperatura (°C)</i>	150	150	*	235
	<i>% Exaustão</i>	32	32	*	10
	<i>% Ventilação Superior</i>	70	75	*	75
	<i>% Ventilação Inferior</i>	70	65	*	65
<b>Estufa 6</b>	<i>Temperatura (°C)</i>	250	248	*	235
	<i>% Exaustão</i>	60	60	*	10
	<i>% Ventilação Superior</i>	75	75	*	80
	<i>% Ventilação Inferior</i>	60	58	*	57
<b>Estufa 7</b>	<i>Temperatura (°C)</i>	250	248	*	235
	<i>% Exaustão</i>	15	15	*	15
	<i>% Ventilação Superior</i>	80	75	*	80
	<i>% Ventilação Inferior</i>	58	58	*	57

\*- Não aplicável estufa desligada

Para que se possa analisar o consumo de gás natural e avaliar medidas a implementar que possam promover a diminuição desse consumo, foi necessário realizar balanços de energia à máquina de impregnar tela.

O balanço global de energia a um sistema traduz-se pela equação 4.1 [11].

$$\dot{q} + W + \sum E_{\text{entrada}} - \sum E_{\text{saída}} = \Delta U \quad (4.1)$$

Onde:

$\dot{q}$ - Perdas térmicas (kW)

W- Potência (kW)

$E_{\text{entrada}}$ - Potência correspondente às correntes de entrada (kW)

$E_{\text{saída}}$ - Potência correspondente às correntes de saída (kW)

Considerando a situação de estado estacionário ( $\Delta U = 0$ ), que não há trabalho ao veio desprezando a variação da energia cinética e potencial e considerando o calor de reação, então a equação 4.1 pode escrever-se:

$$\dot{q} = \sum H_{\text{saída}} + \Delta H_{298}^0 - \sum H_{\text{entrada}} \quad (4.2)$$

Onde:

$H_{\text{saída}}$ - Entalpia das correntes de saída do sistema (kW)

$\Delta H_{298}^0$ - Calor de combustão (kW)

$H_{\text{entrada}}$ - Entalpia das correntes de entrada no sistema (kW)

Sendo as entalpias das correntes calculadas pela equação 4.3 [11]:

$$H = \dot{m} \times \int_{T_{\text{ref}}}^T C_p dT \times (T - T_{\text{ref}}) \quad (4.3)$$

Onde:

H- Entalpia (kW)

$\dot{m}$ - Caudal mássico (kg/s)

$C_p$ - Calor específico (kJ/(kg. °C))

T- Temperatura (°C)

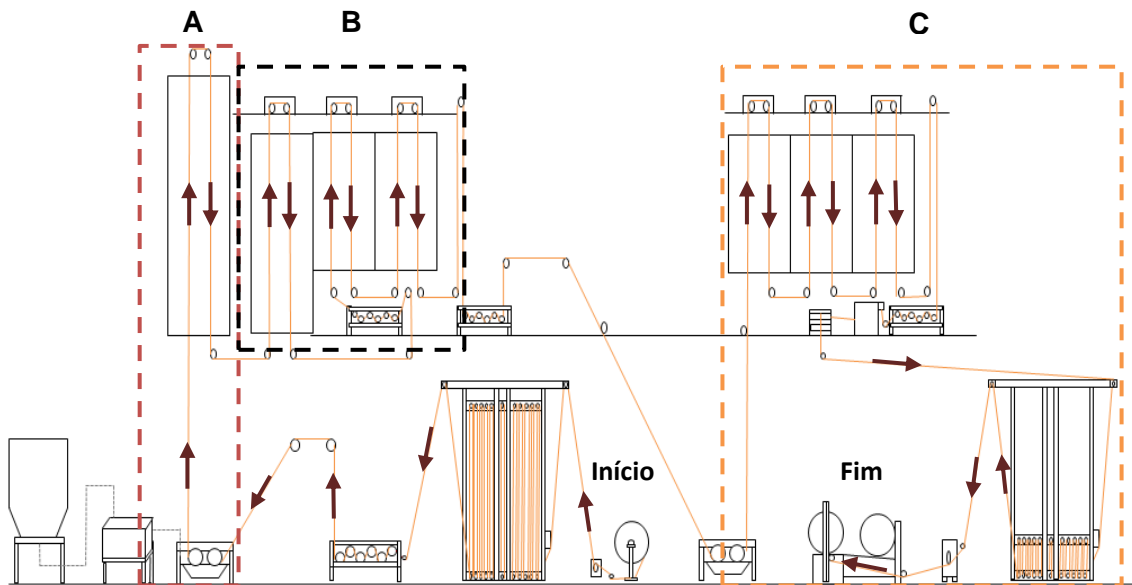
$T_{\text{ref}}$ - Temperatura de referência (°C)

Para a realização dos balanços de energia é necessário definir as fronteiras do sistema assim como as correntes de entrada e saída.

Cada estufa da máquina de impregnar possui uma chaminé interior para encaminhar os gases de exaustão para o exterior do edifício. No entanto, por questões de manutenção, as chaminés interiores das estufas 2, 3 e 4 encontram-se unidas numa só chaminé no exterior, sendo que o mesmo acontece nas chaminés interiores das estufas 5, 6 e 7. Só na estufa 1 existe uma chaminé exterior individual. Esta distribuição pode ser visualizada

no anexo B onde se apresenta uma vista em corte da máquina de impregnar tela. Assim, as fronteiras do sistema foram definidas tendo em consideração as ligações das chaminés interiores a uma mesma chaminé exterior.

Na figura 4.5 encontra-se uma representação esquemática das fronteiras do sistema.



**Figura 4.5-** Esquema representativo das fronteiras do sistema.

**Legenda:**

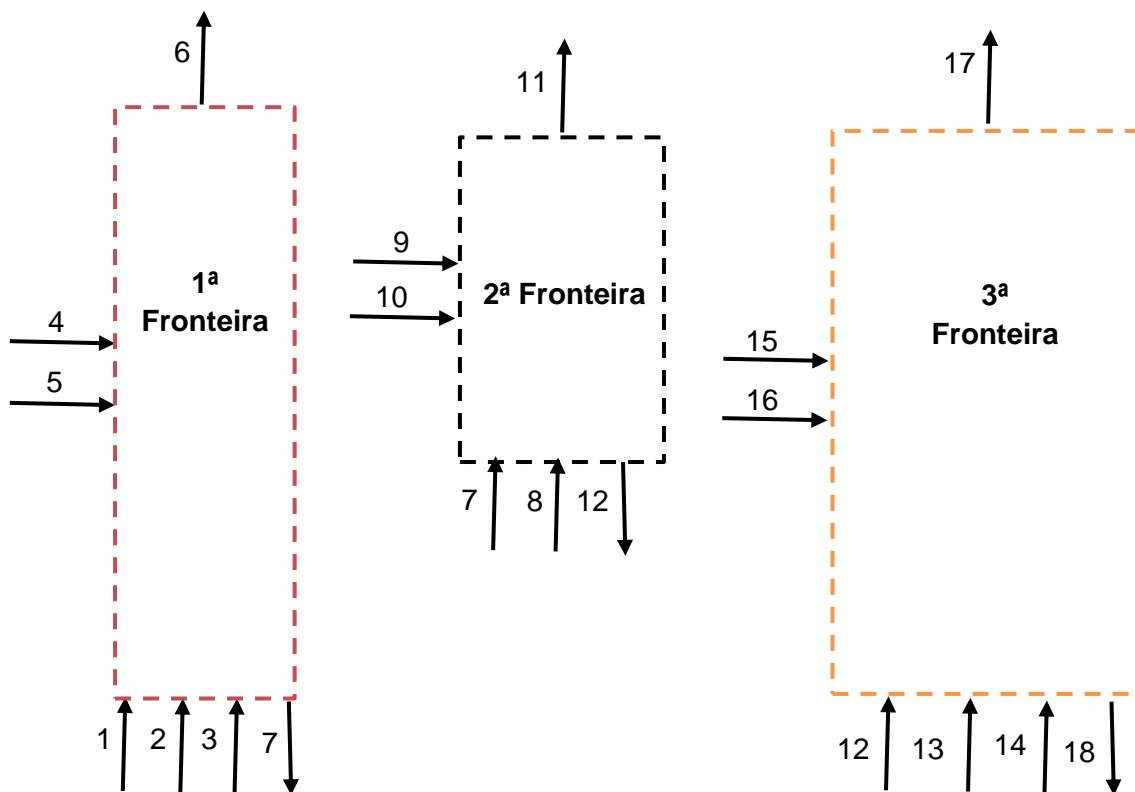
- A- Primeira fronteira
- B- Segunda fronteira
- C- Terceira fronteira

Após a definição das fronteiras, torna-se necessário identificar todas as correntes de entrada e saída em cada fronteira.

As correntes de entrada na primeira fronteira são: a solução de impregnação, a tela em “verde”, o ar fresco que entra pelas aberturas de entrada e saída da tela, o combustível e o ar de combustão. À saída da primeira fronteira tem-se os gases de exaustão e a tela húmida.

Na segunda fronteira, as correntes de entrada são: a tela húmida que saiu da primeira fronteira, o ar fresco, o combustível e o ar de combustão. Por sua vez, à saída da segunda fronteira tem-se a tela com menor teor de humidade e os gases de exaustão.

As correntes de entrada da terceira fronteira são a tela que saiu da segunda fronteira, o ar fresco, o combustível, e podem ou não ter uma outra corrente de solução de impregnação dependendo do artigo a produzir. À saída desta fronteira tem-se os gases de exaustão e a tela impregnada. Na figura 4.6 mostra-se uma representação esquemática de todas as correntes de entrada e saída do sistema.



**Figura 4.6-** Representação esquemática de todas as correntes de entrada e saída do sistema.

**Legenda:**

**1ª Fronteira**

- 1- Corrente de entrada da solução de impregnação
- 2- Corrente de entrada da tela em “verde”
- 3- Corrente de entrada do ar fresco na 1ª fronteira
- 4- Corrente de entrada do ar de combustão na 1ª fronteira
- 5- Corrente de entrada do combustível na 1ª fronteira
- 6- Corrente de saída dos gases de exaustão na 1ª fronteira

**2ª Fronteira**

- 7- Corrente de saída da tela húmida
- 8- Corrente de entrada do ar fresco na 2ª fronteira
- 9- Corrente de entrada do ar de combustão na 2ª fronteira
- 10- Corrente de entrada do combustível na 2ª fronteira
- 11- Corrente de saída da tela na 2ª fronteira
- 12- Corrente de saída dos gases de exaustão na 2ª fronteira

**3ª Fronteira**

- 13- Corrente de entrada da solução de impregnação na 3ª fronteira
- 14- Corrente de entrada do ar fresco na 3ª fronteira
- 15- Corrente de entrada do ar de combustão na 3ª fronteira
- 16- Corrente de entrada do combustível na 3ª fronteira
- 17- Corrente de saída dos gases de exaustão na 3ª fronteira
- 18- Corrente de saída da tela impregnada

### 4.3.1. Balanços de energia

Para se avaliar as necessidades térmicas do sistema, foi necessário calcular a potência térmica de cada uma das correntes de entrada e saída do sistema e definir uma temperatura de referência que neste caso foi de 25 °C. Assim, as potências térmicas de entrada no sistema são: a potência térmica do combustível, a potência do ar fresco, a potência do ar de combustão, a potência térmica da solução de impregnação e a potência da tela em “verde”. As potências correspondentes às correntes de saída do sistema são: a potência dos gases de exaustão e a potência térmica da tela com solução de impregnação. Os dados necessários para proceder aos balanços de energia encontram-se no anexo C. Os valores apresentados neste capítulo foram baseados no consumo de gás natural anual médio para cada um dos artigos.

**Potência térmica do combustível**

O caudal de combustível foi determinado através de leituras efetuadas no contador de gás natural da máquina de impregnar tela num determinado período de tempo. Esse valor foi multiplicado pelo fator corretivo indicado no contador do gás industrial de modo a se obter o valor consumido real. A potência de combustão do combustível foi então

calculada pela equação 4.4 [12]. Na tabela 4.7 encontram-se os resultados obtidos para os calores de combustão.

$$-\Delta H_{298}^0 = \dot{V}_{\text{Combustível}} \times \text{PCI} \quad (4.4)$$

Onde:

$-\Delta H_{298}^0$ - Calor de combustão (kW)

$\dot{V}_{\text{Combustível}}$ - Caudal volumétrico de combustível (m<sup>3</sup>/h)

PCI- Poder Calorífico Inferior (kWh/m<sup>3</sup>)

**Tabela 4.7-** Valores obtidos para o calor de combustão.

Fronteira	Artigo	$-\Delta H_{298}^0$ (kW)
1 <sup>a</sup>	P1	1019
	P2	1034
	N1	791
	N2	800
2 <sup>a</sup>	P1	1804
	P2	1931
	N1	1549
	N2	1561
3 <sup>a</sup>	P1	1652
	P2	1715
	N1	*
	N2	948

\*- Não aplicável (fronteira com as estufas todas desligadas)

Usa-se o valor do Poder Calorífico Inferior [13] pois, apenas é considerada a energia libertada na forma de calor, tendo em atenção que a água obtida se encontra na fase gasosa. No anexo D.1 apresenta-se um exemplo de cálculo.

### Potência do ar fresco

Com o auxílio de um anemómetro mediou-se a velocidade do ar nas aberturas de entrada e saída da tela nas estufas que correspondem a ranhuras de forma retangular. Pela equação 4.5 calculou-se o caudal volumétrico de ar fresco considerando a temperatura

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

do ar fresco igual a 35 °C. Esta temperatura foi medida com o auxílio de um termo higrómetro.

$$\dot{m}_{\text{ar fresco}} = v_{\text{ar fresco}} \times \rho_{\text{ar fresco}} \times A_{\text{abertura}} \tag{4.5}$$

Onde:

$\dot{m}_{\text{ar fresco}}$ - Caudal mássico de ar fresco (kg/h)

$v_{\text{ar fresco}}$ - Velocidade do ar fresco (m/s)

$\rho_{\text{ar fresco}}$ - Massa específica do ar fresco (kg/m<sup>3</sup>)

$A_{\text{abertura}}$ - Área da abertura de entrada de ar fresco (m<sup>2</sup>)

Para calcular a entalpia do ar fresco recorreu-se à equação 4.3.

Na tabela 4.8 apresentam-se os valores da entalpia do ar fresco obtidos e no anexo D.2 um exemplo de cálculo.

**Tabela 4.8**– Valores obtidos para a potência térmica do ar fresco.

Fronteira	Artigo	H <sub>ar fresco</sub> (kW)
1 <sup>a</sup>	P1	8
	P2	8
	N1	8
	N2	8
2 <sup>a</sup>	P1	16
	P2	16
	N1	16
	N2	16
3 <sup>a</sup>	P1	15
	P2	15
	N1	*
	N2	15

\*- Não aplicável (fronteira com as estufas todas desligadas)

**Potência térmica do ar de combustão**

O ar de combustão é admitido pelo ventilador presente junto ao queimador. Para conhecer o caudal de ar admitido para a câmara de combustão, foi necessário efetuar medições de velocidade do ar à entrada do ventilador, efetuadas do mesmo modo que se procedeu para a medição da velocidade do ar fresco. Uma vez que, a velocidade de

entrada do ar de combustão difere ao longo do raio da grelha do ventilador, recorreu-se à média da velocidade para calcular o caudal de ar admitido (equação 4.6) [14].

$$\dot{V}_{\text{ar combustão}} = V_{\text{ar combustão}} \times A_{\text{livre}} \quad (4.6)$$

Onde:

$\dot{V}_{\text{ar combustão}}$ - Caudal volumétrico do ar de combustão (m<sup>3</sup>/h)

$V_{\text{ar de combustão}}$ - Velocidade do ar de combustão (m/s)

$A_{\text{livre}}$ - Área de escoamento livre (m<sup>2</sup>)

O exemplo de cálculo é apresentado no anexo D.3. A entalpia do ar de combustão foi considerada zero uma vez que a sua temperatura média de entrada é de 25 °C e portanto igual à temperatura de referência.

### Potência térmica da solução de impregnação

O cálculo do caudal mássico da solução de impregnação foi obtido recorrendo-se aos registos de consumo de solução fornecidos pela C-ITA através de equação 4.7. O poder calorífico da solução de impregnação foi calculado a partir da equação 4.8 [11].

$$\dot{m}_{\text{Dip}} = \frac{m_{\text{Dip}}}{\text{rolo}} \times v \times \frac{1}{c_{\text{rolo}}} \quad (4.7)$$

$$\bar{c}_p = \sum_{i=1}^n y_i \times c_{p_i} \quad (4.8)$$

Onde:

$\dot{m}_{\text{Dip}}$ - Caudal mássico da solução de impregnação

$m_{\text{Dip}}/\text{rolo}$ - Massa de solução de impregnação por rolo de tela em “verde” (kg/rolo)

$v$ - Velocidade de impregnação (m/s)

$c_{\text{rolo}}$ - Comprimento do rolo de tela em “verde” (m)

$\bar{c}_p$ - Capacidade calorífica (kJ/(kg.K))

$y_i$ -fração molar do componente  $i$

$c_{p_i}$ - Calor específico do componente  $i$

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

Para determinar a entalpia recorreu-se à equação 4.3 para uma temperatura da solução de impregnação igual a 15 °C (temperatura à qual se encontra a solução de impregnação).

Os valores obtidos para a potência térmica da solução de impregnação apresentam-se na tabela 4.9 e o exemplo de cálculo no anexo D.4.

**Tabela 4.9-** Valores obtidos para a potência térmica da solução de impregnação.

Dip	Artigo	H <sub>Dip</sub> (kW)
1	P1	-7
	P2	-9
	N1	-3
	N2	-4
2	P1	-2
	P2	-3
	N1	*
	N2	*

**Potência térmica da tela em “verde”**

O caudal mássico da tela em “verde” foi calculado a partir da massa específica do artigo e da velocidade com que este circula na máquina de impregnar (equação 4.9).

$$\dot{m}_{\text{tela em "verde"}} = v \times \frac{m_{\text{tela em "verde"}}}{C_{\text{rolo}}} \quad (4.9)$$

Onde:

$\dot{m}_{\text{tela em "verde"}}$ - Caudal mássico da tela em “verde” (kg/s)

v- Velocidade de impregnação (m/s)

$m_{\text{tela em "verde"}}$  - Massa da tela em “verde” (kg)

$C_{\text{rolo}}$  - Comprimento do rolo de tela em “verde” (m)

Assim reúnem-se as condições para calcular o valor da entalpia da tela em “verde” pela equação 4.3. Os valores obtidos para uma temperatura de 15 °C encontram-se na tabela 4.10. O exemplo de cálculo está no anexo D.5.

**Tabela 4.10-** Valores obtidos para a potência térmica da tela em “verde”.

Artigo	H tela em “verde” (kW)
P1	-7,2
P2	-8,5
N1	-3,8
N2	-7,9

### Potência térmica dos gases de exaustão

Como referido anteriormente, no anexo B apresenta-se uma vista em planta do prédio da Máquina Zell onde se pode ver qual a posição relativa de cada chaminé relativamente à posição e ligação às estufas. O calor específico dos gases de exaustão foi obtido pela equação 4.10 tendo em consideração que a composição desta corrente pode ser considerada igual à composição do ar atmosférico, segundo os dados de uma análise aos gases de exaustão elaborada por uma empresa externa.

$$\bar{C}_p = \sum_{i=1}^n y_i \frac{\int_{298}^T (a + bT + cT^2) dT}{\Delta T} \quad (4.10)$$

Onde:

$\bar{C}_p$ - Calor específico médio (kJ/(kg.K))

$y_i$ -fração molar do componente i

a, b e c – Constantes para cálculo do calor específico molar de gases

T- Temperatura (K)

A potência dos gases de exaustão foi calculada através da equação 4.3 para uma temperatura de referência de 25 °C e uma temperatura dos gases de exaustão igual à temperatura média a que se encontram as estufas ligadas a uma dada chaminé exterior.

Os resultados encontram-se na tabela 4.11 e o seu exemplo de cálculo no anexo D.6.

**Tabela 4.11-** Valores obtidos para a potência térmica dos gases de exaustão.

Fronteira	Artigo	H gases de exaustão (kW)
1 <sup>a</sup>	P1	302
	P2	302
	N1	278
	N2	268
2 <sup>a</sup>	P1	792
	P2	792
	N1	547
	N2	553
3 <sup>a</sup>	P1	378
	P2	376
	N1	0
	N2	127

\*- Não aplicável (fronteira com as estufas todas desligadas)

### Potência térmica da tela com solução de impregnação

À saída da primeira fronteira, a tela possui um determinado teor de humidade adquirido pela absorção da solução de impregnação. Devido a esta absorção, o valor da potência térmica da tela, não pode ser calculado como na equação 4.3 pois torna-se necessário acrescentar a potência térmica da solução de impregnação. Assim, tanto para a tela húmida como para a tela impregnada a potência térmica é calculada através da equação 4.11 [11]. As potências térmicas obtidas para a tela húmida apresentam-se na tabela 4.12 e as potências térmicas referentes à tela impregnado na tabela 4.13. O exemplo de cálculo para estas potência encontra-se no anexo D.7.

$$H_{\text{tela impregnada}} = \dot{m}_{\text{tela em "verde"}} \times C_{p_{\text{tela em "verde"}}} \times (T_{\text{tela em "verde"}} - T_{\text{ref}}) + \dot{m}_{\text{Dip}} \times y_{\text{Dip}} \times C_{p_{\text{Dip}}} \times (T_{\text{Dip}} - T_{\text{ref}}) \quad (4.11)$$

Onde:

$H_{\text{tela impregnada}}$  - Entalpia da tela impregnada (kW)

$\dot{m}_{\text{tela em "verde"}}$  – Caudal mássico da tela em “verde” (kg/s)

$C_{p_{\text{tela em "verde"}}$  – Calor específico da tela em “verde” (kJ/(kg. °C)

$T_{\text{tela em "verde"}}$  – Temperatura da tela em “verde” (°C)

$T_{\text{ref}}$  – Temperatura de referência (°C)

$\dot{m}_{\text{Dip}}$  – Caudal mássico de solução de impregnação (kg/s)

$y_{Dip}$  – fração mássica de solução de impregnação

$C_{pDip}$  – Calor específico da solução de impregnação (kJ/(kg. °C))

$T_{Dip}$  – Temperatura da solução de impregnação (°C)

**Tabela 4.12-** Valores obtidos para a potência térmica da tela húmida.

Fronteira	Artigo	H tela húmida (kW)
Saída de 1ª e entrada na 2ª	P1	54
	P2	67
	N1	21
	N2	43
Saída da 2ª	P1	116
	P2	139
	N1	45
	N2	89
Entrada na 3ª	P1	10
	P2	12
	N1	4
	N2	9

**Tabela 4.13 –** Valores obtidos para a potência térmica da tela em “verde”.

Artigo	H tela impregnada (kW)
P1	101
P2	122
N1	-2
N2	121

### Perdas térmicas

Para se efetuar uma otimização energética, trabalhou-se no sentido de diminuir as perdas térmicas. Calcularam-se então as perdas térmicas para cada uma das fronteiras através da equação 4.1 para posteriormente se poderem comparar com as obtidas pelas medidas de otimização. Os resultados obtidos encontram-se apresentados na tabela 4.14 e o exemplo de cálculo no anexo D.8.

**Tabela 4.14** – Valores obtidos para as perdas térmicas.

Artigo	Fronteira	$\Sigma H_{\text{entrada}}$ (kW)	$\Sigma H_{\text{saída}}$ (kW)	$-\Delta H_{298}^0$ (kW)	$\dot{q}$ (kW)	$\dot{q}_{\text{total}}$ (kW)
P1	1 <sup>a</sup>	-6,7	355,9	1019,1	-657	-2505
	2 <sup>a</sup>	70,1	908,3	1803,7	-965	
	3 <sup>a</sup>	22,9	478,9	1652,3	-883	
P2	1 <sup>a</sup>	-10,0	368,1	1034,0	-656	-2979
	2 <sup>a</sup>	82,3	931,4	1930,5	-1081	
	3 <sup>a</sup>	24,3	497,3	1715,2	-1242	
N1	1 <sup>a</sup>	0,6	298,8	791,0	-493	-1493
	2 <sup>a</sup>	36,7	591,5	1548,9	-994	
	3 <sup>a</sup>	4,3	-1,6	0,0	-6	
N2	1 <sup>a</sup>	-4,5	311,0	799,5	-484	-2186
	2 <sup>a</sup>	59,1	641,6	1560,6	-978	
	3 <sup>a</sup>	24,0	247,7	947,7	-724	



## 5. Implementação do Sistema ECO VAC

Atualmente, as estufas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 da máquina de impregnar tela possuem o sistema ECO VAC instalado, contudo este não se encontra implementado. Neste sentido, foi desenvolvido um estudo para definir o *set point* relativo à pressão diferencial entre o exterior e o interior de cada estufa, que permitirá o controlo da exaustão no sentido de diminuir o consumo de gás natural.

### 5.1. Caraterísticas do Sistema

Como já foi descrito, o sistema ECO VAC permite fixar o diferencial de pressão no interior de cada estufa. Este sistema é constituído por dois tubos (um no interior e outro no exterior da estufa) ligados a um transmissor de pressão que envia a informação do diferencial de pressão ao PLC que controla o caudal de exaustão (ver figura 3.12). Contudo, o diferencial de pressão medido encontra-se limitado pela gama de trabalho do transdutor de pressão, sendo que esta varia entre 0 e 0,500 mbar.

Assim, com a implementação deste sistema pretende-se determinar qual o diferencial de pressão ótimo. O valor ótimo será aquele que permite poupar gás natural, baixando a exaustão, sem alterar as especificações do produto final.

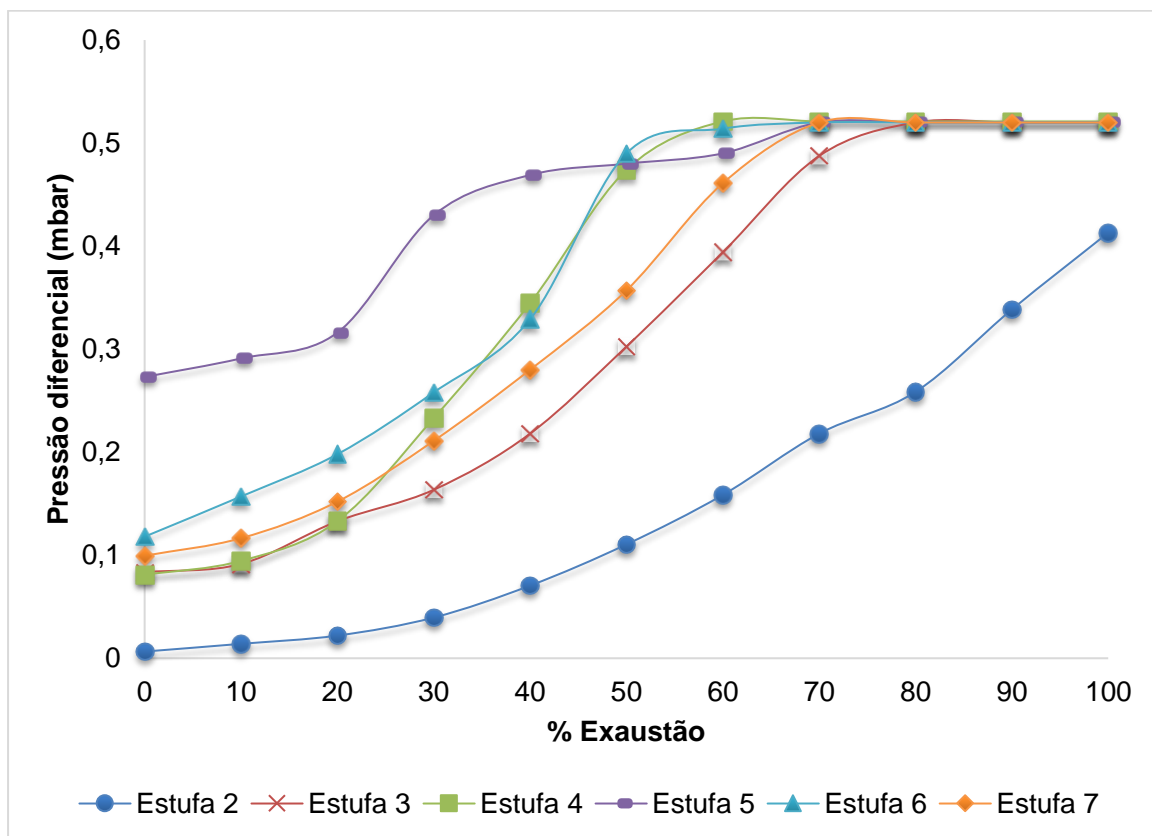
### 5.2. Dados experimentais

Devido à escassa informação sobre o sistema ECO VAC, foi necessário realizar ensaios com uma tela que é usada para limpeza da máquina designada por *Linner* pois, não se conheciam os impactos que este sistema poderia ter na tela produzida. O *Linner*, pela sua diferente construção, não permite o uso de temperaturas superiores a 200°C no interior das estufas. Assim, utilizaram-se temperaturas o mais próximo possível das temperaturas de operação usadas para os artigos que correspondem aos valores apresentados na tabela 5.1. Na tabela 5.1 também se faz referência à altura das estufas e se estas possuem ou não tampa no topo. Entende-se por tampa uma estrutura metálica que cobre os rolos no topo das estufas impedindo assim que, quando a tela inverte o seu sentido no topo das estufas, arrefeça.

**Tabela 5.1-** Condições utilizadas no ensaio utilizando *Linner*.

Estufa	Temperaturas de operação (°C)	Temperatura testada com <i>Linner</i> (°C)	Altura (m)	Com/ Sem tampa no topo da estufa
2	140-175	175	17,74	Sem
3	235-250	200	14,03	Com
4	235-250	200	14,03	Com
5	150-235	150	14,03	Sem
6	235-250	200	14,03	Com
7	235-250	200	14,03	Com

Na figura 5.1, estão representados os valores de pressão diferencial obtidos em função da variação da percentagem de exaustão das estufas. De notar que nestes ensaios o valor da pressão atmosférica foi de 1011 mbar.



**Figura 5.1-** Valores de pressão diferencial obtidos em função da percentagem de exaustão.

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

Como seria de esperar quando a % de exaustão aumenta a pressão interior baixa levando por isso a um valor de pressão diferencial maior. Para uma mesma % de exaustão verifica-se entre as estufas 3,4,6 e 7 uma tendência semelhante relativamente ao valor da pressão diferencial registado. Nas estufas 2 e 5 obtém-se um comportamento diferente. Pela análise da figura 5.1 verifica-se que, a estufa 2 possui um comportamento diferente das restantes, podendo ser justificado pelo facto da estufa 2 não possuir tampa no topo e apresentar uma altura superior às restantes estufas que possuem o sistema ECO VAC, sendo mais propícia para que aí se faça sentir o “o efeito chaminé. No caso da estufa 5, o valor de pressão diferencial inicial é diferente dos restantes pelo facto desta estufa não possuir tampa no topo e, portanto, estar mais vulnerável a que ocorra “o efeito chaminé”. O efeito chaminé consiste na movimentação vertical de uma massa gasosa devido à diferença de temperatura ou pressão com o meio envolvente. Este efeito é ainda potencializado pela distância vertical entre saída e entrada de ar e pelo aumento do tamanho da abertura, sendo que o tamanho de abertura não tem relevância neste estudo, pois é igual em todas as estufas. Pelo facto da estufa 5 é que apresentar pressão diferencial maior para uma exaustão 0% pode-se afirmar que, apesar da altura potencializar “o efeito chaminé”, este é mais notório na estufa 5, estando envolvidos outros fatores que não se conseguiu avaliar. Nas restantes estufas foi atingido o valor máximo que o sistema consegue contabilizar (0,500 mbar).

Após este conjunto de ensaios, reuniu-se a informação necessária para prosseguir os ensaios com os artigos em estudo. Para se implementar o sistema ECO-VAC é então necessário saber qual a pressão diferencial a impor, de maneira a assegurar a mínima exaustão possível e assim diminuir o consumo de gás natural. Para se poder definir qual o valor de pressão diferencial a aplicar, escolheu-se o valor mínimo possível desta variável tendo como critério experimental a não visualização de fumos nem pelas extremidades das estufas nem pelas chumaceiras . O fumo nas chumaceiras pode causar um incêndio, pois a sujidade e a acumulação de solução de impregnação tem tendência a acumular-se nesses locais.

Com esse valor definido, retiraram-se os consumos de gás natural por artigo para cada estufa.

A estufa 1 não possui instalado o sistema ECO VAC, como tal otimizou-se o seu caudal de exaustão até ao valor mínimo possível.

Como o valor máximo de pressão diferencial admitido pelos transdutores de pressão instalados é de 0,500mbar, no caso da estufa 3 não é possível trabalhar com o ECO VAC, pois não se consegue atingir a % de exaustão adequada para o valor máximo de

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

pressão diferencial permitido, pois observa-se fumo a sair pelas chumaceiras. Assim, procedeu-se à otimização da exaustão pelo mesmo processo que foi utilizado na estufa 1.

Com a diminuição do caudal de exaustão menos ar quente é extraído do interior das estufas e conseqüentemente menos ar fresco entra pelas aberturas de entrada e de saída da tela, consumindo-se assim um menor caudal de gás natural. Considerando que o caudal mássico de ar fresco e o de voláteis da tela impregnada (constituídos maioritariamente por vapor de água) são desprezáveis, têm que se garantir que a soma do caudal mássico do ar de combustão com o caudal mássico de combustível é igual ou superior ao caudal mássico dos gases de exaustão.

Uma vez que, a variação da pressão atmosférica faz variar a pressão diferencial no interior da estufa, torna-se necessário realizar ensaios no mesmo dia com e sem o sistema ECO VAC em funcionamento. Com a alteração da exaustão o caudal mássico de ar fresco também sofre alteração, no entanto, pelo facto da temperatura de referência ser considerada igual à temperatura de entrada do ar fresco, a sua potência térmica assume na mesma o valor de zero. Assim, as potências térmicas do ar fresco, do ar de combustão, da solução de impregnação, do tecido “em verde” e do tecido com solução de impregnação apresentam o mesmo valor que as apresentadas no capítulo 4.3 pois, com esta otimização está-se apenas a alterar a potência térmica do combustível e dos gases de exaustão e conseqüentemente a potência térmica perdida. Os resultados apresentados na tabela 5.2 dizem respeito às as condições ambientais a que foram realizados os ensaios..

**Tabela 5.2-** Condições em que foram efetuados os ensaios.

Artigo	Temperatura ambiente (°C)	%Humidade	Pressão atmosférica (mbar)
P1	27,2	50,5	1017,6
P2	30,9	41,1	1018,2
N1	29,5	52	1017,5
N2	26,5	51	1018

Na tabela 5.3 apresentam-se as condições ótimas de pressão diferencial e de exaustão e as condições atuais para cada um dos artigos em estudo assim como, os respetivos consumos de gás natural. O exemplo de cálculo e os resultados para a sua validação encontram-se no anexo E.1. Como o caudal de exaustão com otimização ainda se

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

encontra longe do caudal mínimo poder-se-ia diminuir o *set point* definido, mas tal requer especial atenção, pois com valores mais baixos verifica-se a saída de fumos pelo topo das estufas e provoca uma maior sujidade no interior das mesmas.

**Tabela 5.3-** Condições ótimas de pressão diferencial e de exaustão.

Estufa	Artigo	% Exaustão atual	% Exaustão otimizada	Pressão diferencial (mbar)	Gás natural atual (m <sup>3</sup> /h)	Gás natural c/ otimização (m <sup>3</sup> /h)
1	P1	20	10	*	91,9	89,5
	P2	20	10	*	93,0	90,6
	N1	20	10	*	67,0	64,5
	N2	20	10	*	73,9	72,3
2	P1	100	97-100	0,450	47,3	45,3
	P2	100	97-100	0,450	51,4	50,6
	N1	50	5-11	0,150	24,4	21,2
	N2	50	5-22	0,150	37,4	33,5
3	P1	99	85	**	80,7	73,9
	P2	99	85	**	83,6	76,3
	N1	95	80	**	61,4	56,6
	N2	95	80	**	75,5	69,6
4	P1	20	5-21	0,150	19,8	19,9
	P2	20	5-23	0,150	24,7	19,4
	N1	20	6-15	0,150	16,9	16,6
	N2	20	6-15	0,150	18,8	18,4
5	P1	32	17-22	0,300	43,7	43,2
	P2	32	17-22	0,300	48,7	47,5
	N1	***	***	***	***	***
	N2	10	10-12	0,380	62,0	61,1
6	P1	60	65-70	0,500	64,4	67,2
	P2	60	65-67	0,500	66,0	68,3
	N1	***	***	***	***	***
	N2	10	43-44	0,300	38,6	46,2
7	P1	15	21-23	0,140	40,9	42,7
	P2	15	21-26	0,140	39,5	41,7
	N1	***	***	0,140	***	***
	N2	15	21-22	0,140	37,0	38,7

\*- Estufa sem instalação do sistema ECO VAC

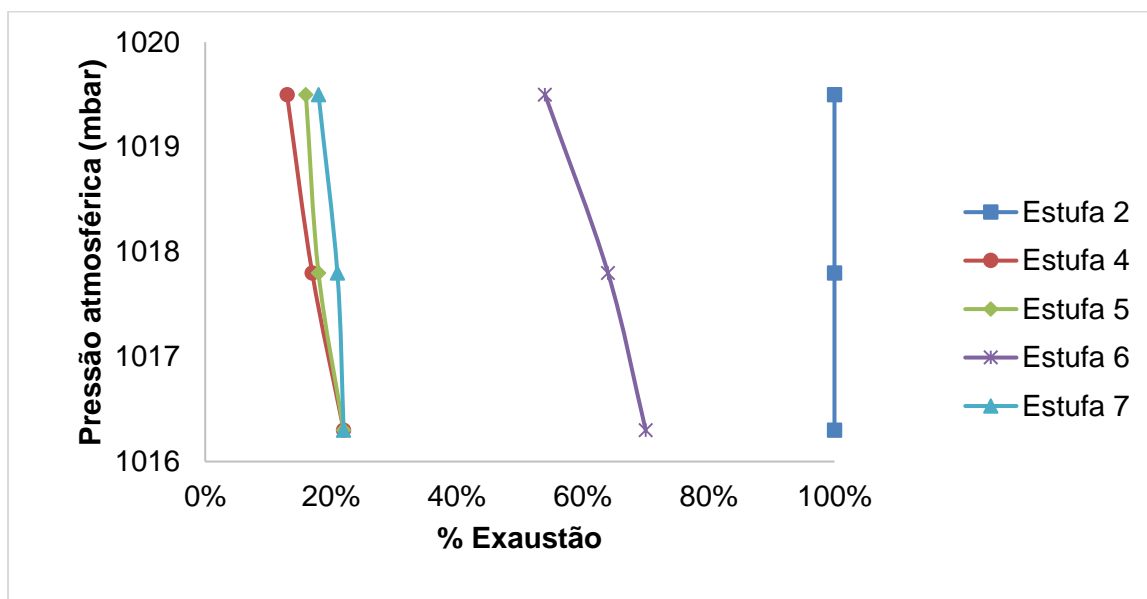
\*\* - Limite máximo do ECO VAC não permite as condições desejadas

\*\*\* - Estufa desligada

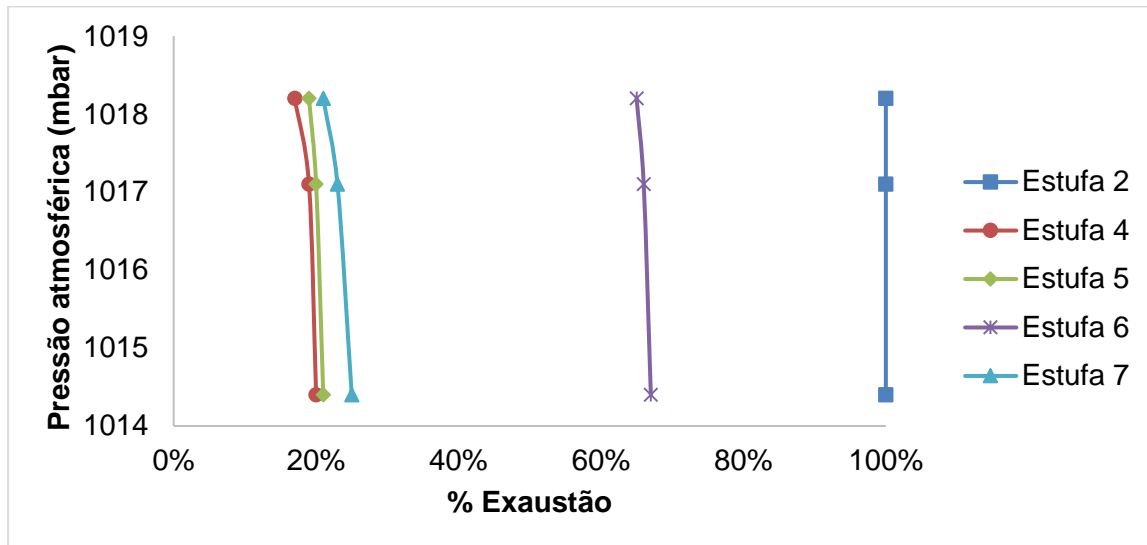
OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

Como seria de esperar com a diminuição da percentagem de exaustão diminui-se o consumo de gás natural. Na tabela 5.3 observa-se que, para as estufas 1, 2, 3 e 5, a diminuição do caudal de gás é notória. No caso da estufa 4, para os ensaios efetuados com a mesma pressão atmosférica, não se verificaram grandes variações pois, durante estes ensaios, a percentagem de exaustão rondou os 20%. Nas estufas 6 e 7, aumentou-se um pouco a percentagem de exaustão e consequentemente o caudal de gás natural pois, verificou-se que o valor praticado não era o mais adequado uma vez que saíam fumos pela tampa e pelas chumaceiras.

Nas figuras 5.2 e 5.3 apresenta-se a influência que a pressão atmosférica tem na percentagem de exaustão para os artigos de poliéster, utilizando os valores de *set point* de pressão diferencial definidos para cada estufa.



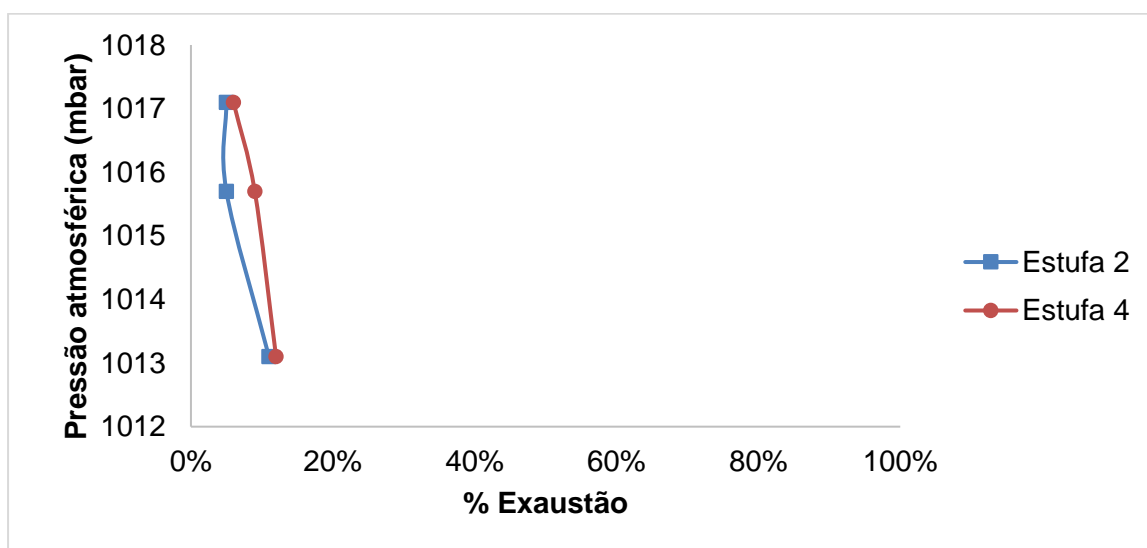
**Figura 5.2-** Influência da pressão atmosférica na percentagem de exaustão no artigo P1 a operar com o sistema ECOVAC.



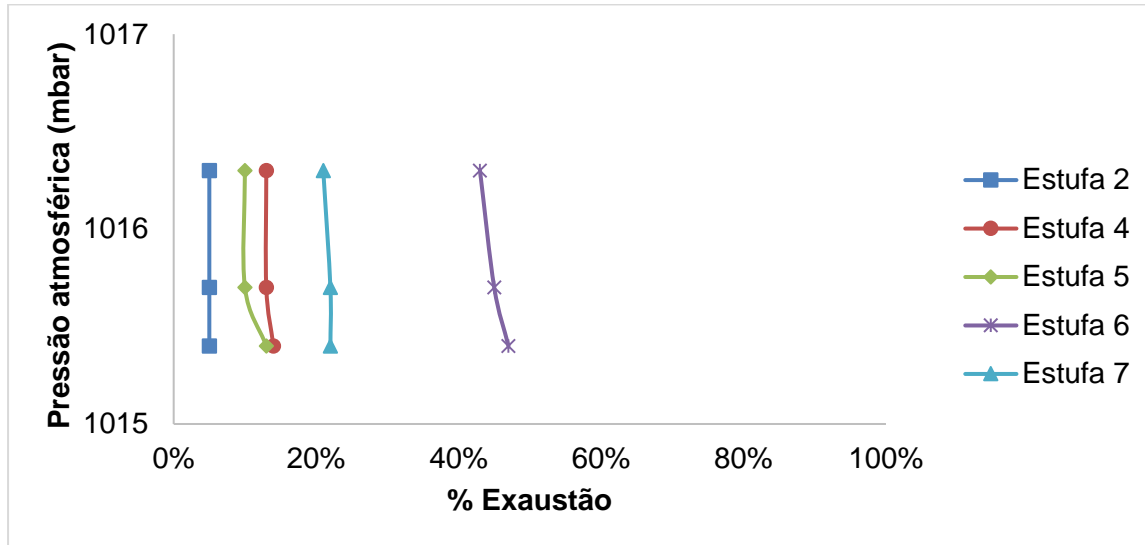
**Figura 5.3-** Influência da pressão atmosférica na percentagem de exaustão para cada estufa utilizada no artigo P2 a operar com o sistema ECOVAC.

As figuras 5.2 e 5.3 correspondem aos artigos de poliéster. Nestes artigos verificou-se que, na estufa 2 a percentagem de exaustão estabiliza em 100% de exaustão, enquanto que nas restantes estufas a percentagem de exaustão diminui com o aumento da pressão atmosférica.

Nas figuras 5.4 e 5.5 apresenta-se a influência que a pressão atmosférica tem na percentagem de exaustão para os artigos de *nylon*.



**Figura 5.4-** Influência da pressão atmosférica na percentagem de exaustão para cada estufa utilizada no artigo N1 a operar com o sistema ECOVAC.



**Figura 5.5-** Influência da pressão atmosférica na percentagem de exaustão para cada estufa utilizada no artigo N2 a operar com o sistema ECOVAC.

As figuras 5.4 e 5.5 dizem respeito aos artigos de *nylon*. Pela análise da figura 5.4 observa-se que para as estufas 2 e 4, a percentagem de exaustão diminui com o aumento da pressão atmosférica. O mesmo ocorre na figura 5.5 com exceção da estufa 2 que estabiliza em 5% de exaustão.

Ao longo da realização destes ensaios, foram encontradas diversas dificuldades inerentes ao planeamento da produção e também às condições atmosféricas. O planeamento da produção é feito com base na prioridade das encomendas, o que por vezes, não permitiu que os artigos em estudo fossem impregnados no horário laboral, em que decorreu o estágio.

Um dos objetivos desta dissertação era avaliar o efeito que a pressão atmosférica tem na percentagem de exaustão definida pelo *set point* admitido. Para isso, era importante fazer ensaios em dias em que a pressão atmosférica atingisse os valores máximos e mínimos previstos para a localidade de Lousado, pois não foram possíveis. De acordo com as figuras 3.15 e 3.16 os valores da pressão atmosférica no ano de 2015 e no ano de 2016 foram respetivamente 994,7mbar e 984,5 mbar para o valor mínimo e , 1.034 mbar e 1.028 mbar para o valor máximo. No entanto, no decorrer do trabalho, nos dias em que era possível realizar ensaios, nunca se obteve valores da pressão atmosférica correspondentes aos valores mínimos observados. Deste modo, só foi possível apresentar valores da exaustão ótima para os valores mais altos da pressão observada nesta zona cujos, são os mais frequentes.

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

Os valores mais baixos de pressão atmosférica são os mais problemáticos no sentido de poder diminuir a exaustão pois, como se verifica nos gráficos que apresentam a influência da pressão atmosférica na percentagem de exaustão, com a diminuição de pressão atmosférica a percentagem de exaustão aumenta e, aumentando assim o caudal de gás natural.



## 6. Otimização energética

Com a preocupação em reduzir a fatura energética foram desenvolvidas propostas de otimização dos consumos energéticos. Estas propostas visam a otimização do consumo elétrico, bem como a implementação do sistema ECO VAC que permitirá a poupança de gás natural. Este sistema atua ao nível da exaustão que pode ser controlada pela diferença de pressão entre a atmosfera e o interior de cada estufa. A Poupança de gás natural também pode ser avaliada por alteração de outros parâmetros como: a diminuição da temperatura dentro das estufas com o conseqüente aumento da taxa de ventilação de modo a proporcionar uma igual taxa de transferência de calor para a tela. No anexo E encontram-se os dados e os resultados obtidos para as otimizações energéticas.

### 6.1. Otimização do consumo de energia elétrica

Com o intuito de se diminuir o consumo de energia elétrica despendido na iluminação efetuou-se uma pesquisa de alternativas existentes no mercado.

Das alternativas encontradas destaca-se uma solução proposta pela *Disano*. Esta proposta tem em consideração aspetos que até aqui não foram tidos em conta. A aplicação de luminárias resistentes a altas temperaturas e laváveis no Piso 7 torna-se uma potencial forma de poupança pois, devido à libertação de vapores provenientes da secagem e termofixação, as armaduras adquirem uma coloração castanha, o que prejudica a iluminação do local. Também pelo facto de as armaduras de polietileno não resistirem à temperatura a que estão sujeitas, quebram, sendo necessária a sua substituição. A aplicação de luminárias com sensores de movimento também refletirá uma potencial fonte de poupança pois existem zonas em que não é necessária iluminação permanente. A aplicação de lâmpadas *LED* permite a obtenção da iluminância necessária com o consumo de uma potência inferior à consumida pelas atuais lâmpadas fluorescentes.

Na tabela 6.1 apresenta-se o levantamento efetuado á iluminação no Edifício da máquina de impregnar tela bem como os respetivos consumos energéticos e custos associados atuais.

**Tabela 6.1-** Levantamento efetuado à iluminação e respetivos custos associados.

Situação atual	Piso 0	Piso 7	Outras	Total	Consumo (W) /luminária	Total (W)	Nº dias	h/dia	Energia (€)
Fluorescente T5 2*49W	13	12	53	78	104	8.112	350	24	6.039
Fluorescente T8 1*36W	18	0	24	42	45	1.890	350	24	1.407
Fluorescente T8 2*36W	9	0	12	21	90	1.890	350	24	1.407
<b>Total</b>	---	---	---	---	---	11.892	---	---	8.853€

Na tabela 6.2 apresentam-se os consumos e custos associados à proposta efetuada pela *Disano* para iluminação do edifício utilizando lâmpadas LED.

**Tabela 6.2-** Proposta de otimização da iluminação.

Solução DISANO	Piso 0	Piso 7	Outras	Total	Consumo (W) /luminária	Total (W)	Nº dias	h/dia	Energia (€)
Hydro LED 46w	13	0	23	36	51	1.836	350	24	1.367
Hydro LED 46w radar sensor	0	0	30	30	51	1.530	350	2	95
Forma LED 42w	0	12		12	46	552	350	24	411
Echo LED 18w	18	0	24	42	20	840	350	24	625
Hydro LED 33w	9	0	12	21	36	756	350	24	563
<b>Total</b>	---	---	---	---	---	5.514	---	---	3.061

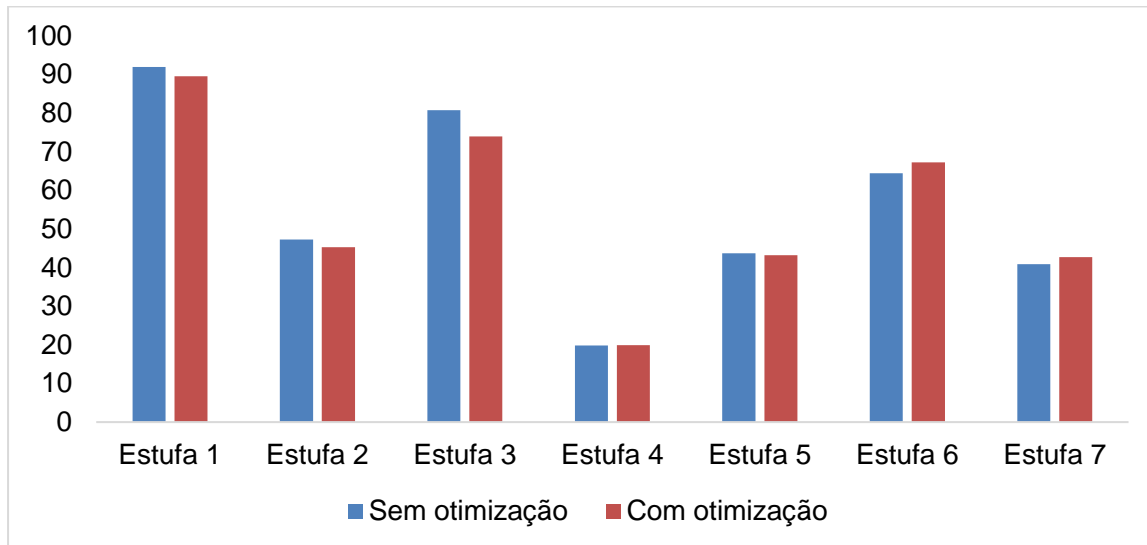
A proposta de otimização tem subjacente um investimento 12.511 € com um período de retorno do investimento de 2,2 anos.

## 6.2. Implementação do sistema ECO VAC e alteração das exaustões

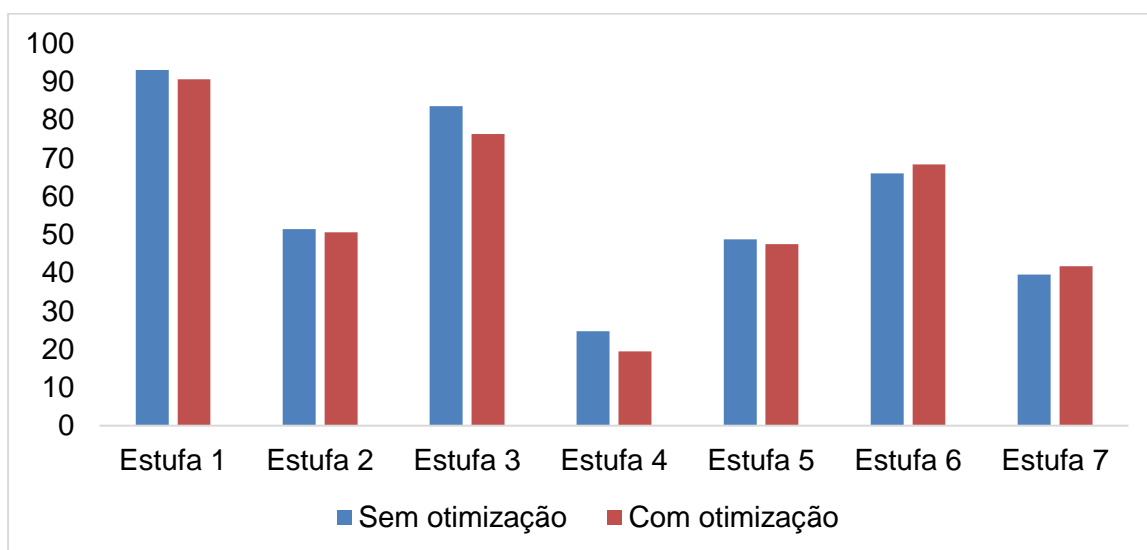
Como referido no capítulo 5.2, para um dado valor de *set point* definido verifica-se em regra geral (excetuando os casos em que a percentagem de exaustão estabiliza) que, a percentagem de exaustão diminui com o aumento da pressão atmosférica. Assim, pode-se afirmar que o consumo de gás natural diminuirá com a aumento da pressão atmosférica.

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

O sistema ECOVAC será mais adequado para países tropicais pois, nesses países verificam-se maiores oscilações de pressão atmosférica ao longo do dia. Nesse caso, ao longo do dia o ECOVAC ajustará a percentagem de exaustão de acordo com as necessidades, não permitindo a estabilização da mesma. Nas figuras 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4 apresenta-se a variação do caudal de gás natural sem e com otimização dos caudais de exaustão.

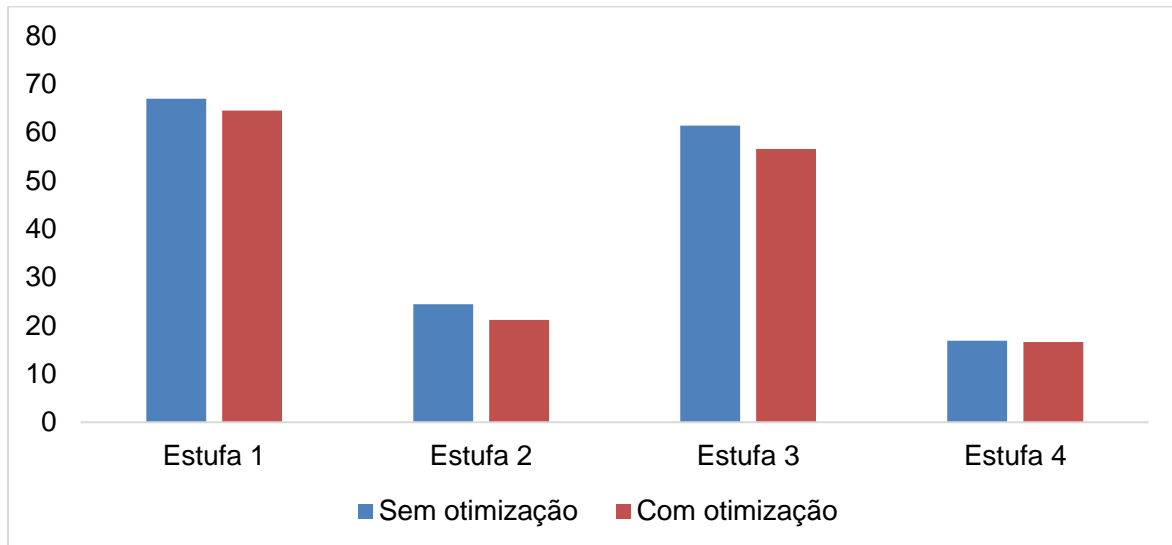


**Figura 6.1-** Variação do caudal de gás natural (m³/h) sem e com otimização dos caudais de exaustão para o artigo P1.

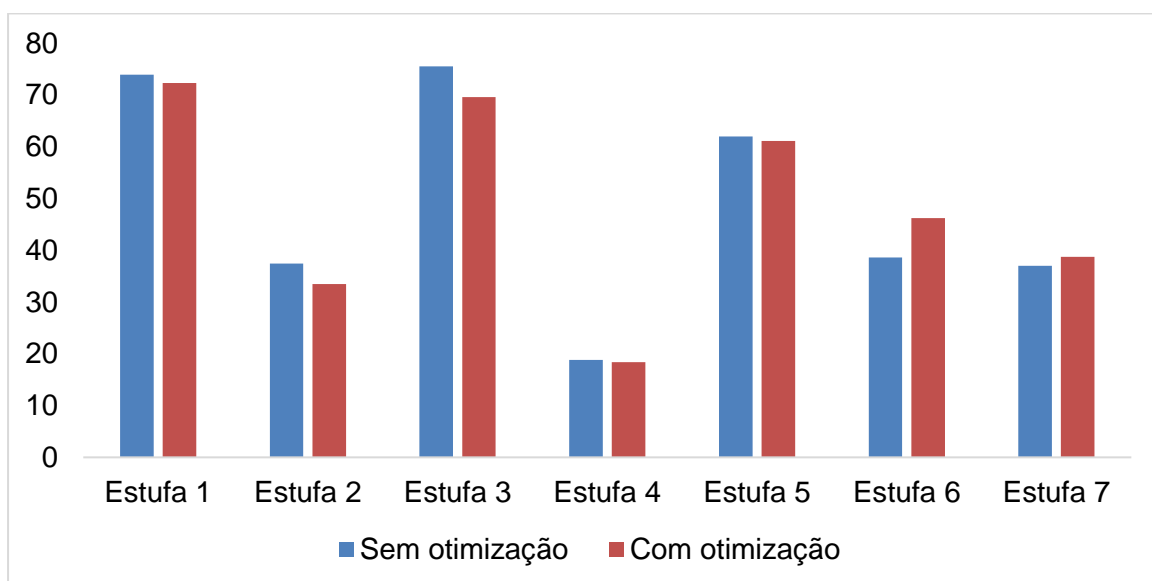


**Figura 6.2-** Variação do caudal de gás natural (m³/h) sem e com otimização dos caudais de exaustão para o artigo P2.

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS



**Figura 6.3-** Variação do caudal de gás natural (m³/h) sem e com otimização dos caudais de exaustão para o artigo N1.



**Figura 6.4-** Variação do caudal de gás natural (m³/h) sem e com otimização dos caudais de exaustão para o artigo N2.

Pela análise das figuras 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4, observa-se que o caudal de gás natural diminui em todos os artigos nas estufas de 1 a 5. Nas estufas 6 e 7 este aumenta pois, foi necessário aumentar a percentagem de exaustão devido há verificação de fumos a sair pela tampa das estufas.

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

Para se avaliar o impacto económico desta medida de otimização é necessário analisar a poupança obtida. O exemplo de cálculo encontra-se no anexo E.1.

Nas tabelas 6.3 e 6.4 apresenta-se a análise económica efetuada para os artigos de poliéster. Esta análise tem em conta os valores da produção do ano de 2015.

**Tabela 6.3-** Análise económica para o artigo P1.

Estufa	Situação atual		Com otimização		Poupança
	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Custo (€/ano)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Custo (€/ano)	
1	91,9	15.264	89,5	14.866	399
2	47,3	7.856	45,3	7.524	332
3	80,7	13.404	73,9	12.275	1.130
4	19,8	3.289	19,9	3.305	-17
5	43,7	7.259	43,2	7.175	83
6	64,4	10.697	67,2	11.162	-465
7	40,9	6.793	42,7	7.092	-299
<b>Total</b>	<b>388,7</b>	<b>64.562</b>	<b>381,7</b>	<b>63.400</b>	<b>1.163</b>

**Tabela 6.4-** Análise económica para o artigo P2.

Estufa	Situação atual		Com otimização		Poupança
	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Custo (€/ano)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Custo (€/ano)	
1	93,0	22.799	90,6	22.21	588
2	51,4	12.601	50,6	12.405	196
3	83,6	20.495	76,3	18.705	1.790
4	24,7	6.055	19,4	4.756	1.299
5	48,7	11.939	47,5	11.645	294
6	66,0	16.180	68,3	16.744	-564
7	39,5	9.684	41,7	10.223	-539
<b>Total</b>	<b>406,9</b>	<b>99.752</b>	<b>394,4</b>	<b>96.688</b>	<b>3.064</b>

Analisando a tabelas 6.3 verifica-se que há um aumento do consumo de gás natural nas estufas 4, 6 e 7 para o artigo P1. No caso da tabela 6.4 apenas aumenta o consumo das estufas 6 e 7 para o artigo P2. Estes aumentos energéticos resultam do aumento percentagem de exaustão nas estufas. Contudo, apesar de existirem estufas em que o consumo de gás natural aumentou, os artigos P1 e P2 apresentam uma poupança de 1.163 €/ano e 3.064 €/ano respetivamente.

**Tabela 6.5-** Análise económica para o artigo N1.

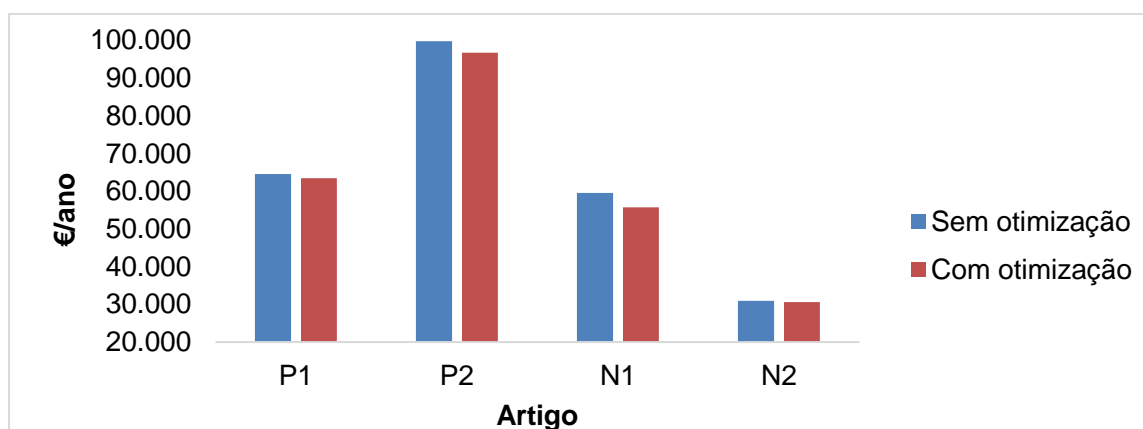
Estufa	Situação atual		Com otimização		Poupança
	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Custo (€/ano)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Custo (€/ano)	
1	67,0	23.508	64,5	22.631	877
2	24,4	8.561	21,2	7.438	1.123
3	61,4	21.543	56,6	19.859	1.684
4	16,9	5.930	16,6	5.824	105
<b>Total</b>	<b>169,7</b>	<b>59.542</b>	<b>158,9</b>	<b>55.753</b>	<b>3.789</b>

**Tabela 6.6-** Análise económica para o artigo N2.

Estufa	Situação atual		Com otimização		Poupança
	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Custo (€/ano)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Custo (€/ano)	
1	73,9	6.659	72,3	6.515	144
2	37,4	3.370	33,5	3.019	351
3	75,5	6.803	69,6	6.272	532
4	18,8	1.694	18,4	1.658	36
5	62,0	5.587	61,1	5.506	81
6	38,6	3.478	46,2	4.163	-685
7	37,0	3.334	38,7	3.487	-153
<b>Total</b>	<b>343,2</b>	<b>30.926</b>	<b>339,8</b>	<b>30.619</b>	<b>306</b>

As tabelas 6.5 e 6.6 dizem respeito aos artigos de *nylon*. A poupança anual para o artigo N1 é de 3.789 €/ano. Quanto ao artigo N2, verifica-se que existe um aumento no consumo de gás natural nas estufas 6 e 7, sendo a poupança obtida de apenas 306 €/ano.

Na figura 6.5 apresenta-se os custos anuais com e sem otimização para os artigos em estudo.



**Figura 6.5-** Custos anuais com e sem otimização das exaustões.

No total, para os artigos em estudo, a poupança obtida foi de 8.323 €/ano.

### 6.3. Alteração dos caudais de ventilação superior e inferior

Em 1991, ano em que a máquina de impregnar tela foi adquirida, esta foi projetada para que os ventiladores funcionassem a 100% da sua capacidade. Devido à produção de um tecido mais grosso, foi necessário estabelecer novos limites para a ventilação pois, pelo facto da ventilação ser muito elevada e o tecido funcionar como uma parede que não deixa passar nada para o outro lado, fazia com que este abanasse muito. Para evitar esta situação diminui-se a % de ventilação.

Como consequência desta variação na % de ventilação, o consumo específico de energia elétrica diminuiu significativamente. Assim, optou-se por diminuir a % de ventilação nos restantes artigos.

Em 2015, em consequência de uma modernização na máquina, a velocidade de impregnação aumentou. Para se poder garantir que era transferida a mesma quantidade de calor para o tecido, aumentou-se a temperatura das estufas, requerendo-se assim uma maior potência elétrica e térmica dos queimadores.

Neste subcapítulo, pretende-se mostrar que é possível garantir que o processo de secagem é conseguido, aumentando a % de ventilação e diminuindo assim a temperatura no interior da estufa. Assim, com a diminuição da temperatura no interior da estufa diminui-se também o caudal de gás natural utilizado. Esta medida é de elevado relevo principalmente na estufa 1, visto que esta possui ventilações relativamente baixas quando comparadas com as restantes. A estufa 1, possui um défice de secagem o que provoca a acumulação de sujidade na estufa 2 e 3. Com este aumento pretende-se que a secagem no interior desta estufa seja mais eficiente diminuindo assim a sujidade nas estufas seguintes. Aumentando a % de ventilação no interior da estufa, aumenta-se a velocidade do ar no seu interior, permitindo assim que o coeficiente convectivo de transferência de calor aumente. Assim, a potência térmica transferida para o tecido pode ser calculada de acordo com a equação 12.

$$\dot{q}_{\text{transferido p/tela}} = h_{\text{conv}} \times A_{\text{tela}} \times (T_{\infty \text{ estufa}} - T_{\text{tela}}) \quad (12)$$

Em que:

$\dot{q}_{\text{transferido p/tela}}$  – Potência térmica transferida para a tela (kW)

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

$h_{conv}$  – Coeficiente convectivo de transferência de calor entre o ar quente da estufa e a tela (kW/(m<sup>2</sup>.°C))

$A_{tela}$  – Área tela (m<sup>2</sup>)

$T_{\infty \text{ estufa}}$  – Temperatura no interior da estufa (°C)

$T_{tela}$  – Temperatura da tela (°C)

Admitindo a mesma taxa de transferência de calor para a tela, sem alterações das condições de secagem e com a tela sair com o mesmo grau de humidade e à mesma temperatura, calculou-se qual a temperatura necessária no interior da estufa, supondo diferentes incrementos do coeficiente convectivo. Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 6.7 e o seu exemplo de cálculo na anexo E.2.

**Tabela 6.7-** Resultados obtidos para a temperatura simulando um aumento no coeficiente convectivo.

Artigo	Incremento $h_{conv}$ (%)	$T_{\infty}$ estufa 1 (°C)	$T_{\infty}$ estufa 2 (°C)	$T_{\infty}$ estufa 3 (°C)	$T_{\infty}$ estufa 4 (°C)	$T_{\infty}$ estufa 5 (°C)	$T_{\infty}$ estufa 6 (°C)	$T_{\infty}$ estufa 7 (°C)
<b>P1</b>	1	173	173	248	248	149	248	248
	2	172	172	245	245	147	245	245
	3	170	170	243	243	146	243	243
<b>P2</b>	1	173	173	248	248	149	246	246
	2	172	172	245	245	147	243	243
	3	170	170	243	243	146	241	241
<b>N1</b>	1	158	139	233	233	*	*	*
	2	157	137	230	230	*	*	*
	3	155	136	228	228	*	*	*
<b>N2</b>	1	153	153	233	233	233	233	233
	2	152	152	230	230	230	230	230
	3	150	150	228	228	228	228	228

Com o aumento da percentagem de ventilação, a potência elétrica do ventilador aumenta, incrementando assim o consumo de energia elétrica (ver figura A.1). Apesar de se diminuir a temperatura e consequentemente o caudal de gás natural, é necessário verificar se esta diminuição é suficiente para compensar o facto do consumo elétrico aumentar.

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

Para se calcular qual o caudal de gás natural esperado para esta medida de otimização, utilizou-se a equação 4.13.

$$\dot{v}_{\text{novo}} = \frac{\dot{m}_{\text{gases de exaustão}} \times C_{p_{\text{gases de exaustão}}} \times (T_1 - T_2) + \dot{v}_1 \times (-\text{PCI})}{-\text{PCI}}$$

Em que:

- $\dot{v}_{\text{novo}}$  - Caudal de gás natural para a nova temperatura (m<sup>3</sup>/h)
- $\dot{m}_{\text{gases de exaustão}}$  - Caudal mássico dos gases de exaustão (kg/h)
- $C_{p_{\text{gases de combustão}}}$  - calor específico dos gases de combustão kJ/(kg.°C)
- $T_1$  - Temperatura dos gases de combustão atual (°C)
- $T_2$  - Temperatura dos gases de combustão nova (°C)
- $\dot{v}_1$  - Caudal de gás natural para a temperatura atual (m<sup>3</sup>/h)
- PCI- Poder calorífico inferior (kWh/m<sup>3</sup>)

Neste cálculo, assumiu-se que o valor do caudal dos gases de exaustão e da potência térmica das correntes de entrada era o mesmo com ou sem otimização da temperatura. O exemplo de cálculo é apresentado no anexo E.2.

Na tabela 6.8 e 6.9 apresentam-se os caudais o de gás com e sem otimização da temperatura do interior das estufas para os artigos P1 e P2 respetivamente.

**Tabela 6.8-** Caudais de gás natural para a otimização da temperatura do interior das estufas para o artigo P1.

Estufa	Sem otimização		Com otimização (incremento de 1% do $h_{\text{conv}}$ )		Com otimização (incremento de 3% do $h_{\text{conv}}$ )	
	Temperatura (°C)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura (°C)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura (°C)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)
1	175	91,9	173	91,2	170	90,7
2	175	47,3	173	47	70	46,4
3	250	80,7	248	80,6	243	80,5
4	250	19,8	248	19,7	243	19,6
5	150	43,7	149	43,6	146	43,5
6	250	64,4	248	64,2	243	63,6
7	250	40,9	248	40,8	243	40,7

**Tabela 6.9-** Caudais de gás natural para a otimização da temperatura do interior das estufas para o artigo P2.

Estufa	Sem otimização		Com otimização (incremento de 1% do $h_{conv}$ )		Com otimização (incremento de 3% do $h_{conv}$ )	
	Temperatura (°C)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura (°C)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura (°C)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)
1	175	93	173	92,6	170	92,1
2	175	51,4	173	51	70	50,5
3	250	83,6	248	83,2	243	82,4
4	250	24,7	248	24,6	243	24,5
5	150	48,7	149	48,6	146	48,3
6	248	66	246	65,8	241	65,2
7	248	39,5	246	39,4	241	39,3

Para o artigo P1 o incremento de 1% e 3% ao coeficiente de convecção entre o ar e a tela traduz-se numa poupança de 266 €/ano e 615 €/ano. Para o artigo a poupança obtida foi de 417 €/ano e 1.1285 €/ano.

Nas figuras 6.10 e 6.11 apresentam-se os resultados obtidos para os artigos de *nylon*.

**Tabela 6.10-** Caudais de gás natural obtidos para a otimização da temperatura do interior das estufas para o artigo N1.

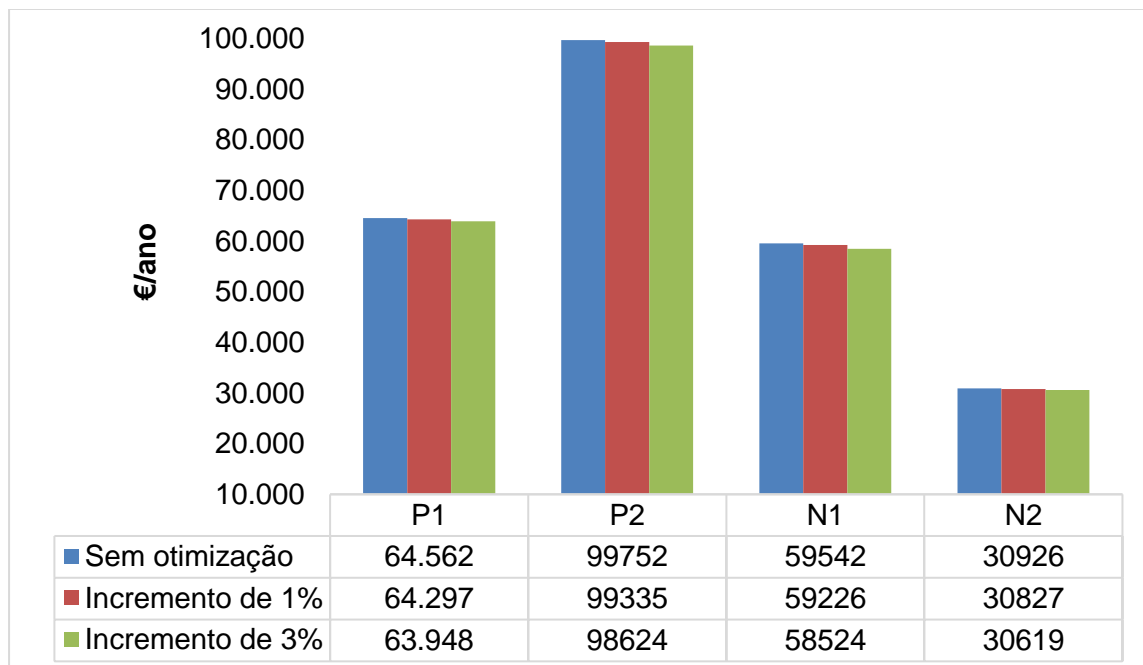
Estufa	Sem otimização		Com otimização (incremento de 1% do $h_{conv}$ )		Com otimização (incremento de 3% do $h_{conv}$ )	
	Temperatura (°C)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura (°C)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura (°C)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)
1	160	67	158	66,6	155	66
2	140	24,4	139	24,3	136	24
3	235	61,4	233	61,1	228	60,2
4	235	16,9	233	16,8	228	16,6

**Tabela 6.11-** Caudais de gás natural obtidos para a otimização da temperatura do interior das estufas para o artigo N2.

Estufa	Sem otimização		Com otimização (incremento de 1% do $h_{conv}$ )		Com otimização (incremento de 3% do $h_{conv}$ )	
	Temperatura (°C)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura (°C)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura (°C)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)
1	155	73,9	153	73,5	150	72,9
2	155	37,4	153	37,2	150	36,9
3	235	75,5	233	75,2	228	74,3
4	235	18,8	233	18,7	228	18,5
5	235	62	233	62	228	61,9
6	235	38,6	233	38,6	228	38,5
7	235	37	233	36,9	228	36,8

Para o artigo N1 o incremento de 1% e 3% ao coeficiente de convecção entre o ar e a tela leva a uma poupança de 316 €/ano e 1.018 €/ano. Para N2 a poupança obtida foi de 99 €/ano e 306 €/ano.

Na figura 6.6 apresentam-se os custos com e sem as otimizações estudadas.



**Figura 6.6-** Custos anuais com e sem as otimizações de ventilação estudadas.

A poupança global obtida para os artigos em estudo, com o incremento de 1% foi de 1.098€/ano, e para um incremento de 3% foi de 3.067€/ano.



## 7. Conclusões e propostas para trabalhos futuros

Ao longo deste estágio analisaram-se os consumos de energia da máquina de impregnar tela para pneus. Após análise dos consumos, estabeleceram-se medidas de otimização tais como, a alteração das exaustões e a implementação do sistema ECO VAC, o estudo do aumento dos caudais de ventilação e do consumo elétrico referente à iluminação.

Verificou-se que a estufa 1 não possui o sistema ECO VAC instalado, tendo sido estudada a alteração da exaustão de modo manual. As condições operatórias da estufa 3 não permitem a implementação do ECO VAC e, como tal, foi estudada a alteração da exaustão de modo manual. Para as estufas 6 e 7 definiu-se um valor de *set point* de pressão diferencial que, nas condições em que foram realizados os ensaios, levou a um ligeiro aumento da percentagem de exaustão. Nas estufas 2, 4 e 5 foi possível implementar o sistema ECO VAC. A poupança obtida com esta medida para os artigos P1, P2, N1 e N2, tendo por base a produção do ano de 2015, foi de 1.163 €, 3.064 €, 3.789 € e 306 € respetivamente, traduzindo-se numa poupança global para os artigos em estudo de 8.323 €/ano.

Para o estudo do aumento do caudal de ventilação, a poupança global obtida para os artigos em estudo, foi de 1.098 €/ano e 3.067 €/ano, para um incremento do coeficiente convectivo entre o ar e a tela de 1% e 3% respetivamente.

Analisaram-se os elementos que consomem ar comprimido e detetaram-se fugas. Após a reparação de fugas, obteve-se uma poupança anual de energia elétrica de 2.430 € e um período de retorno do investimento de 0,8 anos.

Quanto à iluminação do edifício, efetuou-se um levantamento às luminárias presentes e propôs-se alterações ao atual sistema de iluminação. Estas alterações sugerem uma poupança de 5.792 €/ano e um período de retorno do investimento de 2,2 anos.

### **Propostas futuras**

No sentido de dar continuidade a este estudo, foram elaboradas algumas propostas para trabalhos futuros. Estas propostas são:

- Validar os valores de *set point* definidos, para diferentes pressões atmosféricas, com especial atenção às baixas pressões;

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

- Acompanhar o sujamento das estufas e verificar sempre a existência o não de fumos, para os valores definidos de exaustão de acordo com o *set point* estabelecido;
- Elaborar um procedimento de arranque para a máquina de impregnar tela pois, na fase de arranque, estão a usar-se atualmente as exaustões definidas na ficha de especificação do artigo. Assim, é importante realizar um estudo em que se quantifique o desperdício de energia nesta fase. A seguir ao arranque a exaustão será fixada no valor pré-estabelecido;
- Aumentar os caudais de ventilação e diminuir a temperatura no interior da estufa validando a otimização efetuada neste trabalho.

## 8. Bibliografia

- [1] - Manual de acolhimento da C-ITA. Indústria Têxtil do Ave, S.A, Lousado, 2015.
- [2] - <http://local.pt/portugal/braco-textil-da-continental-cresce-em-resultados-inovacao-e-investigacao/>, acedido em 15 de janeiro de 2016
- [3] - Decreto-Lei nº 71/2008 de 15 de abril de 2008 (versão pdf descarregada de <https://dre.pt/application/file/249641> em 8 de fevereiro de 2016)
- [4] - Despacho nº 17449/2008 de 27 de junho de 2008 (versão pdf descarregada de <http://www.adene.pt/sites/default/files/2809328094.pdf> em 8 de fevereiro de 2016)
- [5] - Auditoria Energética – Relatório de Execução e Progresso, Período de 2011 a 2016, Ano referência 2014. Indústria Têxtil do Ave, S.A - Lousado. Auditene, Vila Nova de Famalicão, abril de 2015.
- [6]- A.R. Horrocks, S.C. Anand; “Handbook of Technical Textile”, Woodhead Publishing Limited, Cambridge,2000.
- [7] - “Acabamentos Mecânicos”, apontamentos Consulgés – Consultadoria Empresarial
- [8]- Marlin, T. E; “Process Control - Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance”, McGraw-Hill international Editions, 1995.
- [9]- Manual Benninger-Zell “Tire Cord- Treatment Lines and Technology”. Benninger Zell GmbH.D.BW., Alemanha, setembro de 2011.
- [10]- Vilarinho, S.;”Inflência da localização, nas medições efetuadas por uma estação meteorológica, no Campus de Gualtar”, Universidade do Minho- Escola de Ciências,Gualtar,setembro de 2009. (tese de mestrado em Física, versão pdf descarregada de <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/10849/1/tese.pdf> em 20 de setembro de 2016).
- [11]- Çengel, Yunus A., Boles, Michael A.;”Heat Transfer- A Pratical Approach”, Mc Graw-Hill, 5ª Edição, 2007.
- [12]- Houghen, Olaf A., Watson, Kenneth M., Ragatz, Roland A.; “Princípios dos Processos Químicos”, Lopes da Silva, 1984

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

[13]- <http://galpgasnaturaldistribuicao.pt/gas-natural/o-que-e> (acedido em 27 de setembro de 2016).

[14]- Geankoplis, C.J.; “Transport Processes and Separation Process Principles”, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2003.

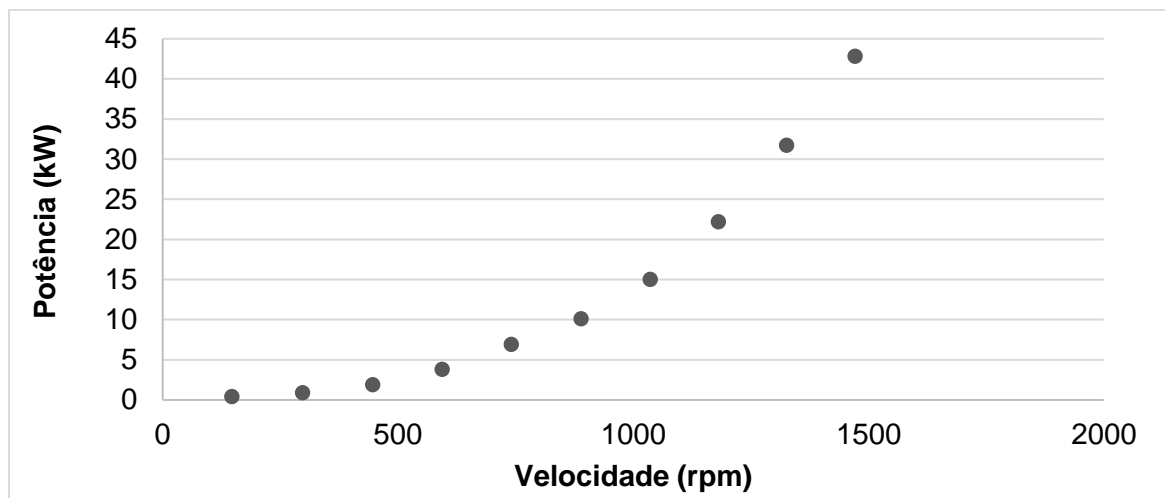
[15]- Incropera, F.P. and De Witt, D.P.; “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, John Wiley & Sons, 2002.

## Anexos

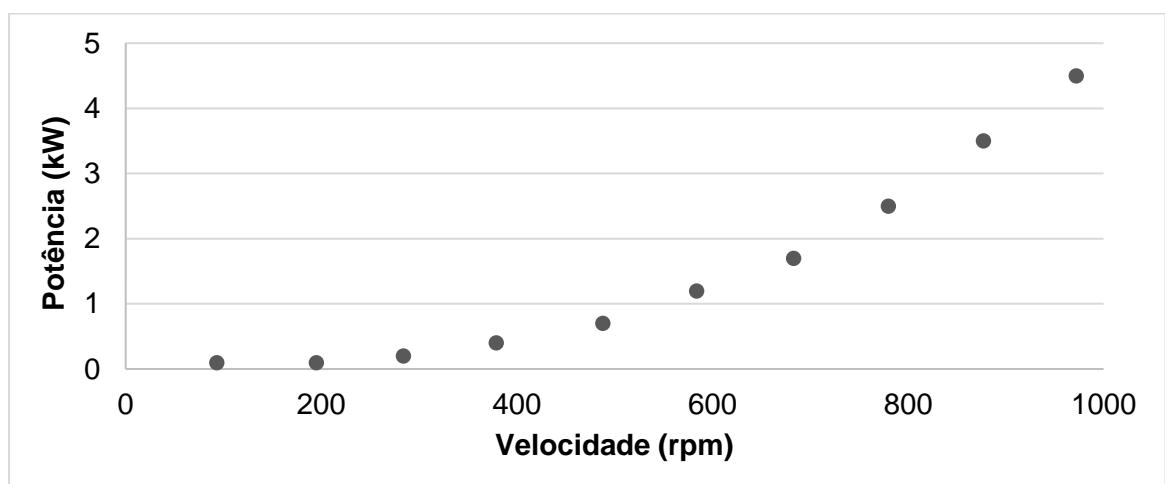
### Anexo A. Consumos energéticos de eletricidade

No anexo A apresentam-se os consumos energéticos de eletricidade referentes à máquina de impregnar tela para pneus no ano de 2015.

Na figura A.1 e A.2 apresentam-se as curvas de potência em função da velocidade construídas para os ventiladores e dos exaustores.



**Figura A. 1-** Curva dos ventiladores- potência em função da velocidade.

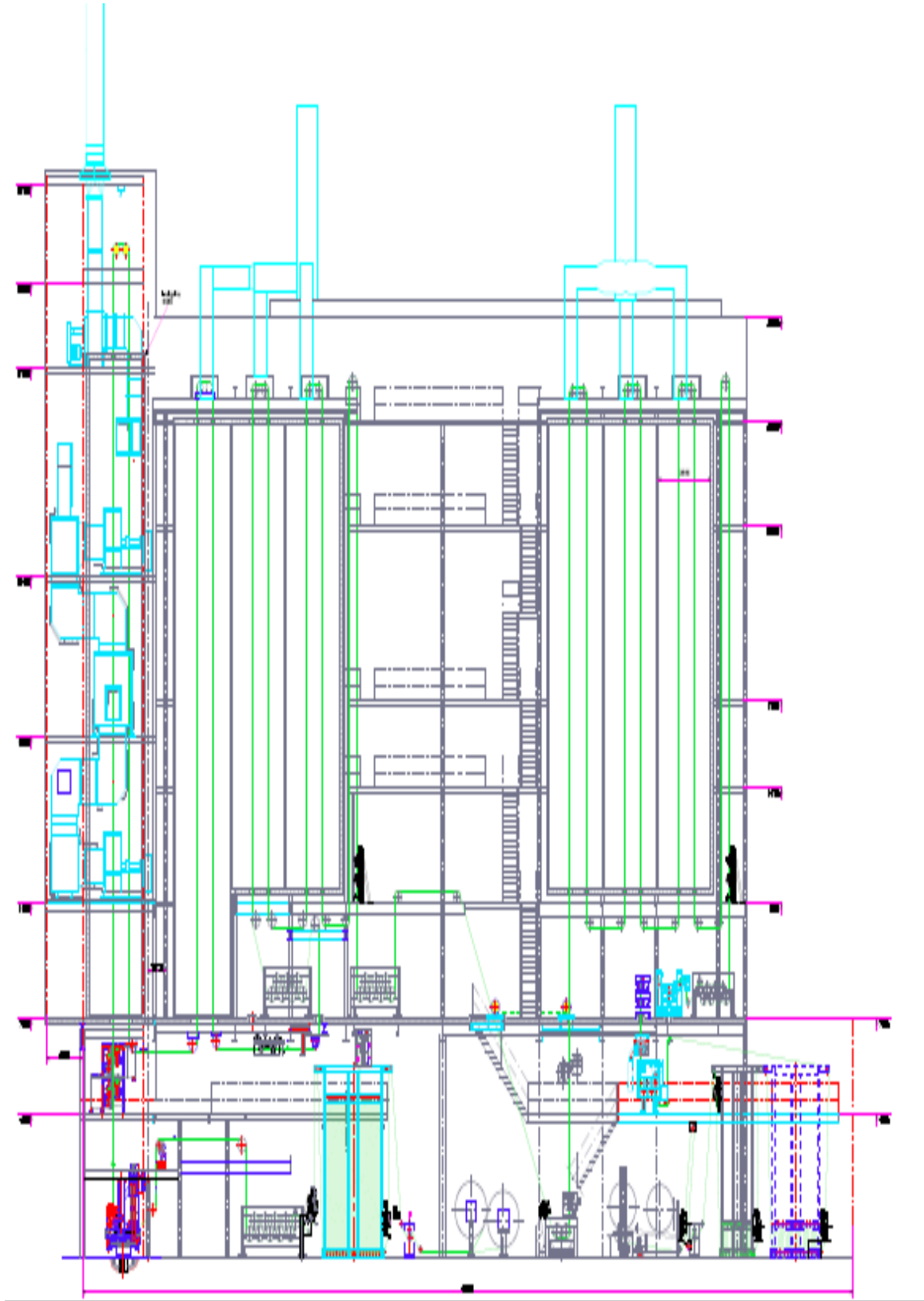


**Figura A. 2-** Curva dos exaustores- potência em função da velocidade

Os dados relativos ao levantamento energético da iluminação do edifício da máquina de impregnar e os respetivos custos associados apresentam-se na tabela A.1.

## Anexo B. Vista em corte da Máquina de impregnar tela

No anexo B apresenta-se a figura B.1 que representa uma vista em corte de toda a Zell.



## Anexo C. Condições e dados experimentais

No anexo C apresentam-se as condições e os dados experimentais que permitiram chegar á obtenção dos resultados da avaliação energética efetuada à máquina de impregnar tela.

Na tabela C.1 apresentam-se as temperaturas por artigo de todas as correntes de entrada e saída das fronteiras do sistema.

**Tabela C.** Error! No text of specified style in document.- Temperatura de todas as correntes de entrada e saída.

		<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>N1</b>	<b>N2</b>
<b>1ª Fronteira</b>	<b>T Dip</b>	15	15	15	15
	<b>T tela em "verde"</b>	15	15	15	15
	<b>T ar fresco</b>	30	30	30	30
	<b>T ar combustão</b>	25	25	25	25
	<b>T gases de exaustão</b>	175	175	160	155
	<b>T tela húmida</b>	71	71	60	65
<b>2ª Fronteira</b>	<b>T tela húmida</b>	71	71	60	65
	<b>T ar fresco</b>	30	30	30	30
	<b>T ar combustão</b>	25	25	25	25
	<b>T gases de exaustão</b>	225	225	205	208
	<b>T tela à saída</b>	166	166	129	129
<b>3ª Fronteira</b>	<b>T tela à entrada</b>	35	35	35	35
	<b>T Dip</b>	15	15	15	15
	<b>T ar fresco</b>	30	30	30	30
	<b>T ar combustão</b>	25	25	25	25
	<b>T gases de exaustão</b>	217	215	*	235
	<b>T tela impregnada</b>	153	153	21	170

\*- Não aplicável (fronteira com as estufas todas desligadas)

A massa de solução de impregnação usada, a massa de tecido “em verde” e impregnado e respetivos comprimentos para cada artigo encontram-se apresentados na tabela C.2.

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

Ainda nesta tabela, apresenta-se a velocidade de impregnação dos artigos. As diferentes soluções de impregnação são designadas de A, B e C.

**Tabela C. 2-** Características da tela, dos rolos e quantidade das soluções de impregnação.

<b>Artigo</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>N1</b>	<b>N2</b>
<b>Solução de impregnação 1</b>	A	A	C	C
<b>Solução de impregnação 2</b>	B	B	---	---
<b>Massa de solução de impregnação 1 (m) /rolo</b>	248	285	192	124
<b>Massa de solução de impregnação 2 (m) /rolo</b>	112	139	---	---
<b>Massa da tela em “verde” (kg)</b>	1.102	1.179	665	571
<b>Comprimento da tela em “verde” (m)</b>	1.920	1.730	2.915	1.200
<b>Velocidade de impregnação (m/min)</b>	80	80	95	80
<b>Massa da tela impregnado (kg)</b>	1.116	1.212	701	590
<b>Comprimento da tela (m)</b>	10876	1.703	2.987	1.276
<b>Comprimento impregnado em 2015 (m)</b>	2.145.463	3.166.585	5.381.819	1.163.941

--- Não aplicável (artigo não contém solução de impregnação 2)

Na tabela C.3 encontram-se as dimensões das ranhuras de entrada e saída do tecido bem como as respetivas velocidades do ar.

**Tabela C. 3** - Dimensões das ranhuras de entrada e saída da tecido e respetivas velocidades do ar.

Estufa	1	2	3	4	5	6	7
<b>Comprimento da abertura de entrada e de saída do tecido (m)</b>	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
<b>Largura da abertura de entrada e de saída do tecido (m)</b>	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
<b>Velocidade do ar à entrada do tecido (m/s)</b>	4,5	4,3	3,6	1,5	2,6	4,2	2,4
<b>Velocidade do ar à saída do tecido (m/s)</b>	4,4	4,3	6	2,2	4,4	7,4	5,5

Os valores de caudal volumétrico de gás natural consumido em média no ano de 2015 por cada fronteira em cada artigo encontram-se na tabela C.4.

**Tabela C. 4-** Caudal de gás natural para cada artigo consumido em média no ano de 2015.

Artigo	Caudal (m <sup>3</sup> /h) 1 <sup>a</sup> Fronteira	Caudal (m <sup>3</sup> /h) 2 <sup>a</sup> Fronteira	Caudal (m <sup>3</sup> /h) 3 <sup>a</sup> Fronteira
<b>P1</b>	95,6	169,2	155
<b>P2</b>	97	181,1	160,9
<b>N1</b>	74,2	145,3	0
<b>N2</b>	75	146,4	88,9

## Anexo D. Exemplos de cálculo

Neste anexo são apresentados os exemplos de cálculo para a determinação das potências térmicas, baseados nos dados do artigo P1.

### Anexo D.1. Cálculo da potência térmica do combustível

Para determinar a potência térmica do combustível, foi necessário conhecer o caudal volumétrico do combustível (PTN). Assim:

$$\dot{V}_{\text{Combustível}} = \dot{V}_{\text{Combustível lido}} \times f_c \leftrightarrow \dot{V}_{\text{Combustível}} = \frac{25,3\text{m}^3}{30 \text{ min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \times 1,896$$

$$\leftrightarrow \dot{V}_{\text{Combustível}} = 95,6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Onde:

$\dot{V}_{\text{Combustível}}$  - Caudal volumétrico de combustível ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$\dot{V}_{\text{Combustível lido}}$  - Caudal volumétrico de combustível lido ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$f_c$  – Fator de correção do gás natural

Após a determinação do caudal de combustível, reúnem-se as condições para a obtenção da potência térmica do combustível. O valor do PCI do combustível foi retirado da literatura [13]. Os resultados obtidos para a potência térmica do combustível estão presentes na tabela 4.6.

$$\Delta H_{298}^0 = \dot{V}_{\text{Combustível}} \times \text{PCI} \leftrightarrow \Delta H_{298}^0 = 95,6 \times 10,66$$

$$\leftrightarrow \Delta H_{298}^0 = 1019,1\text{kW}$$

Onde:

$\Delta H_{298}^0$  - Calor de combustão (kW)

$v_{\text{combustível}}$  - Caudal volumétrico de combustível ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

PCI - Poder Calorífico Inferior ( $\text{kWh}/\text{m}^3$ )

### Anexo D.2. Cálculo da potência do ar fresco

Como referido no capítulo 4.2, o caudal mássico de ar fresco foi obtido pela equação abaixo apresentada. O valor da massa volúmica e do calor específico do ar fresco foi obtida na literatura [15] para uma temperatura de 30 °C pois, considerou-se esta a

temperatura do ar fresco à entrada das estufas. De acordo com os valores apresentados na tabela C.3, obtém-se:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{ar fresco}} &= v_{\text{ar fresco}} \times \rho_{\text{ar fresco}} \times A_{\text{abertura}} \\ \Leftrightarrow \dot{m}_{\text{ar fresco}} &= v_{\text{ar fresco}} \times \rho_{\text{ar fresco}} \times (c_{\text{abertura}} \times l_{\text{abertura}}) \times 2 \\ \Leftrightarrow \dot{m}_{\text{ar fresco}} &= 4,5 \times 1,154 \times (1,8 \times 0,04) \times 2 \\ \Leftrightarrow \dot{m}_{\text{ar fresco}} &= 0,748 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Onde:

$\dot{m}_{\text{ar fresco}}$  - Caudal mássico de ar fresco (kg/s)

$v_{\text{ar fresco}}$  - Velocidade do ar fresco (m/s)

$\rho_{\text{ar fresco}}$  - Massa específica (kg/m<sup>3</sup>)

$A_{\text{abertura}}$  - Área de abertura da ranhura (m<sup>2</sup>)

$c_{\text{abertura}}$  - Comprimento da abertura (m)

$l_{\text{abertura}}$  - Largura da abertura (m)

Os resultados obtidos para o caudal mássico de ar fresco podem ser observados na tabela D.1.

**Tabela D.1-** Caudais mássicos de ar fresco.

Artigo	$\dot{m}_{\text{ar fresco}}$ (kg/s) 1 <sup>a</sup> Fronteira	$\dot{m}_{\text{ar fresco}}$ (kg/s) 2 <sup>a</sup> Fronteira	$\dot{m}_{\text{ar fresco}}$ (kg/s) 3 <sup>a</sup> Fronteira
<b>P1</b>	0,748	1,562	1,529
<b>P2</b>	0,748	1,562	1,529
<b>N1</b>	0,748	1,562	0
<b>N2</b>	0,748	1,562	1,529

Após a determinação do caudal de ar fresco reúnem-se todos os dados necessários para a aplicação da equação 4.3. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 4.7.

$$\begin{aligned} H_{\text{ar fresco}} &= \dot{m}_{\text{ar fresco}} \times C_{p_{\text{ar fresco}}} \times (T_{\text{ar fresco}} - T_{\text{ref}}) \\ \Leftrightarrow H_{\text{ar fresco}} &= 0,748 \times 1,007 \times (30 - 25) \Leftrightarrow H_{\text{ar fresco}} = 3,8 \text{ kW} \\ \Leftrightarrow H_{\text{ar fresco}} &= 3,8 \text{ kW} \end{aligned}$$

Onde:

$H_{ar\ fresco}$  - Entalpia de entrada do ar fresco (kW)

$\dot{m}_{ar\ fresco}$  - Caudal mássico de ar fresco (kg/s)

$C_{p_{ar\ fresco}}$  - Capacidade calorífica do ar fresco (kJ/(kg.°C))

$T_{ar\ fresco}$  - Temperatura do ar fresco (°C)

$T_{ref}$  - Temperatura de referência (°C)

### Anexo D.3. Cálculo da potência do ar de combustão

A velocidade do ar de combustão foi obtida pela média das velocidades do ar medidas junto à grelha dos ventiladores de admissão de ar para o queimador.

$$v_{ar\ combust\tilde{a}o} = \frac{\sum v_{medida}}{n^{\circ}\ de\ medi\tilde{c}o\tilde{e}s} \leftrightarrow v_{ar\ combust\tilde{a}o} = \frac{8 + 8 + 7,6 + 8 + 7,6 + 8}{6}$$

$$\leftrightarrow v_{ar\ combust\tilde{a}o} = 7,9 \frac{m}{s}$$

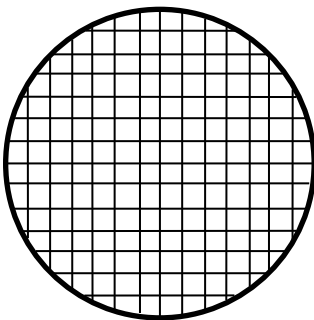
Onde:

$v_{ar\ combust\tilde{a}o}$  – Velocidade do ar de combustão (m/s)

$v_{medida}$  – Velocidade do ar medida com o anemómetro (m/s)

Para se determinar o caudal volumétrico do ar de combustão foi necessário ter em conta a geometria das grelhas de admissão de ar.

Na figura D.1 apresenta-se a geometria da grelha de admissão de ar do queimador da estufa 1.



**Tabela D. 1-** Dimensões características da grelha de admissão de ar da estufa 1.

<b>Diâmetro (D [m])</b>	0,15
<b>Lado do quadrado (L [m])</b>	0,007
<b>Espessura do aro (s [m])</b>	0,0006

**Figura D. 1** - Representação da geometria da grelha de admissão de ar da estufa 1.

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

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

$$A_{\text{total}} = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \leftrightarrow A_{\text{total}} = \pi \times \left(\frac{0,15}{2}\right)^2 \leftrightarrow A_{\text{total}} = 0,018\text{m}^2$$

$$A_{\text{externa quadrado}} = (L + s)^2 \leftrightarrow A_{\text{externa quadrado}} = (0,007\text{m} + 0,0006\text{m})^2 \\ \leftrightarrow A_{\text{externa quadrado}} = 6 \times 10^{-5}\text{m}^2$$

Onde:

$A_{\text{total}}$  – Área total do interior da grelha ( $\text{m}^2$ )

$A_{\text{externa quadrado}}$  – Área externa de um quadrado ( $\text{m}^2$ )

Assim, calculou-se o número de quadrados:

$$N^{\circ}_{\text{quadrados}} = \frac{A_{\text{total}}}{A_{\text{externa quadrado}}} \leftrightarrow N^{\circ}_{\text{quadrados}} = \frac{0,018\text{m}^2}{6 \times 10^{-4}\text{m}^2} \leftrightarrow N^{\circ}_{\text{quadrados}} = 306$$

Após a determinação do número de quadrado calculou-se a área livre.

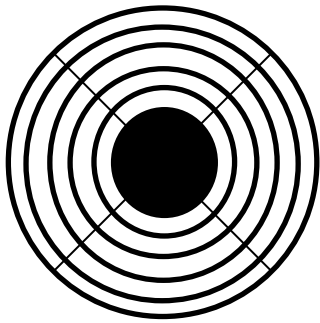
$$A_{\text{livre}} = N^{\circ}_{\text{quadrados}} \times A_{\text{interna quadrado}} \leftrightarrow A_{\text{livre}} = 306 \times (0,007 \times 0,007) \\ \leftrightarrow A_{\text{livre}} = 0,015\text{m}^2$$

Onde:

$A_{\text{externa quadrado}}$  – Área de escoamento livre ( $\text{m}^2$ )

$A_{\text{interna quadrado}}$  – Área interna de um quadrado ( $\text{m}^2$ )

A grelha de admissão de ar do queimador das estufas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 possui a geometria apresentada na figura D.2.



**Figura D. 5-** Representação da geometria da grelha de admissão de ar da estufa 2, 3, 4, 5, 6 e 7.

**Tabela D. 2-** Dimensões características da grelha de admissão de ar da estufa 2, 3, 4, 5, 6 e 7.

<b>Diâmetro (D [m])</b>	0,20
<b>Espessura do aro (s [m])</b>	0,003
<b>Espaçamento entre aro (m)</b>	0,02
<b>Comprimento da barra (L [m])</b>	0,05
<b>Nº de barras</b>	4
<b>Nº de círculos interiores</b>	5

Para a determinação da área livre calcularam-se as áreas interiores de cada círculo, a área do centro do motor e a área ocupada pelas barras.

$$A = \pi \times \left(\frac{D}{2} - s\right)^2 \leftrightarrow A_1 = \pi \times \left(\frac{0,20}{2} - 0,003\right)^2 \leftrightarrow A_1 = 0,030\text{m}^2$$

Os resultados obtidos encontram-se na tabela D.3.

**Tabela D. 3-** Resultados obtidos para as áreas interiores dos círculos.

	<b>Diâmetro (m)</b>	<b>Área interior (m<sup>2</sup>)</b>
<b>A1</b>	0,20	0,030
<b>A2</b>	0,18	0,024
<b>A3</b>	0,16	0,019
<b>A4</b>	0,14	0,014
<b>A5</b>	0,12	0,010

$$A_{\text{centro}} = \pi \times \left(\frac{0,10}{2}\right)^2 \leftrightarrow A_{\text{centro}} = 0,008\text{m}^2$$

$$A_{\text{barra}} = 2 \times \pi \times (L - 5s) \times 0,5s \leftrightarrow A_{\text{barra}} = 2 \times \pi \times (0,05 - 5 \times 0,003) \times 0,5 \times 0,003$$

$$\leftrightarrow A_{\text{barra}} = 0,00033\text{m}^2$$

Onde:

$A_{\text{centro}}$  – Área de secção do veio ( $\text{m}^2$ )

$A_{\text{barra}}$  – Área de uma barra transversal ( $\text{m}^2$ )

A área livre foi por:

$$A_{\text{livre}} = \sum_{i=1}^n (A_n - A_{n-1}) - A_{\text{centro}} - N^{\circ}_{\text{barras}} \times A_{\text{barra}} \leftrightarrow A_{\text{livre}} = 0,019 - 0,008 - 4 \times 0,00033 \leftrightarrow A_{\text{livre}} = 0,01\text{m}^2$$

O caudal volumétrico do ar de combustão e o respetivo caudal mássico são calculados por:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\text{ar combustão}} &= v_{\text{ar combustão}} \times A_{\text{livre}} \leftrightarrow \dot{V}_{\text{ar combustão}} = 5,4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,01\text{m}^2 \\ &\leftrightarrow \dot{V}_{\text{ar combustão}} = 0,054 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \end{aligned}$$

Onde:

$\dot{V}_{\text{ar combustão}}$  - Caudal volumétrico do ar de combustão ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$v_{\text{ar combustão}}$  - Velocidade do ar de combustão ( $\text{m/s}$ )

$A_{\text{livre}}$  - Área de escoamento livre ( $\text{m}^2$ )

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{ar combustão}} &= \dot{V}_{\text{ar combustão}} \times \rho_{\text{ar combustão}} \leftrightarrow \dot{m}_{\text{ar combustão}} = 0,054 \times 1,194 \\ &\leftrightarrow \dot{m}_{\text{ar combustão}} = 0,064 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Onde:

$\dot{m}_{\text{ar de combustão}}$  - Caudal mássico de ar de combustão ( $\text{kg/h}$ )

$\rho_{\text{ar combustão}}$  - Massa específica do ar de combustão à temperatura do ar de combustão ( $\text{kg/m}^3$ )

Assim, para a 2ª Fronteira tem-se que:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{ar combustão } 2^{\text{a}} \text{ Fonteira}} &= \dot{m}_{\text{ar combustão}} \times N^{\circ}_{\text{queimadores}} \leftrightarrow \dot{m}_{\text{ar combustão } 2^{\text{a}} \text{ Fonteira}} \\ &= 0,064 \times 3 \end{aligned}$$

$$\leftrightarrow \dot{m}_{\text{ar combustão } 2^{\text{a}} \text{ Fronteira}} = 0,192 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Na tabela D.4 apresentam-se os valores calculados do caudal mássico do ar de combustão.

**Tabela D. 4-** Caudais mássicos do ar de combustão.

Artigo	$\dot{m}_{\text{ar combustão}} \text{ (kg/s) } 1^{\text{a}}$ Fronteira	$\dot{m}_{\text{ar combustão}} \text{ (kg/s) } 2^{\text{a}}$ Fronteira	$\dot{m}_{\text{ar combustão}} \text{ (kg/s) } 3^{\text{a}}$ Fronteira
P1	0,282	0,192	0,192
P2	0,282	0,192	0,192
N1	0,282	0,192	0
N2	0,282	0,192	0,192

A entalpia do ar de combustão para a 2ª fronteira foi calculada através da equação 4.3. Os resultados obtidos encontram-se na tabela D.8.

$$H_{\text{ar combustão}} = \dot{m}_{\text{ar combustão}} \times C_{p_{\text{ar combustão}}} \times (T_{\text{ar combustão}} - T_{\text{ref}})$$

$$\leftrightarrow H_{\text{ar combustão}} = 0,192 \times 1,007 \times (25 - 25) \leftrightarrow H_{\text{ar combustão}} = 0\text{kW}$$

Em que:

- $H_{\text{ar de combustão}}$  – Entalpia do ar de combustão (kW)
- $C_{p_{\text{ar de combustão}}}$  - calor específico do ar de combustão(kJ/(kg.°C)
- $T_{\text{ar de combustão}}$  - Temperatura do ar de combustão (°C)
- $T_{\text{ref}}$  - Temperatura de referência (°C)

O valor da massa volúmica e do calor específico do ar de combustão foi obtida na literatura [15] para uma temperatura de 25 °C.

#### Anexo D.4. Cálculo da potência da solução de impregnação

O caudal mássico de solução de impregnação foi calculado com base nos dados apresentados na tabela C.2 através da equação 4.7.

$$\dot{m}_{Dip} = \frac{m_{Dip}}{rolo} \times v \times \frac{1}{c_{rolo}} \leftrightarrow \dot{m}_{Dip} = 248 \times \frac{80}{60} \times \frac{1}{1870} \leftrightarrow \dot{m}_{Dip} = 0,172 \frac{kg}{s}$$

Onde:

$\dot{m}_{Dip}$ - Caudal mássico da solução de impregnação

$m_{Dip}/rolo$ - Massa de solução de impregnação por rolo de tecido em “verde” (kg/rolo)

v- Velocidade de impregnação (m/s)

$c_{rolo}$ - Comprimento do rolo de tecido em “verde” (m)

Por questões de confidencialidade, a composição do banho não pode ser aqui mencionada pelo que apenas se mostra qual a equação utilizada para o cálculo do Cp da solução de impregnação A e o resultado obtido.

$$\overline{C_p} = \sum_{i=1}^n y_i \times C_{p_i} \leftrightarrow \overline{C_p} = 4,045 kJ/(kg.K)$$

Sendo:

$\overline{C_p}$ - calor específico médio da solução de impregnação (kJ/(kg.K))

$y_i$ -fração molar do componente i

T- Temperatura (K)

Na tabela D.5 encontram-se os valores obtidos para o calor específico de cada solução e o respetivo caudal mássico consumido por artigo.

**Tabela D. 5-** Capacidade calorífica e caudal mássico de solução de impregnação consumido por artigo.

Solução de impregnação	Capacidade calorífica ((kJ/(kg.K))	$\dot{m}_{Dip}$ (kg/s) P1	$\dot{m}_{Dip}$ (kg/s) P2	$\dot{m}_{Dip}$ (kg/s) N1	$\dot{m}_{Dip}$ (kg/s) N2
A	4,075	0,172	0,220	*	*
B	3,117	0,078	0,107	*	*
C	2,989	*	*	0,104	0,138

\*- Não aplicável

Pela equação 4.3 calculam-se os valores das entalpias das soluções de impregnação que se encontram apresentados na tabela 4.9.

$$H_{Dip} = \dot{m}_{Dip} \times \overline{C_{p_{Dip}}} \times (T_{Dip} - T_{ref})$$

$$\leftrightarrow H_{Dip} = 0,172 \times 4,075 \times (15 - 25) \leftrightarrow H_{Dip} = -7,0 \text{ kW}$$

Onde:

$H_{Dip}$  – Entalpia da solução de impregnação (kW)

$T_{Dip}$  – Temperatura da solução de impregnação (°C)

$T_{ref}$  – Temperatura de referência (°C)

### Anexo D.5. Cálculo da potência do tecido em “verde”

O valor do  $C_p$  da matéria-prima do tecido foi encontrado na literatura [C]. O caudal mássico do tecido em “verde” foi calculado pela equação 4.9.

$$\dot{m}_{\text{tecido em "verde"}} = v \times \frac{m_{\text{tecido em "verde"}}}{C_{\text{rolo}}} \leftrightarrow \dot{m}_{\text{tecido em "verde"}} = \frac{80}{60} \times \frac{1.102}{1.920}$$

$$\leftrightarrow \dot{m}_{\text{tecido em "verde"}} = 0,765 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Na tabela D.6 apresentam-se o caudal mássico do tecido em “verde” para cada artigo.

**Tabela D. 6-** Caudal mássico do tecido em “verde” para cada artigo.

Artigo	$\dot{m}_{\text{tecido em "verde"}}$ (kg/s)
P1	0,765
P2	0,909
N1	0,361
N2	0,634

Onde:

$\dot{m}_{\text{tecido em "verde"}}$  - Caudal mássico do tecido em “verde” (kg/s)

v- Velocidade de impregnação (m/s)

$m_{\text{tecido em "verde"}}$  - Massa do tecido em “verde” (kg)

$C_{\text{rolo}}$  - Comprimento do rolo de tecido em “verde” (m)

Calculou-se a entalpia da tela em “verde” recorrendo à equação 4.3. Os resultados encontram-se na tabela 4.10.

$$H_{\text{tela em "verde"}} = \dot{m}_{\text{tela em "verde"}} \times C_{p_{\text{tela em "verde"}}} \times (T_{\text{tela em "verde"}} - T_{\text{ref}})$$

$$\leftrightarrow H_{\text{tela em "verde"}} = 0,765 \times 1,25 \times (15 - 25) \leftrightarrow H_{\text{tela em "verde"}} = -9,6\text{kW}$$

Em que:

- $H_{\text{tecido "em verde"}}$  - Entalpia de entrada do tecido em “verde” (kW)
- $\dot{m}_{\text{tecido em "verde"}}$  - Caudal mássico do tecido em “verde” (kg/s)
- $C_{p_{\text{tecido em "verde"}}$  - Capacidade calorífica do tecido em “verde” (kJ/(kg.°C)
- $T_{\text{tecido em "verde"}}$  - Temperatura do tecido em “verde” (°C)
- $T_{\text{ref}}$  - Temperatura de referência (°C)

## Anexo D.6. Cálculo da potência dos gases de exaustão

Para se calcular o caudal mássico dos gases de exaustão, tem que se ter em consideração a % de exaustão. Uma vez que a composição dos gases de exaustão é muito próxima da composição do ar (ver anexo F) a sua massa específica foi aproximada à do ar. A capacidade dos motores dos exatores foi consultada no manual do fabricante. A capacidade dos motores dos exatores das estufas 2 a 7 corresponde a 10.000m<sup>3</sup>/h e a do motor do exaustor da estufa 1 a 50.000m<sup>3</sup>/h para uma exaustão de 100%. Assim:

$$\dot{m}_{\text{gases de exaustão}} = \% \text{exaustão} \times \text{capacidade do exaustor} \times \rho_{\text{gases de combustão}}$$

$$\leftrightarrow \dot{m}_{\text{gases de exaustão}} = 0,2 \times \frac{50.000}{3.600} \times 0,778 \leftrightarrow \dot{m}_{\text{gases de exaustão}} = 2,161 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Onde:

- $\dot{m}_{\text{gases de exaustão}}$  - Caudal mássico dos gases de exaustão (kg/h)
- %exaustão – Valor percentual da exaustão
- Capacidade do motor – Caudal volumétrico correspondente a 100% de exaustão (m<sup>3</sup>/h)
- $\rho_{\text{ar exaustão}}$  - Massa específica dos gases de exaustão (kg/m<sup>3</sup>)

## OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

Na tabela D.7 apresentam-se os dados necessários para o cálculo calor específico dos gases de exaustão. A composição molar dos gases de exaustão encontra-se no anexo F.

**Tabela D. 7-** Valores das constantes utilizadas no cálculo da capacidade calorífica (cal/(mol.K))

Componente	a	b	c
N <sub>2</sub>	6,903	-3,8×10 <sup>-4</sup>	1,930×10 <sup>-6</sup>
CO <sub>2</sub>	5,316	1,4285×10 <sup>-2</sup>	-8,362×10 <sup>-6</sup>
O <sub>2</sub>	6,085	3,631×10 <sup>-3</sup>	-1,709×10 <sup>-6</sup>
H <sub>2</sub> O	7,7	4,59×10 <sup>-4</sup>	2,521×10 <sup>-6</sup>

Assim, pode-se calcular a capacidade calorífica dos gases de exaustão pela equação 4.10:

$$\bar{C}_p = \sum_{i=1}^n y_i \frac{\int_{298}^T (a + bT + cT^2) dT}{\Delta T}$$

$$\Leftrightarrow \bar{C}_p = 0,737 \frac{\int_{298}^{448} (6,903 - 3,8 \times 10^{-4} \times T + 1,930 \times 10^{-6} \times T^2) dT}{448 - 298} + 0,009$$

$$\times \frac{\int_{298}^{448} (5,316 + 1,4285 \times 10^{-2} \times T - 8,362 \times 10^{-6} \times T^2) dT}{448 - 298} + 0,193$$

$$\times \frac{\int_{298}^{448} (6,085 + 3,631 \times 10^{-3} \times T - 1,709 \times 10^{-6} \times T^2) dT}{448 - 298}$$

$$+ 0,061 \frac{\int_{298}^{448} (7,7 + 4,5910^{-4} \times T + 2,521 \times 10^{-6} \times T^2) dT}{448 - 298}$$

$$\Leftrightarrow \bar{C}_p = 6,280 \text{ cal}/(\text{mol. K})$$

$$\bar{C}_p = 6,280 \times 4,18 \div 1000 \div 0,0282 = 0,930 \text{ kJ}/(\text{kg. K})$$

Onde:

$\bar{C}_p$ - Calor específico médio (kJ/(kg.K))

$y_i$ -fração molar do componente i

a, b e c – Constantes para cálculo do calor específico molar de gases

T- Temperatura (K)

Na tabela D.8 apresentam-se os caudais mássicos e calores específicos dos gases de exaustão obtidos.

**Tabela D. 8-** Massa específica, caudais mássicos e as calores específicos dos gases de exaustão.

Fronteira	Artigo	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Caudal (kg/s)	Capacidade calorífica ((kJ/(kg.K))
1 <sup>a</sup>	P1	0,778	2,161	0,930
	P2	0,778	2,161	0,930
	N1	0,811	2,253	0,914
	N2	0,817	2,269	0,907
2 <sup>a</sup>	P1	0,700	4,258	0,973
	P2	0,700	4,258	0,973
	N1	0,734	3,364	0,956
	N2	0,726	3,328	0,960
3 <sup>a</sup>	P1	0,712	2,116	0,967
	P2	0,715	2,125	0,966
	N1	---	---	---
	N2	0,686	0,667	0,980

A entalpia dos gases de combustão foi calculada através da equação 4.3, sendo a temperatura média dos gases de combustão igual à temperatura do interior da estufa. Os valores obtidos podem ser consultados na tabela 4.11.

$$\begin{aligned}
 H_{\text{gases de combustão}} &= \dot{m}_{\text{gases de combustão}} \times C_{p_{\text{gases de combustão}}} \\
 &\times (T_{\text{média dos gases de combustão}} - T_{\text{ref}}) \leftrightarrow H_{\text{gases de combustão}} \\
 &= 2,161 \times 0,930 \times (175 - 25) \leftrightarrow H_{\text{gases de combustão}} = 301,6 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Em que:

$H_{\text{gases de combustão}}$  - Entalpia de entrada dos gases de combustão (kW)

$\dot{m}_{\text{gases de combustão}}$  - Caudal mássico dos gases de combustão (kg/s)

$C_{p_{\text{gases de combustão}}}$  - calor específico dos gases de combustão kJ/(kg.°C)

$T_{\text{gases de combustão}}$  - Temperatura dos gases de combustão (°C)

$T_{\text{ref}}$  - Temperatura de referência (°C)

## Anexo D.7. Cálculo da potência do tecido com solução de impregnação

Pelo facto da tela absorver a solução de impregnação a sua entalpia tem que ser calculada pela equação 4.11 pois é necessário ter em consideração a fração de solução de impregnação retida no tecido. Os resultados obtidos estão presentes na tabela 4.12 e 4.13.

$H_{tela \text{ à saída da } 2^{\text{a}} \text{ fronteira}}$

$$= \dot{m}_{tela \text{ em "verde"}} \times C_{p_{tecido \text{ em "verde"}}} \times (T_{tela \text{ em "verde"}} - T_{ref}) + \dot{m}_{Dip} \times y_{Dip} \times C_{p_{Dip}} \times (T_{Dip} - T_{ref})$$

$$\leftrightarrow H_{tela \text{ à saída da } 2^{\text{a}} \text{ fronteira}} = 0,765 \times 1,4 \times (166 - 25) + 0,172 \times 4,075 \times 0,15 \times (166 - 25)$$

$$\leftrightarrow H_{tela \text{ à saída da } 2^{\text{a}} \text{ fronteira}} = 116kW$$

Onde:

$H_{tecido \text{ à saída da } 2^{\text{a}} \text{ fronteira}}$  - Entalpia do tecido à saída da 2ª fronteira (kW)

$\dot{m}_{tecido \text{ em "verde"}}$  – Caudal mássico do tecido em “verde” (kg/s)

$C_{p_{tecido \text{ em "verde"}}$  – Capacidade calorífica do tecido em “verde” (kJ/(kg.°C)

$T_{tecido \text{ em "verde"}}$  – Temperatura do tecido em “verde” (°C)

$T_{ref}$  – Temperatura de referência (°C)

$\dot{m}_{Dip}$  – Caudal mássico de solução de impregnação (kg/s)

$y_{Dip}$  – fração mássica de solução de impregnação

$C_{p_{Dip}}$  – Capacidade calorífica da solução de impregnação (kJ/(kg.°C)

$T_{Dip}$  – Temperatura da solução de impregnação (°C)

As frações mássicas de solução de impregnação encontram-se na tabela D.9.

**Tabela D. 9-** Frações mássicas de solução de impregnação.

Solução de impregnação	Artigo	Entrada 2ª fronteira	Saída 2ª fronteira	Entrada 3ª fronteira	Saída 3ª fronteira
1	P1	0,7	0,15	0,15	0,08
	P2	0,7	0,15	0,15	0,08
	N1	0,7	0,15	0,15	0,09
	N2	0,7	0,15	0,15	0,09
2	P1	0	0	0,7	0,08
	P2	0	0	0,7	0,08
	N1	0	0	0	0
	N2	0	0	0	0

## Anexo D.8. Cálculo perdas térmicas

As perdas térmicas foram calculadas com base na equação 4.2. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 4.14.

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

↔  $\dot{q}_{saída}$  da 2ª fronteira

$$= (H_{gases \ de \ exaustão} + H_{tecido \ à \ saída \ da \ 2ª \ fronteira}) + \Delta H_{298}^0$$

$$- (H_{tecido \ húmido \ à \ entrada \ da \ 2ª \ fronteira} + H_{ar \ fresco \ da \ 2ª \ fronteira}$$

$$+ H_{ar \ de \ combustão \ da \ 2ª \ fronteira})$$

$$\leftrightarrow \dot{q}_{saída \ da \ 2ª \ fronteira} = (792,3 + 116,0) - 1803,7 - (54,4 + 15,7 + 0)$$

$$\leftrightarrow \dot{q}_{saída \ da \ 2ª \ fronteira} = 965,5 \text{ kW}$$

Onde:

$H_{saída}$  - Entalpia de saída do sistema (kW)

$\Delta H_{298}^0$  - Calor de combustão (kW)

$H_{entrada}$  - Entalpia de entrada no sistema (kW)

## Anexo E. Otimização energética

Neste anexo são apresentados todos os dados e resultados inerentes à realização das otimizações energéticas descritas no capítulo 5. O anexo E.1 refere-se à implementação do sistema ECO VAC e o anexo E.2 à alteração dos caudais de ventilação superior e inferior.

### Anexo E.1. Implementação do Sistema ECO VAC

Para validar o *set point* definido para otimização de cada estufa é necessário comparar o caudal dos gases de exaustão com o caudal mínimo de exaustão considerando que não entra ar fresco e que o caudal de voláteis da tela impregnada é desprezável. O valor mínimo de exaustão é calculado por:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{mínimo necessário}} &= \dot{m}_{\text{ar de combustão}} + \dot{m}_{\text{combustível}} \\ \Leftrightarrow \dot{m}_{\text{mínimo necessário}} &= \dot{m}_{\text{ar de combustão}} + \dot{V}_{\text{combustível}} \times \rho_{\text{combustível}} \\ \Leftrightarrow \dot{m}_{\text{mínimo necessário}} &= 0,278 + \frac{89,5}{3600} \times 0,814 \\ \Leftrightarrow \dot{m}_{\text{mínimo}} &= 0,298 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Em que:

- $\dot{m}_{\text{mínimo necessário}}$  – Caudal mássico mínimo para os gases de exaustão (kg/s)
- $\dot{m}_{\text{ar combustão}}$  – Caudal mássico de ar de combustão (kg/s)
- $\dot{m}_{\text{combustível}}$  – Caudal mássico de gás natural (kg/s)
- $\dot{V}_{\text{combustível}}$  – Caudal volumétrico de gás natural (m<sup>3</sup>/h)
- $\rho_{\text{combustível}}$  – Massa específica do gás natural (kg/ m<sup>3</sup>) [14]

Na tabela E.1 apresenta-se uma tabela comparativa entre o caudal mínimo e o caudal dos gases de exaustão obtido para os valores definidos para a otimização.

**Tabela E. 1-** Caudal mínimo de exaustão e caudal real dos gases de exaustão para os valores de *set point* definidos.

	Artigo	1ª Fronteira	2ª Fronteira			3ª Fronteira		
		Estufa 1	Estufa 2	Estufa 3	Estufa 4	Estufa 5	Estufa 6	Estufa 7
<b>Caudal mínimo necessário (kg/s)</b>	P1	0,298	0,064	0,071	0,059	0,064	0,069	0,064
	P2	0,298	0,066	0,071	0,058	0,065	0,069	0,063
	N1	0,293	0,059	0,067	0,058	0	0	0
	N2	0,286	0,062	0,070	0,058	0,068	0,064	0,063
<b>Caudal dos gases de exaustão (kg/s)</b>	P1	1,181	1,944	1,653	0,369	0,336	1,325	0,435
	P2	1,181	1,944	1,653	0,369	0,397	1,291	0,457
	N1	1,126	0,102	1,613	0,265	0	0	0
	N2	1,135	0,101	1,613	0,262	0,300	0,819	0,419

Assim, uma vez que o caudal dos gases de exaustão é sempre superior ao caudal mínimo pode-se validar os valores de *set point* definidos. A poupança anual para a estufa 1 é obtida por:

$$\text{Poupança} = \text{Custo situação atual} - \text{Custo com otimização}$$

$$\Leftrightarrow \text{Poupança} = \left( \dot{V}_{\text{gás natural}} \times (C_{\text{impregnado}} \div v_{\text{impregnação}}) \times \text{PCI} \times \text{Custo} \right)_{\text{situação atual}} - \left( \dot{V}_{\text{gás natural}} \times (C_{\text{impregnado}} \div v_{\text{impregnação}}) \times \text{PCI} \times \text{Custo} \right)_{\text{com otimização}}$$

$$\Leftrightarrow \text{Poupança} = (91,9 \times (2.145.463 \div 80) \div 60 \times 10,66 \times 0,03486) - (89,5 \times (2.145.463 \div 80) \div 60 \times 10,66 \times 0,03486)$$

$$\Leftrightarrow \text{Poupança} = 399\text{€/ano}$$

Em que:

$\dot{V}_{\text{gás natural}}$  - Caudal volumétrico de gás natural (m<sup>3</sup>/h)

$C_{\text{impregnado}}$  - Comprimento impregnado no ano de 2015 (m/ano)

$v_{\text{impregnação}}$  - Velocidade de impregnação (m/min)

PCI - Poder calorífico inferior (kWh/m<sup>3</sup>)

Custo - Preço unitário de gás natural (€/kWh)

## Anexo E.2. Alteração dos caudais de ventilação

Para o calculo da temperatura após alteração do coeficiente de convecção recorreu-se à equação 4.12. Assim para a estufa 1:

$$\dot{q}_{\text{transferido p/tela}} = h_{\text{conv}} \times A_{\text{tela}} \times (T_{\infty \text{ estufa}} - T_{\text{tela}}) \leftrightarrow$$

$$h_{\text{conv}} \times A_{\text{tela}} \times (T_{\infty \text{ estufa}} - T_{\text{tela}}) = 1,01 \times h_{\text{conv}} \times A_{\text{tela}} \times (T_{\infty \text{ estufa novo}} - T_{\text{tela}})$$

$$\leftrightarrow T_{\infty \text{ estufa novo}} = \frac{175}{1,01} \leftrightarrow T_{\infty \text{ estufa}} = 173^{\circ}\text{C}$$

Em que:

$\dot{q}_{\text{transferido p/tela}}$  – Potência térmica transferida para a tela (kW)

$h_{\text{conv}}$  – Coeficiente convectivo de transferência de calor entre o ar quente da estufa e a tela (kW/(m<sup>2</sup>.°C))

$A_{\text{tela}}$  – Área tela (m<sup>2</sup>)

$T_{\infty \text{ estufa}}$  – Temperatura no interior da estufa (°C)

$T_{\text{tela}}$  – Temperatura da tela (°C)

Os resultados obtidos encontram-se na tabela 6.7.

Para se determinar qual o caudal de gás natural para as novas temperaturas usou-se a equação 4.13. Assumiu-se que o caudal dos gases de exaustão e a potência térmica das correntes de entrada admitiam o mesmo valor com ou sem otimização da temperatura.

$$\dot{V}_{\text{novo}} = \frac{\dot{m}_{\text{gases de exaustão}} \times C_{p_{\text{gases de exaustão}}} \times (T_1 - T_2) + \dot{v}_1 \times (-\text{PCI})}{-\text{PCI}}$$

$$\leftrightarrow \dot{V}_{\text{novo}} = \frac{2,161 \times 0,930 \times (175 - 173) + 91,9 \times (-10,66)}{-10,66}$$

$$\leftrightarrow \dot{V}_{\text{novo}} = 91,2 \text{ m}^3/\text{h}$$

Em que:

$\dot{V}_{\text{novo}}$  – Caudal de gás natural para a nova temperatura (m<sup>3</sup>/h)

$\dot{m}_{\text{gases de exaustão}}$  – Caudal mássico dos gases de exaustão (kg/h)

$C_{p_{\text{gases de combustão}}}$  - calor específico dos gases de combustão kJ/(kg.°C)

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ECO VAC NA MÁQUINA DE IMPREGNAR TELA PARA PNEUS

$T_1$  - Temperatura dos gases de combustão atual ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_2$  - Temperatura dos gases de combustão nova ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\dot{v}_1$  - Caudal de gás natural para a temperatura atual ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

PCI- Poder calorífico inferior ( $\text{kWh}/\text{m}^3$ )

Os resultados obtidos encontram-se nas tabelas 6.8, 6.9, 6.10 e 6.11.

## Anexo F. Composição dos gases de exaustão

A análise aos gases de exaustão foi efetuada por uma empresa externa à C-ITA. Os resultados obtidos para a 1ª, 2ª e 3ª fronteira apresentam-se na figura F.1, F.2 e F.3 respetivamente.

**Tabela F. 1-** Resultados da análise dos gases de exaustão da 1ª fronteira.

- RESULTADOS DO ENSAIO – PARÂMETROS SOLICITADOS:

ENSAIO	IMPREGNAÇÃO ZELL #1	VLE <sup>[1]</sup>	INCERTEZA
H <sub>2</sub> O (%)	6,1	-	±0,5
O <sub>2</sub> (%)	19,3	-	±0,7
CO <sub>2</sub> (%)	0,9	-	±0,9x10 <sup>-1</sup>
CO (mg/Nm <sup>3</sup> , gás seco)	7,8	-	±0,8
NO <sub>x</sub> , expressos em NO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> , gás seco)	15,8	500	±1,6
SO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> , gás seco)	<5,8 <sup>a)</sup>	500	-
COV, expressos em C (mg/Nm <sup>3</sup> , gás seco)	<3,4 <sup>a)</sup>	200	-
PARTÍCULAS (mg/Nm <sup>3</sup> , gás seco)	<0,8 <sup>a)</sup>	150	-
ISOCINETISMO (%)	≅100		

**Tabela F. 2-** Resultados da análise dos gases de exaustão da 2ª fronteira.

- RESULTADOS DO ENSAIO – PARÂMETROS SOLICITADOS:

ENSAIO	IMPREGNAÇÃO ZELL #2	VLE <sup>[1]</sup>	INCERTEZA
H <sub>2</sub> O (%)	4,8	-	±0,5
O <sub>2</sub> (%)	19,2	-	±0,7
CO <sub>2</sub> (%)	0,9	-	±0,1
CO (mg/Nm <sup>3</sup> , gás seco)	44,9	-	±4,5
NO <sub>x</sub> , expressos em NO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> , gás seco)	19,4	500	±1,9
SO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> , gás seco)	<5,8 <sup>a)</sup>	500	-
COV, expressos em C (mg/Nm <sup>3</sup> , gás seco)	8,5	200	±0,4
PARTÍCULAS (mg/Nm <sup>3</sup> , gás seco)	3,3	150	±0,2
ISOCINETISMO (%)	≅100		

**Tabela F. 3-** Resultados da análise dos gases de exaustão da 3ª frente.

- RESULTADOS DO ENSAIO – PARÂMETROS SOLICITADOS:

ENSAIO	IMPREGNAÇÃO ZELL #3	VLE <sup>(1)</sup>	INCERTEZA
H <sub>2</sub> O (%)	2,3	-	±0,4
O <sub>2</sub> (%)	19,2	-	±0,7
CO <sub>2</sub> (%)	0,9	-	±0,1
CO (mg/Nm <sup>3</sup> , gás seco)	24,4	-	±2,4
NO <sub>x</sub> , expressos em NO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> , gás seco)	15,6	500	±1,6
SO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> , gás seco)	<5,8 <sup>a)</sup>	500	-
COV, expressos em C (mg/Nm <sup>3</sup> , gás seco)	11,1	200	±0,6
PARTÍCULAS (mg/Nm <sup>3</sup> , gás seco)	<0,9 <sup>a)</sup>	150	-
ISOCINETISMO (%)	≅100		