



**Universidade de
Aveiro
Ano 2019**

Departamento de Engenharia Mecânica

**Fábio Alexandre
Pereira da Silva**

**Aumento da Eficiência Energética na Indústria dos
Pavimentos**



**Fábio Alexandre
Pereira da Silva**

**Aumento da Eficiência Energética na Indústria dos
Pavimentos**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Mestre Miguel da Silva Oliveira, Professor assistente convidado do Departamento de Economia, Gestão, Engenharia Industrial e Turismo da Universidade de Aveiro.

o júri

Presidente

Prof. Doutor Vítor António Ferreira da Costa
Professor Catedrático, DEM - Universidade de Aveiro

Vogal – arguente principal

Prof. Doutor Luís António da Cruz Tarelho
Professor Associado, DAO - Universidade de Aveiro

Vogal - Orientador

Mestre Miguel da Silva Oliveira
Assistente Convidado, DEGEIT - Universidade de Aveiro

agradecimentos

À minha família e namorada, por todo o apoio ao longo do mestrado, a todos os meus amigos pelos bons momentos proporcionados durante o curso, ao meu orientador Professor Miguel Oliveira, pela ajuda e orientação, e Engenheiro João Mendes, que sempre se mostrou disponível para me orientar e transferir conhecimentos no decorrer do estágio.

palavras-chave

Cerâmica, Eficiência Energética, Secador Horizontal, Ar Comprimido.

Resumo

O presente relatório foi realizado na empresa Pavigrés Cerâmicas, S.A, na unidade fabril da Cerev, situada no concelho da Mealhada. O objetivo do trabalho passou pela apresentação de medidas/propostas com vista a uma redução de consumos e a uma utilização mais eficiente de energia.

Para atingir o objetivo foi efetuada uma análise a todo o processo, para se perceber quais os principais consumidores de energia e quais desses consumidores apresentavam uma maior margem de possível melhoria. Foram selecionados os equipamentos de secagem do produto, concretamente os secadores horizontais, e o sistema de ar comprimido.

No caso dos secadores horizontais foi possível constatar que, os mesmos apresentavam valores de performance muito inferiores aos secadores presentes atualmente no mercado, devido sobretudo ao baixo nível de desenvolvimento, principalmente tecnológico, dos componentes que o constituem. Apresentando-se assim como um desperdício enorme de energia, e neste caso em específico de gás natural. Para tal, foi proposta a substituição dos secadores atuais, por dois secadores novos com um rendimento bastante superior.

Quanto ao ar comprimido, apresentam-se propostas de melhoria que passam pela substituição dos compressores atuais, atendendo à antiguidade do compressor de reserva, e ao facto do compressor de uso permanente apresentar elevados consumos de energia em períodos de baixa necessidade de ar, devido ao seu sobredimensionamento.

keywords

Ceramic, Energetic Efficiency, Horizontal Dryer, Compressed Air.

Abstract

This report was carried out at the company Pavigrés Cerâmicas, S.A, at Cerev factory unit, located in the municipality of Mealhada. The objective of the work was the presentation of measures/proposals with a view of a reduction of consumption and a more efficient use of energy.

In order to reach the objective, an analysis was made of the whole process, so that it would be possible to understand which are the major energy consumers and which one of them would show the better possible improvement. The drying equipment of the product, more specifically, the horizontal driers, and the compressed air system, were selected.

In the case of horizontal driers, it was possible to verify that they have lower performance values in comparison to the driers in the market, mainly due to the low level of development, mainly technological, of the constituent components. This presents itself as a huge waste of energy, and in this specific case, natural gas. For this reason, it was proposed to replace the current driers by two new driers with a much higher yield.

As for the compressed air, there are proposals for improvement that replace the current compressor, taking into account the age of the backup compressor, and the fact that the compressor of permanent use presents high energy consumption in periods of low air need, due to their oversizing.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Metodologia	2
1.4 Estrutura do Trabalho	2
1.5 Cronograma.....	3
2. Contextualização	5
2.1 Indústria Portuguesa de Cerâmica.....	5
2.1.1 Caraterização da Produção	5
2.1.2 Caraterização Financeira.....	7
2.2 Consumo de Energia	9
2.2.1 Nível Nacional	9
3. Empresa	15
3.1 Apresentação	15
3.2 Processo Produtivo.....	16
3.2.1 Receção e armazenamento de Matérias-Primas	16
3.2.2 Processamento das Pastas	17
3.2.3 Atomização.....	18
3.2.4 Prensagem e Secagem	19
3.2.5 Preparação de vidros.....	20
3.2.6 Vidragem e Decoração	20
3.2.7 Cozedura	21
3.2.8 Retificação e Escolha	22
3.2.9 Embalamento e Armazenamento.....	23
3.3 Consumos de Energia	24
4. Secador Horizontal	27

4.1	Secador Horizontal Sacmi	27
4.2	Estratégia de Cálculo.....	29
4.2.1	Balanço Mássico	29
4.2.2	Balanço Térmico.....	32
4.2.3	Energia Elétrica	42
4.2.4	Rendimento	43
4.2.5	Dados Gerais.....	44
4.3	Instrumentos de Medida Utilizados	45
4.4	Dados Experimentais.....	46
4.5	Apresentação e Análise dos Resultados Experimentais	51
4.5.1	Balanço Mássico	51
4.5.2	Balanço Térmico.....	52
4.5.3	Potência Elétrica.....	54
4.5.4	Rendimentos	55
4.6	Melhorias Propostas	56
5.	Sistema de Ar Comprimido	61
5.1	Rede de Ar Comprimido	61
5.2	Compressores	62
5.3	Fugas de Ar Comprimido.....	64
5.4	Análise do Sistema de Ar Comprimido.....	65
5.5	Metodologia de Análise de Dados	66
5.6	Análise de Dados do Compressor	67
5.7	Soluções Propostas.....	73
5.7.1	Análise Detalhada das Soluções Apresentadas.....	73
5.7.2	Estratégia de Cálculo para os Novos Consumos	76
5.7.3	Resultados Obtidos	78
6.	Considerações Finais	81
7.	Referências	83

8. Anexos85

Índice de Figuras

Figura 1 - Distribuição da Indústria Portuguesa de Cerâmica ^[1]	6
Figura 2 - Produção da Indústria Portuguesa de Cerâmica ^[1]	7
Figura 3 - Exportações de Produtos Cerâmicos ^[2]	8
Figura 4 - Mercados de Exportação de Produtos Cerâmicos ^[2]	8
Figura 5 - Consumo Energia Primária ^[3]	10
Figura 6 - Consumos de Energia por Setor de Atividade em Portugal (2017) ^[4]	10
Figura 7 - Consumo Gás Natural ^[3]	11
Figura 8 - Gastos de Gás Natural por Setor de Atividade em Portugal (2017) ^[4]	12
Figura 9 - Consumo de Eletricidade ^[3]	12
Figura 10 - Gastos de Energia Elétrica por Setor de Atividade em Portugal (2017) ^[4]	13
Figura 11 - Vista Exterior da Empresa	15
Figura 12 - Armazém Matérias-Primas	16
Figura 13 - Zona de Preparação de Pastas	17
Figura 14 - Pó após a Atomização	18
Figura 15 - Secador Horizontal	18
Figura 16 - Secção de Preparação de Vidros	19
Figura 17 - Aplicação de Engobe	20
Figura 18 - Saída do Forno	21
Figura 19 - Zona de Escolha	22
Figura 20 - Produto Final Preparado para Expedição	22
Figura 21 - Consumo de Gás Natural por Secção na Cerev (2018)	23
Figura 22 - Consumo de Energia Elétrica por Secção na Cerev (2018)	24
Figura 23 - Características dos Secadores Horizontais	25
Figura 24 - Zona de Entrada de Ar para Arrefecimento	26
Figura 25 - Princípio de Admissão e Extração do Ar	26
Figura 26 - Esquema do Balanço Mássico	28
Figura 27 - Esquema do Balanço Térmico	33
Figura 28 - Representação do Secador	36
Figura 29 - Divisão das Condutas	37
Figura 30 - Parede s/ conduta com porta (Módulos 1,2,4,5,6,8)	38
Figura 31 - Parede s/ conduta sem porta (Módulos 3 e 7)	38
Figura 32 - Parede com conduta	39
Figura 33 - Conduta	39

Figura 34 - Balança Eletrónica "HF-6100"	43
Figura 35 - Micromanómetro "8715 TSI"	43
Figura 36 - Analisador de Gases "testo 350-XL" ^[15]	44
Figura 37 - Termómetro Infravermelhos "Fluke 62 Mini"	44
Figura 38 – Representação das Percentagens Relativas à Potência Térmica de Saída ..	51
Figura 39 - Secador SACMI ^[16]	54
Figura 40 - Evolução do Payback com a Variação do Valor das Cotações	56
Figura 41 - Diagrama de Tipos de Compressores.....	59
Figura 42 - Ciclo de Trabalho de um Compressor de Parafuso ^[21]	60
Figura 43 - Compressor Ingersoll Rand IRN110K-CC.....	61
Figura 44 - Comparação de Controlos de Capacidade Compressores Rotativos ^[23]	62
Figura 45 - Perfil Consumo (Janeiro Semana-Dia).....	64
Figura 46 - Perfil Consumo (Março Semana - Noite).....	65
Figura 47 - Perfil Consumo (Março - Domingo).....	66
Figura 48 - Consumo Médio de Ar Comprimido (m^3/min)	66
Figura 49 - Potência Média de Funcionamento do Compressor (kW)	67
Figura 50 - Custo de Produção de Ar Comprimido ($€/m^3$)	67

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Cronograma de Estágio	3
Tabela 2 - Descrição das Diferentes Tarefas	4
Tabela 3 - Dados Gerais	44
Tabela 4 - Informações sobre os casos de Estudo	47
Tabela 5 - Dados Experimentais Relativos às Peças	47
Tabela 6 - Dados Experimentais Relativos ao Gás Natural	48
Tabela 7 - Dados Experimentais Relativos aos Gases Extraídos pela Chaminé	48
Tabela 8 - Dados Experimentais Relativos à Parede s/ Conduta (em °C)	49
Tabela 9 - Dados Experimentais Relativos à Parede Conduta (em °C)	49
Tabela 10 - Dados Experimentais Relativos à Conduta Inferior (em °C)	50
Tabela 11 - Dados Experimentais Relativos à Conduta Superior (em °C)	51
Tabela 12 - Resultados Experimentais Relativos ao Caudal Mássico de Entrada (kg/s)	52
Tabela 13 - Resultados Experimentais Relativos ao Caudal Mássico de Saída (kg/s)	52
Tabela 14 - Resultados Experimentais Relativos às Potências Térmicas de Entrada (em kW)	53
Tabela 15 - Resultados Experimentais Relativos às Potências Térmicas de Saída (em kW)	53
Tabela 16 - Percentagens Relativas às Potências Térmicas de Saída	54
Tabela 17 – Energia Elétrica	55
Tabela 18 - Rendimentos Obtidos	55
Tabela 19 - Valores Obtidos para os Diferentes Cenários	57
Tabela 20 - Valores Obtidos para Redução de Emissões nos Diferentes Cenários	58
Tabela 21 - Caudal de Ar (Nm^3/min) perdido através de Fugas ^[22]	65
Tabela 22 - Estimativa do Caudal de Fugas	72
Tabela 23 - Preço das Perdas de Ar Comprimidos Através das Fugas Estimadas	72
Tabela 24 - Características dos Compressores (Sol.1)	74
Tabela 25 - Percentagens de Necessidade de Ar Comprimido (Sol.1)	74
Tabela 26 - Características dos Compressores (Sol.2)	75
Tabela 27 - Consumo de Energia Previsto e Registado no Período de Análise (kWh)	78
Tabela 28 - Custo do Consumo de Energia Previsto e Registado no Período de Análise (€)	79
Tabela 29 - Valores Finais de Poupança e Payback	79

Nomenclatura

L – Altura da superfície (m)

$A_{chamine}$ – Área da chaminé (m²)

A_s – Área da superfície (m²)

q_{conv} – Calor cedido por convecção (kWt)

q_{rad} – Calor cedido por radiação (kWt)

$q_{Parede\ Conduta}$ – Calor cedido pela parede com conduta (kWt)

$q_{Condutas}$ – Calor cedido pelas condutas (kWt)

$q_{Parede\ s/\ Conduta}$ – Calor cedido pela parede sem conduta (kWt)

$Cp_{Ar,Ass}$ – Calor específico do ar assumido (kJ/kg.K)

$Cp_{\text{Água}, Tout}$ – Calor específico de água de saída (kJ/kg.K)

Cp_{GN} – Calor específico do gás natural (kJ/kg.K)

$Cp_{Ar,Comb}$ – Calor específico do ar de combustão (kJ/kg.K)

$Cp_{Peça}$ – Calor específico da peça (kJ/kg.K)

$Cp_{\text{Água}}$ – Calor específico da água líquida (kJ/kg.K)

$l_{\text{Água}}$ – Calor latente de vaporização da água (kJ/kg.K)

$Capacidade_{Compressor}$ – Capacidade de produção de ar pelo compressor (Nm³/min)

$Caudal_{Medido}$ – Caudal consumido pelo compressor registado plataforma de GC (Nm³/min)

\dot{m}_{in} – Caudal mássico de entrada (kg/s)

\dot{m}_{out} – Caudal mássico de saída (kg/s)

\dot{m}_{GN} – Caudal mássico de gás natural (kg/s)

$\dot{m}_{Peça,in}$ – Caudal mássico de peças de entrada (kg/s)

$\dot{m}_{\text{Água},in}$ – Caudal mássico de água de entrada (kg/s)

$\dot{m}_{Ar,Comb}$ – Caudal mássico de ar de combustão (kg/s)

$\dot{m}_{Ar,Ass}$ – Caudal mássico de ar assumido (kg/s)

$\dot{m}_{Peça,out}$ – Caudal mássico de peças de saída (kg/s)

$\dot{m}_{\text{Água},out}$ – Caudal mássico de água de saída (kg/s)

$\dot{m}_{Gás,Comb}$ – Caudal mássico do gás proveniente da combustão e do ar de secagem (kg/s)

$Caudal_{Máximo}$ – Caudal máximo produzido pelo compressor (Nm³/min)

$Caudal_{Mínimo}$ – Caudal mínimo produzido pelo compressor (Nm³/min)

\bar{h} - Coeficiente de transferência de calor por convecção (kW/m².K)

k – Coeficiente de condutividade térmica do ar (kW/m.K)

ε – Coeficiente de emissividade do material

β – Coeficiente térmico de expansão volumétrica (K^{-1})

ν – Coeficiente de viscosidade cinemática (m^2/s)

σ – Constante de Stefan-Boltzmann ($kW/m^2.K^4$)

$Consumo\ ar_{Total}$ – Consumos total de ar em períodos de necessidades inferior à capacidade do compressor de velocidade fixa (Nm^3)

$\rho_{ar,extraído}$ – Densidade do ar (kg/m^3)

ρ_{GN} – Densidade do gás natural (kg/Nm^3)

α – Difusividade térmica (m^2/s)

$Energia_{Variável}$ – Energia consumida prevista pelos compressores de velocidade variável (kWh)

$Energia_{Vazio}$ – Energia consumida pelo compressor de velocidade fixa em vazio (kWh)

$Fator$ – Fator que relaciona a energia consumida com a energia teórica

$m_{peça,in}$ – Massa da peça à entrada (kg)

$m_{peça,out}$ – Massa da peça à saída (kg)

Ra_L – Número de Rayleigh

\overline{Nu}_L – Número de Nusselt

Pr – Número de Prandtl

$Prensagens_{/min}$ – Número de prensagens por minuto

$N^o peças_{/prensagem}$ – Número de peças resultantes de cada prensagem

$\acute{A}gua\ removida$ – Percentagem de água removida ao longo da secagem (%)

q_{Perdas} – Perdas por convecção e radiação (kWt)

q_{Outros} – Perdas não contabilizadas (kWt)

P – Perímetro (m)

$Períodos_{Carga}$ – Períodos em que o compressor de velocidade fixa permanece em carga

$Períodos_{Máximo}$ – Períodos em que a necessidade de ar comprimido é superior à capacidade de produção do compressor de velocidade fixa

$Períodos_{Supl}$ – Períodos calculados em que a necessidade de ar comprimido é inferior à capacidade de produção do compressor de velocidade fixa

$Períodos_{Vazio}$ – Períodos de funcionamento do compressor de velocidade fixa em vazio

PCI_{GN} – Poder calorífico inferior do gás natural (kWh/ Nm^3)

q_{GN} – Potência térmica associada ao gás natural (kWt)

$q_{Ar,Comb}$ – Potência térmica associada ao ar de combustão (kWt)

$q_{Peça,in}$ – Potência térmica associada à peça na entrada (kWt)

$q_{\acute{A}gua,in}$ – Potência térmica de água à entrada (kWt)

- $q_{Ar,Ass}$ – Potência térmica associada ao ar assumido (kWt)
- $q_{Peça,out}$ – Potência térmica associada à saída peça (kWt)
- $q_{Água,out}$ – Potência térmica associada à água na saída (kWt)
- $q_{Gás,Comb}$ – Potência térmica associada aos gases de combustão (kWt)
- q_{in} – Potência térmica de entrada (kWt)
- q_{out} – Potência térmica de saída (kWt)
- $kcal/kg_{água,rem}$ – Potência necessária por massa de água removida
- $kcal/kg_{água,rem}(Gás)$ – Potência térmica, proveniente da combustão do gás natural, necessária por massa de água removida
- $P_{elétrica}$ – Potência Elétrica (kWe)
- $Potência_{Nominal}$ – Potência nominal do compressor (kW)
- $Potência\ Máxima_{Total}$ – Potência máxima total do compressor (kW)
- $Potência\ Estimada_{Vazio}$ – Potência estimada em vazio do compressor (kW)
- $P_{rel\ GN}$ – Pressão relativa do gás natural lida no manómetro à entrada do secador (bar)
- $\eta_{água}$ – Rendimento do secador na remoção de água (%)
- $\eta_{água+peça}$ – Rendimento do secador na remoção de água e aquecimento da peça (%)
- $t_{med\ GN}$ – Tempo de medição de consumo de gás natural (s)
- T_{GN} – Temperatura do gás natural lida no termómetro à entrada do secador (°C)
- $T_{Gás,Comb}$ – Temperatura dos gases extraídos pela chaminé (°C)
- T_{ref} – Temperatura de referência (°C)
- $T_{Ar,Comb}$ – Temperatura do ar de combustão (°C)
- $T_{Peça.in}$ – Temperatura da peça à entrada (°C)
- $T_{Água,in}$ – Temperatura da água à entrada (°C)
- $T_{Ar,Ass}$ – Temperatura do ar assumido (°C)
- $T_{Peça,out}$ – Temperatura da peça à saída (°C)
- $T_{Água,out}$ – Temperatura da água à saída (°C)
- T_f – Temperatura do filme (K)
- T_s – Temperatura da superfície (K)
- T_{∞} – Temperatura ambiente (K)
- $Períodos_{Totais}$ – Total de períodos de funcionamento do compressor
- $v_{extração}$ – Velocidade de extração do gás de combustão e do ar de secagem (m/s)
- $V_{real\ GN}$ – Volume de gás natural (Nm³)
- $V_{lido\ GN}$ – Volume de gás natural lido no contador à entrada do secador (m³)

1. Introdução

Nos dias que correm, a poupança de energia apresenta-se, cada vez mais, como um dos principais pilares na estrutura de uma empresa, para que a mesma possa atingir os seus objetivos, isto porque, um uso eficiente de energia fará com que a empresa apresente um número inferior de gastos, e por consequência um balanço económico mais positivo.

A indústria da cerâmica, como todo o setor da indústria transformadora, apresenta consumos de energia bastante elevados, particularmente no caso do gás natural e eletricidade. Neste panorama, a Cerev, empresa onde decorreu o estágio, não é exceção, apresentando consumos bastante elevados. No caso do gás natural, tem como principais consumidores os secadores e os fornos, quanto à eletricidade, os principais gastos vêm das prensas e dos moinhos. Outro grande problema das unidades fabris prende-se com o consumo elevado de ar comprimido, que requer uma grande quantidade de energia para ser produzido.

O projeto desenvolvido visa uma redução de alguns dos consumos referidos anteriormente, com vista a uma diminuição dos gastos da empresa, sendo o consumo do gás natural e o consumo de ar comprimido os dois principais temas deste trabalho.

1.1 Enquadramento

O projeto apresentado inseriu-se no âmbito do programa GALP 21, que em cooperação conjunta com 3 universidades portuguesas (Universidade de Aveiro, Instituto Superior Técnico e Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto), leva a cabo 21 estudos anuais desenvolvidos por 7 alunos de cada uma das universidades referidas, com vista a uma redução de consumos e uma utilização mais eficiente da energia.

Neste caso em particular, o estudo realizou-se na unidade fabril Cerev, pertencente à empresa Pavigrés Cerâmicas S.A., ao longo de 6 meses, resultando num conjunto de medidas propostas, com o objetivo de uma redução dos consumos energéticos.

1.2 Objetivos

Os principais objetivos deste relatório foram:

- Analisar os principais consumidores de energia da empresa;

- A partir da análise anterior, selecionar as potenciais áreas de melhoria;
- Estudar detalhadamente cada uma dessas áreas;
- Apresentar soluções/medidas com o objetivo de uma redução e um uso mais eficiente de energia.

1.3 Metodologia

O principal objetivo do estágio realizado visa um melhor uso da energia, com vista a um aumento da eficiência energética. Para tal, numa primeira fase, foi realizada uma análise de todo o processo produtivo, desde a chegada da matéria-prima até ao armazenamento, com o intuito de perceber quais seriam as áreas/equipamentos que necessitavam de ser intervencionadas, de forma a reduzir o consumo de energia. Posto isto, foram selecionados os secadores horizontais e o sistema de Ar Comprimido.

Quanto aos secadores horizontais foram realizados 3 casos de estudo, para produtos de diferentes formatos. Nos 3 casos, procedeu-se a um balanço mássico e a um balanço térmico, sendo também analisada a performance dos secadores, com base na relação entre a quantidade de energia fornecida pela combustão do gás natural e a massa de água removida. Este último valor apresenta uma importância significativa, devido ao facto de ser o principal parâmetro de comparação entre secadores.

No sistema de Ar Comprimido procedeu-se a uma análise de toda a rede. A partir da informação recolhida, da produção de ar comprimido e da energia necessária para essa produção, foi possível constatar que nos períodos de menor necessidade de ar o compressor desligava, o que levava a um consumo de energia extra quando voltava a ligar. Tendo em conta esta situação, o estudo no sistema de ar comprimido focou-se sobretudo no compressor, com vista a uma opção mais eficiente nos casos de menor consumo.

1.4 Estrutura do Trabalho

O relatório de estágio apresentado encontra-se dividido em seis capítulos, com o objetivo de um acompanhamento sequenciado de todo o trabalho realizado.

No capítulo inicial procede-se a uma introdução do relatório, onde são apresentados os principais objetivos, bem como a motivação que levou à realização do mesmo.

No segundo capítulo é feita uma caracterização da indústria cerâmica, sobretudo a nível nacional, apresentando-se todos os ramos da cerâmica, quais as suas áreas de exportação, entre outros fatores que caracterizam este tipo de indústria. Neste capítulo é

possível encontrar também uma análise aos consumos energéticos no panorama nacional, tanto gerais, como no caso particular da indústria cerâmica.

No terceiro capítulo é apresentada a empresa, sendo detalhado todo o processo produtivo e os consumos energéticos da mesma, nas diferentes secções.

O quarto capítulo é todo ele dedicado ao estudo dos secadores horizontais presentes na empresa. Neste capítulo é apresentada a estratégia de cálculo adotada, todos os valores medidos e calculados, culminando com a apresentação de melhorias e respetiva análise.

No quinto capítulo é analisado o sistema de ar comprimido, abordando temas importantes como os compressores e as fugas. Ao longo do capítulo é possível encontrar análises a diferentes períodos de consumo, bem como apresentações de algumas melhorias que poderiam vir a ser implementadas.

Por fim, são feitas considerações gerais às propostas apresentadas nos capítulos anteriores e apresentam-se possíveis propostas para trabalhos futuros.

1.5 Cronograma

O cronograma, Tabela 1, bem como a Tabela 2, sistematizam e enquadram no tempo, todas as tarefas realizadas ao longo do estágio.

Tabela 1 - Cronograma de Estágio

Fase	Tarefa	2019																	
		Fevereiro			Março			Abril			Maio			Junho					
1	1																		
	2																		
	3																		
2	4																		
	5																		
	6																		
3	7																		
	8																		
	9																		
4	10																		

Tabela 2 - Descrição das Diferentes Tarefas

Fase	Tarefa	Descrição
1	1	Conhecimento da empresa
	2	Identificação dos principais consumidores de energia
	3	Caraterização da indústria da cerâmica
2	4	Elaboração de um plano de avaliação do secador
	5	Realização de medições
	6	Análise dos resultados e análise de possíveis melhorias
3	7	Conhecimento detalhado da rede de ar comprimido
	8	Estudo de possíveis melhorias
	9	Análise dos resultados obtidos
4	10	Elaboração do relatório final

2. Contextualização

2.1 Indústria Portuguesa de Cerâmica

2.1.1 Caracterização da Produção

A nível de setores da indústria, o setor da indústria da cerâmica apresenta-se como um dos mais antigos. Em fase inicial, a área da construção figurava-se como o seu principal cliente, através da produção de telhas, tijolos, revestimentos e louças sanitárias. Nos tempos presentes, com a evolução tecnológica e o desenvolvimento das funcionalidades da cerâmica, aliadas à versatilidade e durabilidade dos materiais cerâmicos, estes podem ser aplicados em diversas áreas, como por exemplo, investigação médica, indústria automóvel, entre outras.

O setor da indústria da cerâmica encontra-se então subdividido em vários subsectores:

- **Cerâmica Estrutural:** telhas, tijolos, produtos de grés para construção e pavimentos rústicos;
- **Cerâmica de Pavimentos e Revestimentos:** azulejos, mosaicos e placas cerâmicas;
- **Cerâmica de Louça Sanitária:** louça sanitária em porcelana, grés fino e grés, incluindo lavatórios, bidés, entre outros;
- **Cerâmica Utilitária e Decorativa:** louça de mesa, de cozinha e de decoração;
- **Cerâmicas Especiais:** isoladores elétricos, produtos refratários e outros.

Tendo em conta o processo de fabrico e as matérias-primas utilizadas na produção dos produtos, a cerâmica pode ainda ser classificada como:

- **Terracota:** peças construídas através da cozedura no forno de argila;
- **Cerâmica Vidrada:** consiste na aplicação de um vidro sobre uma base normalmente argilosa, como é o caso do azulejo;
- **Grés:** podendo ser cerâmica vidrada, por vezes pintada;
- **Faiança:** obtida através de uma pasta porosa cozida a elevadas temperaturas, produzindo assim uma louça fina.

No ano de 2014, a indústria cerâmica portuguesa era responsável por cerca de 0,5 % do PIB português, empregando assim mais de 15800, nos seus diferentes subsectores, distribuídos por mais de 1120 empresas ao longo do território nacional.

Indústria Cerâmica 2014

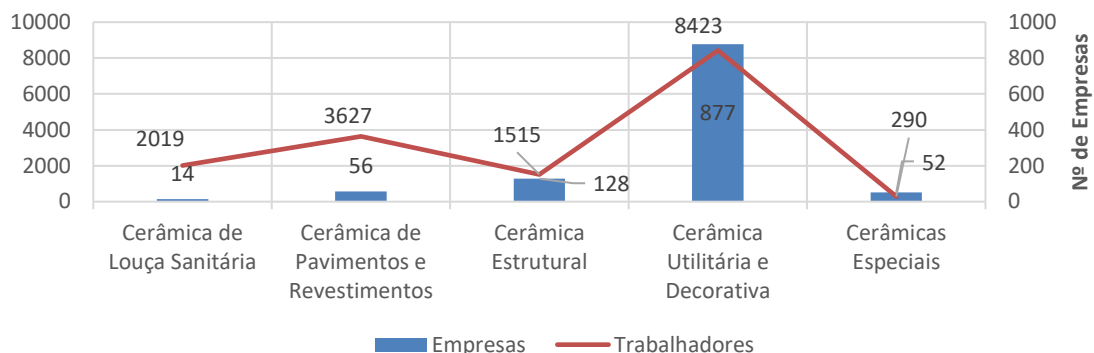


Figura 1 - Distribuição da Indústria Portuguesa de Cerâmica ^[1]

Destacando-se entre os subsectores, a indústria da cerâmica utilitária e decorativa que empregava mais de 50% dos trabalhadores e representava mais de 75% das empresas do ramo cerâmico.

Quanto à produção, no período compreendido entre 2010 e 2014, esta manteve os seus valores muito similares de ano para ano, nos diferentes subsectores, embora se tenha assistido a um ligeiro declínio da produção de matérias cerâmicas para revestimento e pavimento, este decréscimo está associado em grande parte a um menor investimento em maquinarias e equipamentos.

Produção de Cerâmica Nacional 2010-2014

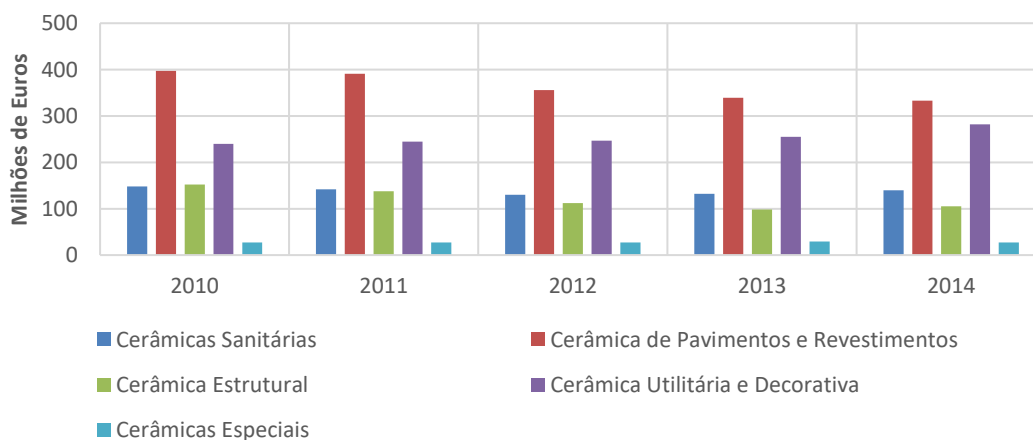


Figura 2 - Produção da Indústria Portuguesa de Cerâmica ^[1]

Analisando os gráficos apresentados na Figura 1 e na Figura 2, é possível constatar que a Cerâmica de Pavimentos e Revestimento embora não sendo o subsector que maior expressão tem a nível de número de empresas e de colaboradores, apresenta uma produção superior a todos os outros subsectores. Contudo, essa tendência tem vindo a desacentuar-se, com um decréscimo da produção de Cerâmicas de Pavimentos e Revestimentos (cerca de 80 milhões de euros), e em sentido contrário, a Cerâmica Utilitária e Decorativa tem vindo a produzir cada vez mais, fruto de um maior investimento em maquinarias e equipamentos.^[1]

2.1.2 Caraterização Financeira

O mercado internacional assume o papel principal no que concerne às vendas da indústria cerâmica, sendo aproximadamente, no ano de 2017, de 714,4 milhões de euros, cerca de 1,3% das exportações nacionais de bens, apresentando assim um aumento de 1,9% em relação ao ano anterior (2016). Acompanhando assim, o conjunto das exportações nacionais de bens, que no ano de 2017 registou um aumento de 10,1% em relação ao período homólogo anterior. Já o valor das importações na área da cerâmica fixaram-se nos 157,6 milhões de euros, representado assim, uma taxa de cobertura de cerca de 453% das importações face às exportações, ocupando o 4º lugar nacional, apenas ultrapassado pelos minérios, pastas de madeira e cortiça.

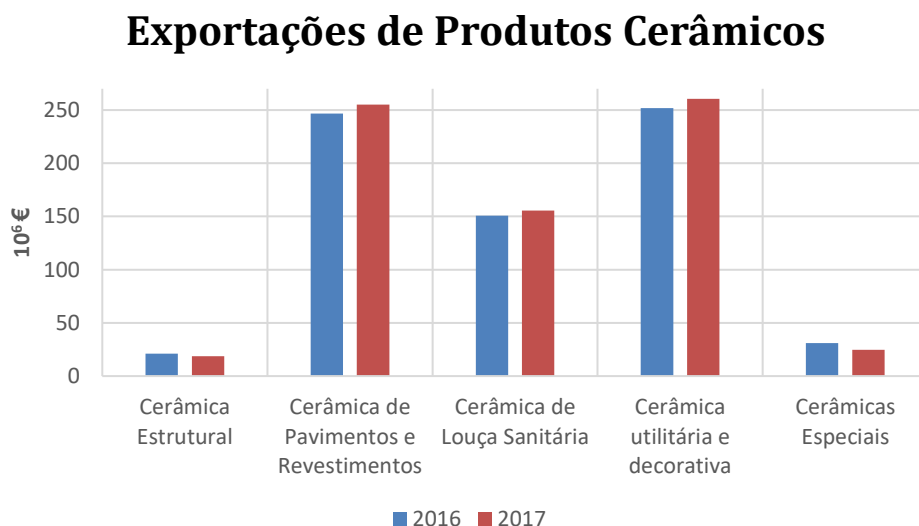


Figura 3 - Exportações de Produtos Cerâmicos ^[2]

O aumento das exportações de produtos cerâmicos está em muito relacionado com o aumento das exportações provenientes da Cerâmica de Pavimentos e Revestimentos e

da Cerâmica Utilitária e Decorativa. Em termos percentuais, estes aumentos correspondem a 3,4% no caso da Cerâmica de Pavimentos e Revestimentos, e de 3,5% na Cerâmica Utilitária e Decorativa. Por outro lado, assistiu-se a um decréscimo, no período em análise, das exportações de Cerâmicas Especiais (-21,1%) e da Cerâmica Estrutural (-11,5%), embora estes valores não tenham um peso considerável na balança de exportações de produtos cerâmicos, pois apresentam um volume muito inferior aos restantes.

Mercados de Exportação 2017

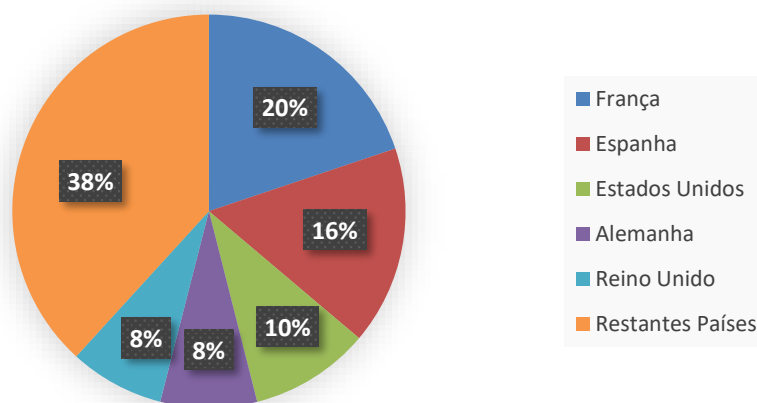


Figura 4 - Mercados de Exportação de Produtos Cerâmicos ^[2]

No ano de 2017, o principal destino das exportações nacionais de produtos cerâmicos foi a França, com cerca de 20% dos produtos exportados, apesar de uma ligeira quebra em relação ao ano de 2016 (-0,8%). A Espanha apresenta-se também como um grande mercado para as exportações portuguesa, sendo ainda o principal mercado requisitado por Portugal para as importações. O Top 5 é fechado pelos Estados Unidos, a Alemanha, país que registou um dos maiores aumentos na procura do produto cerâmico português (mais de 10% em relação a 2016), e por fim o Reino Unido (aumento de 9,4% comparativamente a 2016).

Os países com maior taxa de variação positiva, comparando as exportações de 2016 e 2017, são o Canadá (50%), os Países Baixos (20,1%) e a Finlândia (19%), em sentido oposto a Argélia (-46,1%), Cabo Verde (-22,5%) e Emirados Árabes Unidos (-15,1%), reduziram a sua procura pelo produto nacional.^[2]

2.2 Consumo de Energia

2.2.1 Nível Nacional

O consumo de energia de um país, ou região, depende de vários fatores, sendo a indústria um dos principais. As medidas de eficiência energética implementadas ao longo dos anos, não só pelas empresas, mas também pelos cidadãos no seu quotidiano, têm vindo a permitir um uso mais racional da energia. Esse uso mais racional, por vezes não é o suficiente para que exista uma diminuição de consumo geral, isto porque outros fatores impedem que tal aconteça, como é o caso do crescimento demográfico e o aparecimento de novas indústrias.

Consumo Energia Primária

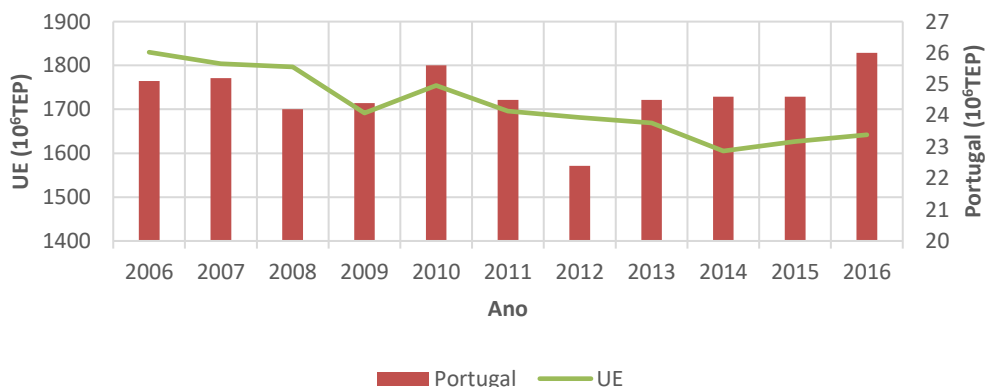


Figura 5 - Consumo Energia Primária ^[3]

Ao longo dos anos, o consumo de energias primárias em Portugal tem seguido a tendência da União Europeia, com um certo decréscimo até ao ano de 2012, mas alterando a sua tendência a partir desse ano. Esta alteração poderá dever-se a uma melhoria na economia, sobretudo no caso português, que levou ao aparecimento de novas indústrias e aumento de produção das já existentes, e consequente aumento de consumo.

A indústria transformadora apresenta-se como uma das atividades económicas com maior consumo de energia, correspondendo a cerca de 28% do consumo nacional no ano de 2017, destacando-se o setor do Papel e Artigos de Papel responsável por cerca de 32% desse consumo. A indústria da Cerâmica figura-se também como uma das que mais gasta, rondando os 6,7%. ^[3]

Consumos de Energia por Setor

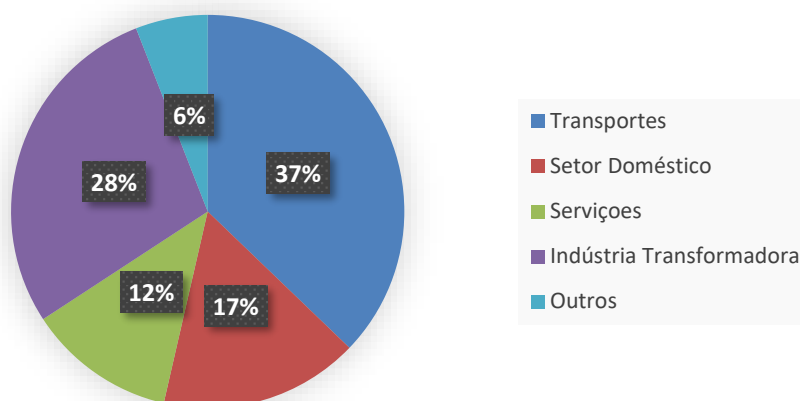


Figura 6 - Consumos de Energia por Setor de Atividade em Portugal (2017) ^[4]

Com vista a uma diminuição dos consumos foram criados fundos para uma melhoria da eficiência energética, como é o caso do Fundo de Eficiência Energética (FEE) que financia os programas e medidas previstas no Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE). Este fundo pretende diminuir, até ao ano de 2020, 25% do consumo de energia, utilizando o estado como exemplo, propondo-se o mesmo a reduzir 30% da energia consumida. ^[5]

2.2.1.1 Gás Natural

Como todos os combustíveis fósseis, o gás natural é um recurso esgotável, para tal o seu uso deve ser racionalizado. Contudo, com o passar dos anos, o consumo de gás natural em Portugal, e na restante UE, tem sofrido algumas variações, mas nunca consistentes, isto é, nunca existe uma tendência generalizada, alternando entre o aumento e a diminuição, de consumo, constantemente. No caso nacional, o uso de gás natural ronda os 4 milhões de tep, existindo oscilações sempre em torno deste valor, na União Europeia o consumo aproxima-se dos 400 milhões de tep. ^[3]

Consumo Gás Natural

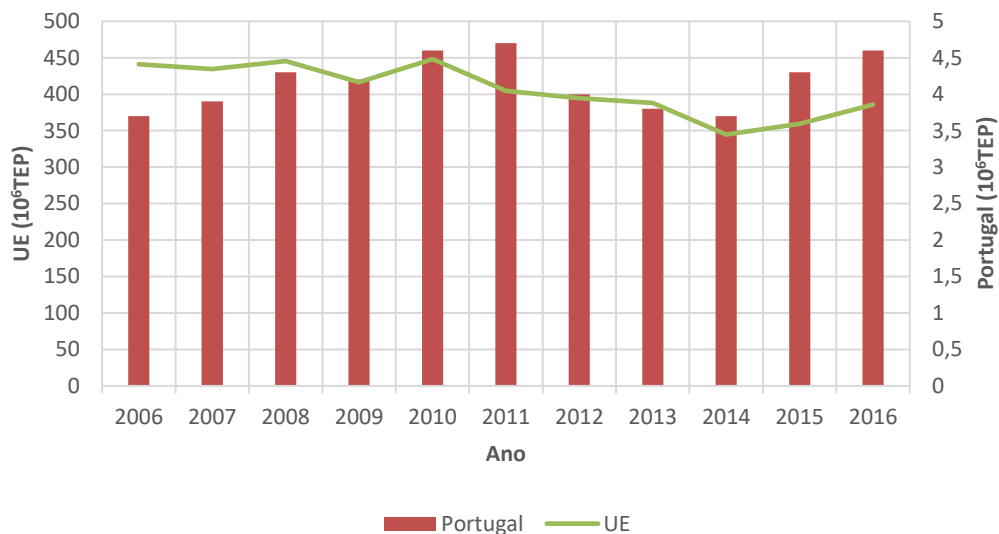


Figura 7 - Consumo Gás Natural ^[3]

O principal utilizador de gás natural em Portugal é a indústria transformadora, gastando mais de 2/3 do que as restantes atividades económicas. O setor dos Serviços e o Setor Doméstico apresentam-se como os outros grandes consumidores (15% cada), embora bastante distantes da Indústria Transformadora. Dentro da Indústria Transformadora, a Cerâmica é mesmo a maior consumidora de Gás Natural, correspondendo a mais de 17% do consumo do Setor, no ano de 2017. ^[4]

Consumo Gás Natural

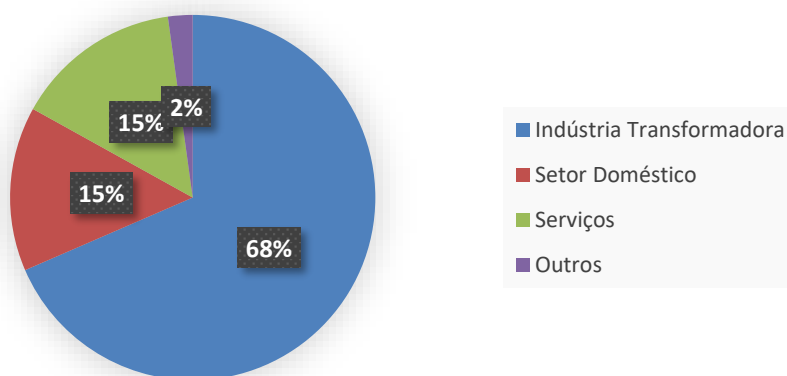


Figura 8 - Gastos de Gás Natural por Setor de Atividade em Portugal (2017) ^[4]

2.2.1.2 Energia Elétrica

No panorama nacional, os gastos provenientes da energia elétrica têm-se mantido inalterados ao longo da última década, rondando sempre os 4 milhões de tep, excetuando o ano de 2016 em que o consumo de energia elétrica superou os 5 milhões de tep. No caso da União Europeia, tem-se assistido a um ligeiro decréscimo, comparando o ano de 2016 com 2006, essa redução é de 3,7%. ^[3]

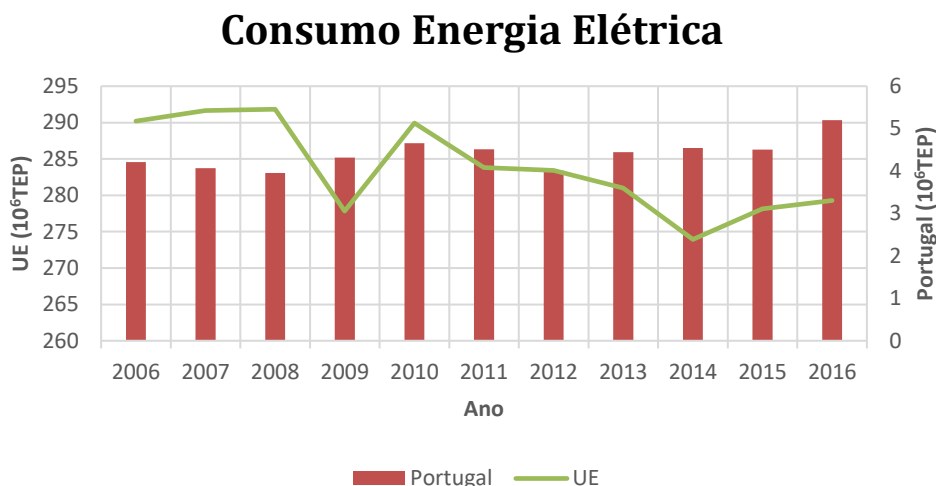


Figura 9 - Consumo de Eletricidade ^[3]

Em Portugal, o consumo de energia elétrica acontece sobretudo no setor dos Serviços e da Indústria Transformadora, 33% e 35%, respetivamente. O Setor Doméstico apresenta-se como o terceiro maior consumidor, responsável por um consumo de 27% da energia elétrica gasta em Portugal. No caso particular da Indústria Cerâmica, e ao invés daquilo que acontece com o gás natural, o uso de energia elétrica representa apenas 2,8% do consumo da mesma, na Indústria Transformadora. ^[4]

Consumo Energia Elétrica

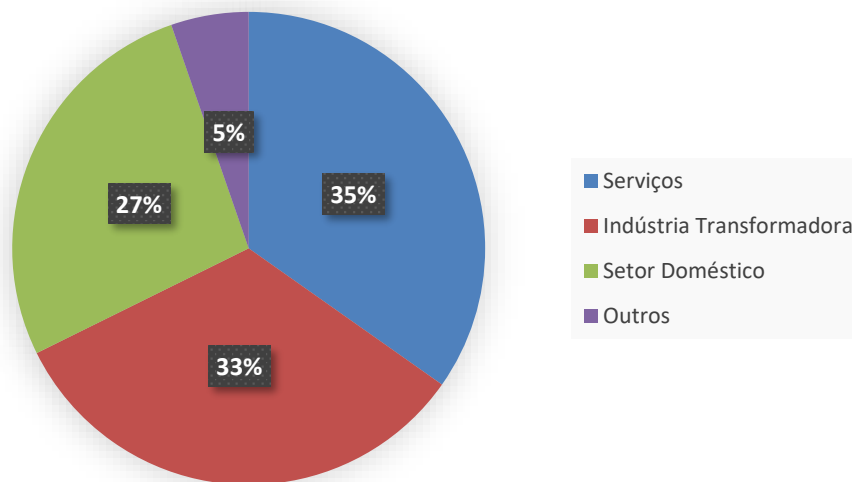


Figura 10 - Gastos de Energia Elétrica por Setor de Atividade em Portugal (2017) [4]

3. Empresa

3.1 Apresentação

A Cerev é uma empresa de cerâmica, fundada em 1991, que se encontra situada no concelho da Mealhada, fazendo parte do grupo de empresas Pavigrés Cerâmicas S.A.. Este grupo, formado em 2004, conta com a presença de mais três Unidades Fabris, a Pavigrés e a Grespor, fundadas em 1973 e 1988, respetivamente, ambas situadas na Anadia, e ainda a Pavigrés 2, adquirida pelo grupo em 2018, em Oliveira do Bairro.

A Pavigrés Cerâmicas S.A. conta com a ajuda de mais de 700 colaboradores espalhados pelas 4 Unidades Fabris. A empresa apresenta um volume de exportação muito superior ao mercado nacional, rondando os 92% no mercado internacional, sendo os restantes 8% vendidos para clientes portugueses. Os produtos da Pavigrés Cerâmicas S.A. são exportados para mais de 90 países, dos quais se destacam como principais clientes a França, o Reino Unido e a Espanha.

O grupo apresenta uma estratégia bem definida de produção, no caso em particular da Cerev são produzidas peças de revestimento Monoporoza e pavimento em Grés Porcelânico Técnico, sendo o mesmo também produzido na Pavigrés, Grespor e Pavigrés 2. Na Pavigrés é também produzido Grés Cerâmico, sendo a única do grupo a produzir este tipo de pavimento.

A Pavigrés S.A assume como principal política o foco permanente no Cliente, demonstrando uma extrema preocupação de se antecipar e corresponder às expetativas do mercado. Outra medida importante prende-se com o facto de ser capaz de apresentar soluções, tanto na área do revestimento como na área do pavimento cerâmico, por meio de produtos que sejam capazes de se fixar no mercado, não só pela sua aparência, mas também pela sua capacidade. Destaca-se entre um conjunto de diretrizes estabelecidas pela empresa, as seguintes:

- Satisfação do Cliente;
- Recompensa aos Acionistas;
- Proteção dos Colaboradores;
- Proteção do Ambiente;
- Melhoria contínua do desempenho ambiental.

Em conformidades com algumas das diretrizes apresentadas anteriormente, a Pavigrés Cerâmicas S.A, viu-lhe ser atribuído a certificação de Qualidade, ISO 9001, em 1998, e num passado recente, no ano de 2014, recebeu a certificação para o Ambiente,

ISO 14001. A norma ISO 9001 apresenta como requisitos, o cumprimento dos requisitos do cliente, estatutários e regulamentares aplicáveis, bem como aumentar a satisfação do cliente através da aplicação eficaz do sistema. Quanto à norma ISO 14001 esta visa a implementação de sistemas de gestão ambiental, através de uma análise, de um período de tempo, daquilo que foi bem-sucedido e do que pode ser melhorado no futuro, apresentando três compromissos, a proteção do meio-ambiente, o cumprimento da legislação ambiental e a melhoria contínua do processo. ^[6]



Figura 11 - Vista Exterior da Empresa

3.2 Processo Produtivo

3.2.1 Receção e armazenamento de Matérias-Primas

A Cerev produz dois tipos de produtos distintos, produtos para revestimento e produtos para pavimento. No caso dos produtos para pavimento, o pó que os constitui é produzido na própria empresa, para tal, as matérias-primas chegam transportadas por veículos pesados que descarregam as mesmas em tulhas, dividindo assim as diferentes matérias-primas, como por exemplo argilas, feldspato, caulino e talco. Quanto às peças para pavimento, a empresa adquire o pó já preparado a ser processado, este pó é designado por Monoporosa, sendo transportado, tal como no caso das matérias-primas, por veículos pesados de transporte de mercadorias.



Figura 12 - Armazém Matérias-Primas

3.2.2 Processamento das Pastas

O processamento das Pastas, apenas necessário em produtos com finalidade de pavimento, inicia-se com a colocação das matérias-primas necessárias, por meio de uma pá carregadora, em silos de Pré-Carga, seguindo por tapetes até aos Silos Balança Doseadores. Estes silos, tal como o próprio nome indica, são capazes de dosear as quantidades necessárias de cada matéria-prima para determinada receita. De seguida, procede-se à moagem das matérias-primas, com uma duração de cerca de 20 horas, em moinhos que contêm no seu interior bolas de moagem, que são as principais responsáveis pela diminuição do tamanho dos grãos. No fim da moagem, toda a pasta é removida do interior dos moinhos, com auxílio de ar comprimido, para o interior de turbo-diluidores, onde será adicionada argila à mistura, e agitada por uma hélice presente na zona inferior dos turbo-diluidores. Por fim, as pastas são armazenadas em tanques até ao momento da atomização.

Para além do processamento da pasta base é necessário também produzir os corantes que irão corar a pasta permitindo a produção de pó corado. Este processo é bastante idêntico ao processamento das pastas, apenas com algumas alterações. As matérias-primas são armazenadas em “big bags”, passando depois à medição da massa necessária de cada uma das diferentes matérias-primas numa balança, e introduzidas dentro dos moinhos para se proceder à moagem dos mesmos. Para concluir esta fase do processo, os corantes são removidos do interior dos moinhos, por ar comprimido, e armazenados em tanques.



Figura 13 - Zona de Preparação de Pastas

3.2.3 Atomização

Esta fase inicia-se com a mistura das pastas com os corantes, em quantidades definidas previamente. Seguidamente, a mistura é peneirada retirando assim alguns pedaços de maiores dimensões que possam vir na mistura, passando depois para um tanque onde é agitada permanentemente até seguir para o atomizador. A mistura é introduzida no interior do atomizador por um conjunto de 10 bicos que a pulveriza, entrando em contacto com o ar quente do atomizador grande parte da humidade é retirada, saindo assim um pó com cerca de 5 a 6% de humidade. O ar quente entra no atomizador pela zona superior do mesmo, a cerca de 600 °C, e deixa o atomizador pela zona inferior a cerca de 120/130 °C. O ar que entra no atomizador é aquecido com recurso a gás natural, mas também graças a um permutador ar-água, que aproveita o calor rejeitado pelo forno, diminuindo assim a quantidade de gás natural utilizada, e aumentando a eficiência do atomizador. Na zona de remoção do “ar frio” ocorre a recuperação de finos, rejeitados pela atomização, que deste modo voltam a entrar no processo, diminuindo assim os resíduos. Por fim, o pó é armazenado em silos com capacidade para cerca de 45 toneladas.



Figura 14 - Pó após a Atomização

3.2.4 Prensagem e Secagem

A primeira etapa deste processo consiste no transporte, através de tapetes, do pó para um pequeno silo que se encontra na parte superior de cada uma das prensas. O pó é então prensado no formato pretendido e inserido num secador de rolos para proceder-se à sua secagem. No interior do secador a peça é sujeita a uma curva de temperatura, inicialmente crescente, passando a decrescente após ultrapassar a zona central do secador, com o seu máximo próximo dos 200 °C. Ao longo desta fase a peça perde grande parte da sua humidade, que inicialmente é de cerca de 5 a 6%, acabando a mesma com cerca de 0,5%.



Figura 15 - Secador Horizontal

3.2.5 Preparação de vidros

Esta fase é em tudo semelhante à preparação de pastas e corantes, ou seja, inicialmente o produto chega na forma de matéria-prima, posteriormente é moído em moinhos, de diferentes dimensões mediante a quantidade de vidro que é necessário ser produzido, e armazenado em tinas aguardando assim pela sua utilização.

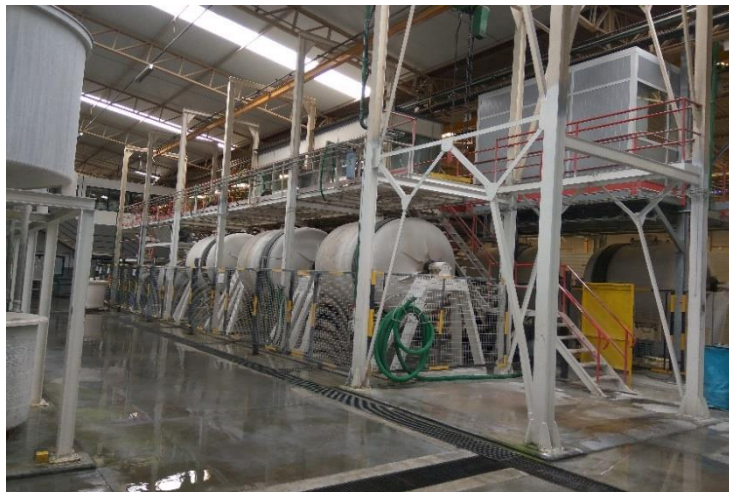


Figura 16 - Secção de Preparação de Vidros

3.2.6 Vidragem e Decoração

No caso das peças para o revestimento, estas saem do interior do secador sendo em primeiro lugar humidificadas, através de jatos que pulverizam água sobre a peça, com o objetivo de aumentar a capacidade de absorção e preparar a aplicação de engobe e vidro por via húmida. De seguida, a peça passa sobre uma cortina de engobe criada por um campânula, este engobe irá uniformizar a camada superficial da peça, e preparar a peça para o passo seguinte, a aplicação do vidro. A aplicação é feita recorrendo à passagem da peça sobre uma cortina uniforme de vidro, seguindo para uma zona de secagem. O processo de aplicação do vidro culmina com a limpeza dos excessos presentes nas arestas da peça.

Quanto às peças de pavimento, após a sua saída do secador, é aplicada uma fina camada de vidro pulverizado, e no fim do processo colocado uma camada de proteção ao desgaste, que é bastante acentuado tendo em conta a aplicação das peças.

Em ambos os casos, numa fase final, é colocado engobe tardo para evitar a agregação de resíduos nos rolos cerâmicos aquando a cosedura.

A etapa da decoração pode não ocorrer em certas peças, pois as mesmas podem não necessitar de qualquer tipo de decoração. No caso das peças que precisem de decoração esta pode ser feita recorrendo a vários métodos, o mais avançado é a impressora digital, mas também pode ser utilizado o método serigráfico ou a pintura por rolo.



Figura 17 - Aplicação de Engobe

3.2.7 Cozedura

Após a vidragem ou a decoração o material passa para a fase de cozedura. É então introduzido num forno de rolos cerâmicos, sofrendo um pré-aquecimento, antes da cozedura, sendo o aumento de temperatura gradual entre ambas as fases. A cozedura pode atingir os 1300 °C, e precede a fase de arrefecimento, que se encontra a cerca de 600 °C. Por fim dá-se o arrefecimento final, com temperatura a rondar os 200 °C. No final desta etapa, o produto já se encontra no nível de rigidez pretendido, ou seja, não necessita de mais nenhum tratamento térmico.



Figura 18 - Saída do Forno

3.2.8 Retificação e Escolha

A etapa da retificação só entra no processo de alguns produtos, isto porque, este processo destina-se a garantir um acabamento e dimensões uniforme e de grande precisão. Nesta etapa as peças são acertadas para as dimensões pretendidas através do corte a seco de arestas.

A fase de escolha divide-se em duas etapas, uma fase de deteção de defeitos dimensionais, de planaridade e de calibre, sendo os erros detetados de forma automática, com o auxílio de sensores, e uma fase de deteção de defeitos visuais, isto é, defeitos que são encontrados pelo operador, sendo como exemplo diferenças nas tonalidades das decorações da peça. Esta última etapa requer uma concentração elevada, e com isso elevado desgaste do operador que executa a mesma. As peças são classificadas de 3 maneiras, as peças de “1ª escolha” caracterizam-se por peças sem qualquer defeito, as peças de “2ª escolha” possuem pequenas imperfeições, mas sem colocar em causa a sua qualidade, e por fim as peças de “caco” que tal como o nome indica não são aproveitadas, pois não atingem a taxa de aceitação mínima.



Figura 19 - Zona de Escolha

3.2.9 Embalamento e Armazenamento

O embalamento ocorre logo após a escolha, sendo o mesmo feito inicialmente em caixas de cartão, recorrendo a equipamentos automáticos, e de seguida paletizado em paletes para ser novamente embalado, desta vez com plástico. É também realizado uma inspeção final de controlo de qualidade por palete, possibilitando assim a deteção de possíveis erros de escolha.

O produto final é então armazenado num dos locais definidos para o efeito, aguardando para ser expedido.



Figura 20 - Produto Final Preparado para Expedição

3.3 Consumos de Energia

No caso particular da Cerev, e sendo a mesma uma empresa transformadora do ramo da Cerâmica, os consumos do no ano de 2018 são em muito semelhantes aos apresentados anteriormente, subcapítulo 2.2.1, existindo um consumo bastante acentuado de gás natural, e embora não tão expressivo, de eletricidade. O consumo de gás natural representa 80% do consumo da empresa, seguido da eletricidade com cerca de 20%, existindo um consumo muito residual de outras formas de energia.

Grande parte do gás natural consumido na Cerev deve-se à secção dos Fornos, tendo um peso superior a 60% do consumo do mesmo, seguido pela Produção de Pastas que necessita de 22% do gás natural consumido pela empresa, isto deve-se à necessidade de temperaturas bastante elevadas para a atomização do pó. Na secção das prensas existe também um uso acentuado de gás natural pelos secadores.

Utilização Gás Natural

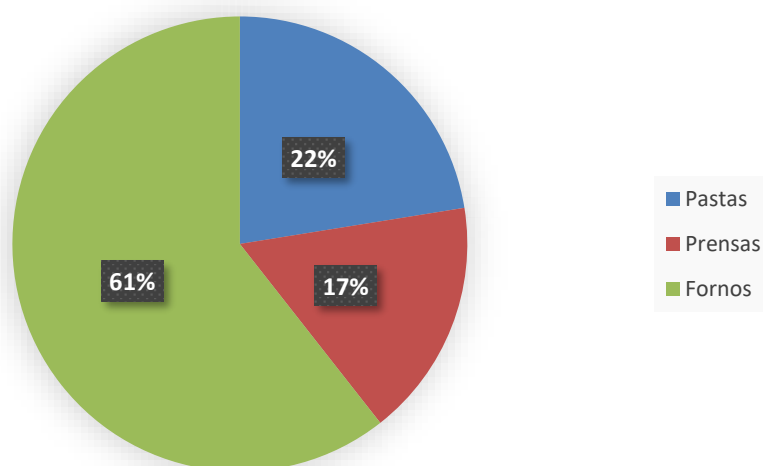


Figura 21 - Consumo de Gás Natural por Secção na Cerev (2018)

O consumo de eletricidade está fortemente ligado à prensagem do produto, sendo a secção das Prensas responsáveis por 34% da energia elétrica gasta na unidade fabril. A secção da Produção de Pastas representa $\frac{1}{4}$ do consumo da Cerev, devendo-se sobretudo aos moinhos de pastas, mas também aos moinhos de corantes e vidros. O consumo de energia elétrica por iluminação, entre outras formas de consumo que não são afetadas diretamente pela produção, designam-se na Figura 22, por “Restante” e correspondem a 22% dos gastos elétricos.

Consumo Energia Elétrica

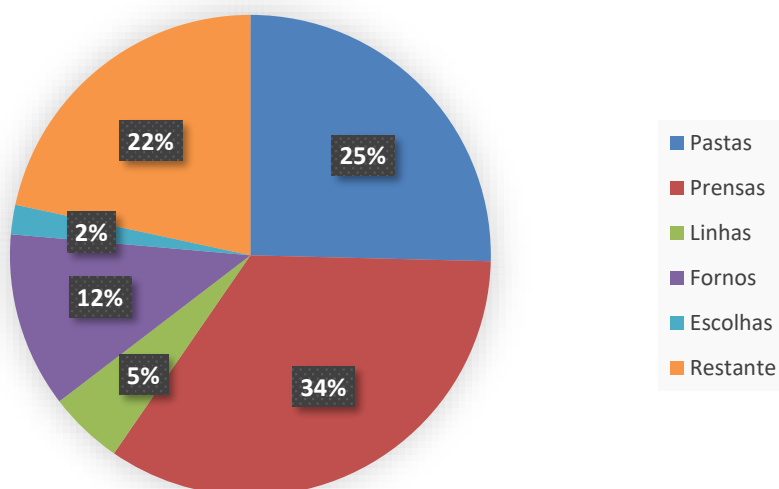


Figura 22 - Consumo de Energia Elétrica por Secção na Cerev (2018)

4. Secador Horizontal

4.1 Secador Horizontal Sacmi

Na zona de Prensagem e Secagem é possível encontrar 5 secadores, sendo 2 deles secadores horizontais, e os restantes secadores verticais. Neste capítulo serão apenas abordados os secadores horizontais, uma vez que estes são um dos temas do relatório.

Os secadores horizontais presentes na Cerev, ECR 2350/16,8 SX, foram produzidos em 1993 pela empresa italiana, Sacmi Imola. Estes secadores apresentam uma potência térmica máxima a rondar os 1300 kW, sendo capazes de atingir temperaturas na ordem dos 300 °C, utilizando gás natural como fonte de combustível. Este equipamento é composto por 8 módulos de características semelhantes, possibilitando assim, uma diferença de temperaturas ao longo da secagem (uma temperatura por módulo).

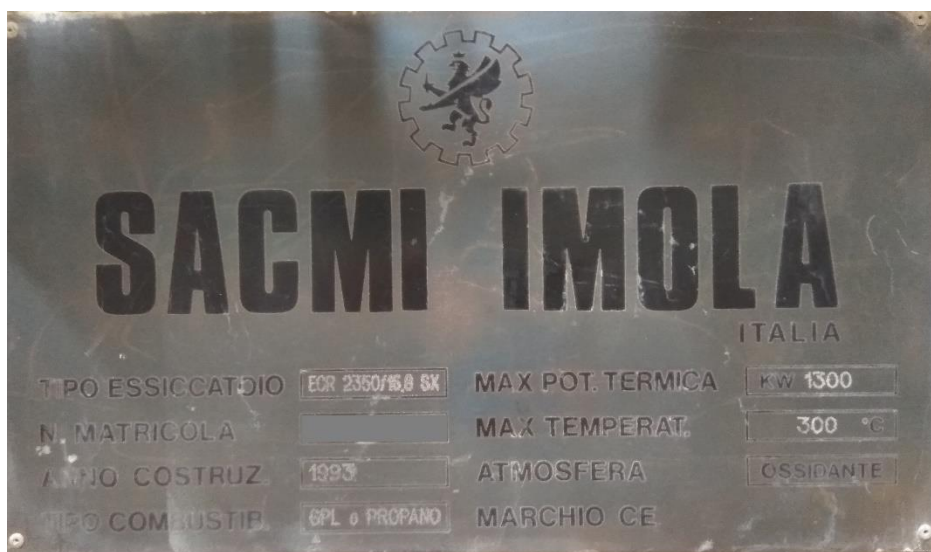


Figura 23 - Características dos Secadores Horizontais

Cada um dos módulos, referidos anteriormente, encontra-se equipado com um queimador, onde se dá a combustão do gás natural com o objetivo de atingir a temperatura pretendida, um ventilador para forçar a circulação do ar de secagem, e uma entrada de ar (borboleta) para arrefecer o ar que circula no interior da conduta, de modo a que a temperatura do mesmo não exceda a definida no set-point, de referir ainda que a admissão principal de ar ocorre na zona de entrada e saída do produto. O secador é composto por três canais de transporte de peças, possibilitando assim uma maior produção, comparativamente aos de um e de dois canais. O avanço da peça é feito através de rolos,

cerca de 230 por canal, os quais necessitam do apoio de 2 motorreductores de tração para promoverem a sua rotação. Para além dos 8 ventiladores presentes em cada um dos módulos, existe ainda um nono ventilador junto à conduta de extração de gases de combustão, para o exterior, para facilitar essa mesma remoção.



Figura 24 - Zona de Entrada de Ar para Arrefecimento

Todo o controlo do secador é feito a partir de um PLC, no qual é possível definir não só as temperaturas de cada módulo, bem como a velocidade de avanço das peças, dependendo da necessidade das linhas de esmaltação, isto é, se for necessário o trabalho com duas linhas (número máximo de linhas que cada secador alimenta), utiliza-se a velocidade rápida, se apenas uma linha estiver em funcionamento a escolha da velocidade recairá sobre a velocidade lenta. O controlo dos queimadores é também executado através do PLC, estes trabalham apenas em dois regimes, máximo e mínimo, sendo máximo quando a temperatura no módulo atinge o mínimo definido pelo set-point, e mínimo quando atinge a temperatura máxima, ao invés de secadores mais recentes já equipados com queimadores ajustáveis à necessidade de combustão.

Na Figura 25 é possível perceber de forma ilustrativa qual o princípio de admissão e extração de ar ocorrido no secador.

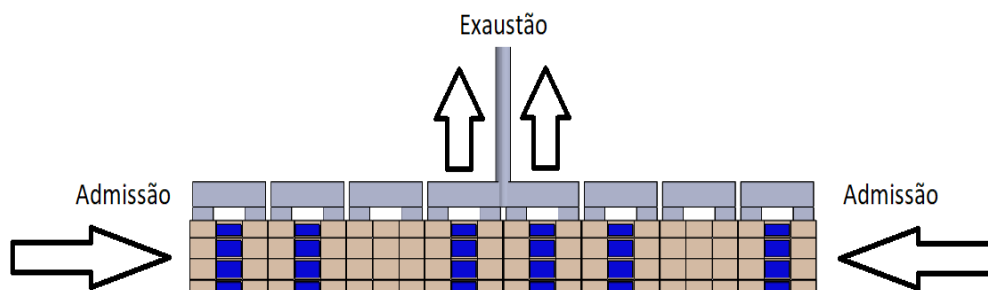


Figura 25 - Princípio de Admissão e Extração do Ar

4.2 Estratégia de Cálculo

4.2.1 Balanço Mássico

Com vista a atingir o objetivo principal, que passava pela elaboração de um balanço térmico do sistema, necessitou-se, em primeiro lugar, de realizar um balanço mássico, sabendo assim os caudais mássicos de entrada e saída.

Foram considerados 5 caudais de entrada:

- o caudal mássico de gás natural (\dot{m}_{GN});
- o caudal mássico de ar necessário para a combustão ($\dot{m}_{Ar,Comb}$);
- o caudal mássico de peças ($\dot{m}_{Peça,in}$);
- o caudal mássico de água ($\dot{m}_{Água,in}$);
- o caudal mássico de ar assumido ($\dot{m}_{Ar,Ass}$).

A saída resume-se a 3 caudais:

- o caudal mássico de água ($\dot{m}_{Água,out}$);
- o caudal mássico de peças ($\dot{m}_{Peça,out}$);
- o caudal mássico de gases provenientes da combustão e secagem ($\dot{m}_{Gás,Comb}$) extraídos pela chaminé.

Com os parâmetros apresentados anteriormente foi possível chegar à Equação 1.

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$$

↓

$$\dot{m}_{GN} + \dot{m}_{Ar,Comb} + \dot{m}_{Peça,in} + \dot{m}_{Água,in} + \dot{m}_{Ar,Ass} = \dot{m}_{Peça,out} + \dot{m}_{Água,out} + \dot{m}_{Gás,Comb}$$

Equação 1 - Balanço Mássico [7]

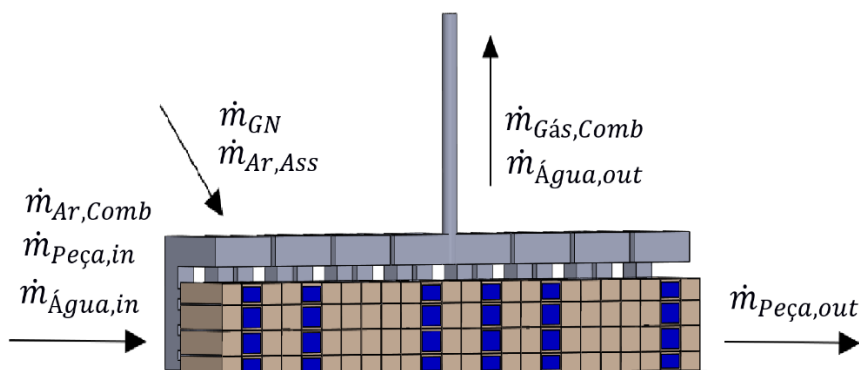


Figura 26 - Esquema do Balanço Mássico

- **Caudal Mássico de Gás Natural (\dot{m}_{GN})**, a rede de gás natural encontra-se sobre uma pressão relativa, o que faz com que a quantidade de gás natural medida pelo contador ($V_{lido\ GN}$) não seja a quantidade que realmente é consumida pelos queimadores, para produção de energia. Posto isto, é necessário conhecer a que pressão relativa o gás natural ($P_{rel\ GN}$), está a ser entregue e qual a sua temperatura (T_{GN}), para posteriormente aplicar-se a seguinte equação para a obtenção do volume real de gás natural ($V_{real\ GN}$), às condições de temperatura de 0°C e de pressão 1 atm.

$$V_{real\ GN} = V_{lido\ GN} \times \left(\frac{273,15}{273,15 + T_{GN}} \right) \times \left(\frac{P_{rel\ GN} + 1,01325}{1,01325} \right)$$

Equação 2 - Volume Real de Gás Natural (Nm^3) [8]

Para calcular o valor do caudal mássico de gás natural (\dot{m}_{GN}) resta dividir o valor anterior pelo tempo de medição ($t_{med\ GN}$) e multiplicar pela densidade do gás natural (ρ_{GN});

$$\dot{m}_{GN} = \frac{V_{real\ GN}}{t_{med\ GN}} \times \rho_{GN}$$

Equação 3 - Caudal Mássico de Gás Natural (kg/s)

- **Caudal Mássico de Peças de Entrada e Saída ($\dot{m}_{Peca,in}$ e $\dot{m}_{Peca,out}$)**, obtido através da massa da peça medida à saída do secador ($m_{peça,out}$), do número de prensagens por minuto ($Prensagens_{/min}$) e do número de peças por prensagem ($N^{\circ}peças_{/prensagem}$);

$$\dot{m}_{peça,in} = \dot{m}_{peça,out} = \frac{m_{peça,out} \times Prensagens_{/min} \times N^{\circ}peças_{/prensagem}}{60}$$

Equação 4 - Caudal Mássico de Peças de Entrada e Saída (kg/s)

- **Caudal Mássico de Água de Entrada e Saída ($\dot{m}_{Água,in}$ e $\dot{m}_{Água,out}$)**, considerando que a peça sai do secador com 0% de humidade, calculado a partir da massa da peça medida à saída do secador ($m_{peça,out}$), da massa da peça medida à entrada do secador ($m_{peça,in}$), do número de prensagens por minuto ($Prensagens_{/min}$) e do número de peças por prensagem ($N^{\circ}peças_{/prensagem}$);

$$\dot{m}_{Água,in} = \dot{m}_{Água,out} = \frac{(m_{peça,in} - m_{peça,out}) \times Prensagens_{/min} \times N^{\circ}peças_{/prensagem}}{60}$$

Equação 5 - Caudal Mássico de Água de Entrada e Saída (kg/s)

- **Caudal Mássico de Ar Necessário para a combustão ($\dot{m}_{Ar,Comb}$)**, calculado pela estequiometria, em anexo, tendo em conta a quantidade de ar necessário para a combustão de um certo caudal de gás natural (\dot{m}_{GN});

$$\dot{m}_{Ar,Comb} = 16,479 \times \dot{m}_{GN}$$

Equação 6 - Caudal Mássico de Ar Necessário para a Combustão (kg/s)

- **Caudal Mássico extraído pela chaminé ($\dot{m}_{Gás,Comb}$)**, para o cálculo é necessário a velocidade de extração ($v_{extração}$), a área da secção circular da chaminé ($A_{chamine}$) e a densidade do ar à temperatura a que se encontram os gases na extração pela chaminé ($\rho_{ar,extraído}$), calculada a uma pressão de 1 atm e à temperatura de $T_{Gás,Comb}$, a utilização da densidade do ar justifica-se por uma quantidade bastante superior de ar comparativamente à de gás proveniente da combustão, segundo a última monitorização realizada;

$$\dot{m}_{Gás,Comb} = (v_{extração} \times A_{chamine}) \times \rho_{ar,extraído}$$

Equação 7 - Caudal Mássico extraído pela Chaminé (kg/s)

- **Caudal Mássico de Ar Assumido ($\dot{m}_{Ar,Ass}$)**, corresponde não só ao ar em excesso presente na combustão, mas também ao ar admitido pelas borboletas laterais utilizado para arrefecer o ar de secagem, quando é atingida uma temperatura superior à pretendida, relacionando-se com o caudal mássico extraído pela chaminé ($\dot{m}_{Gás,Comb}$), o caudal mássico de gás natural (\dot{m}_{GN}) e o caudal mássico de ar calculado por estequiometria ($\dot{m}_{Ar,Comb}$).

$$\dot{m}_{Ar,Ass} = \dot{m}_{Gás,Comb} - (\dot{m}_{GN} + \dot{m}_{Ar,Comb})$$

Equação 8 - Caudal Mássico de Ar Assumido (kg/s)

4.2.1.1 Gases Extraídos pela Chaminé

Para determinar o caudal mássico de ar extraído através das condutas, foi necessário conhecer a velocidade a que o ar seguia dentro das mesmas. Para tal, recorreu-se a um tubo de Pitot, capaz de medir a diferença entre a pressão total e a pressão estática (ΔP). Com o auxílio da equação de Bernoulli é possível obter a seguinte expressão:

$$v_{extração} = \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho_{ar,extraído}}}$$

Equação 9 - Velocidade de Extração de Ar pela Chaminé (m/s)

4.2.2 Balanço Térmico

O balanço térmico teve por base o balanço mássico referido anteriormente. Posto isto, as potências térmicas de entrada encontram-se diretamente relacionadas com os caudais mássicos de entrada, no caso das potências térmicas de saída, encontram-se ainda associadas as perdas através das paredes.

Definiu-se então 5 potências térmicas de entrada:

- **Potência térmica associada ao gás natural (q_{GN})**, calculada a partir do caudal mássico de gás natural (\dot{m}_{GN}), do poder calorífico inferior (PCI_{GN}) para uma combustão a 25°C e um volume de referência às condições de 0°C de temperatura e 1 atm de pressão, do calor específico do gás natural (Cp_{GN}) calculado a partir do software EES (Engineering Equation Solver), com base nas percentagens molares

dos diferentes constituintes do gás natural, a uma temperatura de 0 °C e pressão de 1 atm, da temperatura do gás natural (T_{GN}) e da temperatura de referência (T_{ref});

$$q_{GN} = \dot{m}_{GN} \times \left(PCI_{GN} + \left(Cp_{GN} \times (T_{GN} - T_{ref}) \right) \right)$$

Equação 10 – Potência térmica associada ao gás natural (kW) [7]

- **Potência térmica associada ao ar de combustão ($q_{Ar,Comb}$)**, obtida através do caudal mássico de ar de combustão ($\dot{m}_{Ar,Comb}$), do calor específico do ar de combustão ($Cp_{Ar,Comb}$) a uma pressão de 1 atm e temperatura de $T_{Ar,Comb}$, da temperatura a que o ar de combustão se encontra na entrada para o sistema ($T_{Ar,Comb}$) e da temperatura de referência (T_{ref});

$$q_{Ar,Comb} = \dot{m}_{Ar,Comb} \times Cp_{Ar,Comb} \times (T_{Ar,Comb} - T_{ref})$$

Equação 11 – Potência térmica associada ao ar de combustão (kW) [7]

- **Potência térmica associada à peça na entrada ($q_{Peça,in}$)**, relacionada com o caudal mássico da peça ($\dot{m}_{Peça,in}$), do calor específico do material ($Cp_{Peça}$), da temperatura de entrada ($T_{Peça,in}$) e da temperatura de referência (T_{ref});

$$q_{Peça,in} = \dot{m}_{Peça,in} \times Cp_{Peça} \times (T_{Peça,in} - T_{ref})$$

Equação 12 – Potência térmica associada à peça na entrada (kW) [7]

- **Potência térmica associada à água na entrada ($q_{Água,in}$)**, determinada através do caudal mássico de água ($\dot{m}_{Água,in}$), do calor específico da água no estado líquido ($Cp_{Água}$), da temperatura da água à entrada ($T_{Água,in}$) e da temperatura de referência (T_{ref});

$$q_{Água,in} = \dot{m}_{Água,in} \times Cp_{Água} \times (T_{Água,in} - T_{ref})$$

Equação 13 – Potência térmica associado à água na entrada (kW) [7]

- **Potência térmica associada ao ar assumido ($q_{Ar,Ass}$)**, calculada a partir do caudal mássico de ar assumido ($\dot{m}_{Ar,Ass}$), do calor específico do ar ($Cp_{Ar,Ass}$), calculado à

pressão de 1 atm e à temperatura de $T_{Ar,Ass}$, da temperatura do ar ($T_{Ar,Ass}$) e da temperatura de referência (T_{ref});

$$q_{Ar,Ass} = \dot{m}_{Ar,Ass} \times Cp_{Ar,Ass} \times (T_{Ar,Ass} - T_{ref})$$

Equação 14 – Potência térmica associada ao ar assumido (kW) [7]

No caso da saída, foram calculadas 3 potências térmicas, as perdas por convecção e radiação através de alguns dos elementos do secador, e perdas não medidas/contabilizadas:

- **Potência térmica associada à saída da peça ($q_{Peça,out}$)**, dada pelo caudal mássico da peça de saída ($\dot{m}_{Peça,out}$), pelo calor específico do material ($Cp_{Peça}$), pela temperatura de saída da peça ($T_{Peça,out}$) e pela temperatura de referência (T_{ref});

$$q_{Peça,out} = \dot{m}_{Peça,out} \times Cp_{Peça} \times (T_{Peça,out} - T_{ref})$$

Equação 15 – Potência térmica associada à saída da peça (kW) [7]

- **Potência térmica associada à água na saída ($q_{Água,out}$)**, onde foi necessário conhecer o caudal mássico de saída da água ($\dot{m}_{Água,out}$), o calor específico da água no estado líquido ($Cp_{Água}$), o calor latente de vaporização da água ($l_{Água}$) a uma temperatura de 100°C e a uma pressão de 1 atm, o calor específico médio da água após a vaporização ($Cp_{Água,Tout}$), ou seja, o valor médio entre o calor específico da água a 100°C e $T_{Água,out}$ à pressão de 1 atm, a temperatura de saída da água ($T_{Água,out}$) e a temperatura de referência (T_{ref});

$$q_{Água,out} = \dot{m}_{Água,out} \times \left((Cp_{Água} \times (100 - T_{ref})) + (l_{Água}) + (Cp_{Água,Tout} \times (T_{Água,out} - T_{ref})) \right)$$

Equação 16 – Potência térmica associada à água na saída (kW) [7]

- **Potência térmica associada aos gases de combustão ($q_{Gás,Comb}$)**, obtida através do caudal mássico dos gases de combustão ($\dot{m}_{Gás,Comb}$), do calor específico do ar

($Cp_{GásComb}$) à temperatura de $T_{Gás,Comb}$ e pressão de 1 atm, da sua temperatura de saída ($T_{Gás,Comb}$), bem como da temperatura de referência (T_{ref});

$$q_{Gás,Comb} = \dot{m}_{Gás,Comb} \times Cp_{GásComb} \times (T_{Gás,Comb} - T_{ref})$$

Equação 17 – Potência térmica associada aos gases de combustão (kW) [7]

- **As perdas por convecção e radiação (q_{Perdas})**, resultante da soma das perdas pela parede com conduta ($q_{Parede Conduta}$), pela parede sem conduta ($q_{Parede s/ Conduta}$) e pelas condutas de circulação do ar ($q_{Condutas}$);

$$q_{Perdas} = q_{Parede Conduta} + q_{Condutas} + q_{Parede s/ Conduta}$$

Equação 18 - Perdas por convecção e radiação (kW)

- **As perdas não contabilizadas (q_{Outros})** são obtidas através da relação de todas as anteriores.

$$q_{Outros} = q_{Peça,out} + q_{Água,out} + q_{Gás,Comb} + q_{Perdas} - (q_{GN} + q_{Ar,Comb} + q_{Peça,in} + q_{Água,in} + q_{Ar,Ass})$$

Equação 19 - Perdas não contabilizadas (kW)

A partir da junção de todas as variáveis apresentadas anteriormente é possível obter a seguinte expressão para o balanço térmico:

$$q_{in} = q_{out}$$

↓

$$\begin{aligned} q_{GN} + q_{Ar,Comb} + q_{Peça,in} + q_{Água,in} + q_{Ar,Ass} \\ = q_{Peça,out} + q_{Água,out} + q_{Gás,Comb} + q_{Perdas} + q_{Outros} \end{aligned}$$

Equação 20 - Balanço térmico [7]

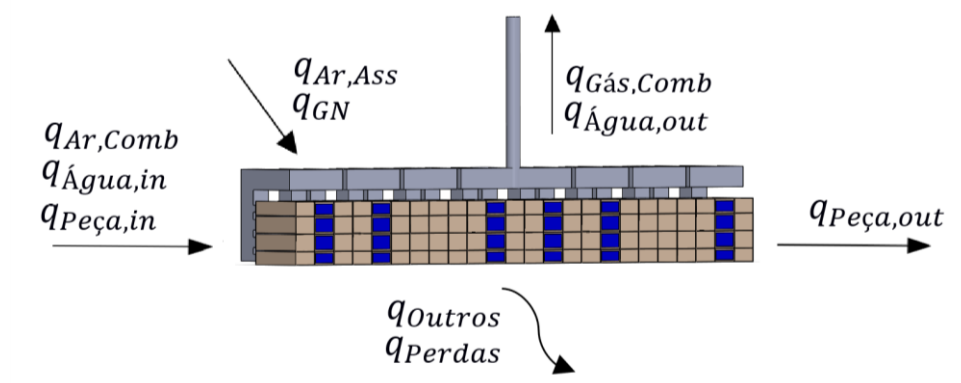


Figura 27 - Esquema do Balanço Térmico

4.2.2.1 Perdas

No cálculo das perdas foi contabilizado o calor perdido pelas paredes laterais e das condutas de circulação do ar, através de convecção livre e radiação. Para tal, necessitou-se de um conjunto de fórmulas, apresentadas de seguida, que permitiram chegar aos valores finais.

- **Temperatura do filme (T_f)**, obtida através da temperatura da superfície (T_s) e da temperatura ambiente (T_∞);

$$T_f = \frac{(T_s + T_\infty)}{2}$$

Equação 21 - Temperatura do Filme (K) ^[9]

- **Coefficiente térmico de expansão volumétrica (β)**, sendo este o inverso da temperatura do filme (T_f);

$$\beta = \frac{1}{T_f}$$

Equação 22 - Coeficiente térmico de expansão volumétrica (K^{-1}) ^[9]

- **Número de Rayleigh (Ra_L)**, calculado a partir da aceleração gravítica (g), do coeficiente térmico de expansão volumétrica (β), da temperatura da superfície (T_s), da temperatura ambiente (T_∞), da altura da superfície em questão (L), do coeficiente

de viscosidade cinemática do ar (ν) e a difusividade térmica do ar (α), sendo estes dois últimos parâmetros à temperatura do filme;

$$Ra_L = \frac{g \times \beta \times (T_s - T_\infty) \times L^3}{\nu \times \alpha}$$

Equação 23 - Número de Rayleigh [9]

- **Número de Nusselt (\overline{Nu}_L) para superfícies em posição vertical**, relaciona o Número de Rayleigh (Ra_L) e o Número de Prandtl (Pr) à temperatura do filme;

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \times Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2, \text{ se } Ra_L \geq 10^9$$

Equação 24 - Número de Nusselt para superfícies em posição vertical (1) [9]

$$\overline{Nu}_L = 0,68 + \frac{0,670 \times Ra_L^{1/4}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{4/9}}, \text{ se } Ra_L \leq 10^9$$

Equação 25 - Número de Nusselt para superfícies em posição vertical (2) [9]

- **Número de Nusselt (\overline{Nu}_L) para superfícies quentes superiores**, que se encontra diretamente ligada ao Número de Rayleigh (Ra_L);

$$\overline{Nu}_L = 0,54 \times Ra_L^{1/4}, \text{ se } (10^4 \leq Ra_L \leq 10^7, Pr \geq 0.7)$$

Equação 26 - Número de Nusselt para superfícies quentes superiores (1) [9]

$$\overline{Nu}_L = 0,15 \times Ra_L^{1/3}, \text{ se } (10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11})$$

Equação 27 - Número de Nusselt para superfícies quentes superiores (2) [9]

- **Número de Nusselt (\overline{Nu}_L) para superfícies quentes inferiores**, calculado com base no Número de Rayleigh (Ra_L);

$$\overline{Nu}_L = 0,52 \times Ra_L^{1/5}, \text{ se } (10^4 \leq Ra_L \leq 10^9, Pr \geq 0.7)$$

Equação 28 - Número de Nusselt para superfícies quentes inferiores [9]

- **Altura (L)** nos dois casos anteriores é obtida através da área da superfície (A_s) e do perímetro da mesma (P);

$$L \equiv \frac{A_s}{P}$$

Equação 29 - Altura para peças não verticais (m) [9]

- **Coefficiente de transferência de calor por convecção (\bar{h})**, resultante da relação entre o Número de Nusselt (\overline{Nu}_L), o coeficiente de condutividade térmica do ar à temperatura do filme (k) e a altura da superfície (L);

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_L \times k}{L}$$

Equação 30 - Coeficiente de transferência de calor por convecção ($kW/m^2 \cdot K$) [9]

Após a obtenção, de todos os parâmetros apresentados, é então possível proceder-se ao cálculo do calor perdido por convecção e por radiação.

- **Calor cedido por convecção (q_{conv})**, calculado a partir do coeficiente de transferência de calor por convecção (\bar{h}), da área da superfície (A), da temperatura da superfície (T_s) e da temperatura ambiente (T_∞);

$$q_{conv} = \bar{h} \times A \times (T_s - T_\infty)$$

Equação 31 - Calor cedido por convecção (kW) [9]

- **Calor cedido por radiação (q_{rad})**, relacionando a emissividade do material que constitui a superfície (ε), da área da superfície (A), da constante de Stefan-Boltzmann (σ), da temperatura da superfície (T_s) e da temperatura da vizinhança (T_{sur});

$$q_{rad} = \varepsilon \times A \times \sigma \times (T_s^4 - T_{sur}^4)$$

Equação 32 - Calor cedido por radiação (kW) [9]

4.2.2.1.1 Divisão do Secador

Para a contabilização das perdas por convecção e radiação, através das superfícies do secador, o mesmo foi dividido em 3 partes, 2 zonas laterais e o conjunto de condutas de circulação de ar.

Consultando a Figura 28 é possível perceber que o mesmo possui condutas de circulação de ar apenas numa das paredes, para tal, e para uma mais fácil orientação do trabalho, nomeou-se a parede com conduta de *Parede Conduta* e a oposta de *Parede s/ Conduta*.

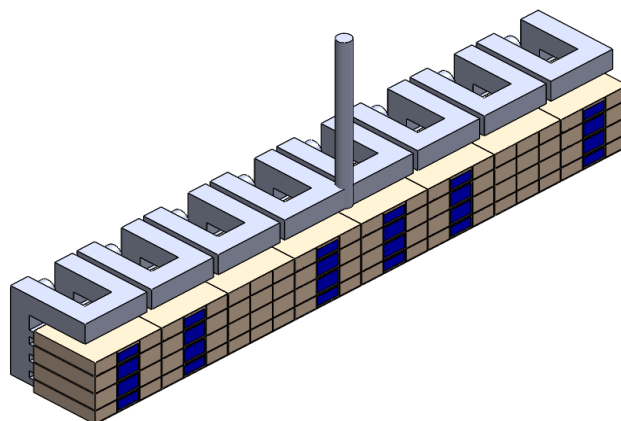


Figura 28 - Representação do Secador

Procedeu-se ainda a uma divisão por módulos do secador, sendo os mesmo numerados por ordem crescente, tomando a entrada do secador, como ponto de partida para a numeração, ou seja, o módulo de entrada das peças será o número 1 e o módulo de saída das peças o número 8. Cada módulo do secador foi dividido em 4 camadas, numeradas por ordem crescente de cima para baixo.

No caso das condutas, foi efetuada uma divisão, conduta inferior e conduta superior, sendo a conduta inferior dividida em direita e esquerda. Cada conduta inferior encontra-se seccionada por 4 áreas diferentes, que podem ser consultadas na Figura 29.

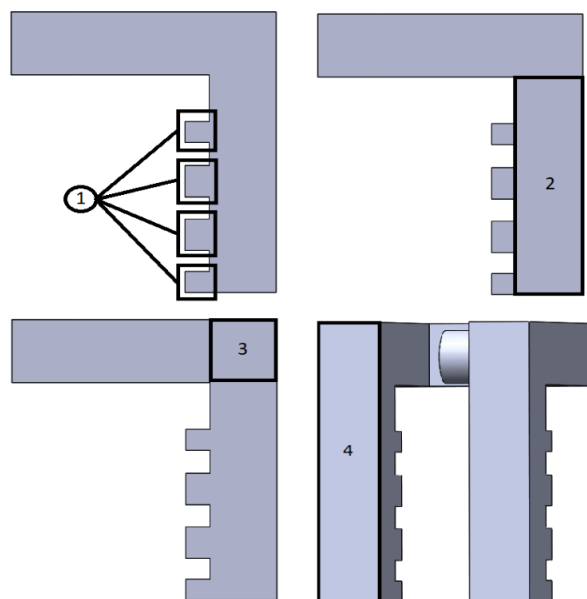


Figura 29 - Divisão das Condutas

4.2.2.1.2 Medidas Gerais de Cada Componente

Para o cálculo das perdas foram necessárias as dimensões dos componentes do secador tidos em conta para a análise das mesmas, para tal procedeu-se a algumas simplificações no que diz respeito ao formato de alguns componentes.

As dimensões que foram tidas em conta na análise encontram-se nas figuras seguintes (em metros):

- **Parede s/ Conduta**

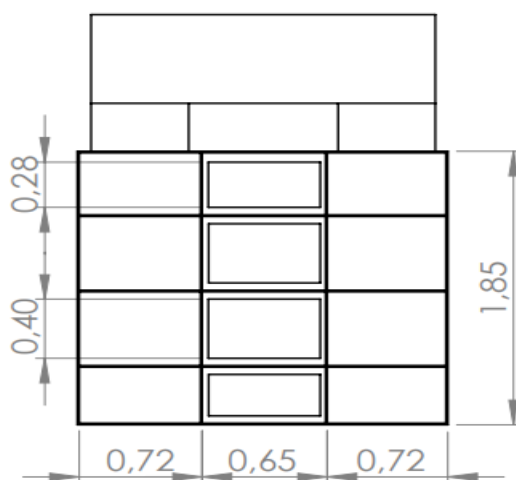


Figura 30 - Parede s/ conduta com porta (Módulos 1,2,4,5,6,8)

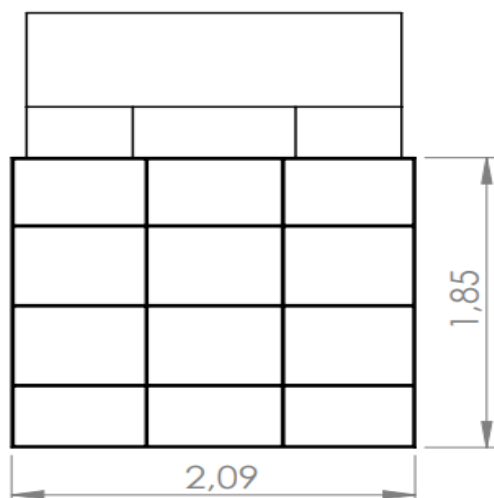


Figura 31 - Parede s/ conduta sem porta (Módulos 3 e 7)

- Parede Conduta

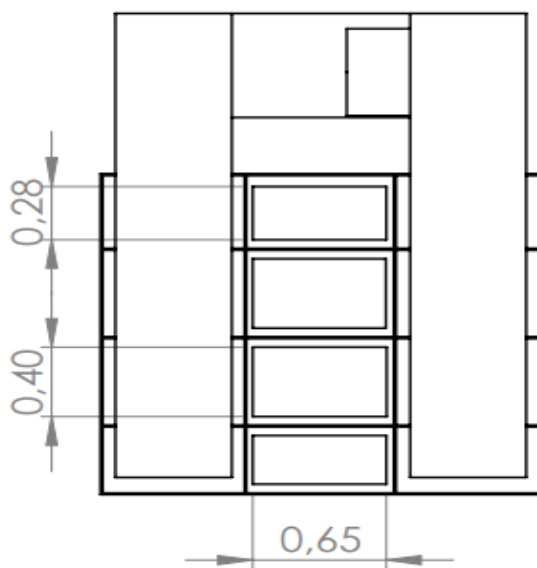


Figura 32 - Parede com conduta

- **Conduta**

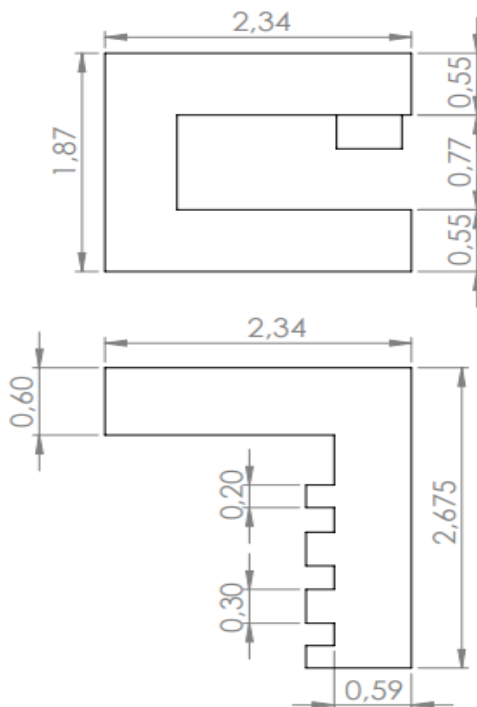


Figura 33 - Conduta

4.2.3 Energia Elétrica

Os gastos relacionados com a Energia Elétrica no secador assumem o seu papel importante no cálculo do rendimento. Os valores dos consumos foram recolhidos com auxílio da Plataforma de Gestão de Consumo (GC), que recolhe os valores de consumo elétrico de 15 em 15 minutos. Posto isto, foi tido em conta os gastos do secador analisado, durante o dia da análise, desde as 9 horas até às 17 horas. Estes valores englobam a energia necessária para rodar os rolos de avanço da peça, bem como os ventiladores que auxiliam na circulação do ar de secagem.

4.2.4 Rendimento

4.2.4.1 Água Removida

Para quantificar a quantidade de água removida nos vários casos, necessitou-se de conhecer o caudal mássico de peças à entrada do secador ($\dot{m}_{peça,in}$) e o caudal mássico das peças à saída do secador ($\dot{m}_{peça,out}$).

$$\text{Água removida (\%)} = \left(\frac{\dot{m}_{peça,in} - \dot{m}_{peça,out}}{\dot{m}_{peça,in}} \right) \times 100$$

Equação 33 - Percentagem de Água Removida

4.2.4.2 Rendimento

O rendimento foi subdividido em dois, o rendimento “Água”, que corresponde apenas ao rendimento para a secagem da peça, e o rendimento “Água + Peça” que diz respeito à percentagem útil de energia não só no processo de secagem, mas também no aquecimento da peça para posterior aplicação do vidro, tendo em conta que a temperatura da peça é um parâmetro fundamental nessa mesma aplicação.

4.2.4.2.1 Água

O rendimento Água ($\eta_{água}$), é calculado através da potência térmica da água de entrada ($q_{água,in}$), da potência térmica da água de saída ($q_{água,out}$), da potência fornecida ao sistema pelo gás natural (q_{GN}) e pela potência elétrica necessária ($P_{elétrica}$).

$$\eta_{água} = \left(\frac{q_{água,out} - q_{água,in}}{q_{GN} + P_{elétrica}} \right) \times 100$$

Equação 34 - Rendimento Água [9]

4.2.4.2.2 Água + Peça

O rendimento Água + Peça ($\eta_{água+peça}$), obtido da mesma forma que o rendimento Água, com a introdução da potência térmica de entrada e saída da peça ($q_{peça,in}$ e $q_{peça,out}$)

$$\eta_{\text{água+peça}} = \left(\frac{(q_{\text{água,out}} - q_{\text{água,in}}) + (q_{\text{peça,out}} - q_{\text{peça,in}})}{q_{GN} + P_{\text{elétrica}}} \right) \times 100$$

Equação 35 - Rendimento Água + Peça [9]

4.2.4.3 Quantidade de Energia Necessária por Massa de Água Removida

Um dos principais parâmetros de comparação de performance entre secadores é a quantidade de energia necessária fornecer ao sistema para a remoção de uma certa massa de água. Para chegar a esta relação é necessária a potência térmica associada ao gás natural (q_{GN}), a potência elétrica necessária ($P_{\text{elétrica}}$) e a massa de água de saída ($\dot{m}_{\text{água,out}}$). Este valor é normalmente representado em $kcal/kg_{\text{água,rem}}$.

$$kcal/kg_{\text{água,rem}} = \frac{q_{GN} + P_{\text{elétrica}}}{\dot{m}_{\text{água,out}}}$$

Equação 36 - Quantidade de Energia Necessária por Massa de Água Removida

4.2.5 Dados Gerais

Na Tabela 3 é possível consultar os dados gerais, comuns a todas as análises feitas.

Tabela 3 - Dados Gerais

PCI_{GN}	10,755 kWh/Nm ³ [10]
Cp_{GN}	2,15 kJ/kg.K [10]
ρ_{GN}	0,8019 kg/Nm ³ [10]
$T_{Ar,Comb} = T_{Ar,Ass} = T_{\infty} = T_{sur}$	20 °C
T_{ref}	0 °C
$Cp_{Ar,Ass} = Cp_{Ar,Comb}$	1,007 kJ/kg.K [11]
$Cp_{\text{água}}$	4,18 kJ/kg.K [7]
$l_{\text{água}}$	2257 kJ/kg [7]
$Cp_{\text{peça}}$	1,0032 kJ/kg.K [12]
$\varepsilon_{porta} = \varepsilon_{conduta}$	0,85 [13]
ε_{parede}	0,56 [14]
g	9,8 m/s ²

4.3 Instrumentos de Medida Utilizados

Na recolha de dados, para a realização do estudo, foram necessários vários aparelhos de medida, discriminados abaixo.

- Balança Eletrónica “HF-6100”, Figura 34, usada na medição da massa das peças, antes e depois de secadas.



Figura 34 - Balança Eletrónica "HF-6100"

- Micromanómetro “8715 TSI” com Tubo de Pitot, Figura 35, utilizado para a medição da diferença entre a pressão total e a pressão estática, com vista à obtenção da velocidade de extração dos gases de combustão do secador.



Figura 35 - Micromanómetro “8715 TSI”

- Analisador de Gases “testo 350-XL”, Figura 36, que permite medir, entre outros parâmetros, a temperatura dos gases, nomeadamente os gases de combustão do secador.



Figura 36 - Analisador de Gases "testo 350-XL" [15]

- Sensor de Temperatura por Infravermelhos, Figura 37, utilizado na medição da temperatura das peças e das diferentes superfícies do secador.



Figura 37 - Termómetro Infravermelhos "Fluke 62 Mini"

4.4 Dados Experimentais

O processo de medição ocorreu em 3 dias diferentes e sempre com um formato diferente, como pode ser consultado na Tabela 4, é possível também consultar a velocidade a que estava a operar o secador, bem como qual o secador em que foram recolhidos os valores.

Tabela 4 - Informações sobre os casos de Estudo

Caso	Dia	Formato (mm)	Velocidade	Secador
1	12/03/2019	20 × 20	Rápida	2
2	14/03/2019	20 × 40	Rápida	2
3	18/03/2019	30 × 60	Rápida	1

Nas tabelas seguintes (Tabela 5, Tabela 6, Tabela 7, Tabela 8, Tabela 9, Tabela 10, Tabela 11) são apresentadas tabelas com os dados experimentais recolhidos para a análise, subdivididos pelos diferentes constituintes do sistema analisado. Apenas se encontram representados os valores médios, todas as medições efetuadas vêm em Anexo.

- Peças

Tabela 5 - Dados Experimentais Relativos às Peças

	Caso		
	1	2	3
$m_{peça,in}$	0,4799 kg	1,2913 kg	3,8915 kg
$m_{peça,out}$	0,4522 kg	1,2365 kg	3,6576 kg
$Prensagens_{/min}$	17,1	11,7	9,6
$N^o_{peças}/prensagem$	5	4	2
$T_{Peça,in} = T_{Água,in}$	23,56 °C	24,16 °C	24,28 °C
$T_{Peça,out}$	106,28 °C	106,72 °C	108,5 °C
$T_{Água,out}$	103,2 °C	141,7 °C	138,7 °C
$Cp_{Água,Tout}^{[7]}$	2,033 kJ/kg.K	2,140 kJ/kg.K	2,125 kJ/kg.K

- Gás Natural

Tabela 6 - Dados Experimentais Relativos ao Gás Natural

	Caso		
	1	2	3
T_{GN}	33 °C	36 °C	31,67 °C
$V_{lido\ GN}$	0,7 m ³	1,0 m ³	1,0 m ³
$P_{rel\ GN}$	3,00 bar	3,17 bar	3,05 bar
$t_{med\ GN}$	201 s	210 s	186,3 s

- Gases Extraídos pela Chaminé

Tabela 7 - Dados Experimentais Relativos aos Gases Extraídos pela Chaminé

	Caso		
	1	2	3
$\varnothing_{chaminé}$	0,4 m	0,4 m	0,4 m
ΔP	44,2 Pa	59,3 Pa	50,7 Pa
$T_{Gás,Comb}$	103,2 °C	141,7 °C	138,7 °C
$\rho_{ar,extraído}^{[11]}$	0,9381 kg/m ³	0,8509 kg/m ³	0,8570 kg/m ³
$Cp_{GásComb}^{[11]}$	1,009 kJ/kg.K	1,013 kJ/kg.K	1,013 kJ/kg.K

- Parede s/ Conduta

Tabela 8 - Dados Experimentais Relativos à Parede s/ Conduta (em °C)

	Caso		
	1	2	3
Portas - Módulo 1	42,05	51,80	40,10
Parede - Módulo 1	48,35	58,70	50,25
Portas - Módulo 2	46,00	54,30	43,30
Parede - Módulo 2	50,50	57,85	55,55
Portas - Módulo 3			
Parede - Módulo 3	49,05	61,40	58,85
Portas - Módulo 4	39,95	46,10	43,70
Parede - Módulo 4	50,00	61,65	57,55
Portas - Módulo 5	40,30	45,15	43,00
Parede - Módulo 5	51,05	58,70	55,80
Portas - Módulo 6	40,65	45,40	47,15
Parede - Módulo 6	49,95	53,10	57,15
Portas - Módulo 7			
Parede - Módulo 7	49,20	55,25	57,05
Portas - Módulo 8	40,50	43,05	44,20
Parede - Módulo 8	46,50	51,65	57,95

- Parede Conduta

Tabela 9 - Dados Experimentais Relativos à Parede Conduta (em °C)

	Caso		
	1	2	3
Portas - Módulo 1	47,45	53,05	56,20
Portas - Módulo 2	44,15	54,30	52,70
Portas - Módulo 3	40,45	50,95	52,20
Portas - Módulo 4	36,75	47,10	49,80
Portas - Módulo 5	38,05	47,35	49,60
Portas - Módulo 6	43,05	52,50	55,50
Portas - Módulo 7	50,55	59,40	56,60
Portas - Módulo 8	50,20	58,65	50,80

- Conduta Inferior

Tabela 10 - Dados Experimentais Relativos à Conduta Inferior (em °C)

	Zona	Caso					
		1		2		3	
		Esq.	Dir.	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.
Conduta Inferior 1	1	59,45	54,90	71,15	67,35	67,00	73,55
	2	39,93	37,60	48,20	44,00	46,67	47,80
	3	40,20	44,20	47,40	49,70	44,80	54,90
	4	30,30	31,73	33,73	35,13	37,40	38,93
Conduta Inferior 2	1	56,15	56,00	64,35	62,30	67,90	69,05
	2	40,33	37,93	46,27	43,33	47,60	48,93
	3	38,60	45,70	44,60	49,20	45,40	54,60
	4	32,20	34,93	36,20	38,27	39,33	40,47
Conduta Inferior 3	1	51,15	51,15	63,40	61,00	65,85	67,65
	2	40,27	37,60	43,93	44,73	50,87	50,20
	3	41,00	53,00	47,00	54,60	44,20	58,20
	4	33,73	36,67	37,27	40,20	39,67	40,73
Conduta Inferior 4	1	47,05	45,10	60,50	57,45	64,40	66,75
	2	41,33	36,87	48,27	44,87	49,73	51,07
	3	38,60	46,20	46,00	54,50	49,40	57,50
	4	36,07	36,67	37,87	40,20	39,00	43,67
Conduta Inferior 5	1	49,65	42,70	62,45	55,15	60,75	60,45
	2	43,13	38,47	48,00	42,33	49,47	46,47
	3	52,10	44,20	58,40	43,00	57,30	45,40
	4	34,40	35,67	38,73	39,93	40,67	40,33
Conduta Inferior 6	1	52,00	50,95	61,80	60,00	72,33	67,15
	2	44,27	41,93	47,33	44,80	52,27	50,73
	3	40,30	40,40	52,60	41,40	54,80	48,00
	4	40,87	36,40	39,60	38,80	39,87	39,00
Conduta Inferior 7	1	60,20	56,45	69,10	64,15	74,55	70,40
	2	44,07	39,87	48,20	43,80	48,60	49,60
	3	50,90	42,80	53,00	45,20	52,60	43,00
	4	36,80	36,20	39,27	39,00	37,87	36,53
Conduta Inferior 8	1	59,75	49,90	65,70	56,20	64,05	61,10
	2	41,87	38,80	45,27	42,13	41,07	42,53
	3	47,80	38,60	51,50	42,80	44,40	35,40
	4	34,40	36,93	35,87	37,00	34,07	33,47

- **Conduta Superior**

Tabela 11 - Dados Experimentais Relativos à Conduta Superior (em °C)

	Caso		
	1	2	3
Conduta - Superior 1	43,30	52,35	58,50
Conduta - Superior 2	45,05	56,50	53,55
Conduta - Superior 3	46,75	57,25	56,30
Conduta - Superior 4	45,40	56,15	59,75
Conduta - Superior 5	49,75	57,90	59,00
Conduta - Superior 6	47,30	54,75	55,90
Conduta - Superior 7	47,35	53,00	53,65
Conduta - Superior 8	46,15	47,30	47,70

4.5 Apresentação e Análise dos Resultados Experimentais

4.5.1 Balanço Mássico

Fazendo uma análise do caudal mássico de entrada (\dot{m}_{in}), Tabela 12, é possível constatar que grande parte desse caudal pertence ao caudal de ar assumido e ao caudal de peças, situando-se entre os 85% e os 90% nos 3 casos. Embora, com alguma variação percentual se os analisarmos independentemente, devendo-se sobretudo ao facto da variável de caudal de ar assumido, resultar de uma relação entre o caudal de ar extraído, do caudal de gás natural e do caudal de ar necessário para a combustão desse mesmo caudal de gás natural. Analisando os caudais de entrada e saída, verifica-se que sempre que o caudal de ar extraído varia positivamente, o caudal de ar assumido acompanha a sua tendência, e quando a variação é negativa, o mesmo ocorre na quantidade de ar assumido existente. Os caudais com quantidades inferiores (caudal mássico de água de entrada, caudal mássico de gás natural e caudal mássico de ar calculado por estequiometria) apresentam nos 3 casos valores muito similares em termos percentuais, rondando os 13% do caudal de entrada.

Tabela 12 - Resultados Experimentais Relativos ao Caudal Mássico de Entrada (kg/s)

	Caso					
	1		2		3	
$\dot{m}_{pe\tilde{c}a,in}$	0,6444	35,2 %	0,9644	42,5 %	1,1704	48,4 %
$\dot{m}_{Ar,Comb}$	0,1626	8,9 %	0,2294	10,1 %	0,2549	10,5 %
\dot{m}_{GN}	0,0099	0,5 %	0,0139	0,6 %	0,0155	0,6 %
$\dot{m}_{\tilde{A}gua,in}$	0,0395	2,2 %	0,0428	1,9 %	0,0748	3,1 %
$\dot{m}_{Ar,Ass}$	0,9719	53,2 %	1,0191	44,9 %	0,9011	37,3 %

Quanto ao caudal mássico de saída, Tabela 13, constata-se que a percentagem de caudal de água não varia consideravelmente em nenhum dos casos, já o caudal de ar extraído decresce em termos percentuais à medida que o caudal mássico de peça de saída aumenta, embora em termos quantitativos o valor apresente uma variação pouco acentuada. Outra conclusão possível de retirar é que à medida que os formatos das peças aumentam, consequentemente a sua massa também aumenta, e o caudal mássico de peças segue exatamente a mesma tendência.

Tabela 13 - Resultados Experimentais Relativos ao Caudal Mássico de Saída (kg/s)

	Caso					
	1		2		3	
$\dot{m}_{pe\tilde{c}a,out}$	0,6444	35,2 %	0,9644	42,5 %	1,1704	48,4 %
$\dot{m}_{\tilde{A}gua,out}$	0,0395	2,2 %	0,0428	1,9 %	0,0748	3,1 %
$\dot{m}_{G\tilde{a}s,Comb}$	1,1444	62,6 %	1,2623	55,6 %	1,1715	48,5 %

4.5.2 Balanço Térmico

No caso da potência térmica de entrada, Tabela 14, e tal como era esperado, uma grande parte, cerca de 90% em todos os casos, vem da energia fornecida ao sistema pelo gás natural, em valores quantitativos, cerca de 647,34 kW (valor médio). As restantes quantidades apresentam-se distribuídas pelas 4 potências térmicas de menor expressão, sendo a potência térmica associada ao ar assumido e à peça as mais elevadas, embora com pouca distância face às outras duas, a potência térmica do ar e a potência térmica associada à água de entrada.

Tabela 14 - Resultados Experimentais Relativos às Potências Térmicas de Entrada (em kW)

	Caso					
	1		2		3	
q_{GN}	488,04	92,1 %	689,82	92,9 %	764,17	92,8 %
$q_{Ar,Comb}$	3,28	0,6 %	4,62	0,6 %	5,13	0,6 %
$q_{Peça,in}$	15,23	2,9 %	23,38	3,1 %	28,51	3,5 %
$q_{Água,in}$	3,89	0,7 %	4,32	0,6 %	7,60	0,9 %
$q_{Ar,Ass}$	19,57	3,7 %	20,52	2,8 %	18,15	2,2 %

Analisando a potência térmica de saída, Tabela 15, é possível numa primeira análise perceber que grande parte da energia perdida não é contabilizada, encontrando-se expressa no campo q_{Outros} , embora o valor seja elevado, 35,2% na média dos três casos, este pode ser justificado pelas potências térmicas perdidas que não foram contabilizados por impossibilidade de medida. Tem-se como exemplo, o calor cedido pelas duas extremidades dos mais de 700 rolos que são responsáveis pelo avanço da peça e que se encontram em contacto com o ambiente, o calor cedido pelos 9 ventiladores que auxiliam na circulação do ar e que não apresentam revestimento, o calor cedido pelas paredes da chaminé desde a parte superior do secador até à zona onde se encontra o orifício que permitiu a medição da temperatura dos gases de extração, e por fim, o calor cedido pela superfície superior e inferior do secador. O calor presente na água e na peça representa também perto de 35% da potência térmica de saída, sobrando os restantes 30% para perdas contabilizadas, ou seja, a potência térmica de gases extraídos pela chaminé, cerca de 22,5%, e a potência térmica de perdas, em que as condutas se apresentam como os grandes dissipadores de calor (6,05%).

Tabela 15 - Resultados Experimentais Relativos às Potências Térmicas de Saída (em kW)

	Caso		
	1	2	3
$q_{Peça,out}$	68,70	103,26	127,40
$q_{Água,out}$	105,79	118,28	206,37
$q_{Gás,Comb}$	119,20	181,25	164,57
$q_{Parede\ Conduta}$	1,60	2,41	3,42
$q_{Condutas}$	32,88	44,77	47,64
$q_{Parede\ s/\ Conduta}$	6,79	9,47	9,03
q_{Outros}	191,15	278,91	257,53

Tabela 16 - Percentagens Relativas às Potências Térmicas de Saída

	Caso			Média
	1	2	3	
$q_{Peça,out}$ (%)	13,06	19,98	15,61	14,22
$q_{Água,out}$ (%)	20,11	16,02	25,29	20,47
$q_{Gás,Comb}$ (%)	22,66	24,55	20,17	22,46
$q_{Parede Conduta}$ (%)	0,30	0,33	0,42	0,35
$q_{Condutas}$ (%)	6,25	6,06	5,84	6,05
$q_{Parede s/ Conduta}$ (%)	1,29	1,28	1,11	1,23
q_{Outros} (%)	36,33	37,78	31,56	35,22

De seguida, na Figura 38 é possível consultar um gráfico circular com as respetivas percentagens de cada potência térmica de saída, para uma melhor perceção do que foi abordado no parágrafo anterior.

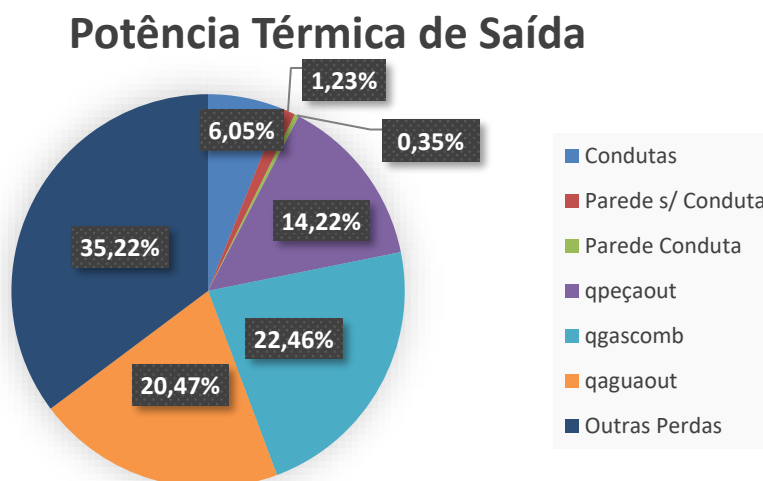


Figura 38 – Representação das Percentagens Relativas à Potência Térmica de Saída

4.5.3 Potência Elétrica

Os valores registados para este tópico apresentam-se muito similares, Tabela 17, como era esperado, tendo em conta que nos 3 casos a velocidade do secador era a mesma. Com uma variação de velocidades estes valores podem ser diferentes. Através de uma comparação com a potência térmica que o gás natural é capaz de fornecer ao sistema,

pode-se concluir que os valores de potência elétrica em pouco afetam o rendimento, pois são bastante inferiores.

Tabela 17 – Energia Elétrica

	Caso		
	1	2	3
$E_{elétrica} (kWh/15min)$	10,59	9,65	9,57
$P_{elétrica} (kW)$	42,35	38,6	38,28

4.5.4 Rendimentos

Neste campo apresentam-se as principais conclusões do estudo. Com base na $\dot{A}gua_{removida}$ (%) é possível concluir se os valores obtidos para os restantes rendimentos são ou não válidos, isto porque, teoricamente, as peças perdem cerca de 5,5% da sua humidade ao longo do processo de secagem. Sendo assim e analisando este parâmetro é possível afirmar que a média dos valores obtidos se encontra perto do valor desejado, embora se a análise for particular, constata-se que no caso 1 e 3 as peças saíram mais secas que o esperado, e no caso 2 mais húmidas.

Os valores dos rendimentos ($\eta_{\dot{A}gua}$ e $\eta_{\dot{A}gua+peça}$) apresentam-se diretamente relacionados com a $\dot{A}gua_{removida}$, quanto maior o valor de massa de água removida, maiores são os valores dos rendimentos. O inverso acontece com o parâmetro $kcal/kg_{\dot{A}gua,rem}$, diminuindo sempre que a $\dot{A}gua_{removida}$ aumenta.

Tabela 18 - Rendimentos Obtidos

	Caso			Média
	1	2	3	
$\eta_{\dot{A}gua} (\%)$	19,21	16,30	25,70	20,40
$\eta_{\dot{A}gua+peça} (\%)$	29,3	27,73	38,49	31,84
$kCal/kg_{\dot{A}gua,rem}$	3210,35	4065,04	2560,25	3278,55
$kcal/kg_{\dot{A}gua,rem}(Gás)$	2954,01	3849,63	2438,13	3080,59
$\dot{A}gua_{removida} (\%)$	5,77	4,25	6,01	5,34

4.6 Melhorias Propostas

Como já foi referido anteriormente, os secadores horizontais encontrados na empresa datam a sua construção do ano de 1993, devido à sua antiguidade apresentam tecnologias e eficiência de baixo nível. Estes secadores são incapazes de reaproveitar ar quente, vindo por exemplo do forno, tanto para pré-aquecimento do ar de combustão como para ser inserido junto com o ar de secagem que circula no interior do secador. Outra contrariedade vem dos queimadores, devido ao facto de estes trabalharem apenas em dois regimes, máximo e mínimo, o que leva a um consumo de gás natural elevado, comparativamente a queimadores que ajustam a sua intensidade mediante a necessidade. Devido à tecnologia de eletrónica de comando bastante antiga (obsoleta), os secadores atuais correm o risco de num futuro próximo serem obrigados a parar a sua produção devido à falta de peças disponíveis no mercado.

Posto isto, apresentou-se como proposta de melhoria, desta fase do processo, a substituição dos dois secadores atuais por dois secadores do mesmo tipo, horizontal, mas com um nível de eficiência superior, secadores horizontais SACMI-ETP 235/16,9 ^[16]. Estes secadores possuem 3 canais de transporte de peças, tal como os atuais, mas com uma melhor distribuição de temperaturas ao longo de cada camada, proporcionando assim uma secagem uniforme em todas as peças, independentemente do canal que percorrem, levando a uma melhoria na produção, evitando assim problemas relacionados com uma secagem ineficiente. Ainda relativamente à sua constituição, estes são compostos por 6 módulos, equipados cada um com 1 queimador. Quanto aos seus valores de performance, estes dispositivos necessitam de cerca de 1500 kcal para removerem 1 kg de água presente nas peças, com uma variação de $\pm 10\%$.



Figura 39 - Secador SACMI ^[16]

O secador proposto é capaz de fazer reaproveitamento do ar quente proveniente do forno, para pré-aquecimento da temperatura do ar de combustão ou para introdução do mesmo no processo de recirculação de ar do secador, a viabilidade desta última aplicação depende da temperatura a que o ar quente chega ao secador

O ano tido em conta para a análise, de retorno de investimento e de poupança anual, foi o ano de 2018. Nesse ano o consumo de gás natural por parte dos secadores horizontais fixou-se nos 448848 Nm^3 , custando à empresa aproximadamente 0,3048 €/ Nm^3 . Foi considerado também que a produção seria sempre a mesma ao longo dos anos, o que levaria a uma quantidade de água removida também inalterável. A partir da análise experimental efetuada, concluiu-se que em média os secadores necessitam de 3080,59 $kCal$ por kg de água removida. Procedeu-se então ao cálculo de 3 cenários, aplicando a variação de $\pm 10\%$ indicada pela empresa fornecedora dos secadores ao valor base apresentado (1500 $kCal/kg$ absorvida), sendo que o investimento ronda o 1 milhão de euros, valor indicativo. O cálculo efetuado provém de uma relação direta entre o Volume Gasto e as $kcal/kg$ absorvida.

Nota: os valores indicados para performance do secador, bem como, o valor indicativo de investimento, foram obtidos através de contacto via e-mail com o representante da SACMI Portugal.

Tabela 19 - Valores Obtidos para os Diferentes Cenários

	Ano 2018	Cenário		
		1	2	3
<i>kcal/kg absorvida</i>	3080,59	1350	1500	1650
Volume Gasto (Nm^3)	448848	196697,6	218552,9	240408,2
Gastos Monetária (€/ano)	136808,87	59953,44	66614,94	73276,43
Energia Consumida ($tep's/ano$)	415,26	181,98	202,26	222,42
Poupança Volume (Nm^3)	-----	252150,4	230295,1	208439,8
Poupança Monetária (€/ano)	-----	76855,43	70193,93	63532,44
Poupança Energia ($tep's/ano$)	-----	233,28	213,06	192,84
Payback (anos)	-----	13,01	14,25	15,74

Da análise aos valores apresentados anteriormente, é possível constatar que a melhoria proposta reduzirá em quase 50% o consumo dos secadores comparativamente ao ano de 2018. Sendo assim, estimou-se uma poupança energética anual a rondar os 213,06 tep, cenário médio, e no cenário mais pessimistas e otimista, de 192,84 tep e 233,28 tep, respetivamente. Em termos monetários esta poupança variará entre os 63532,44€ e os 76855,43€, anuais, fixando o retorno de investimento, no melhor dos cenários perto dos 13 anos, ou na pior das circunstâncias nos 15,74 anos.

Na equação do cálculo de retorno de investimento, para além do fator direto apresentado anteriormente (redução de consumo), pode ainda inserir-se um fator indireto, o Comércio Europeu de Licenças de Emissão (CELE). O CELE insere-se numa estratégia de redução da emissão de gases com efeito de estufa (GEE), na qual são atribuídas licenças gratuitas às empresas, mediante avaliação prévia, sendo que se o valor dessa licença for ultrapassado as empresas necessitaram de comprar novas licenças. Em caso de excedente, as empresas podem optar pela venda, ou por reter esse mesmo excedente para utilizar em anos seguintes, embora exista um limite de acumulação. O valor de emissões é calculado com base na quantidade de Gás Natural consumido, com recurso a parâmetros de conversão previamente estipulados ^[17].

Tabela 20 - Valores Obtidos para Redução de Emissões nos Diferentes Cenários

	Cenário		
	1	2	3
Poupança (GJ/ano)	9697,70	8857,15	8016,59
Redução (tCO₂/ano)	548,89	501,31	453,74

Com os valores apresentados na Tabela 20, calculou-se um novo tempo de Payback em função dos valores das cotações no mercado, para os 3 cenários de estudo. Para essa análise, em primeiro lugar, foi necessário avaliar o comportamento das cotações ao longo de um ano, Anexo 9. Sendo que foi escolhido o intervalo de 10 a 40 €/tCO₂, devido às inúmeras flutuações que se registaram.

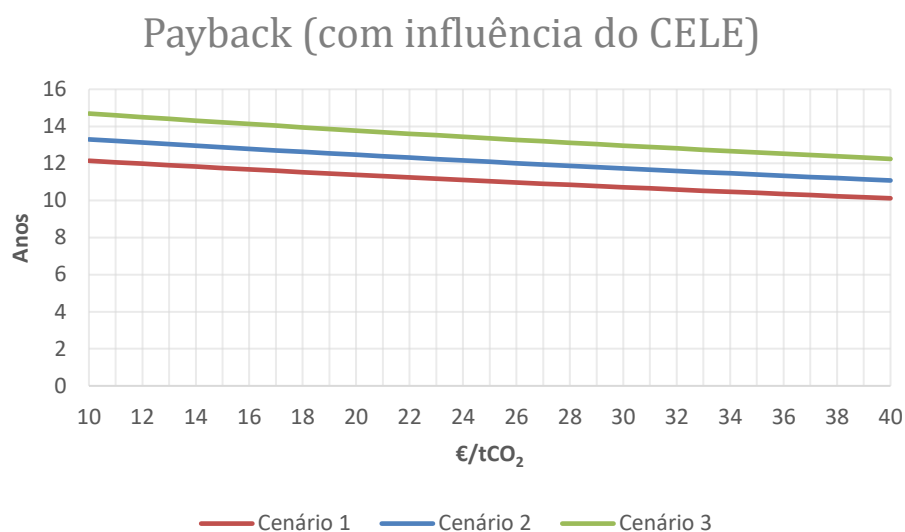


Figura 40 - Evolução do Payback com a Variação do Valor das Cotações

Analisando o gráfico da Figura 40, é possível constatar que, como era de esperar, à medida que o preço da tonelada de dióxido de carbono aumenta, o tempo de retorno do investimento diminui. No pior dos cenários (10 €/tCO₂) o Payback, dos 3 casos, varia entre os 14,69 anos (Cenário 3) e os 12,14 anos (Cenário 1), uma redução de cerca de 7%, comparativamente ao retorno sem a contabilização deste fator. Quanto à melhor das previsões (40 €/tCO₂), seriam necessários entre 10,1 anos (Cenário 1) e 12,2 anos (Cenário 3), para reaver o investimento, ou seja, um período, perto de 22% inferior ao obtido na Tabela 19.

5. Sistema de Ar Comprimido

O ar comprimido é vital no funcionamento de grande parte das indústrias, assumindo-se também como um dos principais consumidores de energia, isto porque embora o ar se encontre disponível de forma gratuita, a sua compressão acarreta elevados custos. Estima-se que os compressores representem normalmente entre 2% a 40% do consumo energético das instalações fabris, sendo esse consumo energético responsável por aproximadamente 70% dos custos ao longo de um ciclo de vida de um compressor, distribuindo-se os restantes 30%, pelo investimento inicial (20%) e a sua manutenção (10%) ^[18].

A rede de ar comprimido de uma empresa possui inúmeros constituintes, apresentando-se o compressor como o principal. Contudo os restantes não podem ser descorados, e um correto dimensionamento da rede assume-se como um dos pontos fulcrais para uma elevada eficiência no uso do ar comprimido.

Na Cerev, as secções com maiores gastos de ar comprimido são: secção das pastas, secção das prensas e secção das escolhas. Na secção das pastas grande parte do consumo relaciona-se com a descarga dos moinhos, isto porque o ar comprimido é utilizado para aumentar a pressão no interior dos moinhos levando a uma saída forçada da pasta moída, nesta mesma secção é também necessário ar comprimido na zona dos silos que armazenam o pó antes da prensagem, pois a abertura dos mesmos é regulada por válvulas de acionamento pneumático, embora a quantidade necessária seja desprezável comparativamente à descarga dos moinhos. No caso da secção das prensas, as próprias prensas apresentam-se como os principais consumidores de ar comprimido. Quanto à secção das escolhas, o ar comprimido é bastante utilizado no acionamento de válvulas pneumáticas presentes nas máquinas que procedem à separação das diferentes peças mediante a sua classificação (1ª escolha, 2ª escolha ou caco), e nas pinças que agrupam as caixas do produto final em cima das paletes.

5.1 Rede de Ar Comprimido

Uma rede de ar comprimido apresenta na sua constituição um conjunto de aparelhos e componentes que permitem uma maior eficiência de todo o sistema de ar comprimido (SAC). Todo esse sistema pode ser dividido em 3 sistemas mais particulares: sistema de geração de ar comprimido; sistema de distribuição de ar comprimido; sistemas de uso final de ar comprimido.

O sistema de geração de ar comprimido, engloba todo o processo, desde a captação de ar até à sua introdução na rede de distribuição. Este sistema inclui os compressores (efetua a compressão do ar), motores (fornecem a energia para acionar o compressor), controlos (regulam a quantidade de ar que é necessária ser produzida), equipamentos de tratamento de ar (removem contaminantes do ar comprimido), reservatórios e acessórios. Quanto ao sistema de distribuição de ar comprimido é responsável pela entrega do ar comprimido, produzido pelo compressor, a todos os locais em que o mesmo é necessário. Este sistema assume um papel bastante importante no que toca a eficiência de todo o SAC, com uma regulação de pressão adequada, uma boa drenagem de condensado e uma ótima estanqueidade. Por fim, o sistema de uso final de ar comprimido corresponde a todas as aplicações finais do ar produzido, como por exemplo o acionamento mecânico e comando de válvula em sistemas de controlo; acionamento de ferramentas pneumáticas em sistemas de acionamento pneumático; transporte por ar comprimido; controlo de processos com ar comprimido. ^[19]

5.2 Compressores

Os compressores representam um papel bastante importante na maioria das unidades fabris, devido à necessidade de ar comprimido para grande parte das operações desenvolvidas.

Existem dois grande tipos de compressores, compressores dinâmicos e compressores volumétricos. Os compressores dinâmicos utilizam a energia cinética para provocarem um aumento de pressão, isto é, o ar admitido pelo compressor é acelerado sendo de seguida, e antes da saída, obrigado a passar por um difusor, que provocará uma diminuição da velocidade de escoamento do fluido e consequente aumento de pressão. Estes compressores trabalham a pressões constantes e o seu rendimento é afetado por condições externas, como é o caso da temperatura de entrada do ar. Quanto aos compressores volumétricos, ou também chamados de compressores de deslocamento positivo, o seu modo de funcionamento prende-se com uma redução de volume sobre uma certa quantidade de ar, levando assim a um aumento de pressão. Ao contrário dos compressores dinâmicos, este tipo de compressor não trabalha a pressões constantes, mas sim a fluxo constante. ^[20]

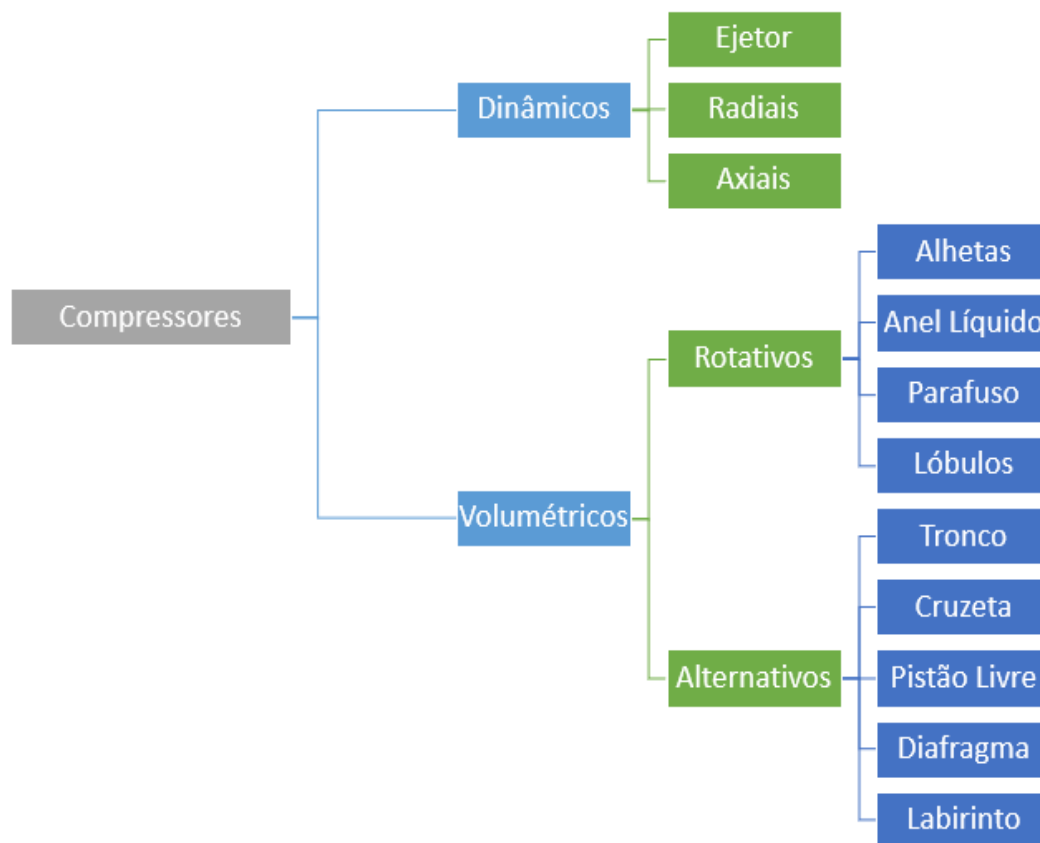


Figura 41 - Diagrama de Tipos de Compressores

Os compressores volumétricos rotativos de parafuso, abordados ao longo do presente relatório, têm vindo a apresentar-se como o principal tipo de compressor utilizado na indústria devido à sua simplicidade de processos. Tal como o próprio nome indica, o modo de funcionamento assenta na utilização de parafusos (macho e fêmea), estes rodam em sentidos opostos fazendo com que o ar avance entre eles à medida que o volume vai diminuindo, causando assim o aumento de pressão pretendido. Atendendo a que, normalmente, não possuem válvulas e forças mecânicas que causem desequilíbrios, são capazes de atingir altas velocidades no veio, o que permite uma maior produção de caudal de ar com dimensões exteriores pequenas. Este tipo de compressores encontra-se ainda dividido em dois subtipos, diretamente relacionados com a sua lubrificação, compressores de parafuso livres de óleo e compressores de parafuso com líquido injetado. Os compressores livres de óleo, não necessitam de qualquer tipo lubrificação, tendo em conta que os parafusos que atuam para comprimir o ar, nunca se tocam. Posto isto, o ar comprimido produzido por este tipo de compressores não apresenta qualquer tipo de contaminação com óleo. Quanto aos compressores com líquido injetado, estes utilizam um líquido, preferencialmente óleo, para arrefecer e lubrificar as partes do compressor em

movimento. Estes compressores são capazes de apenas com um estágio atingir pressões elevadas, acima dos 14 bar, ao contrário dos compressores livres de óleo que necessitam de vários estágios. [20]

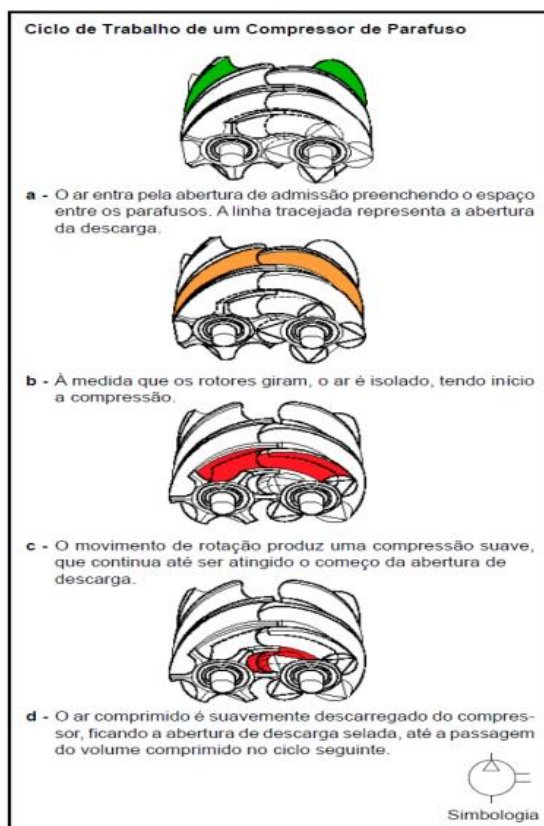


Figura 42 - Ciclo de Trabalho de um Compressor de Parafuso [21]

5.3 Fugas de Ar Comprimido

As fugas de ar comprimido apresentam-se como um dos maiores desafios para a eficiência de um sistema de ar comprimido, estima-se que, no caso da indústria portuguesa, entre 15% a 50% do ar comprimido produzido seja perdido em fugas ao longo da rede. De forma a baixar a percentagem de fugas de ar, não devendo as mesmas exceder os 10%, é necessária uma manutenção correta e atenta. Medidas como a redução da pressão de trabalho levam a uma diminuição de perdas, como se percebe a partir da consulta da tabela seguinte. [22]

Tabela 21 - Caudal de Ar (Nm^3/min) perdido através de Fugas ^[22]

Diâmetro do Furo (mm)	Pressão a 4 bar	Pressão a 6 bar	Pressão a 7 bar	Pressão a 8 bar	Pressão a 10 bar
1	0,01	0,06	0,07	0,08	0,10
2	0,16	0,25	0,28	0,33	0,62
3	0,40	0,57	0,64	0,73	0,90
4	0,72	1,00	1,13	1,29	1,57
5	1,12	1,57	1,77	2,00	2,44
6	1,60	2,27	2,54	2,86	3,78
8	2,80	4,04	4,52	5,03	6,73
10	4,32	6,31	7,07	7,80	10,52

5.4 Análise do Sistema de Ar Comprimido

No caso em particular da Cerev, a empresa possui na sua sala de ar comprimido dois compressores, um secador e um reservatório. O compressor principal (Ingersoll Rand IRN110K-CC) atua continuamente, sendo de velocidade variável, adequando a quantidade de ar comprimido produzido consoante o necessário para manter a pressão requerida.



Figura 43 - Compressor Ingersoll Rand IRN110K-CC

Os compressores Nirvana apresentam algumas particularidades, comparativamente a outros modelos. De modo a aumentar a sua eficiência, estes compressores, desligam-se sempre que a sua capacidade baixa dos 25%, voltando a ligar-

se automaticamente quando a pressão de ar decair.^[23] Quanto à sua performance, os compressores de velocidade variável apresentam uma relação proporcional entre a percentagem de potência de carga total e a percentagem de volume de saída, de acordo com a Figura 44.

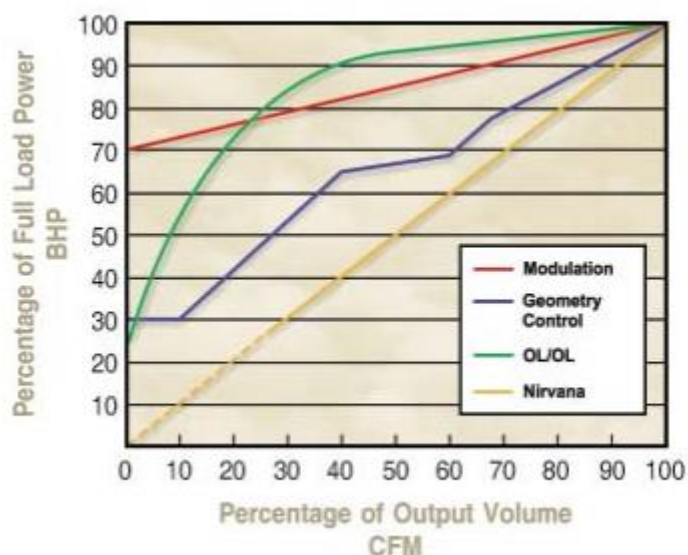


Figura 44 - Comparação de Controlos de Capacidade Compressores Rotativos^[23]

O Compressor secundário (Ingersoll Rand SSR M55-75) é utilizado em caso de avaria do compressor principal, ou quando o mesmo necessita de manutenção. Após a compressão, o ar é armazenado num reservatório (2000 Litros), de seguida dá entrada no secador antes de ser injetado para a rede. Ao longo do sistema de distribuição de ar comprimido é possível encontrar vários purgadores e separadores de ar condensado, para além de 3 reservatórios de ar comprimido colocados em zonas de maior carência, funcionando como um pulmão que responde às necessidades pontuais dessas zonas, um situado junto às prensas (750 Litros), um no auxílio ao despoeiramento do grés (1100 Litros), e um junto às escolhas (1100 Litros) coincidindo também com o local da rede de ar comprimido mais distante do compressor. A rede principal tem mais de 900 metros de perímetro encontrando-se fechada junto às zonas com maiores gastos e mais afastadas do compressor.

5.5 Metodologia de Análise de Dados

Na sequência de uma análise geral aos dados fornecidos pela plataforma de GC, energia consumida pelo compressor e o volume de ar comprimido produzido, ambos em

intervalos de 15 minutos e convertidos em valores médios por minuto, procedeu-se a uma divisão de diferentes períodos ao longo da semana. Estes intervalos foram designados por:

- **Semana Dia:** no período compreendido entre as 9:00 e as 23:00, de segunda-feira a sexta-feira, excluindo feriados. Com o objetivo de perceber quais os consumos nas horas de maior necessidade de ar comprimido ao longo da semana, isto é, durante o funcionamento em pleno de todas as secções.
- **Semana Noite:** entre as 2:00 e as 7:00, de terça-feira a sábado, excluindo feriados. Este espaço temporal corresponde à utilização noturna de ar comprimido, ou seja, um período em que a unidade fabril não funciona no seu máximo de produção, trabalhando apenas as secções dos fornos e prensas.
- **Sábado:** desde as 8:00 até às 00:00, apenas ao sábado, apresentando-se como uma transição entre a semana e o domingo.
- **Domingo:** inicia-se às 00:00 de domingo e termina às 06:00 de segunda-feira, ao longo deste intervalo de tempo, apenas labora a secção dos fornos com um consumo muito baixo de ar comprimido.

Os períodos considerados correspondem a cerca de 84% das horas semanais, sendo os restantes 16% horas de transição, isto é, períodos que não apresentam um espetro regular de utilização de ar comprimido, como por exemplo, a paragem ou arranque de atividade de uma certa secção.

5.6 Análise de Dados do Compressor

Realizou-se uma análise detalhada dos valores de consumo de ar e energia pelo compressor, durante os primeiros 6 meses do ano de 2018, com o objetivo, de perceber as variações de consumos nos diferentes períodos semanas, descritos anteriormente.

Os perfis de consumo do compressor, em cada um dos intervalos, em cada mês, encontram-se em Anexo. Através da sua análise é possível constatar que, como era de esperar, o consumo de energia aumenta sempre que existe um aumento de consumo de ar comprimido.

No caso Semana Dia, os valores assemelham-se ao longo dos meses, com um notório aumento ao início do período, entre as 9:00 e as 11:00, horas em que são atingidos os valores mais elevados de consumos, devido à descarga dos moinhos da secção das pastas, rondando os $12/13 \text{ m}^3/\text{min}$ e os $1,1/1,3 \text{ kWh}/\text{min}$. O segundo pico de consumo regista-se entre as 14:00 e as 16:00, em grande parte dos dias, coincidindo com a descarga dos moinhos da secção dos vidros, não sendo estes valores tão elevados como os do período da manhã.

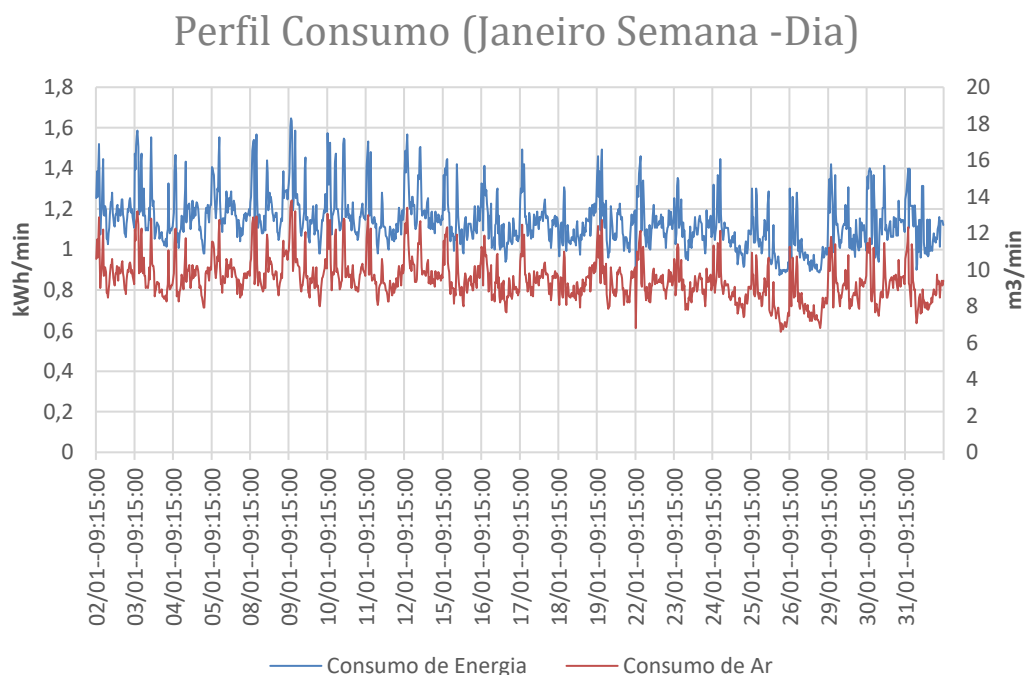


Figura 45 - Perfil Consumo (Janeiro Semana-Dia)

Durante o caso Semana Noite é possível encontrar, esporadicamente, consumos que se assemelhem ao caso anterior, devido a uma necessidade de atividade de algumas secções até mais tarde, oscilando no geral entre os 3 e os $4 \text{ m}^3/\text{min}$, e o consumo de energia próximo dos $0,8 \text{ kWh}/\text{min}$. Por vezes, a empresa sente necessidade de produzir ao longo da noite, para tal existem noites com maior consumo, e que saem do espetro habitual, como por exemplo, nas noites de 14 e 15 de março, ou 28, 29 e 30 do mesmo mês, consumindo entre 6 a $7 \text{ m}^3/\text{min}$ e $0,9 \text{ kWh}/\text{min}$.

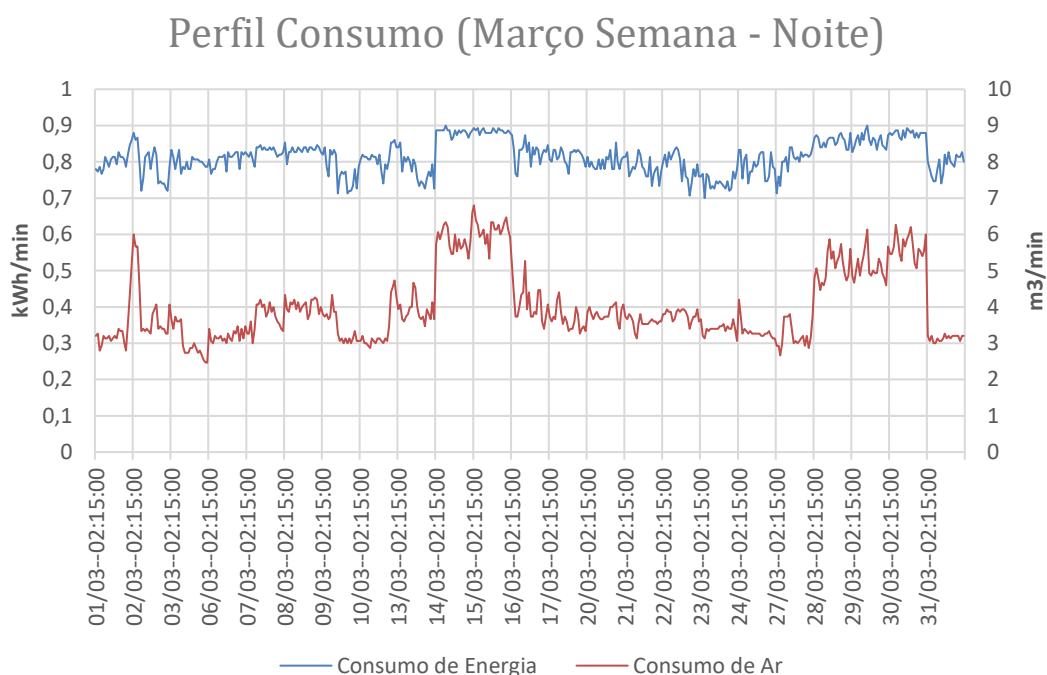


Figura 46 - Perfil Consumo (Março Semana - Noite)

Quanto aos casos Sábado e Domingo, estes apresentam resultados muito semelhantes, sendo os seus valores sempre constantes, sem picos de consumos a registar, essencialmente no consumo de ar, que ronda os $2 \text{ m}^3/\text{min}$. O consumo de energia flutua entre os 0,6 e os 0,8 kWh/min , esta variação tão acentuada comparativamente aos outros casos, deve-se à baixa necessidade de caudal de ar comprimido, o que leva a que o compressor se desligue, sempre que a necessidade de ar baixa dos 30% da sua capacidade de produção.

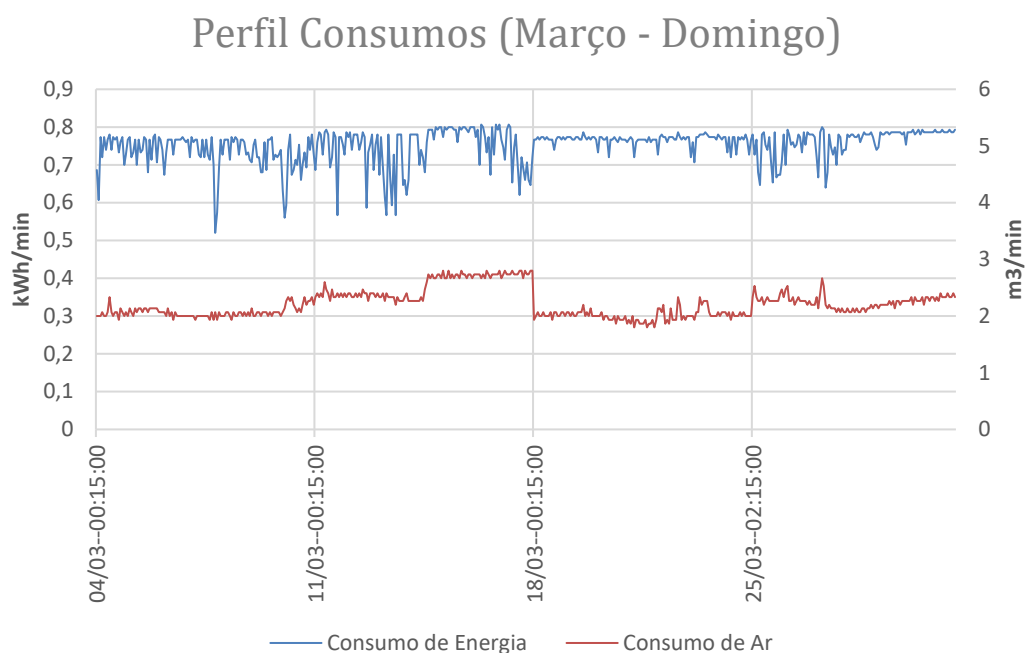


Figura 47 - Perfil Consumo (Março - Domingo)

Nos gráficos seguintes são apresentados os valores de 3 parâmetros importantes, para os 4 casos de estudo.

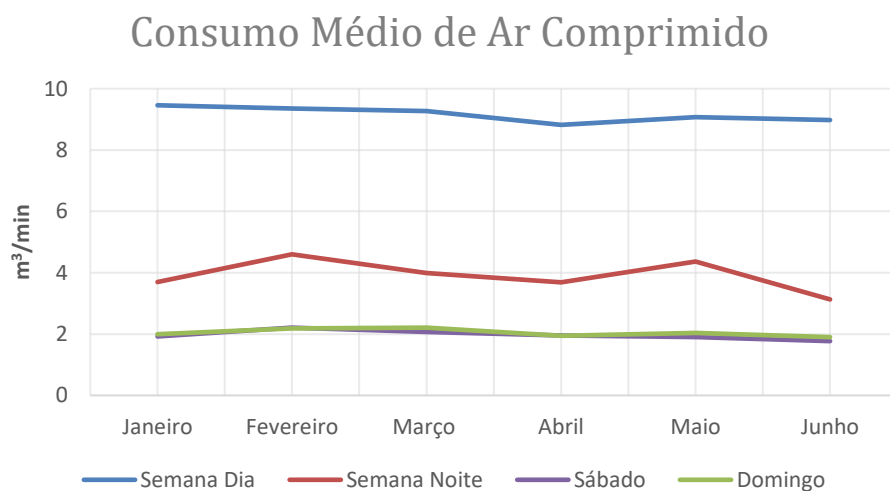


Figura 48 - Consumo Médio de Ar Comprimido (m^3/min)

O consumo médio (m^3/min), como se previa, apresenta-se muito superior durante a Semana Dia (em média $9,15 m^3/min$), sendo 2,3 vezes superior ao da Semana Noite, e cerca de 4,5 vezes superior ao de Sábado e Domingo, que tal como referido anteriormente,

são bastante semelhantes. No geral, todos os períodos mantêm os seus valores constantes, à exceção da Semana Noite, onde existe alguma oscilação, devido às noites em que ocorreram atividades extra.

Potência Média

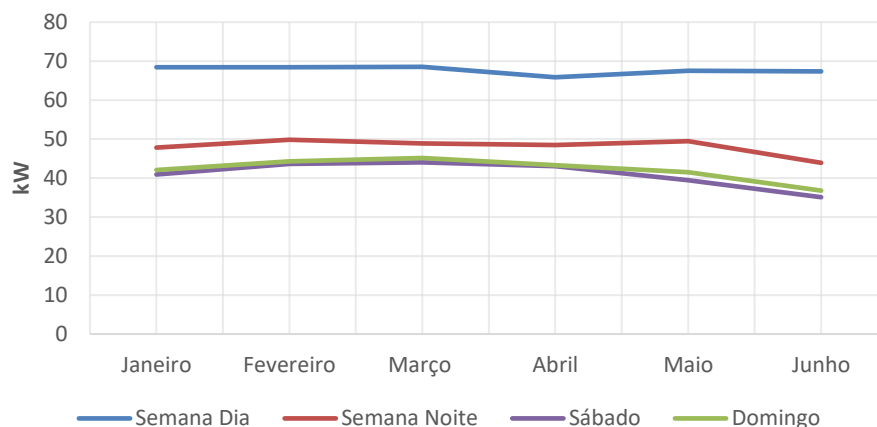


Figura 49 - Potência Média de Funcionamento do Compressor (kW)

A potência média (kW) é também superior na Semana Dia, embora esta não esteja diretamente relacionada com a variação de consumo obtida entre os casos. Na semana Dia, a potência média é de 67,70 kW (valor médio dos 6 meses em análise), ou seja, o compressor encontra-se a laborar nas horas de maior consumo, a cerca de 56% da sua potência máxima.

Custo de Produção de Ar Comprimido

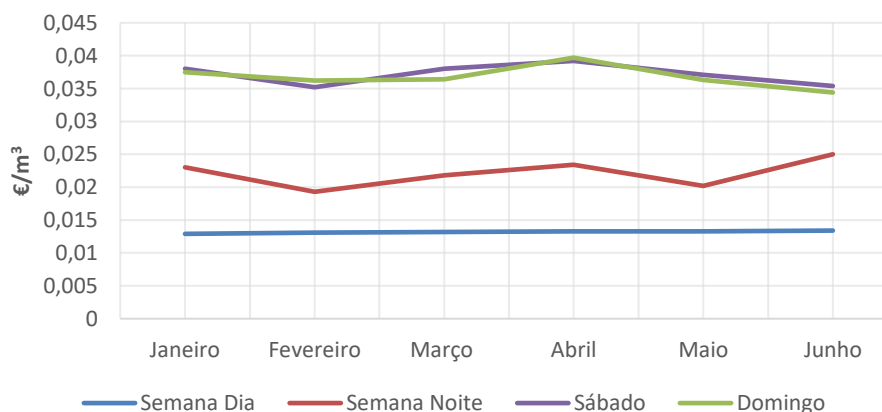


Figura 50 - Custo de Produção de Ar Comprimido (€/m³)

Por fim, o custo de produção (€/m^3) apresenta-se bastante elevado ao fim-de-semana (Sábado e Domingo), comparativamente à Semana Dia, cerca de 2,8 vezes superior, por consequência do constante desligar do compressor, o mesmo acontece no período noturno, embora com uma frequência mais reduzida, sendo apenas 1,67 vezes superior.

Com vista a uma contabilização de fugas de ar comprimido, ao longo da rede, aplicou-se uma taxa de 80, 85, e 90% ao consumo de ar ao longo do caso de Domingo, isto porque, neste período apenas funciona a secção dos fornos, secção essa que necessita de uma quantidade baixa de ar comprimido.

Tabela 22 - Estimativa do Caudal de Fugas

Caudal Estimado	%	80	85	90
	(m^3/s)	1,64	1,74	1,84

Atendendo a que o consumo médio, ao longo do primeiro semestre de 2018, foi de $5,72 \text{ m}^3/\text{min}$, o valor estimado para as fugas corresponde a mais de 28,5% do total produzido. Concluindo-se assim, que o mesmo se encontra dentro dos parâmetros normais no cenário industrial português, mas ainda muito longe dos 10% tidos como máximo para uma rede de ar comprimido com uma boa manutenção. Aplicando aos diferentes períodos a sua taxa correspondente, o preço das fugas é o apresentado na tabela seguinte.

Tabela 23 - Preço das Perdas de Ar Comprimidos Através das Fugas Estimadas

Período	Horas	Preço (€/m^3)	Custo (€)		
			80%	85%	90%
Semana Dia	1722	0,0132	2231,22	2370,67	2510,12
Semana Noite	615	0,0221	1334,14	1417,53	1500,91
Sábado	416	0,0372	1519,05	1613,99	1708,93
Domingo	750	0,0368	2709,22	2878,54	3047,87
Não Analisados	841	0,0132	1089,69	1157,80	1225,91
Total			8883,31	9438,52	9993,73

Por consulta da Tabela 23, ao longo do primeiro semestre, estima-se que o custo das fugas varie entre os 8883,31 € e os 9993,73 €. Na obtenção destes valores assumiu-se que, nos períodos Não Analisados, o preço de produção do ar comprimido seria o mesmo do período Semana Dia, de modo ao que o valor final não seja inflacionado.

5.7 Soluções Propostas

Atendendo ao elevado custo de produção de ar comprimido nos períodos de Fim-de-Semana e Semana noite, comparativamente ao período Semana Dia, foram apresentadas duas soluções diferentes para um uso de energia mais eficiente. Ambas as soluções passam pela colocação de compressores de menor capacidade, anulando ou diminuindo o número de vezes que o compressor necessita de se desligar pela baixa necessidade de ar comprimido. As soluções apresentadas, e respetivas análises detalhadas, advêm dos Perfis de Consumo e dos Histogramas de Consumo, do primeiro semestre de 2018, presente em anexo.

A primeira solução apresentada necessita da colocação de 3 compressores novos, 2 de velocidade fixa Ingersoll Rand modelo RS45i ^[25] (capacidade de 8,9 m³/min a 7,0 bar) e 1 de velocidade variável Ingersoll Rand R45n ^[24] (capacidade entre 1,64 a 7,42 m³/min a 7,0 bar).

A segunda solução apresentada passa pela aquisição de 2 máquinas novas, 1 compressor de velocidade variável Ingersoll Rand modelo RS45n ^[24] (capacidade entre 1,64 a 7,42 m³/min a 7,0 bar) e 1 compressor de velocidade variável Ingersoll Rand modelo R75n ^[26] (capacidade entre 3,23 a 13,56 m³/min a 7,0 bar).

5.7.1 Análise Detalhada das Soluções Apresentadas

5.7.1.1 Primeira Solução

Na Tabela 24, apresentam-se as principais características dos compressores propostos nesta solução, detalhadas em Anexo 17.

Tabela 24 - Características dos Compressores (Sol.1)

	Compressor	
	RS45i	RS45n
Potência_{Nominal} (kW)	45	45
Potência Máxima_{Total} (kW)	53,4	54,1
Potência Estimada_{vazio} (kW)	25% da Potência Nominal ^[27]	
Caudal_{Máximo} (m³/min)	8,9	7,42
Caudal_{Mínimo} (m³/min)		1,64

No período Semana Dia, um dos compressores de velocidade fixa opera permanentemente, sendo que sempre que necessário o compressor de velocidade variável entra em compensação. Quanto aos restantes períodos, Semana Noite, Sábado e Domingo, apenas trabalhará o compressor de velocidade variável. Com esta solução existirá uma rotação no uso das máquinas fixas, e em caso de avaria ou de manutenção, de qualquer um dos compressores, a capacidade da fábrica fica garantida.

Quanto ao período de operação do compressor de velocidade fixa, Semana Dia, estima-se que este opere em carga, cerca de 96,6 % do seu tempo de funcionamento. Ao longo do período Semana Dia será necessário o auxílio do compressor de velocidade variável em cerca de 56,3% do período definido.

Tabela 25 - Percentagens de Necessidade de Ar Comprimido (Sol.1)

	Entre 1,64 e 7,42 m ³ /min	<1,64 m ³ /min	>7,42 m ³ /min
Semana Noite	99,88%	0,04%	0,08%
Sábado	93,33%	6,67%	0%
Domingo	96,49%	3,51%	0%

Através da análise da Tabela 25, é possível constatar que nos períodos correspondentes ao Fim-de-Semana, Sábado e Domingo, o compressor de velocidade variável é capaz de responder na totalidade às necessidades, e permanecendo grande

parte do tempo ligado (93,33% do período de Sábado e 96,49% do período de Domingo), ao invés daquilo que acontece atualmente. No período da Semana Noite, o compressor enquadra-se perfeitamente nas necessidades, sendo as percentagens de tempo que se apresentam fora do intervalo de operação do compressor variável bastante baixas, ou seja, a necessidade de apoio do compressor de velocidade fixa ou a necessidade do compressor de velocidade variável se desligar, são praticamente inexistentes.

5.7.1.2 Segunda Solução

Na Tabela 26, encontram-se as principais características dos dois compressores apresentados nesta solução, apresentadas em Anexo 17.

Tabela 26 - Características dos Compressores (Sol.2)

	Compressor	
	RS45n	RS75n
Potência_{Nominal} (kW)	45	75
Potência Máxima_{Total} (kW)	54,1	87,0
Caudal_{Máximo} (m³/min)	7,42	13,56
Caudal_{Mínimo} (m³/min)	1,64	3,23

Nesta solução, em cada um dos períodos estabelecidos, existe uma máquina variável a operar, isto é, no período da Semana Dia, o compressor variável de maior capacidade assume o papel principal na produção de ar, sendo apenas necessário o compressor R45n em casos que a necessidade de ar supere a capacidade de produção do compressor principal. Nos restantes períodos, o princípio de funcionamento é exatamente o oposto, trabalhando o compressor R45n em permanência, entrando a máquina de maior capacidade em auxílio deste.

Nos períodos Semana Noite e Fim-de-Semana, é esperado que o comportamento do compressor R45n seja igual ao da solução anterior, tendo em conta que para estes períodos, a segunda solução é exatamente igual à primeira.

No período Semana Dia, após análise dos valores registados no primeiro semestre, constata-se que o compressor R75n é capaz de responder quase por completo às necessidades da fábrica (99,96 % do tempo de funcionamento), existindo apenas uma percentagem muito pequena em que precisa do auxílio do compressor de menor capacidade (R45n).

5.7.2 Estratégia de Cálculo para os Novos Consumos

O método adotado para o cálculo dos possíveis consumos varia consoante o tipo de compressor (compressor de velocidade variável ou compressor de velocidade fixa). De seguida, descrevem-se os princípios de cálculo, para cada um dos casos.

5.7.2.1 Compressores de Velocidade Variável

Os compressores de velocidade variável apresentam, como referido anteriormente, certas particularidades no seu funcionamento.

Uma das particularidades dos compressores de velocidade variável Nirvana prende-se com a sua performance, apresentado uma relação direta entre a percentagem de carga total e a percentagem de volume de saída (Figura 44). Assim, o cálculo do seu consumo de energia previsto ($Energia_{variável}$) foi obtido com base na sua Potência Máxima Total ($Potência\ Máxima_{Total}$), no Consumo Medido ($Caudal_{Medido}$) e na Capacidade Máxima de Produção de Ar Comprimido ($Caudal_{Máximo}$).

$$Energia_{variável} = \frac{Caudal_{Medido} \times \left(\frac{Potência\ Máxima_{Total}}{4} \right)}{Caudal_{Máximo}}$$

Equação 37 - Consumo de Energia em Períodos de 15 minutos (kWh)

Outra das particularidades ocorre quando o consumo de ar comprimido por parte da rede é inferior à capacidade mínima do compressor, levando a que o mesmo se desligue, voltando a ligar assim que necessário. Para tal, e tendo em conta que é impossível quantificar a energia despendida com o ligar e o desligar do compressor, tal como o número de vezes que essa operação ocorre, assumiu-se que nos períodos em que o consumo de ar seja inferior à capacidade mínima do compressor, o valor do consumo energético realizado pelo compressor proposto será igual ao consumo de energia do compressor atual, nesse período de tempo. Este método foi utilizado em todos os casos, à

exceção da solução 2, aquando o uso em simultâneo do compressor de velocidade variável e o compressor de velocidade fixa. Nestes períodos recorre-se à Equação 37, aplicando-se um fator de 3,77, Anexo 15. Este fator provém de um cálculo efetuado nos períodos de Fim-de-Semana, que relaciona a quantidade de energia utilizada ($Energia_{Real}$) pelo compressor atual e a quantidade de energia teórica ($Energia_{Teórica}$) caso o mesmo não se desligasse em períodos de baixo consumo.

$$Fator = \frac{Energia_{Real}}{Energia_{Teórica}}$$

Equação 38 - Fator que Relaciona a Energia Consumida com a Energia Teórica

5.7.2.2 Compressor de Velocidade Fixa

No caso do compressor de velocidade fixa, necessitou-se de contabilizar o período de tempo em que o mesmo se encontrava a operar em carga e em vazio. Os períodos de carga foram obtidos recorrendo à Equação 39, onde $Períodos_{Máximo}$ representa todos os períodos em que a necessidade de ar comprimido é superior à capacidade de produção do compressor de velocidade fixa.

$$Períodos_{Carga} = Períodos_{Máximo} + Períodos_{Supl}$$

Equação 39 - Períodos de Carga (15 min)

$Períodos_{Supl}$ obtêm-se através da divisão, do total dos consumos de ar comprimido em períodos com necessidades inferiores à capacidade do compressor ($Consumo_{ar_{Total}}$) pela capacidade de produção do compressor ($Capacidade_{Compressor}$).

$$Períodos_{Supl} = \frac{Consumo_{ar_{Total}}}{Capacidade_{Compressor}}$$

Equação 40 - Períodos Suplementares (15 min)

Os períodos de vazio ($Períodos_{Vazio}$) vêm da subtração aos períodos totais ($Períodos_{Totais}$) dos $Períodos_{Carga}$.

$$Períodos_{Vazio} = Períodos_{Totais} - Períodos_{Carga}$$

Equação 41 - Períodos de Vazio

A estimativa da energia consumida pelo compressor ($Energia_{Fixo}$) advém da soma da energia consumida durante o funcionamento em carga ($Energia_{Carga}$) e em vazio ($Energia_{Vazio}$).

$$Energia_{Carga} = Períodos_{Carga} \times Potência\ Máxima_{Total}$$

Equação 42 - Energia em Períodos de Carga (kWh)

$$Energia_{Vazio} = Períodos_{Vazio} \times Potência\ Estimada_{Vazio}$$

Equação 43 - Energia em Períodos de Vazio (kWh)

5.7.3 Resultados Obtidos

Os consumos de energia registados e previstos, para os diferentes períodos e para as diferentes soluções, encontram-se discriminados em Anexo 16. Na Tabela 27 é possível consultar os valores gerais obtidos.

Tabela 27 - Consumo de Energia Previsto e Registado no Período de Análise (kWh)

	Consumo de Energia Registado	Consumo de Energia Previsto			
		Solução 1		Solução 2	
Semana Dia	116632,20	108822,66	-6,70%	101257,77	-13,18%
Semana Noite	29541,90	17518,55	-40,70%	17518,55	-40,70%
Sábado	17021,90	6559,98	-61,46%	6559,98	-61,46%
Domingo	31583,30	11759,03	-62,77%	11759,03	-62,77%
Total	194779,30	144660,22	-25,73%	137095,33	-29,62%

A partir da análise da tabela anterior, Tabela 27, constata-se que existe na generalidade uma redução do consumo de energia, em qualquer uma das soluções apresentadas. Contudo é possível perceber, que a maior poupança de energia ocorre na Solução 2, atendendo a que existe uma maior diminuição de consumo no período Semana Dia, comparativamente à solução 1. Como esperado, os consumos nos períodos Semana Noite e Fim-de-Semana são iguais em ambas as soluções, tendo em conta que a medida proposta para estes períodos é a mesma. Em termos percentuais, a maior redução no consumo de energia acontece nos dois períodos correspondentes ao fim-de-semana (Sábado e Domingo), atendendo a que o compressor atual apresenta um custo superior na

produção de ar comprimido durante estes períodos, como apresentado anteriormente, devido ao ligar e desligar constante.

Tabela 28 - Custo do Consumo de Energia Previsto e Registado no Período de Análise (€)

	Custo do Consumo de Energia Registado	Custo do Consumo de Energia	
		Solução 1	Solução 2
Semana Dia	12479,65	11644,02	10834,58
Semana Noite	3160,98	1874,49	1874,49
Sábado	1821,34	701,92	701,92
Domingo	3379,41	1258,22	1258,22
Total	20841,38	15478,65	14669,20

Na Tabela 28 apresentam-se os custos monetários da produção de ar comprimido, sendo estes valores calculados a uma taxa de 0,107 €/kWh, valor da taxa paga ao longo de 2018 pela empresa.

Tabela 29 - Valores Finais de Poupança e Payback

	Solução 1	Solução 2
Poupança Energia (kWh/ano)	100238,18	115367,94
Poupança Energia (tep/ano)	8,62	9,92
Poupança Monetária (€/ano)	10725,48	12344,38
Custo do Investimento* (€)	76199,00	66592,00
Payback (Anos)	7,10	5,40

*Nota: os valores de custo de investimento apresentados são indicativos, tendo por base propostas anteriores.

Analisando as poupanças estimadas para cada uma das soluções, Tabela 29, é possível perceber que existirá uma diminuição do consumo, tendo em conta as tabelas anteriores. Esta diminuição, a nível anual, rondará os 8,62 tep e os 9,92 tep, para a solução 1 e 2, respetivamente. Em termos de poupança monetária, espera-se que a solução 2 apresente um valor superior, cerca de +1600 €/ano, comparativamente à solução 1. Os

custos do investimento, em anexo, são superiores na primeira solução, atendendo ao maior número de compressores adquiridos. Quanto ao Payback, o melhor resultado vem da solução 2, cerca de 5,4 anos, apresentando a solução 1 um Payback 1,7 anos superior.

6. Considerações Finais

Ao longo deste estágio foi possível perceber todas as fases da produção de materiais cerâmicos, em particular, de produtos de revestimento em Monoporosa e de produtos de pavimento em grés porcelânico técnico. Quanto ao objetivo principal do trabalho, eficiência energética, foram apresentadas no total 3 propostas, 1 delas no capítulo do secador horizontal e as restantes relacionadas com o ar comprimido.

No caso dos secadores horizontais presentes na Cerev, após uma análise inicial, através dos balanços mássico e térmico realizados, foi possível constatar que grande parte da energia fornecida pelo gás natural era desperdiçada, não só pela chaminé de extração de gases, como também pelas paredes do secador. Para tal, é proposta a aquisição de dois novos secadores, que iriam substituir os presentes, com uma performance bastante superior ao atuais, com funcionalidades e possibilidades de melhoria que não são permitidas nos secadores que se encontram na empresa, como por exemplo, o aproveitamento de ar quente proveniente do forno para um pré-aquecimento do ar de combustão dos queimadores, levando estas melhorias a um aumento mais acentuado da performance dos secadores horizontais propostos face aos atuais. O principal ponto negativo desta alteração, está relacionado diretamente com o custo da aquisição dos secadores, apresentando um retorno de investimento bastante elevado. Contudo, esta proposta poderá permitir uma poupança de energia, proveniente do gás natural, a rondar os 210 tep/ano.

No capítulo de ar comprimido, para além das soluções apresentadas, foram ainda estimadas as perdas provenientes das fugas de ar comprimido, apresentando esta estimativa valores elevados, evidenciando um nível de manutenção inferior ao necessário nesta área. Quanto às duas soluções propostas, estas passam pela substituição dos compressores presentes na empresa. No caso do compressor de velocidade fixa, utilizado apenas aquando manutenção/avaria do compressor principal, a substituição deve-se à sua antiguidade. No caso do compressor de velocidade variável, a sua substituição prende-se com o seu sobredimensionamento em relação às reais necessidades de ar comprimido, levando a um custo de produção acrescido em períodos de baixo consumo de ar comprimido.

A primeira solução apresenta como principais vantagens, a rotação das máquinas fixas, o que levará a uma menor necessidade de gastos com manutenção, e o facto de em caso de avaria de um dos compressores, os dois restantes são capazes de satisfazer as necessidades da unidade fabril, mesmo em períodos de necessidade máxima. A principal

desvantagem desta solução está relacionada com o custo, sendo este superior ao da segunda solução. Quanto aos períodos de funcionamento de cada um dos compressores, nos períodos de Semana Dia, o compressor de velocidade fixa apresenta uma percentagem de trabalho em carga superior a 95%, sendo este um valor aceitável para um compressor de carga-vazio. Nos restantes períodos, as necessidades de ar comprimido concentram-se na sua maioria entre os valores máximos e mínimos de trabalho do compressor de velocidade variável. Embora em alguns casos a necessidade de ar comprimido seja inferior ao mínimo de produção do compressor, o que levará ao desligar do mesmo, esse acontecimento ocorrerá com menor frequência comparativamente ao atual. Com esta solução será possível atingir uma poupança de energia a rondar os 8,6 tep/ano, correspondente a uma diminuição de cerca de 25,7% de energia consumida.

Relativamente à segunda solução, apresenta como principal vantagem, a desvantagem da solução anterior, ou seja, um custo inferior de investimento, e consequentemente um retorno de investimento mais baixo. Contudo, em caso de avaria do compressor de maior capacidade a satisfação das necessidades de ar comprimido ficarão comprometidas. Nesta solução, durante o período Semana Dia, o compressor R75n será capaz de satisfazer as necessidades numa grande maioria do tempo (99,96% do tempo de funcionamento). Nos restantes períodos, as conclusões retiradas são as mesmas do parágrafo anterior, atendendo a que as soluções são iguais. Com a aplicação desta solução estima-se que exista uma poupança energética próxima dos 10 tep/ano, aproximadamente menos 29,6% de energia necessária.

Em trabalhos futuros existem vários temas que podem vir a ser analisados. No caso dos secadores horizontais, seria interessante realizar o estudo de viabilidade de aproveitamento de ar quente, proveniente do forno, para pré-aquecimento do ar de combustão do secador, ou até mesmo para a sua introdução no ar de secagem que circula no interior do secador. Quanto ao ar comprimido, a criação de uma plataforma informática, de modo a que em caso de fuga de ar comprimido, o encarregado de cada secção fosse responsável por inserir a ocorrência da mesma na plataforma. Posteriormente, e após a sua reparação, os elementos da manutenção davam como reparada a fuga na plataforma, existindo assim um maior controlo de deteção e reparação de fugas, o que levaria a uma diminuição de consumo de ar, e consequentemente, a uma redução de energia consumida pelo compressor.

7. Referências

1. pwc, “Capacitação da indústria da Cerâmica Portuguesa – Um cluster, uma estratégia, mercados prioritários”, novembro 2016.
2. APICER, “Comércio Internacional de Produtos Cerâmicos”, fevereiro 2018.
3. BP, “BP Statistical Review of World Energy”, junho 2017.
4. Direção-Geral de Energia e Geologia, “Balanço Energético 2017”.
5. Agência Portuguesa do Ambiente, “Relatório de Estado do Ambiente Portugal 2018”, junho 2018.
6. <http://pavigres.com/pt/institucional>, acedido a 17/02/2019.
7. Çengel, Yunus A., Boles, Michal A., “Thermodynamics : An Engineering Approach”, 5th Edition.
8. EDP Gás Serviço Universal, “Fator de Conversão de m³ para kWh”, julho 2018
9. Bergman, Theodore L., Lavine, Adrienne S., Incropera, Frank P., Dewitt, David P., “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, Seventh Edition.
10. “<https://galpgasnaturaldistribuicao.pt/Centro-de-Informacao%C3%A7%C3%A3o/Monitorizacao-do-gas-natural?fbclid=IwAR1yvf7nU5oAU6UPZXKvefBb6TctnnLh0xIDp0YkYkICeqFJPpasamjcSi8>”, acedido a 25/02/2019.
11. Çengel, Yunus A., “Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer”, Second Edition”.
12. Gueto, Juan Morales, “Tecnología de los materiales cerâmicos”, 2005.
13. “www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html”, acedido a 01/03/2019.
14. Jiří Lucák, “Experimental Verification of Model Simulation Results of Heating Cycles within the Electric Muffle Furnaces”, 2016.
15. Testo, “Instrucion Manual – Testo 350-S Control Unit in combination with Testo 350-S / -XL Flue Gas Analyser”.
16. SACMI, “Horizontal Driers”, 09/2016
17. Agência Portuguesa do Ambiente, “Comércio Europeu de Licenças de Emissão”, 04-08-2008.
18. Abhay Costa, “Eficiência Energética em Ar Comprimido”, Atlas Copco, 31/10/2012
19. Rocha, Carlos Roberto, Monteiro, Marco Aurélio Guimarães, “Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido – Guia Prático”.
20. Atlas Copco, “Compressed Air Manual”, 8th edition, 2015.

21. Parker Training, “Dimensionamento de Redes de Ar Comprimido”, 09/2006.
22. IBERDROLA, “Guia de Eficiências Energética – Manual de Boas Práticas”.
23. Ingersoll Rand, “Industrial Business Unit – Compressed Air System Solutions”, 04/2006.
24. Ingersoll Rand, “Compresores de aire de tornillo rotativo refrigerados por contacto – Serie R de 37-45 kW y 50 Hz”, 2012.
25. Ingersoll Rand, “Next Generation R-Series Oil-Flooded Rotary Screw Air Compressors – 45/75kW”, 2018.
26. Ingersoll Rand, “Oil-Flooded Rotary Screw Air Compressors – R-Series 45/75 kW 50 Hz”, 2016.
27. “<https://www.voltimum.pt/artigos/sistemas-de-ar-comprimido-medidadas-para>”,
acedido a 15/04/2019.

8. Anexos

Anexo 1 – Valores medidos relativos às peças

	Caso		
	1	2	3
$m_{peça,in}$ (kg)	0,4803	1,2951	3,8705
	0,4807	1,2912	3,8835
	0,4803	1,2912	3,8933
	0,4773	1,2920	3,9060
	0,4807		3,9041
$m_{peça,out}$ (kg)	0,4522	1,2399	3,6801
	0,4526	1,2365	3,6495
	0,4523	1,2330	3,6318
	0,4517	1,2365	3,6641
	0,4521		3,6624
$T_{peça,in}$ (°C)	24,0	24,2	24,2
	23,6	24,0	24,2
	22,8	24,0	24,0
	23,6	24,4	24,4
	23,8	24,2	24,6
$T_{peça,out}$ (°C)	108,8	106,2	108,2
	105,6	109,2	107,4
	106,4	105,6	109,6
	105,6	107,4	110,0
	105,0	105,2	107,4
$Prensagens_{/min}$	17,1	11,7	9,6
$N^{\circ}peças_{/prensagem}$	5	4	2

Anexo 2 - Valores de temperatura medidos na Parede s/ Conduta (Portas) em °C

	Caso		
	1	2	3
Portas - Módulo 1	43,8	54,8	42,2
	43,6	53,6	41,4
	46,2	60,2	40,4
	34,6	38,6	36,4
Portas - Módulo 2	48,8	54,8	50,2
	48,6	58,8	45,4
	49,2	57,8	41,4
	37,4	45,8	36,2
Portas - Módulo 3			
Portas - Módulo 4	44,8	55,0	46,2
	41,8	48,2	46,6
	39,8	44,6	45,4
	33,4	36,6	36,6
Portas - Módulo 5	44,2	51,6	47,4
	42,6	49,0	46,8
	41,2	44,6	44,6
	33,2	35,4	33,2
Portas - Módulo 6	45,2	52,2	52,6
	43,4	50,2	51,0
	41,6	43,6	48,2
	32,4	35,6	36,8
Portas - Módulo 7			
Portas - Módulo 8	41,4	43,6	48,4
	42,0	44,4	47,8
	45,2	46,8	46,4
	33,4	37,4	34,2

Anexo 3 - Valores de temperatura medidos na Parede s/ Conduta (Parede) em °C

	Caso		
	1	2	3
Parede - Módulo 1	51,2	64,4	56,8
	52,4	63,6	52,8
	52,6	61,8	54,8
	37,2	45,0	36,6
Parede - Módulo 2	53,6	62,6	63,2
	55,2	67,0	60,2
	55,2	61,0	60,2
	38,0	40,8	38,6
Parede - Módulo 3	52,4	64,2	65,6
	55,6	67,4	62,8
	53,4	69,4	64,4
	34,8	44,6	42,6
Parede - Módulo 4	56,4	72,2	64,0
	53,2	65,4	60,6
	54,6	67,2	64,0
	35,8	41,8	41,6
Parede – Módulo 5	56,2	64,2	62,4
	55,2	66,4	60,8
	53,2	64,0	61,6
	39,6	40,2	38,4
Parede - Módulo 6	53,4	57,0	61,6
	54,2	59,2	65,2
	53,2	56,4	61,0
	39,0	39,8	40,8
Parede - Módulo 7	54,8	57,4	63,8
	53,4	61,6	65,2
	50,8	59,4	60,4
	37,8	42,6	38,8
Parede - Módulo 8	51,6	56,2	59,4
	49,6	56,8	58,4
	48,8	56,4	58,2
	36,0	37,2	55,8

Anexo 4 - Valores de temperatura medidos na Parede Conduta em °C

	Caso		
	1	2	3
Portas - Módulo 1	53,6	67,4	77,2
	57,4	55,6	55,4
	43,6	49,8	50,4
	35,2	39,4	41,8
Portas - Módulo 2	55,0	67,6	61,2
	46,8	58,6	55,6
	41,2	51,8	50,6
	33,6	39,2	43,4
Portas - Módulo 3	45,4	58,8	58,4
	43,2	55,4	54,8
	39,6	49,8	50,8
	33,6	39,8	44,8
Portas - Módulo 4	41,8	54,6	54,4
	39,4	51,4	52,2
	35,2	45,0	50,4
	30,6	37,4	42,2
Portas - Módulo 5	46,8	60,6	54,2
	39,4	48,4	51,4
	35,6	44,8	49,2
	30,4	35,6	43,6
Portas - Módulo 6	56,0	72,8	68,2
	45,4	56,4	59,8
	38,6	44,2	50,8
	32,2	36,6	43,2
Portas - Módulo 7	64,4	78,2	71,0
	53,6	62,4	60,4
	49,2	53,8	52,4
	35,0	43,2	42,6
Portas - Módulo 8	63,0	74,4	59,8
	54,0	60,8	54,0
	49,0	59,2	49,8
	34,8	40,2	39,6

Anexo 5 - Valores de temperatura medidos na Conduta Inferior em °C

	Zona	Caso					
		1		2		3	
		Esq.	Dir.	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.
Conduta Inferior 1	1	66,0	65,0	88,8	82,2	78,8	94,0
		67,2	57,8	78,0	72,8	67,2	74,2
		65,0	55,2	70,6	65,8	71,4	71,2
		39,6	41,6	47,2	48,6	50,6	54,8
	2	35,2	33,0	37,8	35,6	37,0	37,4
		41,0	37,6	52,0	46,8	45,4	49,4
		43,6	42,2	54,8	49,6	57,6	56,6
	3	40,2	49,4	47,4	45,8	44,8	58,6
			39,0		53,6		51,2
	4	29,0	28,8	31,8	32,4	32,6	34,4
		29,2	30,4	32,8	35,4	34,8	34,6
		32,8	36,0	36,6	37,6	44,8	47,8
Conduta Inferior 2	1	73,8	71,4	88,4	78,2	78,8	82,8
		56,2	59,8	62,0	70,4	74,0	74,4
		53,0	51,2	60,2	57,2	66,4	70,6
		41,6	41,6	46,8	43,4	52,4	48,4
	2	34,6	33,2	39,6	37,8	38,2	37,2
		40,6	37,4	45,6	42,8	49,0	50,4
		45,8	43,2	53,6	49,4	55,6	59,2
	3	38,6	50,2	44,6	50,8	45,4	56,6
			41,2		47,6		52,6
	4	37,2	29,4	33,6	33,6	34,8	35,6
		30,8	30,6	35,6	35,0	35,6	36,8
		28,6	44,8	39,4	46,2	47,6	49,0
Conduta Inferior 3	1	57,8	58,4	69,0	75,8	71,8	71,4
		55,2	54,6	65,2	64,6	70,2	73,2
		50,4	49,8	69,6	56,6	66,0	70,2
		41,2	41,8	49,8	47,0	55,4	55,8

	2	33,4	31,8	29,0	36,8	41,0	38,4
		39,2	35,8	48,2	46,4	50,2	50,6
		48,2	45,2	54,6	51,0	61,4	61,6
	3	41,0	66,2	47,0	59,2	44,2	61,6
			39,8		50,0		54,8
	4	29,0	29,4	34,2	35,8	36,4	37,4
		30,8	32,8	36,2	40,2	37,0	38,8
		41,4	47,8	41,4	44,6	45,6	46,0
Conduta Inferior 4	1	55,2	56,2	72,6	71,4	68,0	69,2
		48,6	49,6	59,6	61,4	68,4	71,4
		44,6	47,0	60,4	54,8	65,8	69,2
		39,8	27,6	49,4	42,2	55,4	57,2
	2	33,2	30,0	39,6	36,4	41,2	41,0
		37,4	34,8	47,4	46,6	50,8	50,2
		53,4	45,8	57,8	51,6	57,2	62,0
	3	38,6	53,6	46,0	58,8	49,4	59,4
			38,8		50,2		55,6
	4	29,4	29,4	35,6	34,2	37,0	38,6
		31,0	31,6	36,8	37,8	37,4	39,2
		47,8	49,0	41,2	48,6	42,6	53,2
Conduta Inferior 5	1	57,4	37,0	81,2	71,4	67,6	64,8
		54,2	49,8	61,4	56,4	68,2	65,4
		44,2	45,6	55,6	51,6	54,6	60,0
		42,8	38,4	51,6	41,2	52,6	51,6
	2	36,8	31,2	44,2	33,8	41,0	38,8
		39,2	39,2	47,0	42,8	48,8	43,4
		53,4	45,0	52,8	50,4	58,6	57,2
	3	44,6	44,2	60,2	43,0	60,2	45,4
		59,6		56,6		54,4	
	4	31,4	30,8	36,2	35,0	38,2	35,4
		32,4	33,2	37,4	37,6	38,6	37,4
		39,4	43,0	42,6	47,2	45,2	48,2
	1	60,8	62,6	72,8	75,4	85,4	80,2

Conduta Inferior 6		54,2	52,2	62,4	66,0	77,8	73,8
		49,4	48,8	60,0	55,4	71,6	64,8
		43,6	40,2	52,0	43,2	54,4	49,8
	2	36,2	33,2	40,8	33,6	41,8	39,2
		39,8	39,0	47,4	45,2	50,8	50,4
		56,8	53,6	53,8	55,6	64,2	62,6
	3	36,8	40,4	54,8	41,4	55,8	48
		43,8		50,4		53,8	
	4	31,6	32,2	35,6	34,6	35,8	34,4
		33,6	33,6	37,2	36,6	37,4	35,4
		57,4	43,4	46,0	45,2	46,4	47,2
Conduta Inferior 7	1	67,8	70,0	80,6	82,6	89,6	81,8
		64,4	65,0	73,8	73,2	80,2	74,2
		62,4	52,2	70,6	57,6	73,6	72,2
		46,2	38,6	51,4	43,2	54,8	53,4
	2	38,0	32,2	41,4	36,2	40,4	40,0
		44,8	40,8	46,4	44,4	49,8	47,6
		49,4	46,6	56,8	50,8	55,6	61,2
	3	55,4	42,8	53,8	45,2	54,6	43,0
		46,4		52,2		50,6	
	4	32,8	29,4	35,8	33,4	35,4	32,8
		35,0	35,0	37,8	38,2	35,6	34,4
		42,6	44,2	44,2	45,4	42,6	42,4
Conduta Inferior 8	1	72,6	57,2	77,8	68,4	71,4	69,8
		61,6	54,6	69,4	61,4	67,6	65,0
		60,4	49,2	66,6	54,6	62,6	52,2
		44,4	38,6	49,0	40,4	54,6	47,4
	2	35,8	31,4	39,4	35,2	34,4	35,4
		41,2	37,8	46,0	43,6	41,8	41,8
		48,6	47,2	50,4	47,6	47,0	50,4
	3	51,4	38,6	52,8	42,8	44,6	35,4
		44,2		50,2		44,2	
	4	30,6	30,0	32,2	32,6	30,2	29,4

		33,6	35,6	36,6	37,8	32,2	30,4
		39,0	45,2	38,8	40,6	39,8	40,6

Anexo 6 - Valores de temperatura medidos na Conduta Superior em °C

	Caso		
	1	2	3
Conduta Superior 1	43,2	56,2	49,6
	44,6	53,8	56,6
	42,2	49,0	62,6
	43,2	50,4	65,2
Conduta Superior 2	45,6	62,2	48,2
	47,2	54,4	52,4
	49,2	55,6	52,2
	38,2	53,8	61,4
Conduta Superior 3	47,8	63,4	46,4
	51,2	60,0	56,8
	45,8	54,8	55,2
	42,2	50,8	66,8
Conduta Superior 4	46,2	55,2	50,0
	43,2	57,4	57,4
	47,4	58,6	63,4
	44,8	53,4	68,2
Conduta Superior 5	52,8	60,2	52,2
	53,8	62,4	58,0
	49,8	59,6	64,8
	42,6	49,4	61,0
Conduta Superior 6	49,6	60,4	47,4
	50,6	55,4	53,8
	46,8	53,8	56,4
	42,2	49,4	66,0
Conduta Superior 7	53,6	61,6	45,4
	48,6	52,4	51,0
	45,4	51,6	57,2
	41,8	46,4	61,0
Conduta Superior 8	50,8	50,4	37,4
	53,2	53,6	46,0
	42,2	47,2	53,8
	38,4	38,0	53,6

Anexo 7 - Cálculo estequiométrico para a relação GN/Ar Combustão

Componentes	% Molar	Massa Molecular (kg/mol)	Massa de Ar (kg _{nec} /kg _{ás})
Metano	90,05	16,043	13,803
Etano	6,4485	30,070	1,730
Propano	1,7445	44,097	0,668
i-Butano	0,234	58,124	0,117
n-Butano	0,2695	58,124	0,134
i-Pentano	0,02	72,151	0,012
n-Pentano	0,0105	72,151	0,006
n-Hexano	0,01	86,178	0,008
Azoto	0,5795	28,014	0
Dióxido de Carbono	0,633	44,009	0
Total			16,479

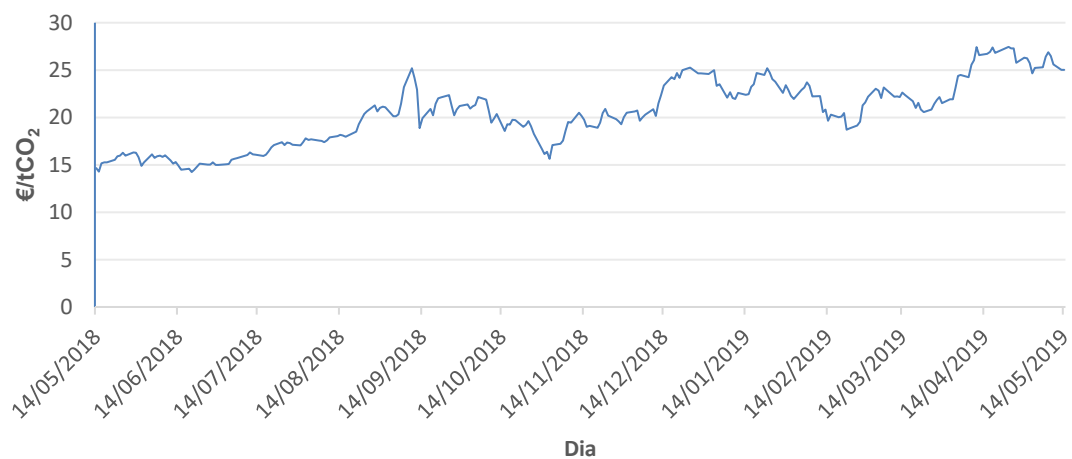
Anexo 8 - Consumo de Energia Elétrica entre as 9:00 e as 17:00 (kWh/15min)

Caso		
1	2	3
10,9	9,8	9,5
10,7	9,8	9,7
10,8	9,6	9,8
10,8	10,0	9,7
10,8	9,4	9,8
10,6	9,8	9,3
10,7	9,6	9,8
10,7	9,9	9,7
10,7	9,6	9,5
10,7	9,8	9,7
10,6	9,5	9,5
10,5	9,6	9,6
9,8	9,6	9,5
9,9	9,7	9,5
10,6	9,5	9,6
10,7	9,5	9,6
10,6	9,7	9,6
10,7	9,4	9,5
10,5	9,6	9,6
10,7	9,5	9,6

10,7	9,5	9,5
10,7	9,6	9,6
10,6	10,0	9,6
10,4	9,7	9,6
10,4	9,7	9,5
10,6	9,7	9,4
10,6	9,5	9,4
10,4	9,7	9,5
10,6	9,8	9,5
10,6	9,6	9,5
10,6	9,8	9,4
10,6	9,3	9,6

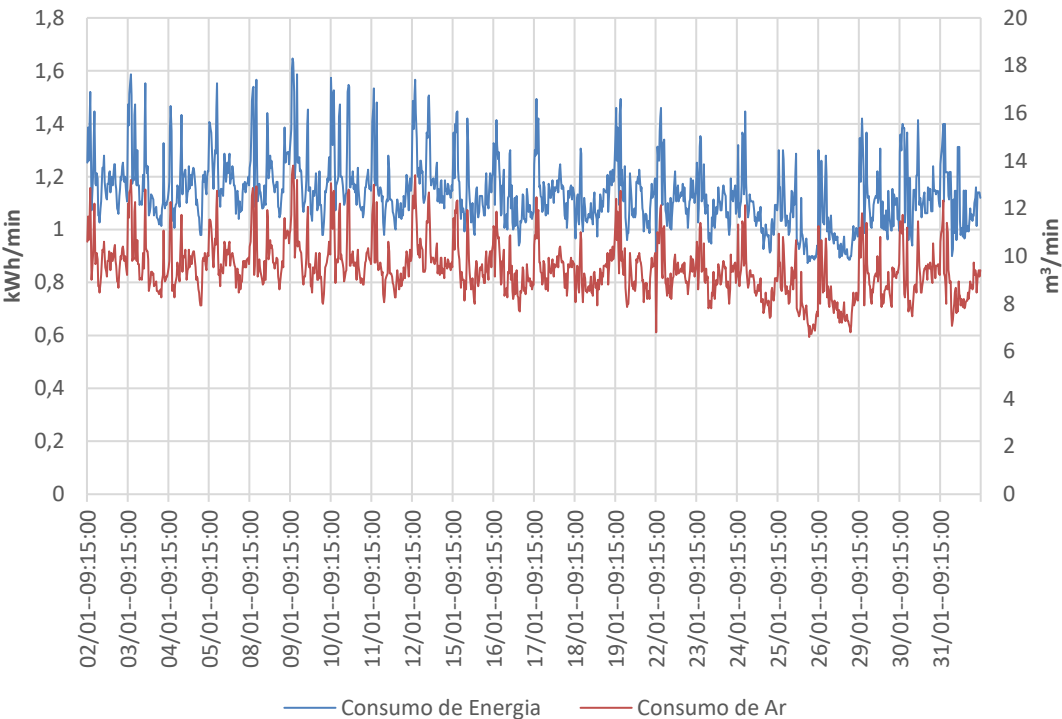
Anexo 9 - Cotações de Licenças de CO₂ desde 14/05/2018 até 14/05/2019

Cotações de Licenças CO₂

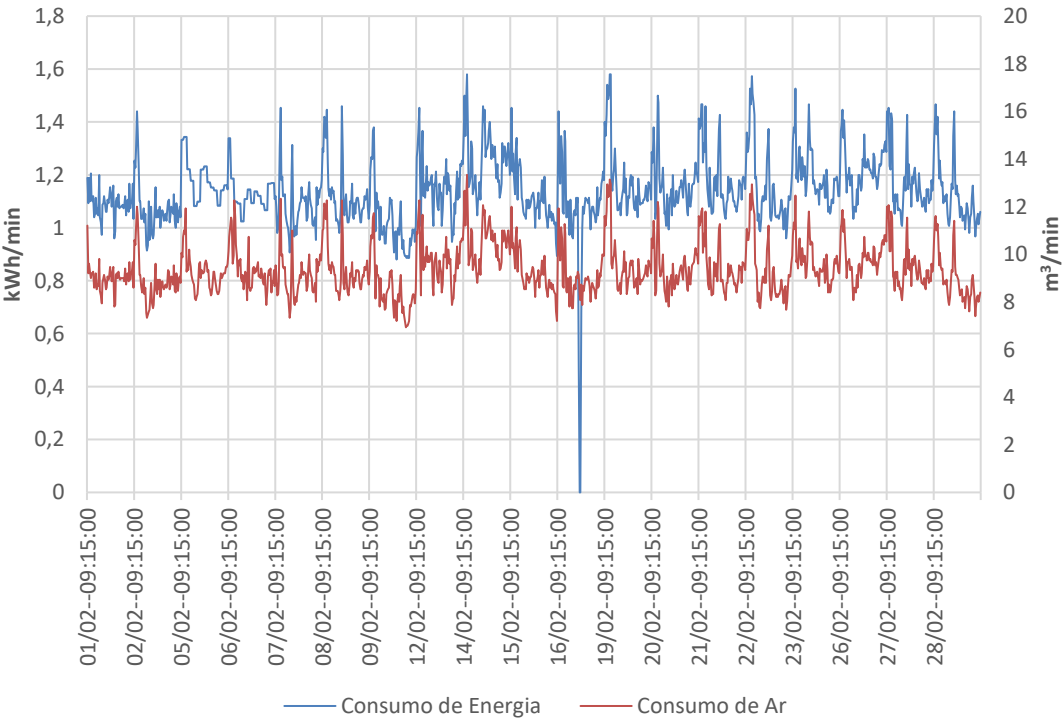


Anexo 10 - Perfis de Consumo (Semana - Dia)

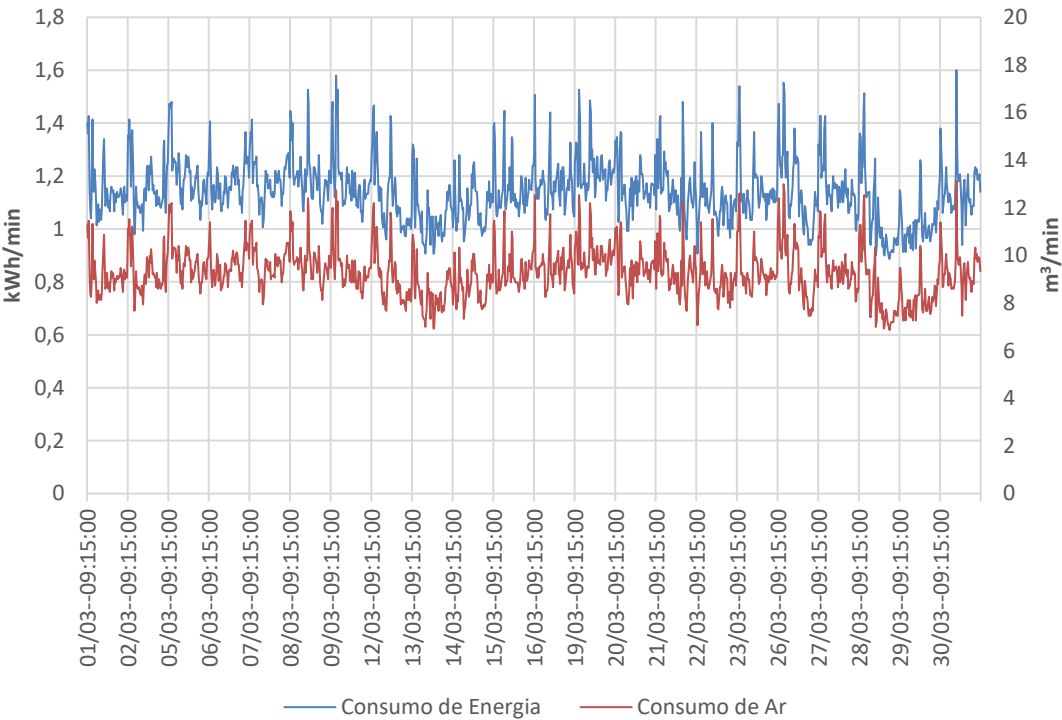
Perfil Consumo (Janeiro Semana -Dia)



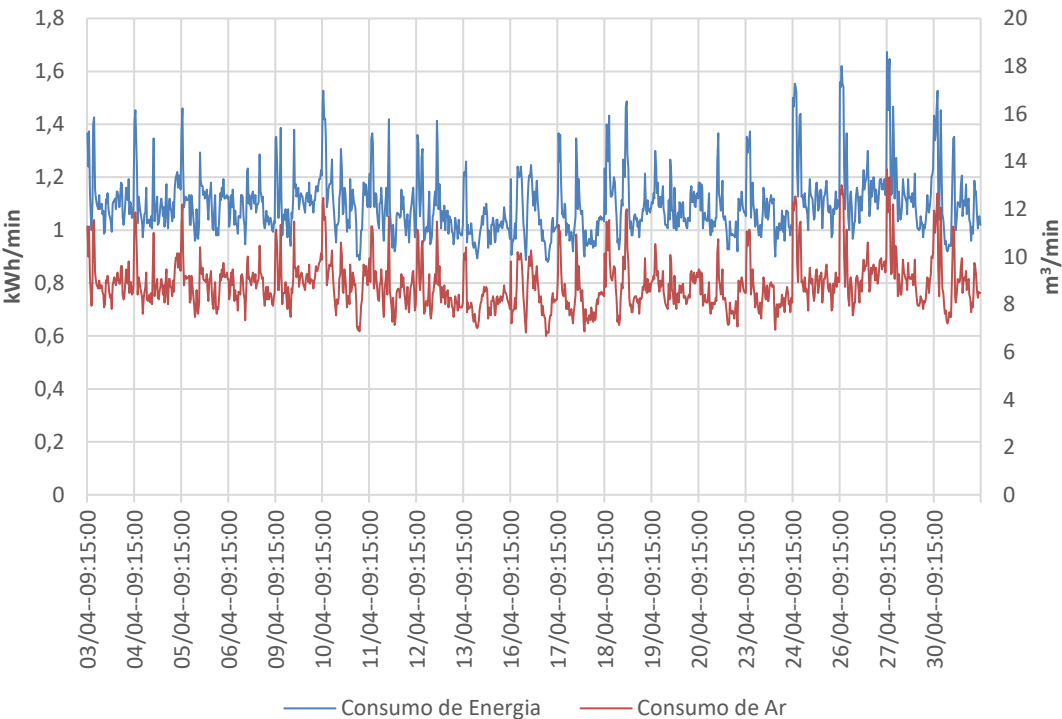
Perfil Consumo (Fevereiro Semana - Dia)



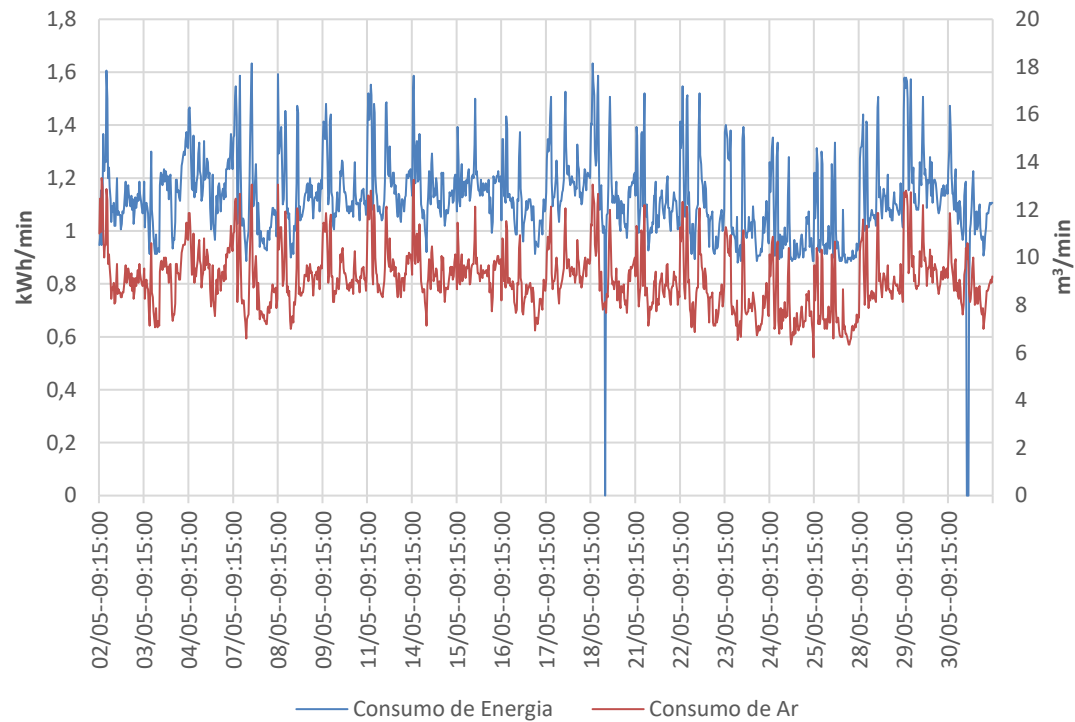
Perfil Consumo (Março Semana - Dia)



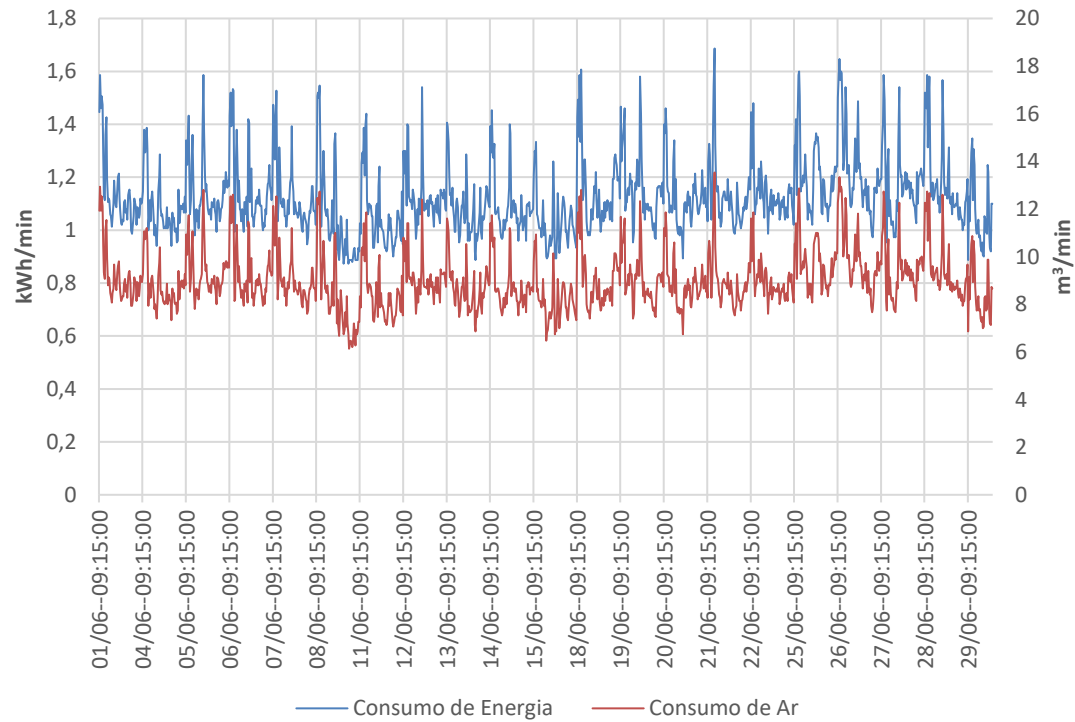
Perfil Consumo (Abril Semana - Dia)



Perfil Consumo (Maio Semana - Dia)

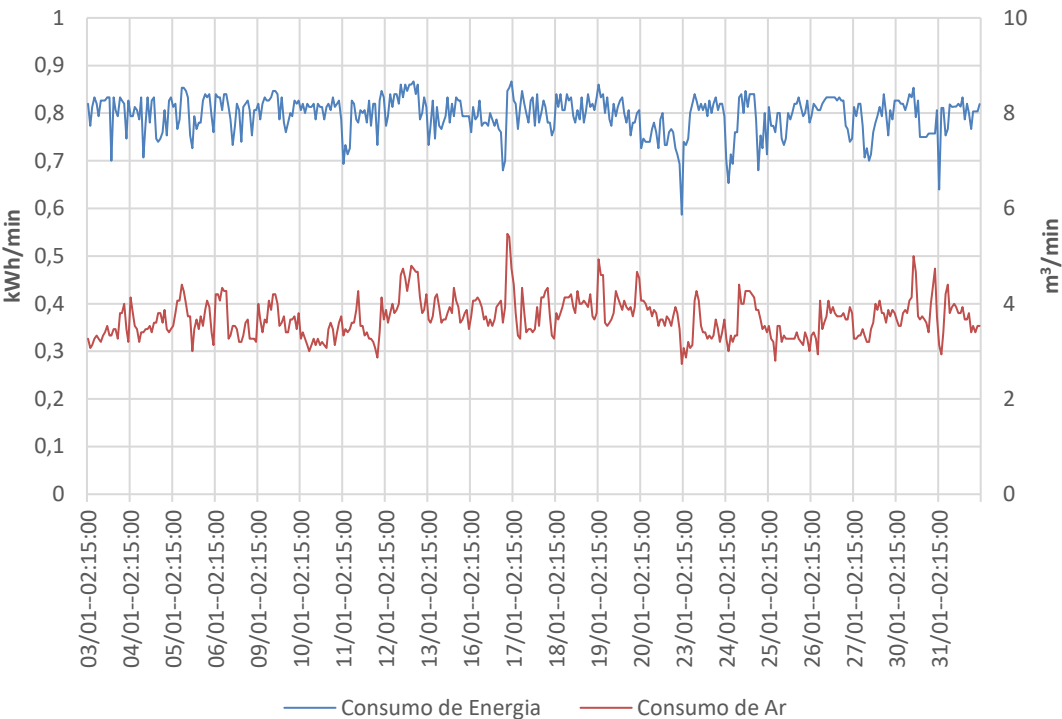


Perfil Consumo (Junho Semana - Dia)

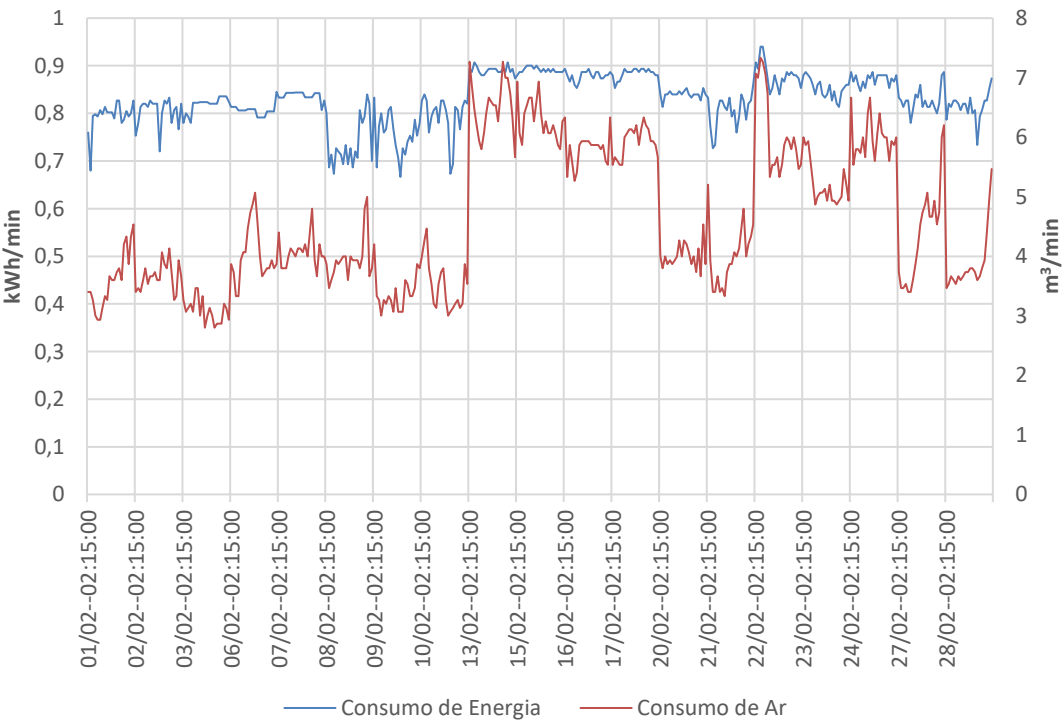


Anexo 11 - Perfis de Consumo (Semana - Noite)

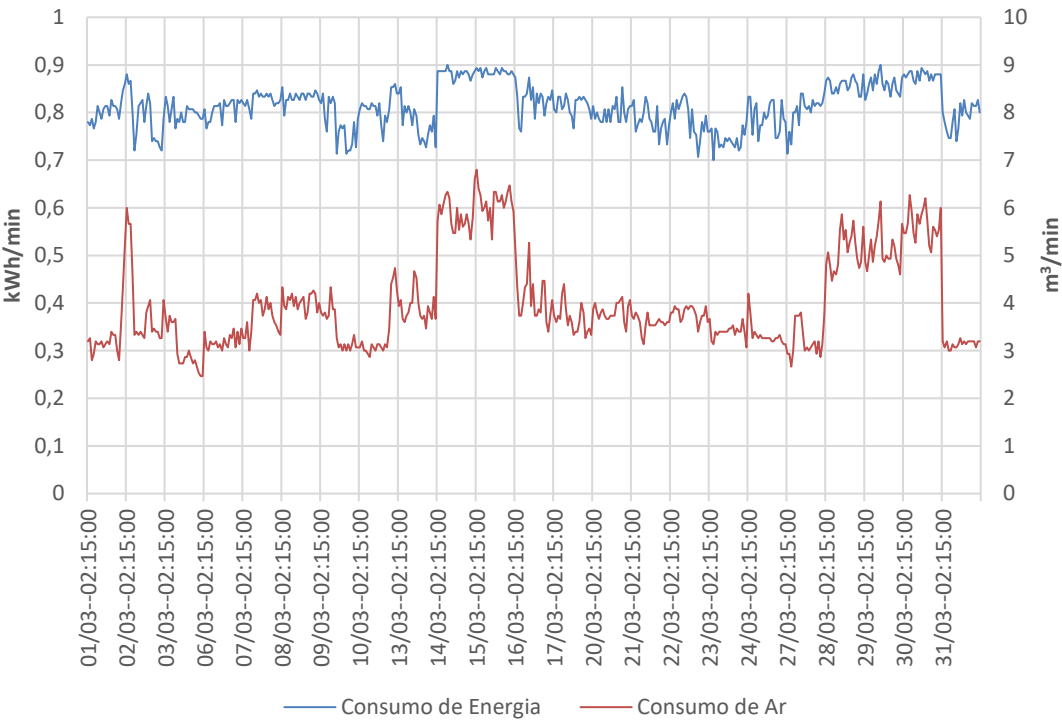
Perfil Consumo (Janeiro Semana - Noite)



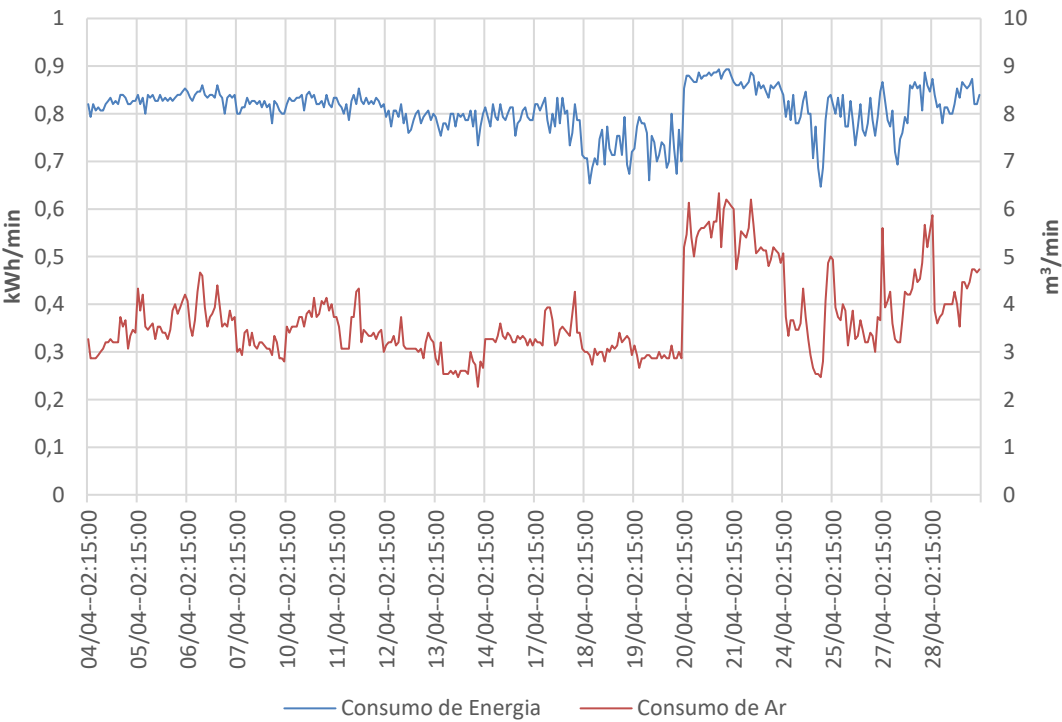
Perfil Consumo (Fevereiro Semana - Noite)



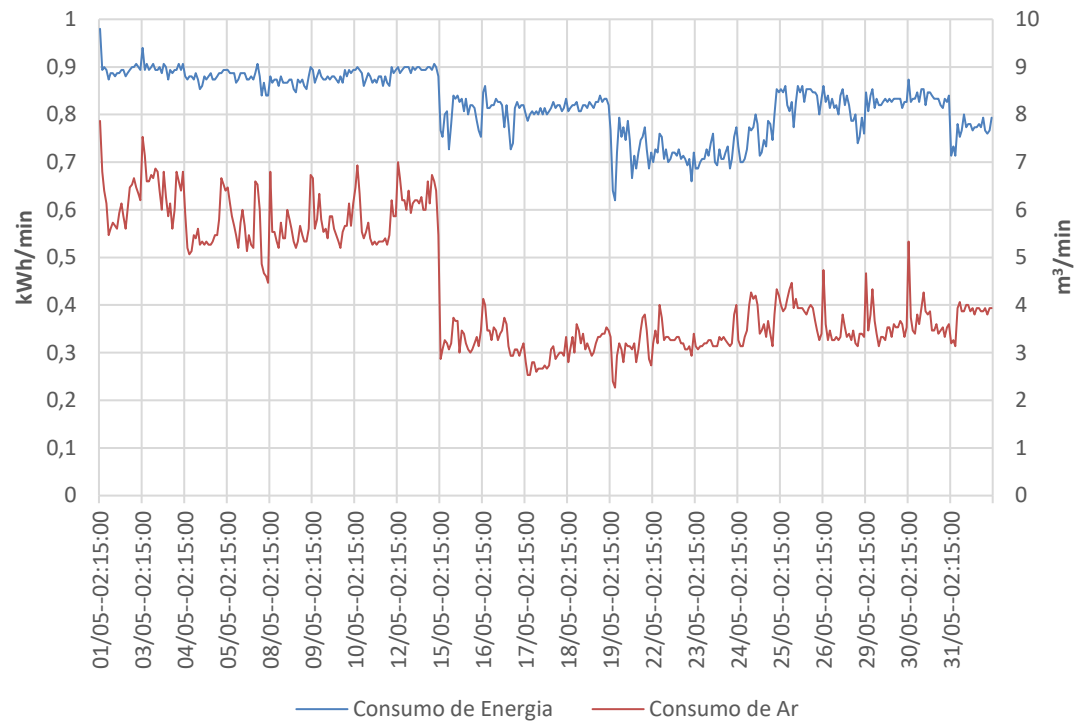
Perfil Consumo (Março Semana - Noite)



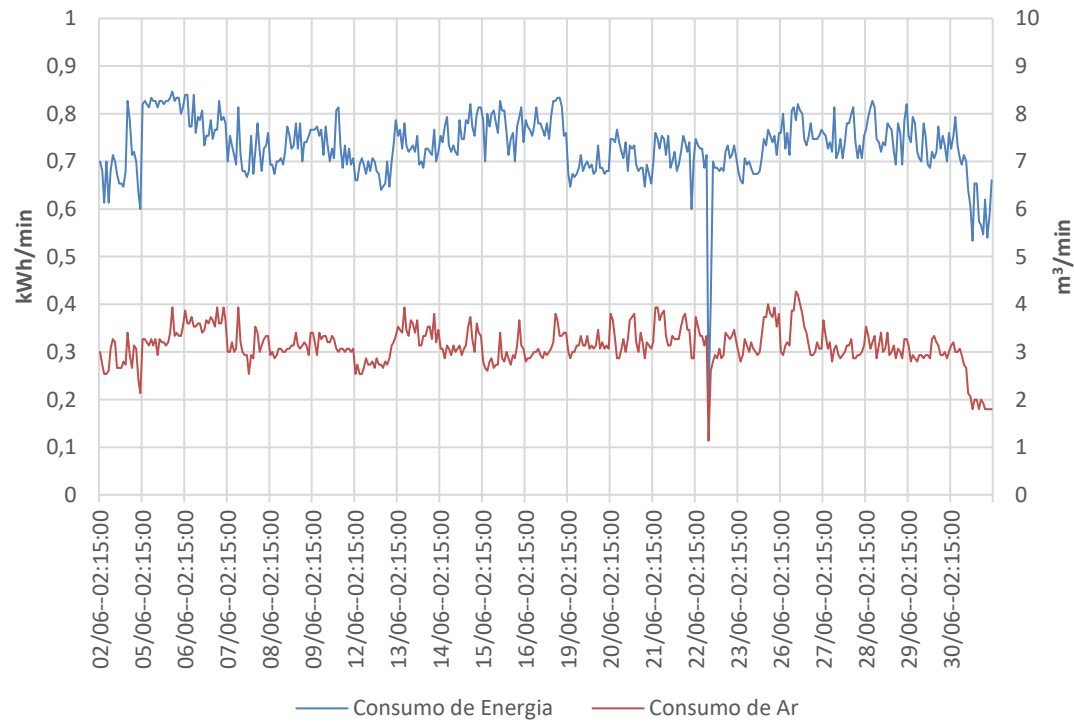
Perfil Consumo (Abril Semana - Noite)

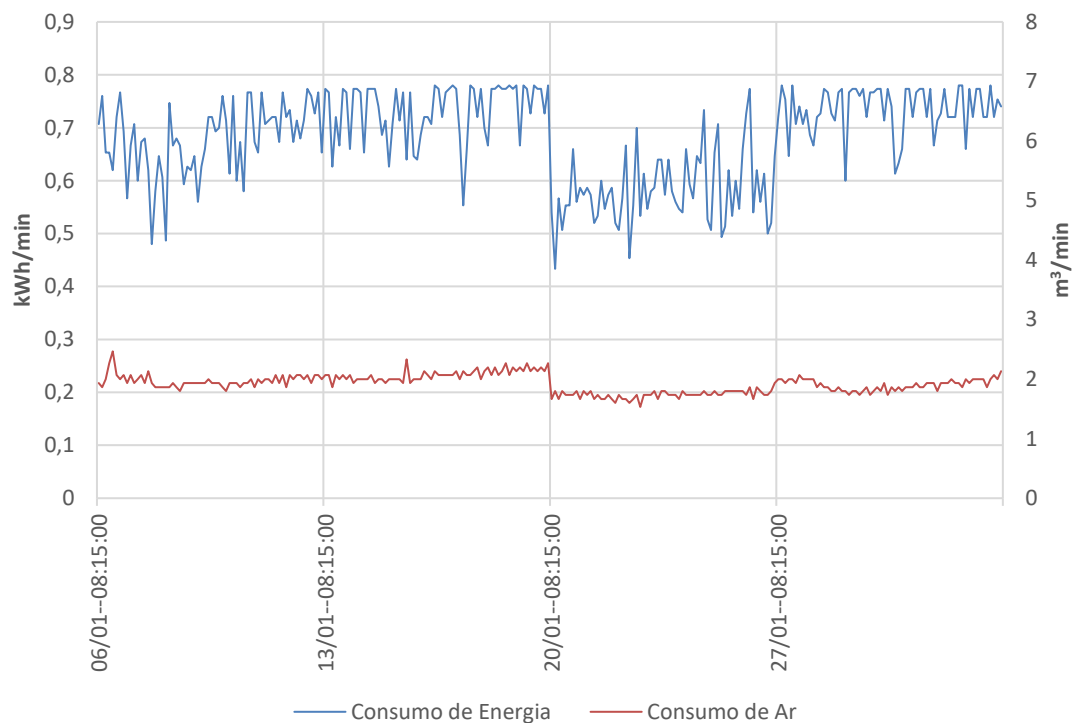
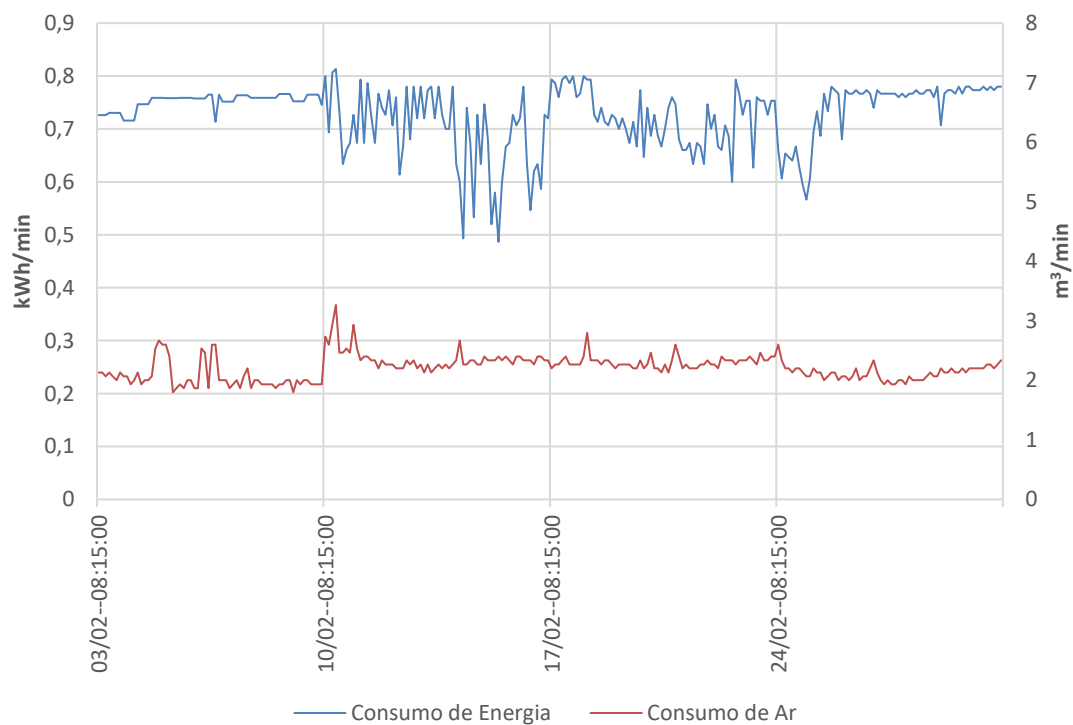


Perfil Consumo (Maio Semana - Noite)

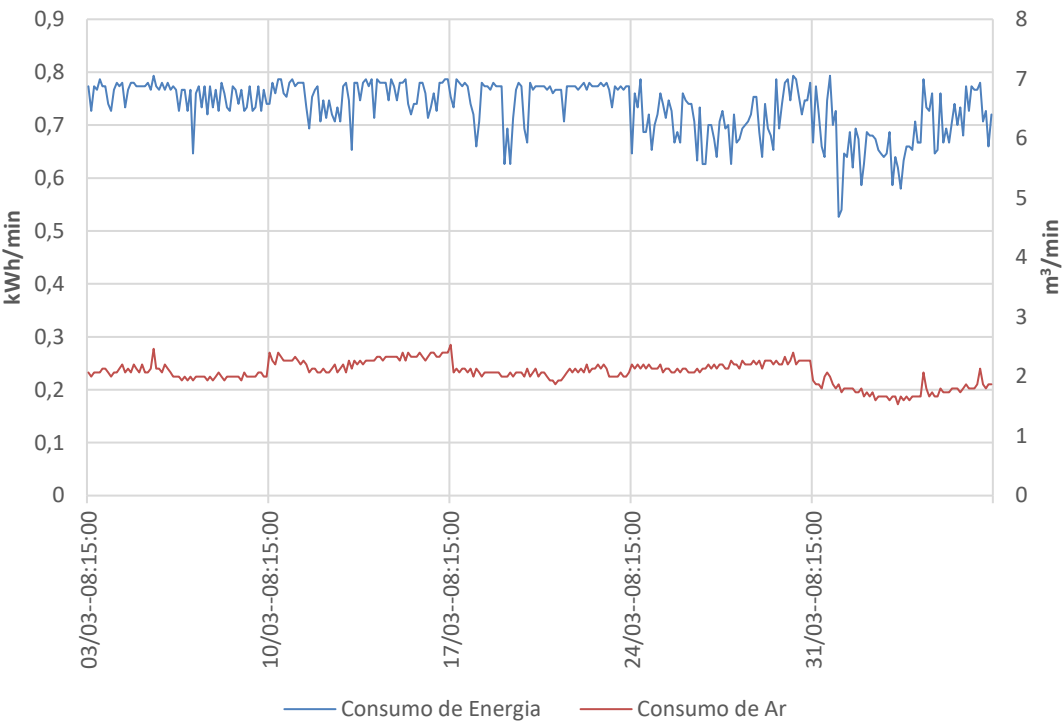


Perfil Consumo (Junho Semana - Noite)

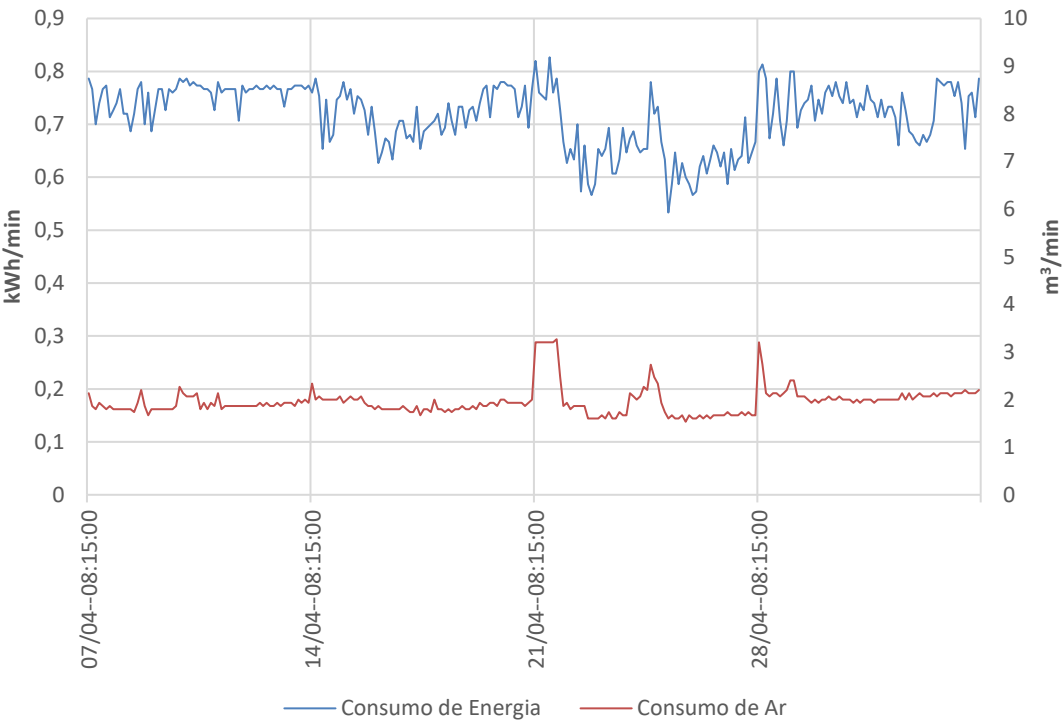


Anexo 12 - Perfis de Consumo (Sábado)**Perfil Consumo (Janeiro - Sábado)****Perfil Consumo (Fevereiro - Sábado)**

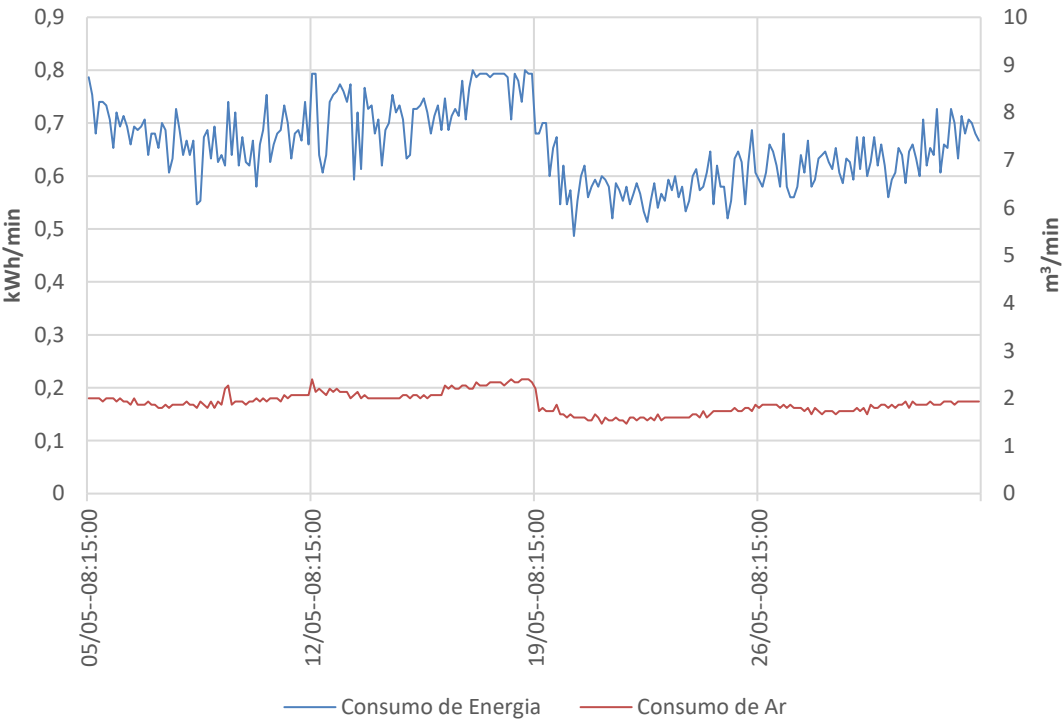
Perfil Consumo (Março - Sábado)



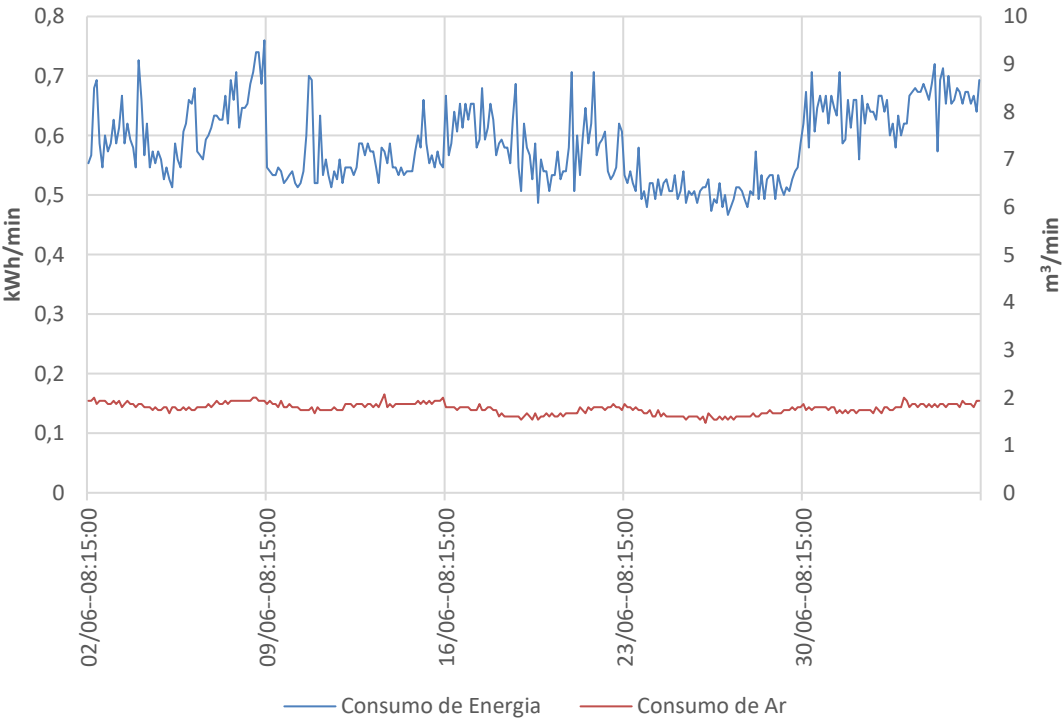
Perfil Consumo (Abril - Sábado)



Perfil Consumo (Maio - Sábado)

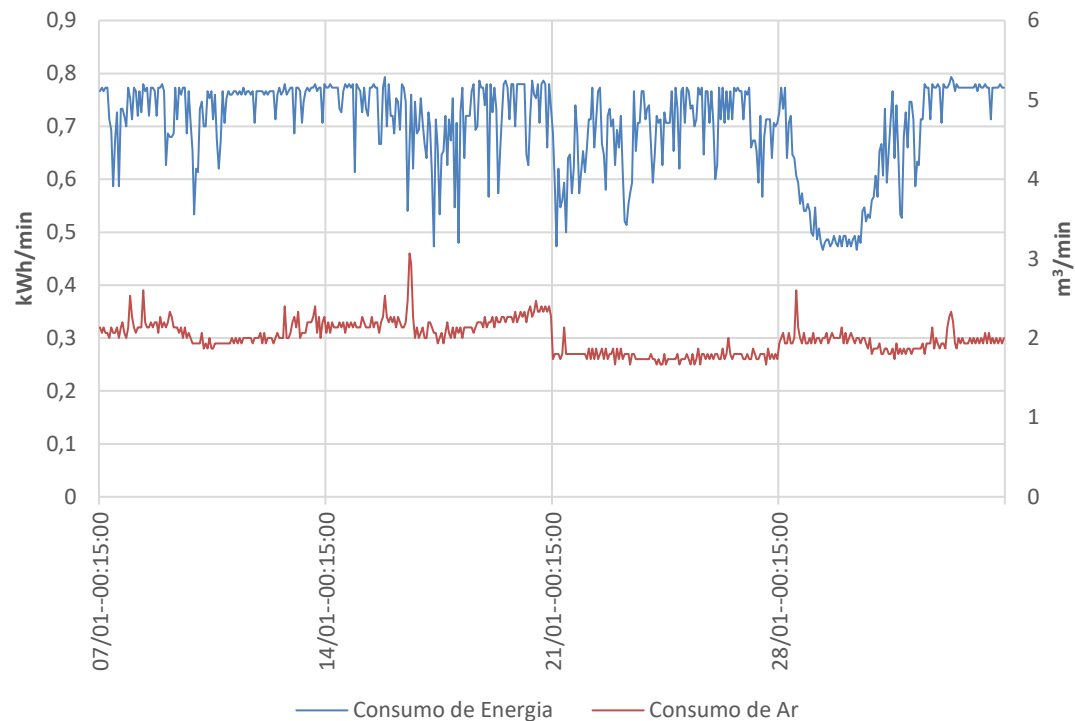


Perfil Consumo (Junho - Sábado)

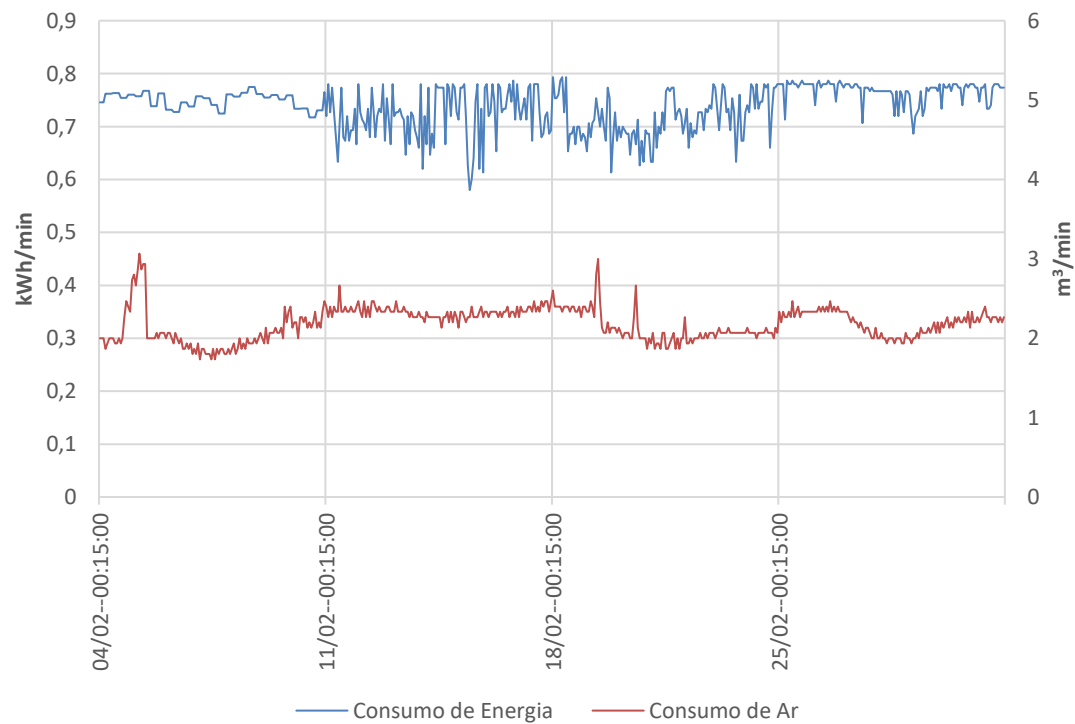


Anexo 13 - Perfis de Consumo (Domingo)

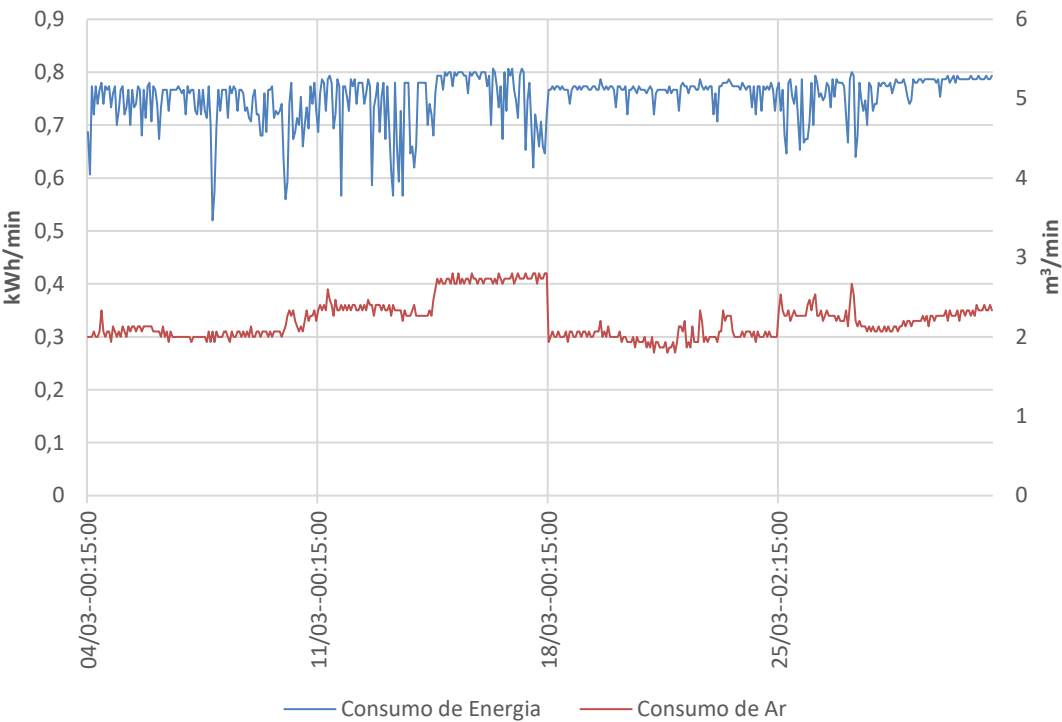
Perfil Consumo (Janeiro - Domingo)



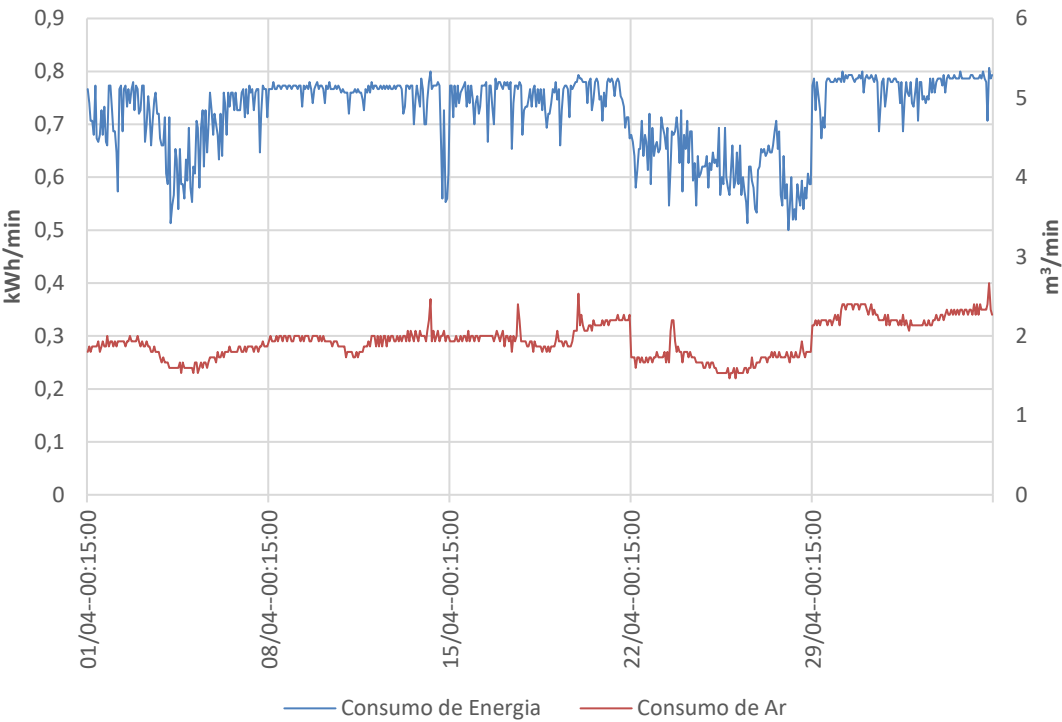
Perfil Consumo (Fevereiro - Domingo)



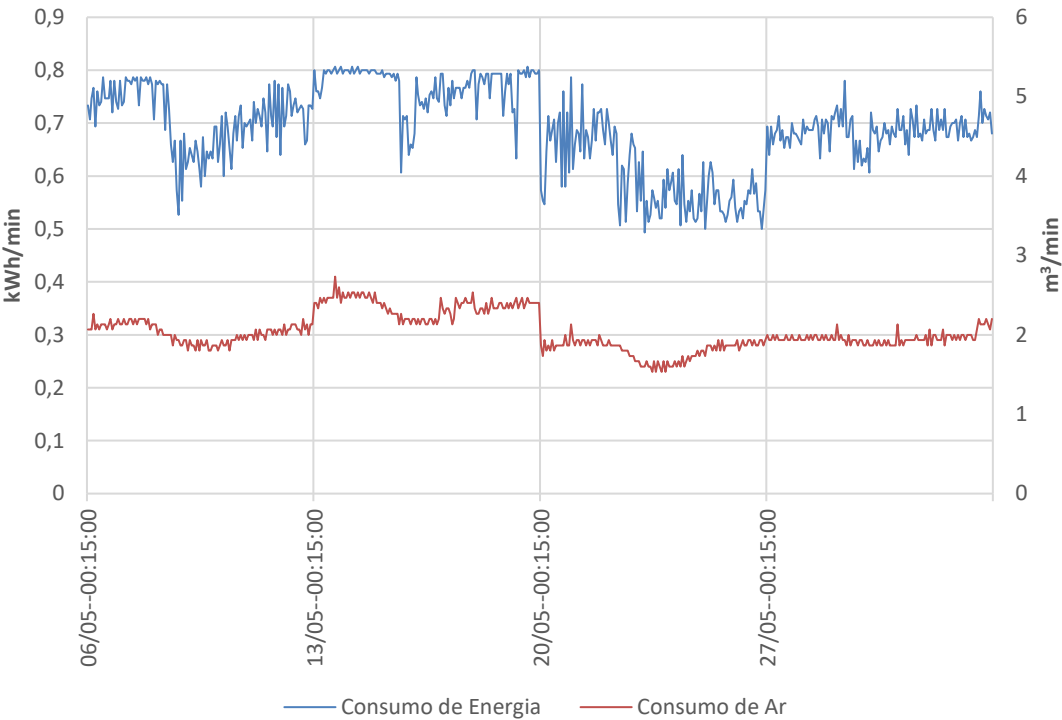
Perfil Consumo (Março - Domingo)



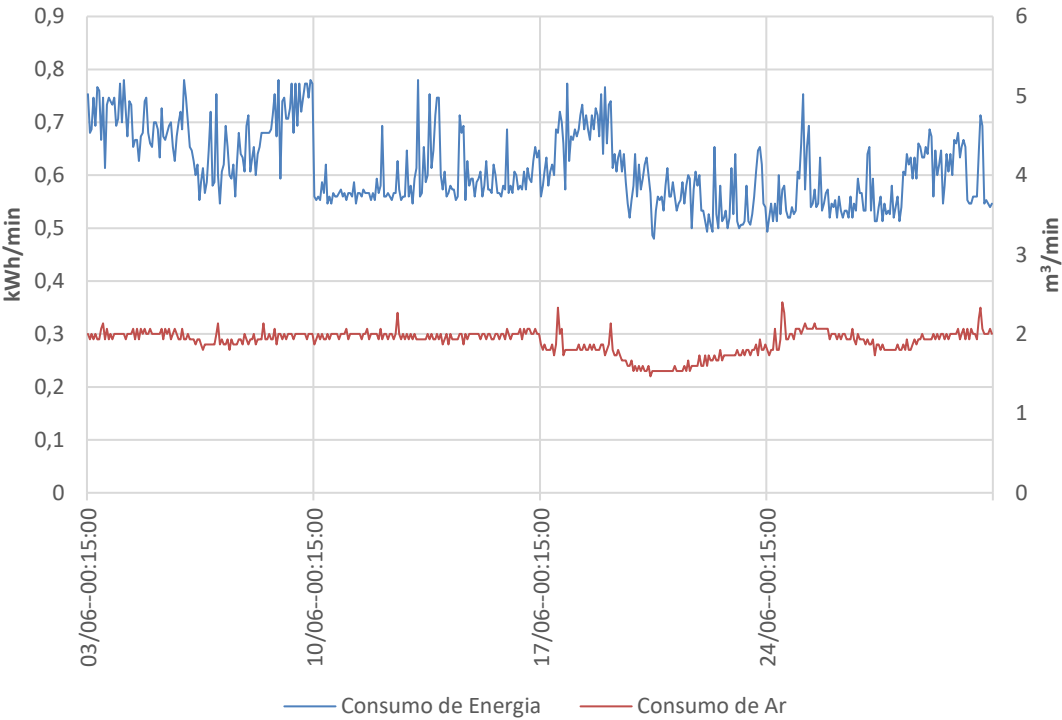
Perfil Consumo (Abril - Domingo)



Perfil Consumo (Maio - Domingo)

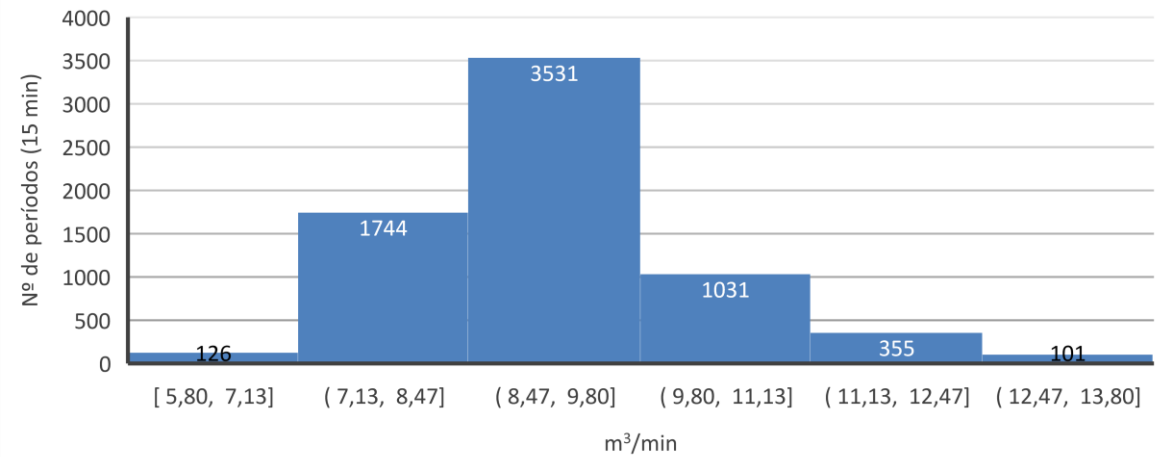


Perfil Consumo (Junho - Domingo)

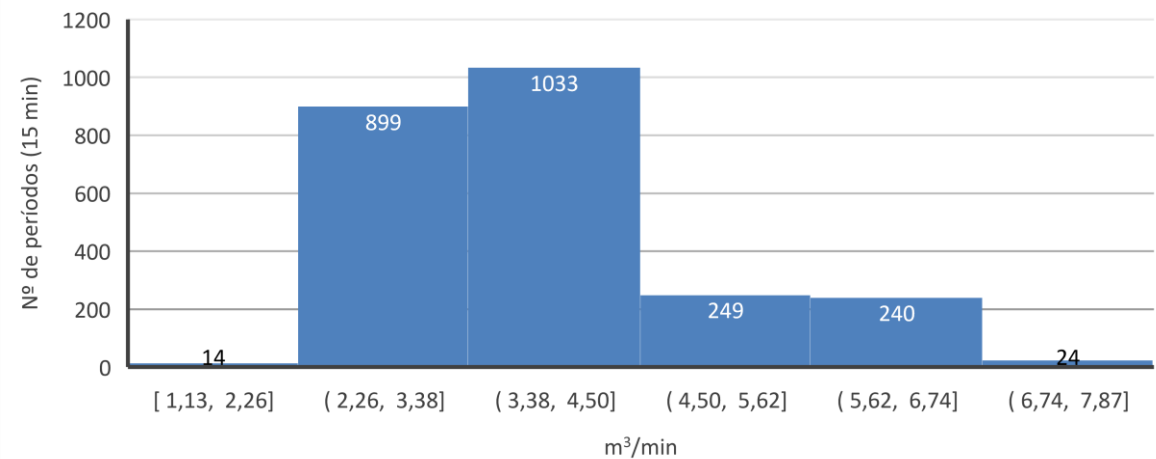


Anexo 14 - Histogramas do Consumo de Ar

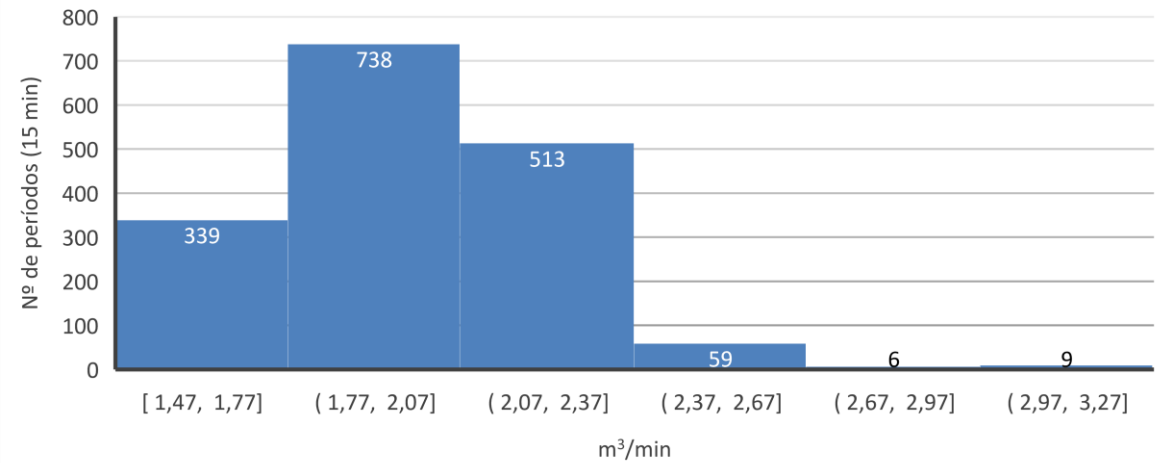
Consumo de Ar (Semana - Dia)

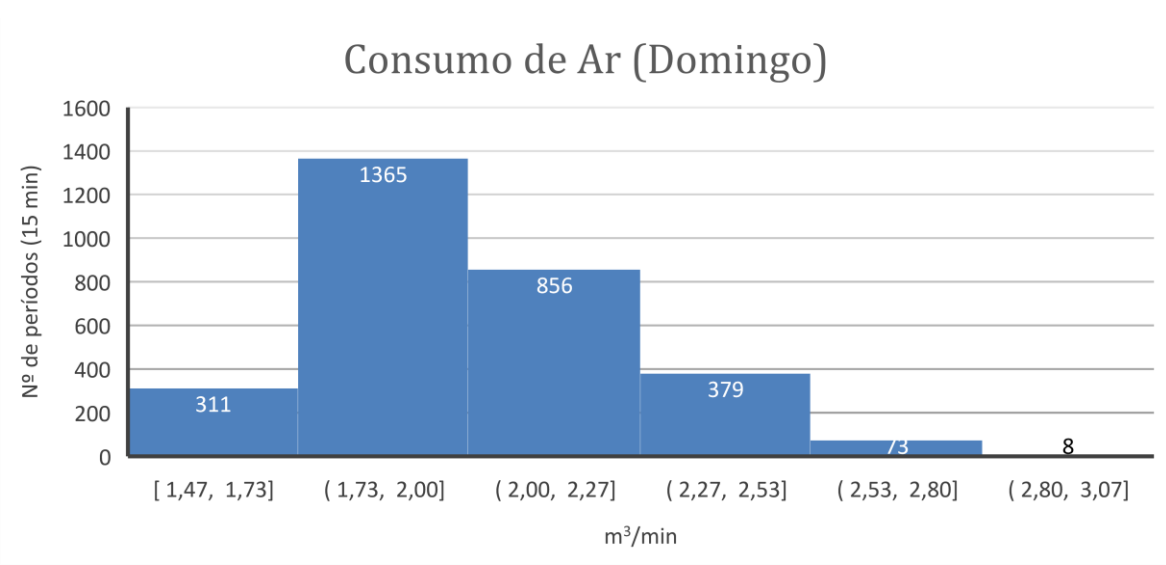


Consumo de Ar (Semana - Noite)



Consumo de Ar (Sábado)





Anexo 15 - Relação entre Consumo Medido e Teórico

		Relação
Sábado	Janeiro	3,86
	Fevereiro	3,61
	Março	3,88
	Abril	4,02
	Maio	3,76
	Junho	3,59
Domingo	Janeiro	3,83
	Fevereiro	3,71
	Março	3,73
	Abril	4,05
	Maio	3,69
	Junho	3,51
Média		3,77

Anexo 16 - Consumo de Energia Registado e Previsto

		Consumo Registado (kWh)	Previsão de Consumo (kWh)	
			Solução 1	Solução 2
Semana Dia	Janeiro	21089,50	108822,66	18691,53
	Fevereiro	18204,70		15961,76
	Março	21106,40		18311,00
	Abril	17517,60		15058,00
	Maio	18897,10		16298,92
	Junho	19816,90		16936,56
Semana Noite	Janeiro	5022,60	2834,30	2834,30
	Fevereiro	4734,30	3184,15	3184,15
	Março	5618,60	3344,67	3344,67
	Abril	4362,50	2420,53	2420,53
	Maio	5193,20	3337,26	3336,9
	Junho	4610,70	2397,64	2397,64
Sábado	Janeiro	2620,20	905,82	905,82
	Fevereiro	2793,40	1032,30	1032,30
	Março	3522,70	1239,62	1239,62
	Abril	2753,40	999,35	999,35
	Maio	2525,20	1087,85	1087,85
	Junho	2807,00	1295,04	1295,04
Domingo	Janeiro	5045,70	1751,08	1751,08
	Fevereiro	5319,40	1909,66	1909,66
	Março	5328,70	1905,41	1905,41
	Abril	6495,80	2438,62	2438,62
	Maio	4979,80	1868,03	1868,03
	Junho	4413,90	1886,23	1886,23
Total		194779,30	144660,22	137095,33

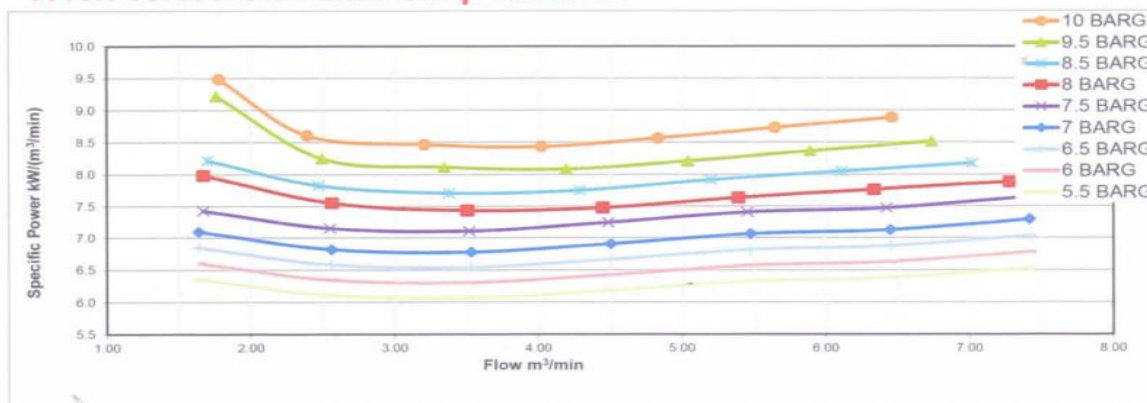
Anexo 17 - Performance dos Compressores RS45i, RS45n e RS75n



ENGINEERING DATA SHEET

RS45i
 50Hz

Model		RS45i-A7.5	RS45i-A8.5	RS45i-A10	RS45i-A14
GENERAL PERFORMANCE DATA					
Maximum Target Operating Pressure	⁽²⁾ barg (psig)	7.5 (109)	8.5 (123)	10.0 (145)	14.0 (203)
Rated Discharge Pressure	barg (psig)	7.0 (102)	8.0 (116)	9.5 (138)	13.5 (196)
Minimum Operating Pressure	barg (psig)	4.5 (65)	4.5 (65)	4.5 (65)	4.5 (65)
Maximum Operating Ambient Temperature	°C (°F)	46 (115)	46 (115)	46 (115)	46 (115)
Minimum Operating Ambient Temperature	°C (°F)	2 (36)	2 (36)	2 (36)	2 (36)
Maximum System Temperature Setting	°C (°F)	109 (228)	109 (228)	109 (228)	109 (228)
Nominal Power - Main Motor	kW (HP)	45 (60)	45 (60)	45 (60)	45 (60)
Main Motor Efficiency	%	94.2%	94.2%	94.2%	94.2%
Capacity FAD	⁽¹⁾ m ³ /min (CFM)	8.9 (315)	8.3 (293)	7.7 (273)	5.9 (208)
Package Input Power with Fan - Air Cooled	⁽⁴⁾ kW	53.4	53.2	54.6	54.2
Specific Power - Air Cooled	⁽⁴⁾⁽⁵⁾ kW/m ³ /min (kW/100CFM)	5.98 (16.9)	6.42 (18.2)	7.07 (20.0)	9.19 (26.0)
SOUND LEVEL					
Noise Level Standard Package - Air Cooled	⁽⁶⁾ Sound Pressure - dB(A)	69	69	69	69
Noise Level Standard Package - Air Cooled	Sound Power - dB(A)	87	87	87	87
COOLING DATA (@ Maximum Ambient Temperature & Maximum Discharge Pressure)					
Heat Removal (Oil Cooler)	kW (1000 Btu/hr)	41.4 (141)	41.8 (142)	43.5 (148)	44.4 (152)
Heat Removal (Oil and Aftercooler)	kW (1000 Btu/hr)	55.2 (188)	54.5 (186)	55.4 (189)	53.5 (183)
Permitted Additional Static Pressure	Pa (in H ₂ O)	63 (.25)	63 (.25)	63 (.25)	63 (.25)
Fan Air Flow	m ³ /min (CFM)	108 (3814)	108 (3814)	108 (3814)	108 (3814)
Fan Motor Nominal Power	kW	1.1	1.1	1.1	1.1
Cooling Air Temperature Rise @ 30°C	°C (°F)	23 (42)	23 (42)	24 (43)	24 (43)
Aftercooler CTD	⁽⁷⁾ °C (°F)	8.0 (14)	8.0 (14)	8.0 (14)	8.0 (14)

R45n AC
 R45n 50Hz AC at different pressures


	5.5barg	6.0barg	6.5barg	7.0barg	7.5barg	8.0barg	8.5barg	9.5barg	10.0barg
Capacity @ Max Speed FAD m ³ /min	7.42	7.42	7.42	7.42	7.39	7.28	7.02	6.74	6.46
Capacity @ Min Speed FAD m ³ /min	1.64	1.64	1.64	1.64	1.67	1.67	1.70	1.76	1.78
Turndown Percentage	78%	78%	78%	78%	77%	77%	76%	74%	72%
Package Input Power @Max Speed kW	48.4	50.3	52.2	54.1	56.5	57.4	57.4	57.4	57.4



Davidson, NC 28036

75 kW
AIR-COOLED
50HZ

 Ref:
 Date:

Nirvana Model		IRN75K-CC	
Cooling Data (46°C/115°F Maximum Ambient Temperature)		1,000 kJ/hr 1,000 Btu/hr	
Heat removal	Aftercooler	1,000 kJ/hr (1,000 Btu/hr)	66.0 62.6
@ 38°C/100°F (2)	Oil Cooler	1,000 kJ/hr (1,000 Btu/hr)	252.1 239
	Total	1,000 kJ/hr (1,000 Btu/hr)	318.2 301.6
Aftercooler CTD (3)		°C/F	8.3/15
Cooling fan electrical inlet power (no ducting)		kW/HP	4.1/5.5
Cooling air flow		m3/min/CFM	240/8500
Maximum added static pressure		Pa/in. Water	124/0.5
Cooling air delta T (approximate)		°C/F	17/30
Lubrication data			
Sump Capacity		Lt/Gal	164/23
Total Lubrication Capacity		Lt/Gal	30/8
Sound Level (4)			
Standard Enclosure		dB(A)	75
Low Sound Enclosure		dB(A)	TBA
Electrical data			
Main drive motor (5) (6)			
Motor type		Hybrid Permanent Magnet ® (HPM®)	
Nominal Shaft Power			75kW
Motor Frame Size	IP23 (ODP)		HPM 380
Motor Service Factor			1.25
Max speed		RPM	3483
Min speed		RPM	894
Efficiency at full speed/power		%	95.8
Efficiency at min speed/power		%	93.1
Power Factor at full load	IP23 (ODP)		0.944
Fan motor			
Motor type		Induction	
Installed Motor Power (= max. shaft power)		kW/HP	4kW
Number of poles			4
Fan motor speed	at 380V	RPM	1415
Fan motor frame size	IP55 (TEFV)		LS112MT
Efficiency at full load	IP55 (TEFV)	%	0.8
Power factor at full load	IP55 (TEFV)		0.83
Full load current at		A	
	220V	A	17.49
	380V	A	10.12
	415V	A	10.23
Total Package (5)			
Total installed package power (main & fan motor)		kW (HP)	87(116)
Full load package absorbed current	400V	AMPS	159.0
	380V	AMPS	159.0