

Instituto Politécnico de Portalegre  
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Estudo e melhoria da eficiência energética  
no setor agroindustrial

Dissertação para obtenção do grau de mestre em  
**Tecnologias de Valorização Ambiental e Produção de Energia**

Discente: Octávio Edgar Rodrigues Alves (aluno n.º 6954)

Docente orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Duque de Brito

Março de 2014

## **Agradecimentos**

Durante a elaboração do presente trabalho gostaria de expressar o meu reconhecido agradecimento às seguintes pessoas e instituições:

- ao Prof. Dr. Paulo Brito, pela orientação, revisão, coragem e força transmitida;
- à Dra. Paula Reis (do C3i - Instituto Politécnico de Portalegre), pela recolha e esclarecimento de dúvidas a respeito dos dados que serviram de base para o estudo deste trabalho;
- ao Prof. Pedro Lopes, pelo apoio prestado na análise energética e económica;
- ao Eng.º José Frade, pelo apoio nas medições experimentais;
- à empresa Garlic & Fruit, em Portalegre, pela disponibilidade para realização da parte experimental e pela informação cedida;
- ao Instituto Politécnico de Castelo Branco, que coordenou o projeto InovEnergy - Eficiência Energética no Setor Agroindustrial e de onde se retirou informação para a realização do trabalho;
- à Arealatejo - Agência Regional de Energia e Ambiente do Norte Alentejano e Tejo, pela informação prestada a respeito das poupanças energéticas conferidas por alguns equipamentos;
- à minha família, amigos próximos e colegas de trabalho pelo apoio, paciência, força incutida e pelo facto de nunca me permitirem desistir nos piores momentos;
- a todos os meus restantes amigos que, quer tivessem ou não participado, me ajudaram a esporear a mente e a regressar ao trabalho com uma novo ânimo e otimismo.

## **Resumo**

No setor agroindustrial alentejano têm sido detetadas diversas deficiências nos processos produtivos, responsáveis por desperdícios e custos de energia desnecessários que poderiam ser evitados através da adoção de medidas corretivas apropriadas. Os sistemas de frio, que possuem um peso relevante no consumo global, constituem um importante foco de localização dos gastos observados.

O presente trabalho surge como forma de analisar o padrão de utilização de energia naquele setor, identificar as causas que originam os desperdícios encontrados e, também, sugerir e avaliar o impacto de medidas como forma de os atenuar. O destaque é especialmente atribuído aos sistemas de frio.

Para tal foi efetuada uma recolha de dados a respeito das características e consumos energéticos de uma amostra de empresas no Alentejo, uma organização e análise gráfica da informação e um estudo técnico-económico de medidas de eficiência energética pré-selecionadas. Construiu-se ainda um simulador do consumo energético em câmaras frigoríficas para auxiliar aquele estudo, determinando-se a economia potencial de cada medida.

**Palavras-chave:** agroindústria, eficiência energética, simulação, câmara frigorífica.

## **Abstract**

In the agroindustrial sector from Alentejo it has been noticed several deficiencies located in the production processes, which are the cause of unnecessary energy losses and costs that could be corrected through the implementation of adequate measures. Refrigeration systems, which have a huge weight in global consumption, are also an important location where those losses may be found.

Present work aims to analyze the behavior of energy use inside that sector, to identify causes of energy losses and also to suggest and to evaluate the impact of pre-defined measures as a way to diminish those wastages. Focus is primarily given to refrigeration systems.

To accomplish such goals a data collection was conducted in a sample of companies located in Alentejo, in order to retrieve information about their characteristics and energy consumptions. Data was organized to perform a graphic analysis, and finally a technical and economical study was done to a set of pre-defined energy efficiency measures that are possible to apply. In order to help this study, it was built an energy consumption simulator of cold chambers to determine the potential savings of individual measures.

**Keywords:** agro industry, energy efficiency, simulation, cold chamber.

## Lista de abreviaturas e símbolos usados

### Abreviaturas

- AQS** - Águas Quentes Sanitárias  
**BTE** - Baixa Tensão Especial  
**BTN** - Baixa Tensão Normal  
**CEE** - Consumo Específico de Energia  
**CFC** - Clorofluorcarboneto  
**CFD** - *Computational Fluid Dynamics*  
**EPS** - Poliestireno Expandido Moldado  
**ERSE** - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos  
**GEE** - Gases de Efeito de Estufa  
**GWP** - *Global Warming Potential*  
**HCFC** - Hidroclorofluorcarboneto  
**IC** - Intensidade Carbónica  
**MEE** - Medida de Eficiência Energética  
**MT** - Média Tensão  
**ODP** - *Ozone Depletion Potential*  
**PME** - Pequena e Média Empresa  
**PUR** - Poliuretano  
**SGCIE** - Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia  
**VAB** - Valor Acrescentado Bruto  
**VEV** - Variador Eletrónico de Velocidade

### Símbolos matemáticos

- A** - Área da superfície ( $m^2$ )  
**a** - Altura (m)  
**C** - Custo total anual de energia (€)  
**c<sub>câmara</sub>** - Comprimento da câmara frigorífica (m)  
 **$\bar{c}$**  - Custo por unidade de energia (€/kW.h), €/kVAr.h ou €/tep)

- $c_p$  - Calor específico geral ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
- $c_{p\ prod\ 1}$  - Calor específico do produto acima do seu ponto inicial de congelação ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
- $c_{p\ prod\ 2}$  - Calor específico do produto abaixo do seu ponto inicial de congelação ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
- COP** - *Coefficient of performance*
- $D_f$  - Fator de fluxo de ar à entrada da câmara
- $D_{relativo}$  - Desvio relativo entre duas quantidades (%)
- $E$  - Consumo de energia (J, kW.h, kVAr.h ou tep)
- $E_b$  - Eficiência da barreira de entrada contra a passagem do ar
- $e$  - Espessura (m)
- $F_{GEE}$  - Fator de emissão de GEE relativo à fonte  $i$  ( $kgCO_2eq.tep^{-1}$ )
- $F_{tep}$  - Fator de conversão do consumo de energia de determinada fonte para tep
- $f$  - Frequência de abertura da porta da câmara, durante o seu funcionamento
- $g$  - Aceleração da gravidade ( $9,81\ m.s^{-2}$ )
- $h$  - Entalpia específica ( $J.kg^{-1}$ )
- $I_{inicial}$  - Valor do investimento inicial a aplicar numa MEE (€)
- $k_{MEE}$  - Fator de poupança energética resultante da medida de eficiência energética (%)
- $L$  - Constante do calor latente de congelação do produto ( $J.kg^{-1}$ )
- $l$  - Largura (m)
- $M$  - Massa molar da substância ( $kg.mol^{-1}$ )
- $m$  - Massa (kg)
- $n$  - N.º de unidades de um objeto (pessoas ou lâmpadas)
- $P$  - Potência elétrica do equipamento (W)
- $p$  - Pressão (Pa)
- $\dot{Q}$  - Taxa de transferência de calor ou potência térmica (W)
- $Q$  - Carga térmica a remover (J)
- $R$  - Constante universal dos gases ideais ( $8,314\ Pa.m^3.mol^{-1}.K^{-1}$ )
- $R_{se}$  - Resistência térmica da envolvente em contacto com o exterior ( $m^2.K.W^{-1}$ )
- $R_{si}$  - Resistência térmica da envolvente em contacto com o interior ( $m^2.K.W^{-1}$ )
- $T$  - Temperatura (K)
- $t$  - Tempo (s)
- $U$  - Coeficiente de transferência térmica ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )
- $V$  - Volume ( $m^3$ )

$\varphi$  - Humidade relativa (%)

$\lambda$  - Condutibilidade térmica do material ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )

$\eta$  - Rendimento energético genérico (%)

$\rho$  - Densidade mássica ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

$\theta$  - Ângulo do fator de potência (rad)

### Sub-índices:

*ar* - Relativo ao ar do meio em consideração

*atm* - Atmosfera

*câmara* - Câmara frigorífica

*capacitiva* - Referente à energia reativa capacitiva

*compressor* - Referente ao compressor do sistema de refrigeração

*condensador* - Referente ao condensador do sistema de refrigeração

*congelamento* - Referente ao ponto de congelamento inicial do produto na câmara

*ele* - Referente ao equipamento elétrico

*equip* - Equipamento

*evaporador* - Referente ao evaporador do sistema de refrigeração

*ext* - Exterior

*fluor* - Lâmpada fluorescente

*fonte* - Referente à fonte energética

*i* - Ordem da variável ou da grandeza

*iluminação* - Referente ao sistema de iluminação da câmara

*in* - De entrada

*inc* - Lâmpada incandescente

*indutiva esc i* - Referente à energia reativa indutiva do escalão *i*

*int* - Interior

*lâmpada* - Referente às lâmpadas do sistema de iluminação das câmaras frigoríficas

*lat* - Referente ao calor latente

*LED* - Lâmpada LED

*out* - De saída

*peçoas* - Referente aos funcionários no interior da câmara frigorífica

**porta** - Referente à porta da entrada da câmara

**produção** - Referente ao volume de produção total da empresa

**produto** - Referente ao produto existente na câmara

**real** - Referente ao consumo energético real para a câmara frigorífica

**reativa** - Referente à energia reativa total

**relevante** - Referente ao consumo energético relevante para a transformação da matéria-prima

**resp** - Respiração metabólica

**retorno** - Retorno do investimento

**sat** - Referente ao vapor saturado

**sensível** - Relativo ao calor sensível

**real** - Referente ao consumo energético real

**simulado** - Referente ao consumo energético simulado para a câmara frigorífica

**útil** - Referente à energia ou potência útil gerada pelo equipamento

**vapor** - Vapor de água ou humidade no ar

## Índice geral

0. Enquadramento do trabalho.....	1
1. Introdução.....	2
1.1. Caracterização do setor agroindustrial nacional ao nível económico e energético .....	2
1.2. Conservação dos alimentos através do frio.....	7
1.3. Tecnologia das câmaras frigoríficas .....	12
1.3.1. Conceção estrutural das câmaras frigoríficas.....	13
1.3.2. Ciclo de refrigeração por compressão de vapor.....	17
1.4. Eficiência energética em câmaras frigoríficas .....	24
1.4.1. Medidas de eficiência energética nos sistemas de frio.....	25
1.4.1.1. Instalação de dispositivos eCube.....	25
1.4.1.2. Instalação de iluminação eficiente e adequada.....	27
1.4.1.3. Circulação forçada de ar.....	28
1.4.1.4. Compensação do fator de potência.....	29
1.4.1.5. Isolamento térmico da câmara e do sistema de refrigeração.....	30
1.4.1.6. Otimização do consumo energético do compressor.....	30
1.4.1.7. Substituição do fluido refrigerante .....	32
1.4.1.8. Ajuste da temperatura interna da câmara .....	33
1.4.1.9. Controlo do fluxo do refrigerante no circuito .....	34
1.4.2. Tecnologias alternativas para a produção de frio.....	34
1.5. Simulação do consumo energético em câmaras frigoríficas.....	35
1.6. Objetivos gerais e específicos do trabalho.....	40
2. Metodologia.....	42
2.1. Análise e melhoria do perfil energético no setor agroindustrial alentejano .....	42
2.1.1. Seleção e recolha da informação.....	43
2.1.2. Tratamento e análise estatística aos dados recolhidos .....	45
2.1.2.1. Classificação dimensional das empresas.....	46

2.1.2.2. Consumos totais, custos totais e custos específicos de energia das empresas .....	47
2.1.2.3. Instalação de equipamentos para melhoria da eficiência energética.....	49
2.1.2.4. Cálculo dos índices específicos de energia .....	49
2.1.2.5. Modelação da função <i>CEE</i> vs produção total anual.....	51
2.1.2.6. Peso do consumo das câmaras frigoríficas no total de energia elétrica admitida nas empresas .....	53
2.1.2.7. Seleção e análise do impacto de MEE nos consumos e custos energéticos das empresas.....	55
2.2. Metodologia para simulação e otimização do consumo energético das câmaras frigoríficas .....	60
2.2.1. Objetivos e estrutura .....	60
2.2.2. Simulação e otimização do consumo energético da câmara .....	61
2.2.2.1. Carga térmica transmitida pelas envolventes ( $Q_{trans}$ ).....	63
2.2.2.2. Carga térmica libertada pela redução da temperatura do produto ( $Q_{red\ temp}$ ) .....	65
2.2.2.3. Carga térmica libertada pela respiração metabólica do produto ( $Q_{resp}$ ) ...	66
2.2.2.4. Carga térmica do ar infiltrado ( $Q_{ar}$ ) .....	67
2.2.2.5. Carga térmica do equipamento elétrico interior ( $Q_{ele}$ ) .....	71
2.2.2.6. Carga térmica libertada pelas pessoas no interior ( $Q_{pessoas}$ ) .....	74
2.2.2.7. Consumo de energia global da câmara ( $E_{câmara}$ ).....	75
2.2.3. Análise de viabilidade económica das MEE simuladas na câmara.....	76
2.2.4. Implementação da metodologia para simulação dos consumos das câmaras e avaliação das MEE propostas.....	77
2.2.5. Validação experimental da metodologia.....	80
2.2.5.1. Descrição da câmara de teste.....	80
2.2.5.2. Recolha de dados e medição do consumo real de câmara.....	82
2.2.5.3. Comparação entre os consumos real e simulado da câmara .....	84

2.2.5.4. Análise de sensibilidade do consumo simulado.....	85
2.2.5.5. Simulação e avaliação económica de MEE propostas .....	85
3. Resultados e discussão .....	87
3.1. Análise e melhoria do perfil energético no setor agroindustrial alentejano .....	87
3.1.1. Classificação dimensional das empresas.....	87
3.1.2. Consumos totais, custos totais e custos específicos de energia .....	87
3.1.3. Instalação de equipamentos para melhoria da eficiência energética.....	94
3.1.4. Cálculo dos índices específicos de energia .....	95
3.1.5. Modelação da função <i>CEE</i> vs produção total anual.....	101
3.1.6. Determinação do peso do consumo das câmaras frigoríficas relativamente ao total de energia elétrica admitida.....	104
3.1.7. Impacto das MEE propostas no consumo e custo energético das empresas ..	106
3.2. Aplicação em contexto real da metodologia para simulação e otimização do consumo das câmaras frigoríficas .....	113
4. Conclusões.....	120
4.1. Análise e melhoria do perfil energético do setor agroindustrial alentejano .....	120
4.2. Metodologia para simulação e otimização do consumo das câmaras frigoríficas .	121
4.3. Sugestões para investigações futuras .....	121
5. Referências bibliográficas .....	123
ANEXO I - Dados energéticos das empresas recolhidos durante o inquérito (valores de 2010).....	128
ANEXO II - Valores de produção anual recolhidos durante o inquérito (período 2010) .	129
ANEXO III - Desagregação dos consumos de energia elétrica por tipo de utilização nas empresas submetidas à auditoria energética (dados 2012) .....	130
ANEXO IV - Dados sobre os sistemas de refrigeração e caldeiras existentes nas empresas auditadas (valores 2012) .....	134

## Índice de figuras

Figura 1 - Peso em percentagem do volume de negócios dos vários setores da indústria transformadora .....	3
Figura 2 - Volume de negócios em cada fileira da indústria alimentar (em percentagem - ano 2010) .....	3
Figura 3 - Evolução do n.º de empresas do setor alimentar entre 2006 e 2010.....	4
Figura 4 - Classificação das empresas alimentares quanto à dimensão .....	4
Figura 5 - Evolução do VAB registado nas empresas alimentares.....	5
Figura 6 - Evolução do consumo energético do setor agroindustrial segundo a fonte energética .....	5
Figura 7 - Obstáculos à implementação de medidas de eficiência energética e respetivas consequências .....	6
Figura 8 - Métodos habituais de conservação dos alimentos .....	8
Figura 9 - Vaso de barro egípcio para arrefecer a água.....	9
Figura 10 - <i>Staphylococcus Aureus</i> , um microrganismo patológico responsável pela septicémia .....	9
Figura 11 - Câmara de refrigeração do séc. XIX e frigorífico atual.....	9
Figura 12 - Exemplo de uma câmara frigorífica típica.....	12
Figura 13 - Balanço energético global numa câmara frigorífica .....	12
Figura 14 - Parâmetros construtivos das câmaras que influenciam a entrada de calor .....	13
Figura 15 - Materiais termicamente isolantes usados nas envolventes .....	14
Figura 16 - Exemplo de constituição das envolventes numa câmara de congelação .....	15
Figura 17 - Cortina em PVC e cortina de ar .....	15
Figura 18 - Tipos de lâmpadas existentes em câmaras frigoríficas.....	16
Figura 19 - Luminária estanque e detetor de presença para controlo automático da iluminação.....	16
Figura 20 - Arrefecimento por circulação forçada de ar e evaporador com ventilação forçada .....	17
Figura 21 - Componentes básicos num ciclo de refrigeração por compressão de vapor.....	18
Figura 22 - Compressor hermético e respetiva constituição interna .....	19
Figura 23 - Condensador .....	19
Figura 24 - Evaporador.....	19

Figura 25 - Válvula de expansão termostática e tubo capilar.....	20
Figura 26 - Tubo flexível em liga de Cobre .....	20
Figura 27 - Filtro .....	20
Figura 28 - Termóstato mecânico e controlador digital de temperatura.....	21
Figura 29 - Gráficos $p(V)$ e $T(s)$ para o ciclo de refrigeração por compressão.....	21
Figura 30 - Variação do $COP$ com a temperatura do evaporador .....	22
Figura 31 - Ciclo de refrigeração com dois andares de compressão .....	23
Figura 32 - Gráfico $p(V)$ para um ciclo com duplo estágio de compressão .....	23
Figura 33 - Formas de melhorar a eficiência energética .....	25
Figura 34 - Dispositivo eCube.....	25
Figura 35 - Estrutura do eCube.....	26
Figura 36 - Relógio temporizador .....	28
Figura 37 - Evaporador com ventiladores de circulação forçada de ar e "racks" para armazenamento dos produtos.....	28
Figura 38 - Bateria de condensadores.....	29
Figura 39 - Relé varimétrico.....	29
Figura 40 - Antecâmara climatizada.....	30
Figura 41 - Variador eletrônico de velocidade .....	31
Figura 42 - Grupo de compressores ligados em paralelo .....	32
Figura 43 - Tempo de trabalho diário do compressor ao longo dos anos para os fluidos R134a e R600a.....	32
Figura 44 - Válvula de expansão eletrônica comandada por eletroválvula.....	34
Figura 45 - Tecnologias de refrigeração alternativas .....	34
Figura 46 - Funcionamento de um modelo simulador.....	36
Figura 47 - Discretização do espaço interior de um chiller.....	37
Figura 48 - Campo de velocidades e de sentidos dos fluxos de ar no interior dum chiller .	38
Figura 49 - Simulação de um sistema de refrigeração com partilha de dados entre os componentes .....	38
Figura 50 - Método iterativo para cálculo dos outputs.....	39
Figura 51 - Etapas para o estudo do perfil energético das empresas do setor agroindustrial .....	43
Figura 52 - Designações usadas para referência das empresas na fileira leite e lacticínios	44
Figura 53 - Resumo das etapas para a execução das auditorias energéticas .....	44

Figura 54 - Etapas para avaliação das MEE selecionadas.....	56
Figura 55 - Partes fundamentais que constituem a metodologia de simulação.....	60
Figura 56 - Identificação das cargas térmicas das câmaras frigoríficas .....	62
Figura 57 - Fluxos ideais de ar à entrada da câmara .....	68
Figura 58 - Fluxograma da metodologia para simulação dos consumos e avaliação das MEE.....	78
Figura 59 - Aspeto da folha de cálculo para introdução de dados sobre a câmara e envolventes .....	79
Figura 60 - Aspeto da folha de cálculo para apresentação dos resultados de cada carga térmica e do consumo global final.....	79
Figura 61 - Etapas da validação experimental da metodologia.....	80
Figura 62 - Layout e acomodação de alho no interior da câmara de teste .....	81
Figura 63 - Imagens da câmara de teste .....	82
Figura 64 - Imagens dos instrumentos de medição .....	83
Figura 65 - Esquema das ligações do analisador de rede ao quadro de comando.....	84
Figura 66 - Proporção das empresas pertencentes a cada classe dimensional, por fileira...	87
Figura 67 - Consumos de energia por tipo de fonte e empresa - fileiras La e Ca, dados 2010 .....	89
Figura 68 - Consumos de energia por tipo de fonte e empresa - fileiras Ho e Pe, dados 2010 .....	89
Figura 69 - Consumos de energia por tipo de fonte e empresa - fileiras Di e Vi, dados 2010 .....	89
Figura 70 - Custos de energia anual por tipo de fonte - fileiras La e Ca, dados 2010 .....	91
Figura 71 - Custos de energia anual por tipo de fonte - fileiras Ho e Pe, dados 2010 .....	92
Figura 72 - Custos de energia anual por tipo de fonte - fileiras Di e Vi, dados 2010.....	92
Figura 73 - Custos específicos de energia - fileiras La e Ca, dados 2010.....	93
Figura 74 - Custos específicos de energia - fileiras Ho e Pe, dados 2010.....	93
Figura 75 - Custos específicos de energia - fileiras Di e Vi, dados 2010.....	93
Figura 76 - Tipologia e quantidade de equipamentos para melhoria de eficiência energética.....	95
Figura 77 - CEE por empresa - fileiras La e Ca, dados de 2010 .....	96
Figura 78 - CEE por empresa - fileiras Ho e Pe, dados de 2010.....	97
Figura 79 - CEE por empresa - fileiras Di e Vi, dados de 2010.....	97

Figura 80 - <i>IC</i> por empresa - fileiras La e Ca, dados de 2010.....	99
Figura 81 - <i>IC</i> por empresa - fileiras Ho e Pe, dados de 2010.....	100
Figura 82 - <i>IC</i> por empresa - fileiras Di e Vi, dados de 2010 .....	100
Figura 83 - Curva de regressão <i>CEE</i> vs produção - fileiras La e Ca.....	101
Figura 84 - Curva de regressão <i>CEE</i> vs produção - fileiras Ho e Pe.....	102
Figura 85 - Curva de regressão <i>CEE</i> vs produção - fileiras Di e Vi.....	102
Figura 86 - Percentagens de energia elétrica usadas nas câmaras e diferenças absolutas apuradas .....	105
Figura 87 - Peso das cargas térmicas relativamente ao total de energia consumida .....	114
Figura 88 - Análise de sensibilidade efetuada por variação da temperatura interior e da temperatura inicial do produto .....	115
Figura 89 - Análise de sensibilidade por variação do n.º de acessos à câmara e do tipo de barreira térmica à entrada .....	116
Figura 90 - Análise de sensibilidade por variação da potência da iluminação.....	116

## Índice de tabelas

Tabela 1 - Processos de conservação dos alimentos através do frio .....	11
Tabela 2 - Condições físicas ideais para a refrigeração de alguns produtos .....	12
Tabela 3 - Etapas do ciclo de refrigeração por compressão .....	22
Tabela 4 - Vantagens e desvantagens das lâmpadas fluorescentes e LED face às incandescentes .....	27
Tabela 5 - Poupanças energéticas com a substituição dos motores convencionais pelos de alta eficiência, em função da potência útil.....	32
Tabela 6 - Fluidos alternativos e condições para a sua substituição .....	33
Tabela 7 - Descrição de algumas das novas tecnologias de refrigeração 8.....	35
Tabela 8 - Vantagens e desvantagens da modelação computacional relativamente à prototipagem de câmaras frigoríficas .....	36
Tabela 9 - Fileiras de estudo selecionadas e siglas de referência.....	43
Tabela 10 - Unidades piloto que foram sujeitas à auditoria energética.....	45
Tabela 11 - Categorias e questões introduzidas no inquérito .....	45
Tabela 12 - Critérios para a classificação dimensional das empresas em função do n.º de trabalhadores efetivos .....	47
Tabela 13 - Fatores de conversão dos consumos das fontes energéticas para tep.....	47
Tabela 14 - Fatores de emissão de GEE associados às fontes energéticas empregues .....	50
Tabela 15 - Escalões e preços médios de energia reativa.....	57
Tabela 16 - Fatores de poupança energética associados a cada medida.....	58
Tabela 17 - Preços dos equipamentos considerados para cada medida.....	59
Tabela 18 - Classificação e lista dos parâmetros de entrada relativos à câmara para a simulação .....	63
Tabela 19 - Valores para $R_{se}$ , $R_{si}$ e $\lambda$ utilizados na eq. 3 .....	64
Tabela 20 - Algumas propriedades físicas do alho.....	66
Tabela 21 - Valores para $D_f$ e condições de aplicação .....	68
Tabela 22 - Valores para $E$ em função do tipo de barreira à entrada .....	68
Tabela 23 - Valores para as constantes usadas na fórmula de $p_{sat vap}$ .....	70
Tabela 24 - Constantes usadas nas fórmula de $h_{ar}$ e $\rho_{ar}$ .....	71
Tabela 25 - Consumos médios das lâmpadas fluorescentes e LED relativamente à lâmpada incandescente .....	71

Tabela 26 - Rendimentos energéticos dos vários tipos de lâmpadas utilizadas no trabalho	72
Tabela 27 - Potências térmicas comuns debitadas por motores acoplados aos ventiladores das câmaras .....	74
Tabela 28 - Condições climáticas para a preservação do alho .....	81
Tabela 29 - Instrumentos de medição utilizados e características técnicas.....	82
Tabela 30 - Inputs e considerações adicionais na análise de sensibilidade.....	85
Tabela 31 - MEE selecionadas para o ensaio e inputs utilizados na sua modelação.....	85
Tabela 32 - Consumos totais, custos totais e custos específicos de energia por tipo de fonte - dados 2010.....	88
Tabela 33 - Consumos energéticos, produções e CEE anuais para cada empresa .....	96
Tabela 34 - Valores das constantes $a$ , $b$ e $R^2$ para a equação de regressão .....	101
Tabela 35 - Valores de energia dedicada às câmaras e consumos totais relevantes.....	104
Tabela 36 - Percentagens de energia elétrica usadas nas câmaras e diferença absoluta apuradas .....	105
Tabela 37 - Poupanças no consumo e no custo, investimentos iniciais e períodos de retorno para a MEE 1 - instalação de eCubes nas câmaras frigoríficas.....	107
Tabela 38 - Modelos de VEV's selecionados, investimentos iniciais e potências totais dos compressores e dos circuitos de refrigeração para cada empresa .....	108
Tabela 39 - Poupanças de energia e de custos associados, investimentos iniciais e períodos de retorno para a MEE2 - instalação de VEV's nos compressores .....	109
Tabela 40 - Custos de energia reativa que se podem poupar através da MEE3 .....	110
Tabela 41 - Custo do consumo de combustível convencional e de biomassa por parte das caldeiras, e economias proporcionadas pela MEE4.....	112
Tabela 42 - Características das caldeiras a biomassa, investimento necessários e períodos de retorno .....	112
Tabela 43 - Valores dos inputs recolhidos durante os ensaios .....	113
Tabela 44 - Consumo real e simulado da câmara em cada ensaio (A e B) e desvios relativos apurados .....	114
Tabela 45 - Características e preços das lâmpadas LED e luminárias selecionadas.....	117
Tabela 46 - Consumos e poupanças simuladas das MEE aplicadas na câmara de teste ...	118
Tabela 47 - Investimentos iniciais e períodos de retorno associados a cada MEE simulada nos 2 ensaios.....	118

## **0. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO**

As preocupações com a eficiência energética têm vindo a ganhar maior relevo nos últimos anos e em praticamente todas as áreas da sociedade, desde o nível doméstico até aos meios industriais mais complexos. Apesar do importante papel que a energia possui na vida do dia-a-dia, diversos acontecimentos ensinaram à humanidade que ela é valiosa demais para ser desperdiçada. O aumento dos custos do petróleo que ocorreu na década de 70 e o aquecimento global com origem na emissão de gases provenientes da produção de energia constituíram sinais de alerta para se refletir sobre a necessidade de racionalização desse bem.

O setor agroindustrial detém um papel dinamizador na economia regional do Alentejo, sendo duas das razões desse sucesso a sua variedade e a estreita ligação com o meio rural. Todavia, têm sido detetados diversos problemas nos processos produtivos relacionados com o não aproveitamento eficiente da energia utilizada: iluminação ativada sem necessidade, perdas térmicas em equipamentos sem manutenção adequada, abertura das portas das câmaras frigoríficas por muito tempo e um sem número de situações que aqui se poderiam imaginar. Os sistemas de frio utilizados na produção e conservação dos alimentos são usualmente grandes consumidores de energia e um foco importante de localização dos desperdícios encontrados. Deste modo, é imperativo que se conheçam as suas causas específicas, que se definam soluções para as reduzir e que se promovam práticas de sensibilização entre as empresas, sempre com o intuito de diminuir os custos nas faturas, melhorar a competitividade e contribuir para um ambiente mais saudável.

Assim, e dentro deste contexto, o presente trabalho pretende estudar o padrão de utilização de energia no setor agroindustrial alentejano, identificar as causas associadas aos gastos e sugerir medidas para a melhoria da eficiência energética, com especial destaque para os sistemas de frio. Para esse efeito o trabalho será estruturado em duas partes principais:

- análise ao perfil energético de empresas do setor e identificação de oportunidades globais de melhoria para um uso mais eficiente da energia;
- desenvolvimento de uma metodologia para simulação e otimização dos consumos de câmaras frigoríficas através da integração de medidas apropriadas.

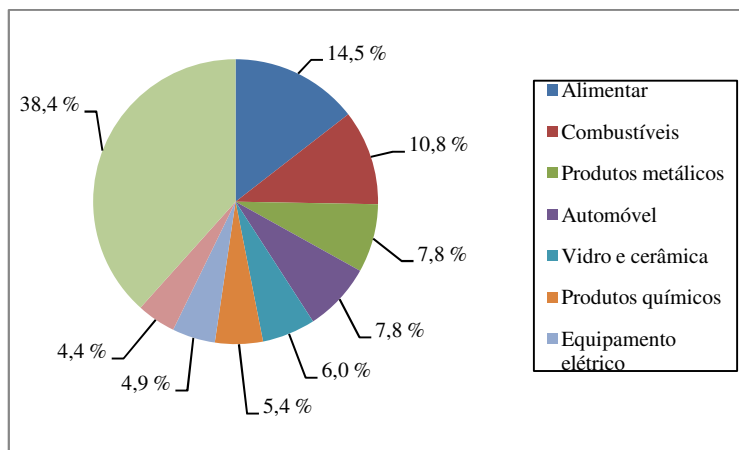
## **1. INTRODUÇÃO**

Na parte introdutória do presente trabalho será adotada a seguinte estrutura de conteúdos:

- análise do setor agroindustrial nos domínios energético e económico, de acordo com a informação já existente;
- utilização do frio na preservação dos alimentos;
- tecnologia dos sistemas de frio, nomeadamente o ciclo de refrigeração por compressão);
- eficiência energética nos sistemas de frio (medidas e novas tecnologias de produção de frio);
- modelos matemáticos de simulação dos sistemas de frio;
- objetivos gerais e específicos do trabalho.

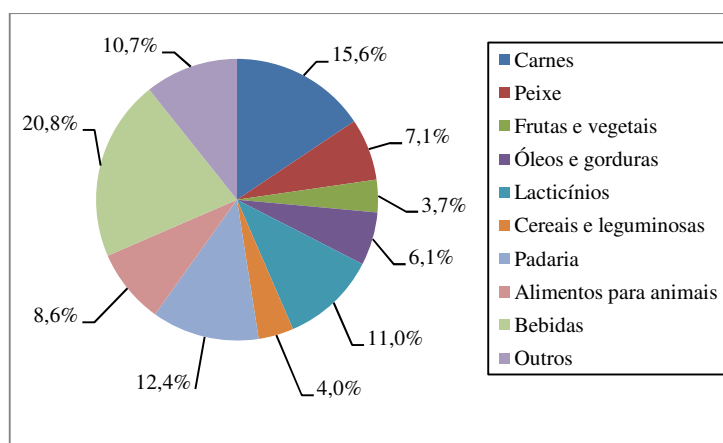
### **1.1. Caracterização do setor agroindustrial nacional ao nível económico e energético**

O setor agroindustrial, que se refere ao tecido produtivo responsável pela transformação de matéria-prima em bens alimentares e bebidas, representa a maior parcela da indústria transformadora em termos de volume de negócios com uma cotação correspondente a 14,5 por cento de todos os proveitos gerados. É igualmente um dos setores com maior peso no que se refere ao número de unidades empresariais, por possuir uma quota de 13,1 por cento dentro da indústria transformadora [1]. A Figura 1 apresenta a distribuição do volume de negócios pelos vários setores da indústria transformadora, em 2010.



**Figura 1 - Peso em percentagem do volume de negócios dos vários setores da indústria transformadora (fonte: [1]).**

De acordo com a classificação portuguesa das atividades económicas, o setor alimentar abarca um conjunto muito diferenciado de indústrias classificadas segundo o produto final fabricado: carne, peixe, frutas e produtos hortícolas, óleos e gorduras, lacticínios, cereais e leguminosas, padaria, bebidas e alimentos para animais [2]. Considerando o volume de negócios gerado por cada uma dessas fileiras, verifica-se que se encontra repartido de uma forma quase equilibrada e que os que possuem maior expressão são os das bebidas, carnes, padaria e lacticínios, conforme se apresenta na Figura 2.



**Figura 2 - Volume de negócios em cada fileira da indústria alimentar (em percentagem - ano 2010) (fonte: [3]).**

O ritmo de crescimento do n.º de empresas tem-se mostrado irregular nos últimos anos, mas a subida que se verificou entre 2009 e 2010 sugere oportunidades de investimento no setor, devido ao aumento das preocupações com a saúde e com a

qualidade dos géneros alimentícios disponíveis para venda (Figura 3).

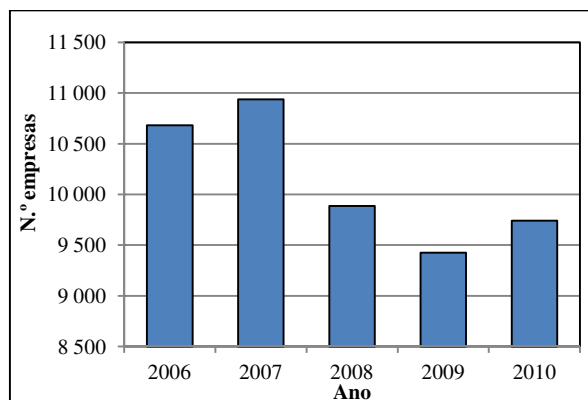


Figura 3 - Evolução do n.º de empresas do setor alimentar entre 2006 e 2010. (fonte: [1]).

Das 10 461 empresas que constituem o universo do setor alimentar, observa-se que quase a totalidade é de reduzida dimensão (micro, pequena ou média), trabalhando menos de 250 trabalhadores em cada uma. Este facto explica a grande facilidade de estas empresas se disseminarem por todo o país, e inclusivamente nas regiões rurais, o que propulsiona o crescimento económico tanto ao nível regional como nacional (Figura 4).

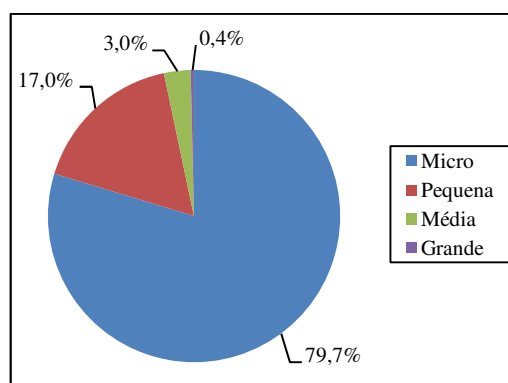


Figura 4 - Classificação das empresas alimentares quanto à dimensão (fonte: [3]).

Nos últimos anos tem-se vindo a assistir a uma redução e estabilização do VAB (valor acrescentado bruto), um indicador que pode ser aplicado para avaliar o saldo existente entre as receitas e as despesas geradas. Esta ocorrência permite antever o potencial que as ações de melhoria da eficiência energética poderão trazer, nomeadamente ao nível da redução das despesas, o que poderá contribuir no futuro para o aumento da competitividade das empresas em geral.

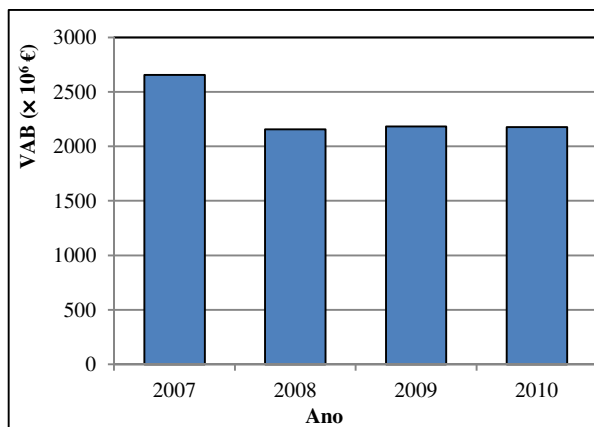


Figura 5 - Evolução do VAB registrado nas empresas alimentares (fonte: [1]).

No que se refere aos consumos energéticos e tipos de fontes utilizadas, o estudo referido pelo CITEVE [4] revela que o setor alimentar tem vindo a reduzir a utilização de energia ao longo dos últimos anos, apesar do crescimento irregular do número de empresas. Os combustíveis líquidos à base de petróleo constituem a fonte que registou um maior declínio, sendo progressivamente substituídas pela energia elétrica e pelo gás natural. O recurso às energias renováveis dentro do processo produtivo, uma medida de eficiência energética relevante para a redução de consumos, tem mantido um ritmo de aquisição aproximadamente constante, conforme se demonstra na Figura 6.

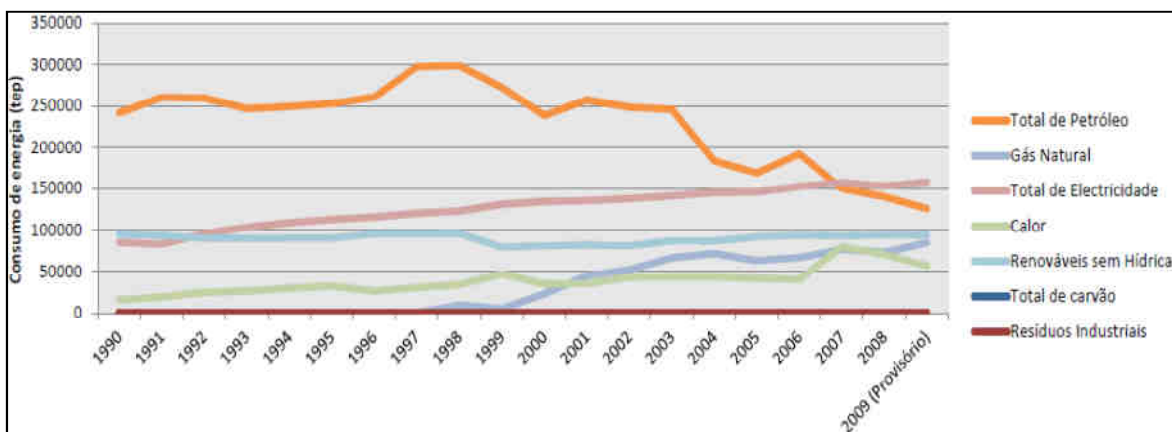
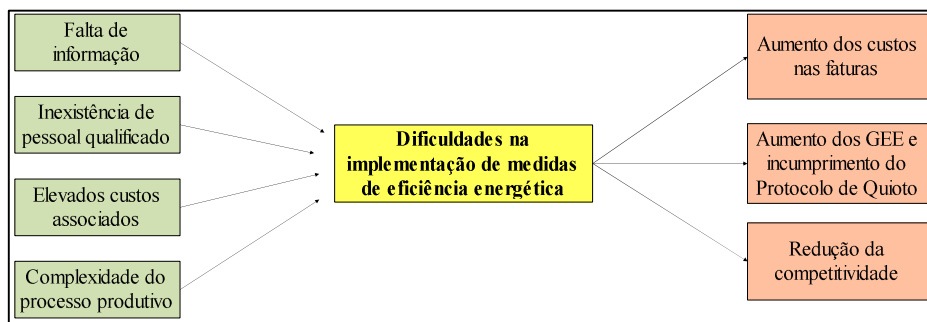


Figura 6 - Evolução do consumo energético do setor agroindustrial segundo a fonte energética (fonte: [4]).

O mesmo estudo refere ainda que, relativamente às empresas seleccionadas para a amostra, muitas delas não efetuam uma gestão adequada do consumo de energia e não se preocupam em planear cuidadosamente a forma ideal de executar essa gestão. Também é

possível verificar que os pontos onde existe um maior desperdício de energia são a rede de ar comprimido e as caldeiras de vapor, revelando-se como focos onde é possível obter um grande potencial de poupança desde que aplicadas as medidas mais favoráveis.

Situações como a falta de isolamento térmico das tubagens dos sistemas de frio ou de calor, as entradas de ar quente através das arestas das câmaras frigoríficas ou das frinchas das portas, as fugas de ar na rede de ar comprimido ou até o funcionamento prolongado dos motores elétricos a plena carga e em ocasiões desnecessárias constituem factos que devem ser corrigidos no sentido de se reduzir os respetivos consumos. No entanto, diversos obstáculos surgem quando se adota uma política de implementação de medidas de eficiência energética, nomeadamente a complexidade dos processos produtivos (que inviabiliza o estudo e a procura de soluções homogêneas e transversais a todas as unidades industriais), a falta de sensibilização dos recursos humanos ou de pessoal especializado nesta problemática e, também, os elevados investimentos iniciais na aquisição de equipamento novo ou na modificação das instalações. Todos estes obstáculos deverão ser ultrapassados para impedir a ocorrência de uma panóplia de consequências nefastas associadas à não racionalização dos recursos energéticos, tal como se explica na Figura 7.



**Figura 7 - Obstáculos à implementação de medidas de eficiência energética e respetivas consequências (fonte: elaboração própria).**

Em termos de legislação, a Estratégia Nacional para a Energia definiu diversos métodos e ferramentas para regulamentar os consumos energéticos admissíveis nas empresas e melhorar os seus desempenhos energéticos através da implementação de medidas adequadas e reduzir as emissões de GEE (gases de efeito de estufa) para a atmosfera. Uma dessas ferramentas é o SGCIE (Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia), que estipula a adoção de medidas que visem reduzir os consumos de energia durante tempos pré-determinados para as empresas com consumos superiores a

500 tonelada equivalente de petróleo por ano (tep/ano). A avaliação da redução de consumos é efetuada através do cálculo de indicadores energéticos que relacionam a energia consumida com a produção, a emissão de GEE e o valor acrescentado bruto. Estes indicadores deverão manter-se constantes ou reduzir para valores abaixo de limite impostos [5].

Os sistemas de refrigeração implementados nas instalações da indústria agroalimentar, utilizados fundamentalmente na preservação dos produtos durante o armazenamento final, são responsáveis pelos consideráveis consumos e custos energéticos presentes nas faturas da generalidade das empresas. Este é, nitidamente, um dos setores que necessita de um estudo preliminar aprofundado com vista ao apuramento de medidas apropriadas para redução dos consumos.

Assim, e porque uma avaliação ao perfil energético de todos os processos operativos do setor agroindustrial é de enorme complexidade, o presente trabalho centrar-se-á sobretudo na análise e na otimização dos gastos existentes nos sistemas de frio.

## **1.2. Conservação dos alimentos através do frio**

O problema da conservação dos alimentos é já uma questão que advém desde os tempos primordiais da civilização humana.

Nos tempos em que o homem se tornou sedentário imperava a necessidade de armazenar os alimentos de forma adequada por mais tempo, após o momento de colheita, com vista a preservar as qualidades nutritivas, sanitárias e de boa aparência para um consumo posterior. Esta necessidade era especialmente importante para o caso dos alimentos facilmente deterioráveis e que não podiam ser guardados nas condições ambientais normais, como se sucedia com o peixe e a carne.

Assim, diversos métodos de conservação foram desenvolvidos à medida que a tecnologia e o conhecimento iam evoluindo. O esquema da Figura 8 sintetiza alguns desses métodos.

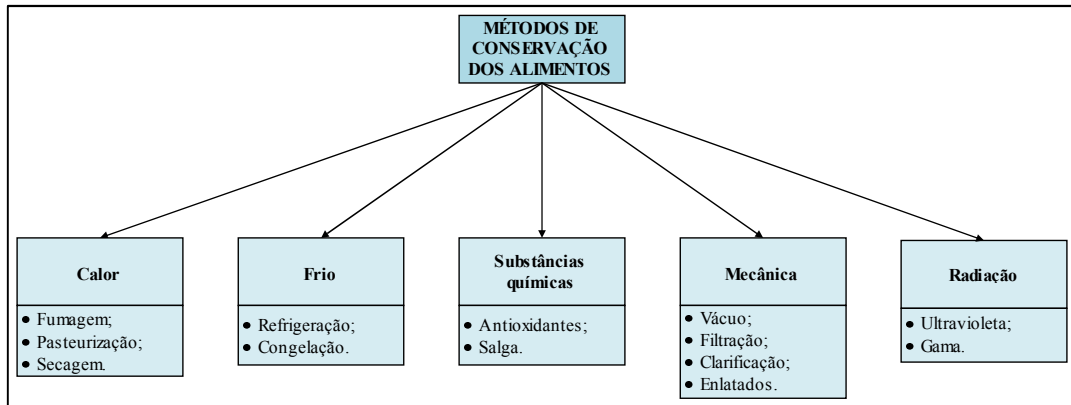


Figura 8 - Métodos habituais de conservação dos alimentos (fonte: [6]).

Apesar da diversidade, existem técnicas como a secagem e a salga que têm tendência para alterar as propriedades originais dos alimentos (textura e sabor), enquanto outras apenas se aplicam a uma gama específica de produtos (pasteurização e salga) ou até possuem uma menor aceitação por causa dos consumidores devido a falsos estereótipos criados (radiação).

Pelo contrário, o frio já apresenta uma aplicação prática bastante interessante e versátil, exibindo diversas vantagens relativamente às suas congêneres pois:

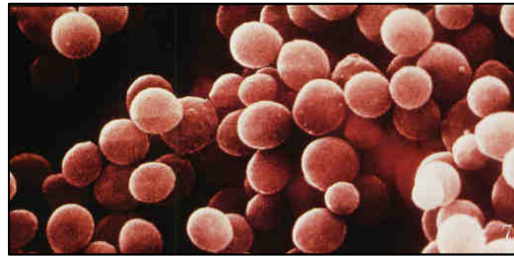
- não altera significativamente as propriedades iniciais (sabor, textura, aparência,...);
- é aplicável a uma larga gama de produtos;
- permite a conservação dos alimentos por muito tempo, mantendo o seu valor nutritivo, sanitário e aparência;
- permite uma adequada exposição visual do produto ao consumidor quando se encontra para venda (e. g. bancadas das peixarias e expositores dos supermercados).

A aplicação do frio nos alimentos era já fomentada desde as antigas civilizações, embora estas apenas o utilizassem como forma de melhorar o paladar ou para o refrescamento. Os antigos egípcios, por exemplo, utilizavam vasos em barro para refrescar a água: o material poroso desses objetos facilitava a evaporação da água, reduzindo assim a temperatura (Figura 9).



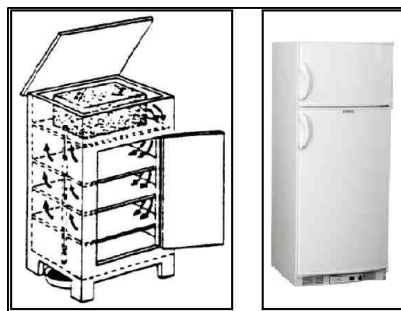
**Figura 9 - Vaso de barro egípcio para arrefecer a água (fonte: [7]).**

As descobertas que ocorreram no séc. XVII revelando que os microrganismos eram responsáveis pela depreciação dos alimentos (ver Figura 10) e que o frio atenuava a sua atividade metabólica permitiram reconhecer a refrigeração como uma valiosa técnica de conservação dos produtos.



**Figura 10 - *Staphylococcus Aureus*, um microrganismo patológico responsável pela septicémia (fonte: [7]).**

Foi assim que por volta do séc. XIX surgiram as primeiras câmaras isoladas de frio por convecção, cujo funcionamento se baseava na recirculação de ar frio arrefecido por um bloco de gelo e que se deslocava por diferença de densidades. Um século mais tarde, e com o advento da eletricidade, desenvolveram-se as câmaras frigoríficas atuais (de aplicação doméstica e industrial) refrigeradas por meio dum fluido submetido a um ciclo de compressão, cujo funcionamento se explicará adiante (Figura 11)



**Figura 11 - Câmara de refrigeração do séc. XIX e frigorífico atual (fonte: [8] (adaptado)).**

Assim, o frio permite a conservação dos produtos por mais tempo porque:

- reduz a **atividade metabólica** dos microrganismos (fungos, bactérias, vírus), evitando a sua rápida proliferação;
- inibe a **oxidação**, que se entende por um conjunto de reações químicas envolvendo transferência de elétrons entre os nutrientes e o oxigênio do ar; esta transferência promove a desagregação dos nutrientes e a consequente perda de qualidade dos alimentos;
- impede a **exposição às condições do meio ambiente** (temperatura, humidade relativa, radiação solar), que se tornam adversas para a preservação dos alimentos.

Relativamente a outras técnicas de preservação, o frio apresenta inconvenientes dos quais são de destacar a não destruição permanente dos microrganismos e a necessidade de sistemas de refrigeração que habitualmente possuem elevados consumos de energia. Além disso, certos produtos necessitam de ser consumidos imediatamente uma vez descongelados, não se podendo voltar a preservá-los por nova congelação.

Assim que se inicia a contaminação do produto por microrganismos, estes reproduzem-se segundo uma lei exponencial e a sua atividade metabólica crescente liberta toxinas e outras substâncias responsáveis pela deterioração do alimento e por doenças. O controlo do crescimento dessas colónias é efetuado intervindo diretamente sobre diversas variáveis físicas no interior das câmaras, das quais são de destacar:

- **temperatura;**
- **humidade relativa;**
- **velocidade de circulação do ar frio.**

A temperatura é o fator que maior influência exerce sobre o crescimento dos microrganismos. Valores entre 20 e 60 °C são propícios a uma reprodução acelerada e rápida degradação dos alimentos, devendo-se portanto submetê-los a temperaturas mais baixas, o que normalmente é conseguido por processos de refrigeração e congelação (ver Tabela 1).

**Tabela 1 - Processos de conservação dos alimentos através do frio (fonte:[9]).**

Processo	Descrição	Temperaturas conservação (°C)	Tempo conservação produto
Refrigeração	A temperatura é reduzida até um valor <b>acima</b> do ponto inicial de congelação do produto, por remoção de calor sensível.	1 a 4	Dias
Congelação	A temperatura é colocada <b>abaixo</b> do ponto inicial de congelação do produto, por remoção de calor sensível e latente (mudança de fase).	-35 a ~0	Meses

Importa referir que cada produto possui a sua composição química e propriedades específicas (taxa de amadurecimento, propensão para formação de manchas na superfície, etc.). Este facto, em conjunto com o tempo desejado para o armazenamento até ao consumo final, determinam a temperatura ideal de conservação. Habitualmente os tempos de preservação são maiores à medida que a temperatura decresce.

O método da congelação é bastante versátil e durável, apesar de não ser aplicável a certos alimentos como os lácteos, ao facto de exigir uma maior necessidade energética e, também, por geralmente não poder ser repetido após descongelação (risco de degradar as qualidades nutritivas, de sabor e de textura). No entanto, é conveniente que a congelação seja realizada no menor tempo possível para impedir a readaptação dos microrganismos às novas condições e à formação de cristais de gelo de grandes dimensões, causadores da rutura das células e conseqüente má aparência ou textura.

A humidade do ar deve encontrar-se dentro de níveis moderados que evitem a desidratação dos produtos (caso das frutas e vegetais) e a condensação do vapor de água nas superfícies, visto que a água líquida é um meio que promove a proliferação dos microrganismos. Grande parte dos produtos pode ser conservada em ambientes com humidades relativas entre 85 e 100 por cento [10].

A velocidade de circulação do ar promove o rápido arrefecimento do produto, mas se se encontrar num valor elevado pode causar a desidratação do mesmo. Velocidades compreendidas entre 0,25 e 5 m.s<sup>-1</sup> são comumente aceites [9, 10].

A manutenção dos valores adequados para cada um dos fatores mencionados acima pode ter um impacto profundo na poupança energética das câmaras, evitando gastos desnecessários resultantes, por exemplo, do abaixamento exagerado da temperatura. A Tabela 2 exemplifica algumas das condições ideais para a conservação de alguns produtos.

**Tabela 2 - Condições físicas ideais para a refrigeração de alguns produtos (fonte: [9, 10, 11]).**

Produto	Temperatura conservação (°C)	Humidade relativa conservação (%)
Pera	-1	90
Banana	14	90 a 95
Batata	7 a 12	85 a 100
Bife	-2 a 1	88 a 95
Salmão	-0,5 a 1	95 a 100
Manteiga	0	75 a 85

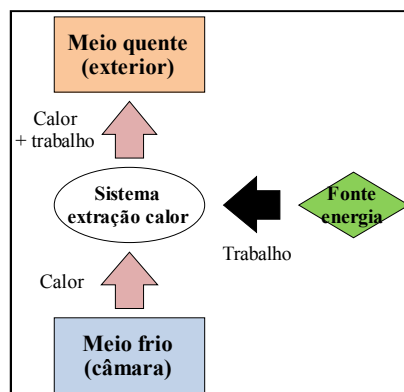
### 1.3. Tecnologia das câmaras frigoríficas

O propósito primordial de qualquer câmara frigorífica (Figura 12) consiste em manter uma temperatura interna abaixo da ambiente, um valor de humidade relativa adequado e uma corrente de ar frio favorável para que seja possível a conservação do produto no mínimo até ao momento previsto para a expedição ou consumo.



**Figura 12 - Exemplo de uma câmara frigorífica típica (fonte: [7]).**

A manutenção da temperatura é efetuada através de um circuito que vai removendo uma quantidade de calor determinada do interior (meio mais frio) para o exterior (meio mais quente). Este processo não é espontâneo e, portanto, para que ele ocorra há que fornecer energia sob a forma de trabalho proveniente da rede elétrica (Figura 13).

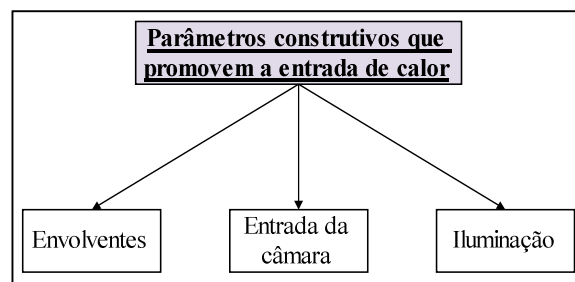


**Figura 13 - Balanço energético global numa câmara frigorífica (fonte: elaboração própria).**

Os subcapítulos seguintes explicam em maior pormenor os aspetos relacionados com o funcionamento e a conceção das câmaras frigoríficas.

### 1.3.1. Conceção estrutural das câmaras frigoríficas

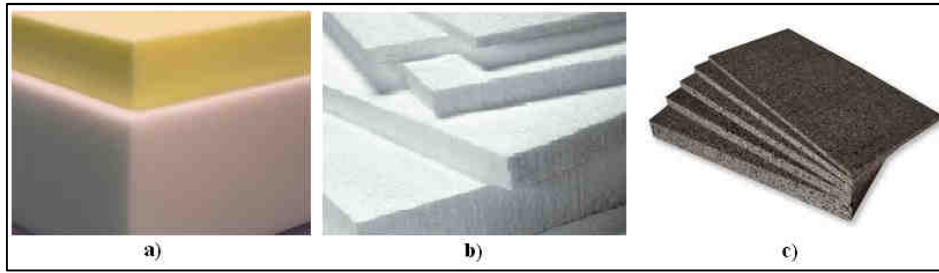
Para um funcionamento eficiente das câmaras frigoríficas é imprescindível garantir que a sua construção impeça a entrada de calor, tanto quanto for possível, para desse modo reduzir ao mínimo o consumo energético e prolongar a preservação do produto. Os parâmetros estruturais que maior influência possuem na entrada de calor são os que se encontram esquematizados na Figura 14.



**Figura 14 - Parâmetros construtivos das câmaras que influenciam a entrada de calor (fonte: elaboração própria).**

As envolventes são os elementos estruturais que contemplam as paredes, o chão e o teto. De acordo com a equação da taxa de transferência de calor por condução ( $\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T$ ), uma das estratégias utilizadas para reduzir a entrada térmica  $\dot{Q}$  consiste em reduzir a área  $A$  de todas as envolventes, adotando formas geométricas prismáticas para a câmara em vez de linhas curvilíneas que esteticamente são mais atraentes.

Outro método consiste em utilizar materiais com baixo coeficiente de transferência térmica  $U$ , designados por termicamente isolantes, como os poliméricos artificiais e naturais (poliuretano (PUR), poliestireno expandido moldado (EPS) e cortiça), exemplificados na Figura 15.



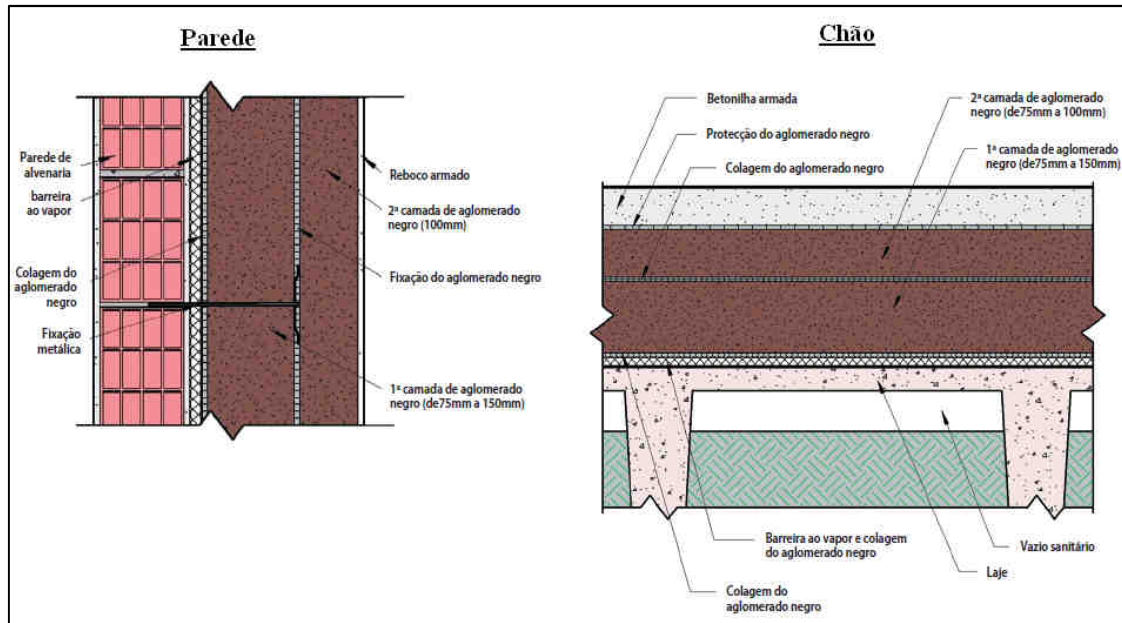
**Figura 15 - Materiais termicamente isolantes usados nas envolturas: a) PUR; b) EPS e c) cortiça (fonte: [7]).**

Para além da baixa condutibilidade térmica, existem outros critérios a ter em conta na conceção das envolturas, cujos materiais devem proporcionar:

- uma boa impermeabilidade à humidade;
- uma diminuta libertação de odores;
- uma adequada resistência mecânica;
- uma boa capacidade contra a corrosão.

A reunião do maior número possível destas características é obtida através da introdução de várias camadas de materiais distintos, dentro das envolturas, cada um com o seu propósito. Elementos como alvenaria, betão e placas metálicas superficialmente tratadas são empregues para conferir principalmente uma boa resistência mecânica e contra a corrosão, enquanto as resinas e filmes poliméricos são acrescentados como barreiras de vapor para impedir a entrada de humidade e consequente degradação acelerada dos isolamentos térmicos.

O chão é habitualmente feito em argamassa, mas pode incluir também um espaçamento de ar para dificultar ainda mais a entrada de calor proveniente do solo. A Figura 16 exemplifica a constituição das envolturas de uma câmara que utiliza a cortiça como material isolador.



**Figura 16 - Exemplo de constituição das envolturas numa câmara de congelamento (fonte: [12]).**

As entradas de acesso à câmara deverão ser providas de uma barreira que impeça a entrada de ar quente para o interior. Além de se pretender que tal barreira limite a carga térmica a ser removida, deve também restringir a entrada de humidade contida no ar responsável pela formação de gelo nas superfícies, que dificulta a absorção de calor para o exterior e piora o desempenho do sistema.

Portas herméticas com borrachas isolantes na periferia e com uma constituição interna semelhante à das envolturas da estrutura, sujeitas a um plano de manutenção periódica, constituem uma boa barreira contra a passagem do ar. Todavia, quando a frequência de acessos ao interior é grande e a abertura regular das portas se torna inviável, pode-se instalar como complemento portas automáticas, cortinas em PVC ou ainda cortinas de ar, que são aparelhos montados no topo da entrada para gerar um fluxo forte e contínuo de ar na vertical, impedindo a penetração de ar parasita externo (Figura 17).



**Figura 17 - Cortina em PVC e cortina de ar (fonte: [7]).**

A iluminação interior possui um contributo pouco influente na carga térmica interna, mas o seu efeito na fatura energética torna-se relevante passado um longo período de tempo de medições.

Uma intensidade luminosa referenciada em  $200 \text{ lm.m}^{-2}$  é considerada suficiente para uma visualização confortável, sendo portanto desnecessária a utilização de valores acima deste que geram calor adicional [13]. Além disso, é necessário atender à tecnologia de funcionamento da lâmpada pois esta condiciona fortemente a potência térmica emitida: as do tipo fluorescente (emissão de luz por excitação elétrica de mercúrio gasoso) ou LED (passagem de corrente elétrica por um semicondutor) são preferíveis às do tipo incandescente ou halogéneo (aquecimento dum filamento metálico), que dissipam muito mais calor (Figura 18).

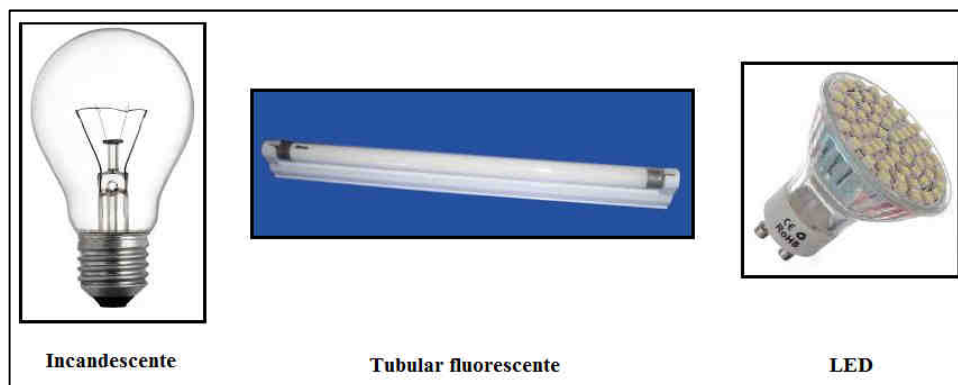


Figura 18 - Tipos de lâmpadas existentes em câmaras frigoríficas (fonte: [7]).

As lâmpadas devem ser instaladas em luminárias estanques à humidade suscetível de se condensar (grau de proteção IP65), e o controlo do seu funcionamento pode ser efetuado por um interruptor acoplado à porta (só acende quando esta é aberta), por sensores de presença colocados no interior ou por temporizadores (Figura 19).



Figura 19 - Luminária estanque e detetor de presença para controlo automático da iluminação (fonte: [7]).

A circulação do ar frio no interior é promovida por um conjunto de ventiladores acoplados ao evaporador, que por sua vez é responsável pela absorção do calor da câmara. Esse ar, ao entrar em contato com o produto, remove o calor por convecção (arrefecendo-o rapidamente) e transfere esse calor para o fluido refrigerante a baixa temperatura que circula pelas tubulações do evaporador (Figura 20).

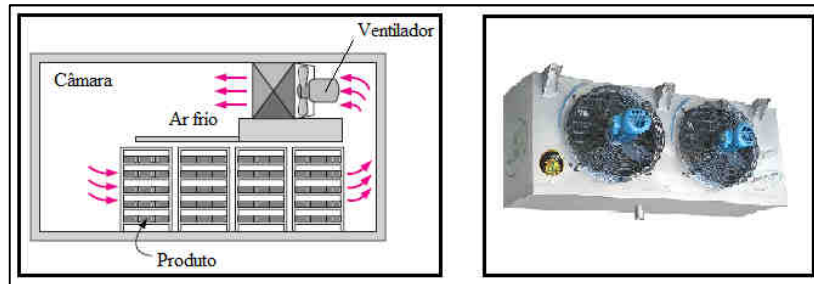


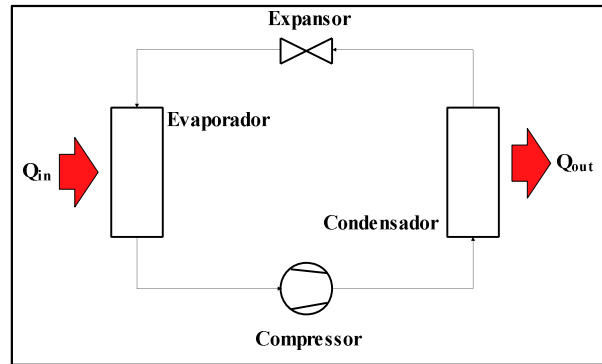
Figura 20 - Arrefecimento por circulação forçada de ar (à esquerda) e evaporador com ventilação forçada (à direita) (fonte: [7, 9 (adaptado)]).

### 1.3.2. Ciclo de refrigeração por compressão de vapor

Grande parte das câmaras frigoríficas domésticas e industriais existentes utiliza o ciclo de refrigeração por compressão de um fluido para gerar frio, por ser um método com um nível de eficiência adequado e um baixo custo inicial de aquisição.

Genericamente, um fluido refrigerante é submetido a uma sequência cíclica de transformações físicas que lhe permite absorver o calor do interior e transportá-lo para o exterior.

Os sistemas que operam segundo este ciclo integram um conjunto de 4 componentes básicos ligados entre si por tubulações nas quais o fluido circula, a saber: **evaporador**, **compressor**, **condensador** e **válvula de expansão**. Estes componentes, bem como o sentido do fluxo do fluido, são esquematizados na Figura 21.



**Figura 21 - Componentes básicos num ciclo de refrigeração por compressão de vapor (fonte: elaboração própria).**

Outros componentes adicionais de controlo ou de manutenção são também incluídos, desempenhando papéis secundários no sistema. Seguidamente se descrevem os componentes mais importantes:

- **fluido refrigerante:** é responsável pelo transporte de calor do interior para o exterior, por via da alteração cíclica do seu estado físico. Um bom fluido deve possuir um conjunto de características como um baixo volume específico, fraca interação com o óleo lubrificante, baixa pressão de vaporização e uma alta pressão de condensação para reduzir o trabalho de compressão.

O amoníaco (R717) é largamente utilizado na indústria devido à sua boa capacidade de absorção de calor, mas por ser tóxico e inflamável pode ser substituído por outras substâncias como o dióxido de carbono (R744) e diversos hidrofluorcarbonetos como o tetrafluoretano (R134a), frequentemente utilizado em aplicações domésticas;

- **compressor:** eleva a pressão do fluido e fá-lo deslocar-se através do sistema, através da compressão e expansão alternada dentro de uma câmara estanque. Um óleo lubrificante é utilizado para reduzir o desgaste e o calor das partes móveis, melhorando a eficiência (Figura 22).

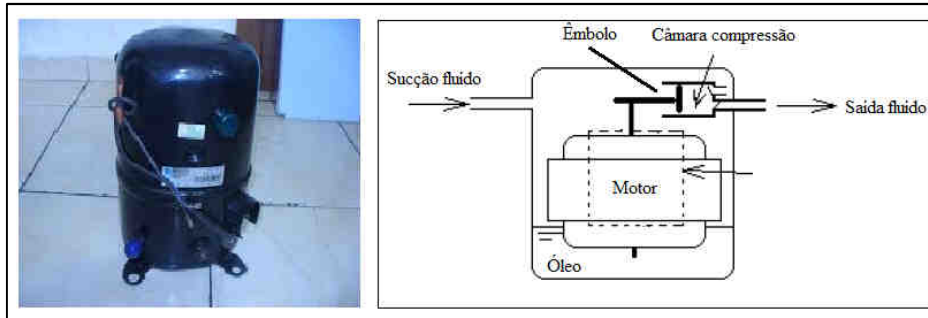


Figura 22 - Compressor hermético e respetiva constituição interna (fonte: [14]).

- **condensador:** local onde o fluido liberta o calor absorvido para o exterior, passando por tubagens ligadas a alhetas metálicas com o propósito de facilitar essa transferência. Ao condensador podem ser acoplados ventiladores com o propósito de acelerar o fluxo de ar que passa pela tubulação (Figura 23).



Figura 23 - Condensador (fonte: [7]).

- **evaporador:** com uma constituição semelhante ao condensador, efetua a transmissão do calor existente no interior da câmara para o fluido refrigerante, podendo ser igualmente melhorada com o acoplamento de ventiladores (Figura 24).



Figura 24 - Evaporador (fonte: [7]).

- **expansor:** reduz a pressão do fluido que entra no evaporador para facilitar a sua vaporização, e controla o respetivo fluxo de modo a manter uma temperatura constante na câmara. O expansor pode assumir a forma prática de uma válvula de expansão ou de um tubo capilar (Figura 25).



Figura 25 - Válvula de expansão termostática e tubo capilar (fonte: [7]).

- **tubulações de interconexão:** direciona o fluido para que passe pelos diversos componentes, sendo habitualmente fabricado numa liga de Cobre resistente à corrosão e com uma boa maleabilidade para facilitar a montagem (Figura 26).



Figura 26 - Tubo flexível em liga de Cobre (fonte: [7]).

- **filtro:** permite remover as partículas sólidas resultantes do desgaste do compressor e qualquer vestígio de humidade, para não afetar o desempenho do ciclo (Figura 27).



Figura 27 - Filtro (fonte: [7]).

- **termóstato:** controla o funcionamento do compressor, ligando-o e desligando-o de modo a que no interior a temperatura se mantenha dentro de valores limite ( $T_{ON}$  e  $T_{OFF}$ ) considerados adequados para a conservação do produto. Um sensor de temperatura instalado no espaço a refrigerar (baseado num tubo contendo um fluido de transmissão ou num fio elétrico cuja resistência varia) é utilizado para acionar um interruptor elétrico que ativa o compressor quando a temperatura atinge o mínimo ( $T_{ON}$ ) e desativa-

o quando a temperatura é máxima ( $T_{OFF}$ ). Estas temperaturas de controlo podem ser reguladas conforme as necessidades, estando disponíveis termóstatos do tipo mecânico e digital, sendo este último mais preciso em termos de leitura e de acerto dos valores (Figura 28).

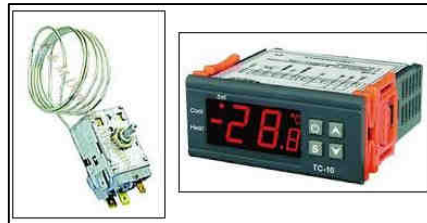


Figura 28 - Termóstato mecânico e controlador digital de temperatura (fonte: [7]).

Ao circular pelos vários componentes, o fluido é sujeito a um ciclo de transformações físicas que envolvem alterações de pressão, volume, temperatura, entalpia, entropia e, até, de fase. Assumindo uma situação próxima da ideal em que não se consideram perdas energéticas (e. g. atrito provocado pelo fluido e dissipação de calor no compressor, ...), o ciclo de transformações pode ser descrito pelos gráficos **pressão ( $p$ ) vs volume ( $V$ )** e **temperatura ( $T$ ) vs entropia específica ( $s$ )**, cujas representações e descrições se efetuam na Figura 29 e na Tabela 3.

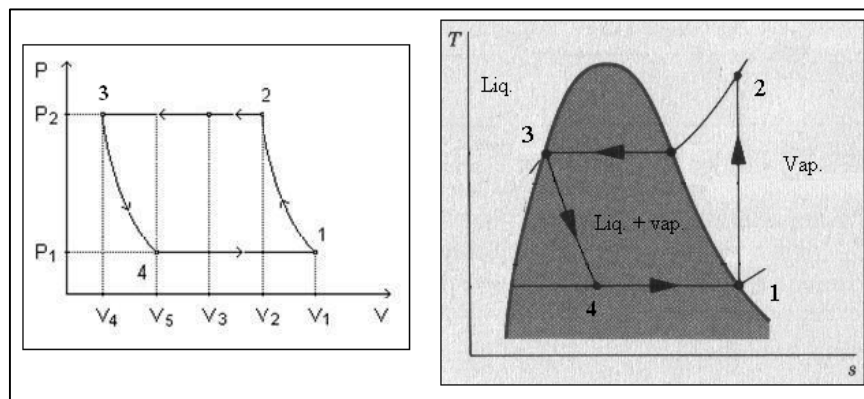


Figura 29 - Gráficos  $p(V)$  e  $T(s)$  para o ciclo de refrigeração por compressão (fonte: [15] (adaptado)).

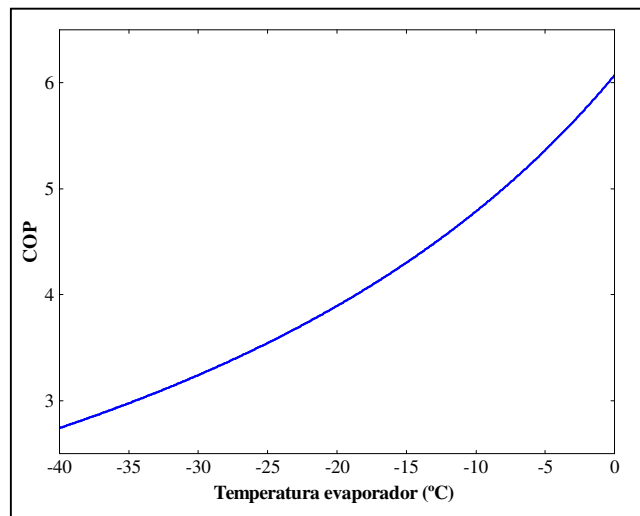
**Tabela 3 - Etapas do ciclo de refrigeração por compressão (fonte: [15]).**

Etapa	Designação	Descrição
1 - 2	Compressão isentrópica	O fluido sofre um aumento de pressão proporcionado pelo compressor através da redução do volume. O processo dá-se a entropia constante, com o fluido no estado gasoso; existe uma pequena dissipação de calor para o exterior.
2 - 3	Condensação isobárica	Ao passar pelo condensador, o fluido liberta calor para o exterior, reduzindo a sua temperatura e volume mas a uma pressão alta e constante. Simultaneamente, o fluido passa do estado gasoso para o líquido.
3 - 4	Expansão adiabática	No expansor, ocorre uma redução na pressão e temperatura do fluido através de um ligeiro aumento do volume e entropia. As perdas de calor são negligenciáveis. Entretanto, o fluido muda do estado líquido para uma mistura líquido + vapor.
4 - 1	Evaporação isobárica	A uma pressão e temperatura baixas e constantes, o fluido absorve o calor da câmara ao passar pelo evaporador, vaporizando-se completamente.

O rendimento do ciclo de refrigeração é medido pelo *COP* (*coefficient of performance*), cuja expressão matemática é:

$$COP = \frac{Q_{absorvido}}{W_{compressor}} = \frac{T_{evaporador}}{T_{condensador} - T_{evaporador}} \quad (1)$$

A Figura 30 mostra a variação do *COP* para valores de  $T_{evaporador}$  entre -40 e 0 °C (assumindo  $T_{condensador} = 45$  °C).



**Figura 30 - Variação do *COP* com a temperatura do evaporador (fonte: elaboração própria).**

O gráfico evidencia a redução do *COP* à medida que a temperatura no interior da câmara baixa; note-se que a temperatura interior é proporcional à temperatura do evaporador.

Tipicamente podem ser obtidos resultados práticos para o *COP* entre 4 e 5. No entanto, para uma avaliação global do desempenho de toda a câmara é também necessário atender à eficiência na conversão entre a energia elétrica e a energia mecânica que ocorre

no compressor, algo que não pode ser desprezado devido ao elevado consumo por parte deste equipamento.

A obtenção de temperaturas muito baixas (na ordem de  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) torna-se inviável aplicando o ciclo de refrigeração descrito anteriormente, devido às altas taxas de compressão envolvidas e aos elevados custos associados. Nestas situações pode-se recorrer a ciclos com múltiplos estágios de compressão, como o que se representa na Figura 31.

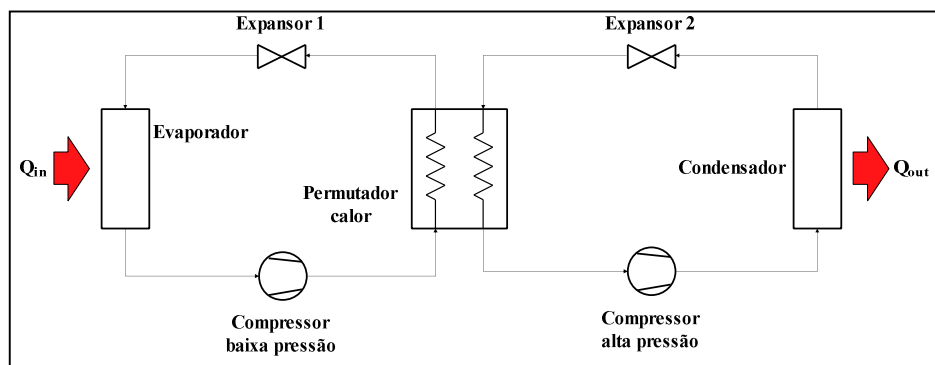


Figura 31 - Ciclo de refrigeração com dois andares de compressão (fonte: elaboração própria).

Um permutador de calor é interposto entre dois ciclos de refrigeração simples, fazendo a transferência de energia térmica entre os estágios de baixa pressão (que absorve o calor da câmara) e de alta pressão (que liberta o calor para o exterior). Deste modo, a taxa de compressão exigida a cada compressor torna-se inferior, proporcionando um menor trabalho requerido e maior poupança energética, conforme se refere pela área a tracejado no gráfico pressão vs volume da Figura 32.

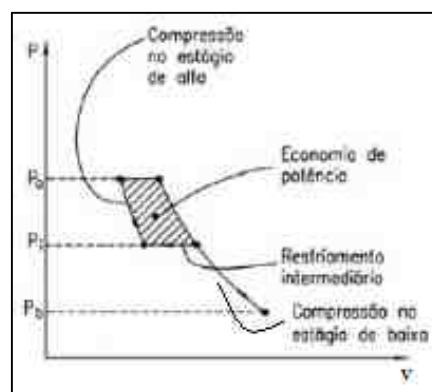


Figura 32 - Gráfico  $p(V)$  para um ciclo com duplo estágio de compressão (fonte: [16] (adaptado)).

#### 1.4. Eficiência energética em câmaras frigoríficas

A utilização de sistemas de refrigeração baseados no ciclo de compressão de vapor necessita de uma quantidade de energia elétrica considerável para operar o compressor. As potências envolvidas podem vir a ser muito altas (acima de 100 kW), o que representa uma fatia considerável no consumo e custo energéticos globais dentro do processo produtivo.

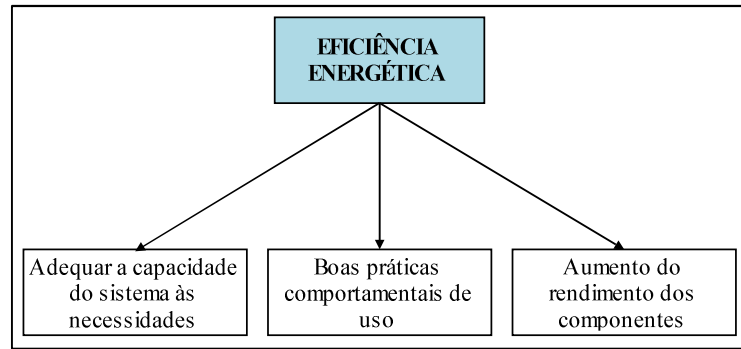
Em Portugal, a indústria nacional utiliza 4 por cento de toda a energia elétrica produzida para os sistemas de refrigeração, o que em termos práticos corresponde a cerca de 630 GW.h. Verifica-se que 80 por cento deste valor provém do setor agroindustrial [17], mostrando ser uma área importante onde o potencial de poupança poderá ser elevado.

Acontecimentos históricos como a crise do petróleo na década de 70, o aquecimento global e a destruição da camada de ozono fizeram refletir sobre os inconvenientes destes sistemas de refrigeração, que até então tinham sido negligenciados. Especificamente, tais inconvenientes incluem:

- o **elevado consumo energético**, que se traduz num maior custo para as empresas e maiores emissões de GEE nas centrais termoelétricas;
- a utilização de **clorofluorcarbonetos** (CFC) na composição dos fluidos, com um elevado ODP (*Ozone Depletion Potential*);
- o favorecimento da **dependência energética** externa, aumentando o custo por unidade de energia.

Estes inconvenientes podem ser ultrapassados ou atenuados por duas vias básicas: a melhoria da **eficiência energética** dos sistemas e o desenvolvimento de **novas tecnologias de refrigeração**.

No que se refere à eficiência energética, esta procura aproveitar o máximo possível da energia consumida na geração de energia útil, reduzindo as perdas associadas; a eficiência pode então ser melhorada atacando-se em três frentes (Figura 33).



**Figura 33 - Formas de melhorar a eficiência energética (fonte: elaboração própria).**

Deste modo, estratégias como uma seleção adequada do compressor face às necessidades, o degelo e a manutenção do isolamento térmico podem ajudar a alcançar poupanças energéticas até 20 por cento [17].

Já as novas tecnologias de refrigeração procuram a utilização direta de energias alternativas (nem sempre uma rede elétrica está disponível) ou de outros processos que não envolvam a aplicação de fluidos nocivos.

Os subcapítulos seguintes descrevem algumas medidas de eficiência energética adotadas assim como as novas tecnologias conhecidas.

### **1.4.1. Medidas de eficiência energética nos sistemas de frio**

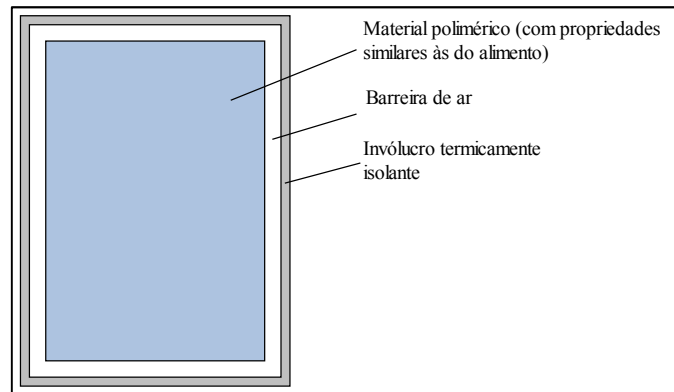
#### **1.4.1.1. Instalação de dispositivos eCube**

**Objetivo:** simular o comportamento térmico real dos produtos acomodados e dar essa indicação à sonda do termóstato ou ao automatismo controlador, de modo a reduzir a frequência de funcionamento do compressor, o que proporciona uma duração mais prolongada desse componente, uma menor quantidade de energia requerida e menos ruído gerado.



**Figura 34 - Dispositivo eCube (fonte: [18]).**

**Princípio de funcionamento:** o eCube é constituído por um material polimérico especial com propriedades térmicas similares às do produto acondicionado, sendo envolto por um invólucro termicamente isolante para evitar as trocas térmicas rápidas entre o interior e o ar circulante. A Figura 35 esquematiza a constituição desse dispositivo na sua abordagem mais básica.



**Figura 35 - Estrutura do eCube (fonte: elaboração própria).**

A sonda é inserida no interior do dispositivo, que deste modo lê a temperatura correta do produto em vez da temperatura do ar circulante na câmara, uma prática comum nas câmaras frigoríficas. De facto, a temperatura do ar é pouco fiável pois oscila fortemente conforme o trabalho realizado e o número de acessos à câmara; esta oscilação não corresponde à que se sucede com os alimentos pois estes possuem uma inércia térmica diferente. Deste modo, o eCube, ao simular essa inércia térmica e ao ser envolvido pelo invólucro externo, consegue reproduzir com maior rigor a temperatura interior do alimento, tal como as normas alimentares sugerem [18].

Diversas vantagens surgem da utilização deste dispositivo:

- redução da frequência dos ciclos de funcionamento do compressor em 66,7 por cento, significando um menor desgaste do componente;
- redução da frequência dos picos de corrente que ocorrem no arranque do compressor, proporcionando um menor consumo energético nessa fase;
- menores oscilações de temperatura no interior;
- menor ruído gerado (em particular durante o arranque do compressor);
- melhor absorção de calor por parte do circuito de refrigeração (devido ao maior tempo de funcionamento do compressor em cada ciclo);
- poupança energética mínima na ordem de 10 por cento (valor anual), após

reajustamento do ponto de funcionamento do termóstato para a temperatura de conservação ideal dos produtos. Estudos conduzidos em cadeias de supermercados e outras instalações com sistemas de refrigeração, localizados na África do Sul e no Reino Unido, mostraram a obtenção de poupanças energéticas entre 13 e 25 por cento [18, 19].

#### 1.4.1.2. Instalação de iluminação eficiente e adequada

**Objetivo:** reduzir a emissão de calor para o interior e o consumo gerado pelas lâmpadas instaladas, ao mesmo tempo que se procura uma intensidade luminosa suficiente e confortável. Medidas práticas podem reduzir o consumo global em 2 por cento [17].

**Estratégias:**

- substituir as lâmpadas incandescentes (que dissipam muito calor) pelas de tecnologia fluorescente ou LED; algumas vantagens / desvantagens de cada tipo são resumidas na Tabela 4.

**Tabela 4 - Vantagens e desvantagens das lâmpadas fluorescentes e LED face às incandescentes (fonte: [16, 20, 21]).**

Tipo de lâmpada	Vantagens	Desvantagens
Incandescente	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Acendimento rápido;</li> <li>▪ boa reprodução das cores;</li> <li>▪ baixo preço.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Baixa durabilidade (1000 h);</li> <li>▪ reduzida eficiência (12 a 15 lm.W<sup>-1</sup>).</li> </ul>
Fluorescente	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Baixa temperatura de operação;</li> <li>▪ baixo consumo (5 vezes inferior);</li> <li>▪ alta eficiência (40 a 80 lm.W<sup>-1</sup>);</li> <li>▪ luz suave;</li> <li>▪ durabilidade até 16 000 h.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Preço moderado (3 vezes mais cara);</li> <li>▪ funciona só acima de 5 °C;</li> <li>▪ acendimento lento;</li> <li>▪ requer equipamento adicional;</li> <li>▪ contém Mercúrio.</li> </ul>
LED	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grande durabilidade (até 50 000 h);</li> <li>▪ acendimento instantâneo;</li> <li>▪ muito compacta;</li> <li>▪ baixo consumo (5 vezes inferior);</li> <li>▪ boa eficiência (40 a 60 lm.W<sup>-1</sup>);</li> <li>▪ baixa temperatura de operação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Preço elevado (25 vezes mais cara);</li> <li>▪ menor reprodução das cores;</li> <li>▪ requer equipamento adicional.</li> </ul>

Apesar do alto custo inicial associado às lâmpadas mais eficientes, o investimento acaba por ser compensado em pouco tempo através do baixo consumo;

- em câmaras com um frequente n.º de acessos ao interior, pode interessar a integração de dispositivos de controlo automático da iluminação (sensores de infravermelhos e temporizadores (Figura 36)) que ativam a iluminação durante a presença de funcionários.



Figura 36 - Relógio temporizador (fonte: [7]).

- efetuar o projeto de iluminação de modo a fornecer uma intensidade luminosa entre 150 e 300  $\text{lm.m}^{-2}$ , considerados mais do que adequados para uma visualização confortável do espaço.

#### 1.4.1.3. Circulação forçada de ar

**Objetivo:** proporcionar uma boa transferência térmica entre o produto, o ar interior e o evaporador, para garantir um arrefecimento rápido sem dispêndio de energia adicional. O ar em circulação impede a concentração de humidade junto do evaporador, que poderia formar gelo com facilidade e reduzir o desempenho daquele.

**Estratégia:** acoplar ventiladores de circulação de ar no evaporador e no condensador, limitando a velocidade da corrente de forma a evitar a desidratação do produto e a dissipação exagerada de calor no motor elétrico.

Deve-se garantir um espaçamento adequado e uma boa organização dos produtos para favorecer uma corrente suficiente (dispondo-os, por exemplo, em "racks" para acondicionamento, Figura 37).



Figura 37 - Evaporador com ventiladores de circulação forçada de ar e "racks" para armazenamento dos produtos (fonte: [7]).

#### 1.4.1.4. Compensação do fator de potência

**Objetivo:** restringir o consumo de energia reativa necessária à criação dos campos magnéticos para a rotação do motor, que traz diversas desvantagens como:

- aumento da corrente elétrica nos cabos e, conseqüentemente, das perdas térmicas por efeito de Joule;
- penalizações na fatura energética (se o fator de potência ficar abaixo de 0,95, conforme regulamentado pela ERSE [22]);
- maior queda de tensão ao longo da linha de alimentação, podendo colocar em risco o funcionamento do compressor e a respetiva vida útil.

**Estratégias:** instalação de uma bateria de condensadores com capacidade adequada para limitar a energia reativa da rede (Figura 38), e num ponto do circuito o mais próximo possível do motor cujo consumo se pretende otimizar.



Figura 38 - Bateria de condensadores (fonte: [7]).

Se existirem grandes flutuações nas cargas elétricas ligadas à rede (e. g. compressor a trabalhar em regime de rotação variável) e a potência reativa for superior a 15 por cento da potência do posto de transformação, é sugerida a colocação de relés varimétricos que ajustam automaticamente a capacidade da bateria de condensadores de acordo com o necessário (Figura 39).



Figura 39 - Relé varimétrico (fonte: [7]).

#### 1.4.1.5. Isolamento térmico da câmara e do sistema de refrigeração

**Objetivo:** reduzir a entrada de calor pelos processos de condução e convecção, através das envolventes e da porta de serviço da câmara, assim como as transferências térmicas entre o fluido e o exterior.

**Estratégias:**

- vistoria e reparação periódica do isolamento térmico das envolventes (EPS, PUR, cortiça), pois têm tendência para se degradar com a humidade;
- utilizar tintas de cor clara na pintura das paredes exteriores, para atenuar a absorção de energia solar;
- em câmaras de acesso frequente, instalar antecâmaras climatizadas na entrada de serviço (Figura 40), com temperaturas entre 1,5 e 7 °C, para reduzir o fluxo de ar devido à diferença de pressões. Em alternativa, pode-se instalar cortinas em PVC, de ar ou portas automáticas;



Figura 40 - Antecâmara climatizada (fonte: [7]).

- isolar as tubagens do circuito de refrigeração com materiais de baixa condutibilidade térmica (PUR ou, preferencialmente, o neoprene, que é mais resistente e duradouro); esta medida permite uma poupança energética entre 5 e 10 por cento [17].

#### 1.4.1.6. Otimização do consumo energético do compressor

**Objetivo:** reduzir o consumo e aumentar a durabilidade do compressor, por se tratar de um componente que requer muita energia (potências até 100 kW) e por ser de alto custo.

### **Estratégias:**

- utilização de variadores eletrônicos de velocidade (VEV) para o arranque e paragem suaves do veio do motor, e também para o ajuste da velocidade de rotação em função da carga de refrigeração. O controlo, efetuado por um autómato cujos parâmetros são facilmente programáveis, baseia-se na variação da frequência de tensão aplicada ao motor, permitindo poupanças entre 20 e 25 por cento [23, 24]. Esses valores puderam ser constatados experimentalmente por parte de indústrias como a Johnson Controls, de acordo com Dieckmann *et al* [25].

Os VEV's reduzem o consumo, os picos de corrente no arranque (3 vezes superiores à corrente nominal [18]) e o esforço inicial do compressor, apesar de se gerarem harmónicos na rede responsáveis por vibrações nos motores e que devem ser suprimidos com equipamento adicional de proteção.



**Figura 41 - Variador eletrónico de velocidade (fonte: [7]).**

- manter um adequado nível de lubrificação das partes móveis do compressor;
- ligação de vários compressores em paralelo (Figura 42), ajustando-os em conformidade com as necessidades de refrigeração (e. g. somente um é ativo no inverno, mas no verão todos são ligados devido ao calor penetrante). Deste modo, não só se ajusta o consumo energético como também se evita o desgaste prematuro do compressor devido ao maior tempo de serviço.

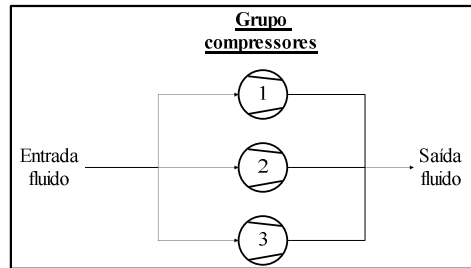


Figura 42 - Grupo de compressores ligados em paralelo (fonte: elaboração própria).

- instalação de motores de alta eficiência, que incluem diversos avanços tecnológicos ao nível dos materiais e da geração do campo magnético. Apesar do investimento inicial elevado (até 30 por cento superior), o retorno ocorre em geral após 3 anos. A Tabela 5 resume as poupanças energéticas na substituição dos motores convencionais (classe EFF1) pelos de alta eficiência (EFF3), para um regime de funcionamento de 4000 h.

Tabela 5 - Poupanças energéticas com a substituição dos motores convencionais pelos de alta eficiência, em função da potência útil (fonte: [23]).

Potência útil (kW)	4	22	45	75
Poupança energética (kW.h/ano)	900	2200	2900	3700
Poupança energética (%)	4,6	2,3	1,5	1,2

#### 1.4.1.7. Substituição do fluido refrigerante

**Objetivo:** reduzir o tempo de funcionamento do compressor devido à degradação química do fluido com o tempo ou a fugas microscópicas através das paredes das tubulações. A Figura 43 mostra que o consumo energético poderá aumentar entre 16 e 33 por cento ao fim de 10 anos, com a utilização dos fluidos R134a e R600a.

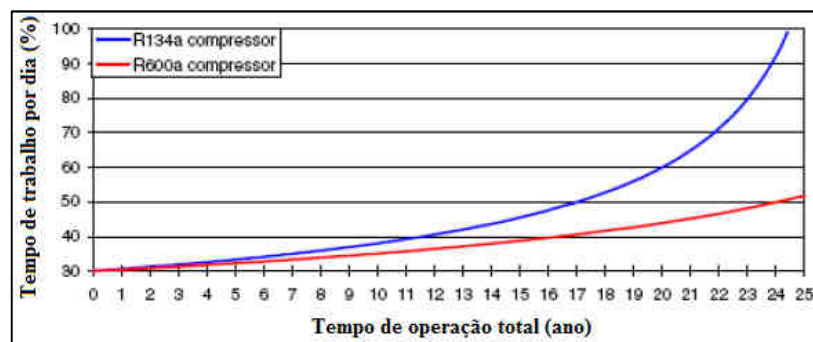


Figura 43 - Tempo de trabalho diário do compressor ao longo dos anos para os fluidos R134a e R600a (fonte: [26] (adaptado)).

Além disso, os fluidos que contêm cloro (CFC's e HCFC's) são responsáveis pela desagregação das moléculas da camada de ozônio e pelo aquecimento global, existindo restrições ao seu uso conforme imposto pelo Protocolo de Montreal e de Quioto.

**Estratégias:**

- mudar periodicamente o fluido refrigerante de acordo com o seu tempo de vida (cerca de 10 anos);
- adotar os cuidados especiais durante a injeção de fluido no circuito (remoção de todos os gases e humidade existente no circuito, limpeza das tubagens, teste de verificação de fugas);
- utilizar fluidos substitutos com baixos índices de ODP e de GWP (*global warming potential*), que podem gerar poupanças energéticas entre 2 e 20 por cento [23]; consultar a Tabela 6.

**Tabela 6 - Fluidos alternativos e condições para a sua substituição (fonte: [14] (adaptado)).**

Fluido a substituir (CFC ou HCFC)	Condições de refrigeração	Fluidos substitutos
R12	-25 a 0 °C	R134a, R290, R600a, R290.
R22	-25 a 0 °C, potência < 1 kW	R410a, R600
R22	-25 a 0 °C, potência > 10 kW	R717
R502	-50 a -25 °C	R507, R407a, R407b
R13	Inferior a -50 °C	R23

**1.4.1.8. Ajuste da temperatura interna da câmara**

**Objetivo:** evitar a degradação do produto e o consumo energético desnecessário, sempre que a temperatura interna se encontra demasiadamente baixa relativamente ao valor que é considerado suficiente para a conservação e sem que ocorram alterações no aspeto físico (caso das machas em certas frutas e vegetais).

**Estratégias:** ajuste do termóstato para regular as temperaturas de ativação e desativação do compressor no termóstato, de modo a se aproximarem do ponto de conservação (ver Tabela 2) e que o intervalo entre elas não seja nem muito pequeno (perigo de o compressor ligar e desligar frequentemente) nem muito grande (menor tempo de conservação do produto).

Esta medida permite a poupança de 1,5 a 3 por cento de energia por cada grau Celsius que se sobem as temperaturas de funcionamento do compressor [27].

#### 1.4.1.9. Controle do fluxo do refrigerante no circuito

**Objetivo:** ajustar o fluxo do fluido refrigerante de modo preciso que circula no sistema, de acordo com a quantidade de produto no interior e a carga térmica variável que deve ser removida, o que evita a geração de temperaturas internas inapropriadas.

**Estratégia:** substituir as válvulas de expansão termostáticas pelas do tipo eletrônico (Figura 44), que permitem regular automaticamente e de modo preciso o fluxo do fluido em função da temperatura à saída do evaporador (detetada por um sensor auxiliar), além de manter constante o diferencial de pressão entre condensador e evaporador. É possível obter ganhos energéticos até 10 por cento, aplicando esta medida [28].



Figura 44 - Válvula de expansão eletrônica comandada por eletroválvula (fonte: [7]).

#### 1.4.2. Tecnologias alternativas para a produção de frio

Diversas tecnologias com um princípio de funcionamento diferente do do ciclo por compressão têm vindo a surgir por apresentarem um conjunto de vantagens interessantes, embora muitas ainda estejam numa fase de desenvolvimento prematuro. O esquema da Figura 45 fornece uma panorâmica geral sobre as várias tecnologias conhecidas.

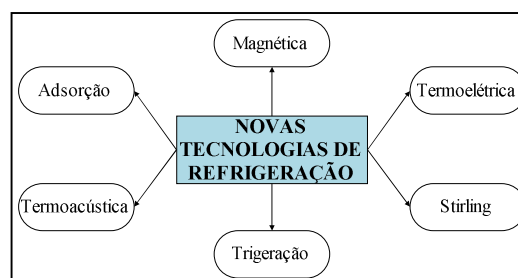


Figura 45 - Tecnologias de refrigeração alternativas (fonte: elaboração própria).

Na Tabela 7 é descrito resumidamente o princípio de funcionamento de cada uma dessas novas tecnologias, bem como as vantagens e desvantagens inerentes quando comparadas com o ciclo de compressão.

**Tabela 7 - Descrição de algumas das novas tecnologias de refrigeração 8 (fonte: [29]).**

Tipo refrigeração	Princípio de funcionamento	Vantagens / desvantagens
Adsorção	Absorção / expulsão alternada de um refrigerante (água) que transporta o calor retido da câmara, por parte de um material adsorvente (zeolite ou sílica-gel).	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Recuperação de calor dissipado noutros processos industriais ou do sol;</li> <li>▪ não possui partes móveis (e. g. compressor);</li> <li>▪ refrigeração mesmo em locais remotos de muito calor;</li> <li>▪ baixo COP (cerca de 0,7);</li> <li>▪ refrigeração só acima de 0 °C.</li> </ul>
Magnética	Um material magnetocalórico (gadolínio) é magnetizado / desmagnetizado alternadamente, para rejeitar ou absorver calor do refrigerante. A magnetização alinha os spins dos eletrões (entropia reduz), fazendo com que o material liberte calor; a desmagnetização faz o contrário.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Obtenção de temperaturas extremamente baixas (1 K);</li> <li>▪ sem substâncias inflamáveis;</li> <li>▪ baixo COP (máx. 1,8);</li> <li>▪ baixa capacidade de refrigeração dos materiais à temperatura ambiente.</li> </ul>
Trigeração	Consiste na obtenção de 3 formas energéticas a partir do calor numa caldeira: elétrica, térmica e refrigeração. Esta última resulta do transporte de calor efetuado por um refrigerante (água) que é absorvido / repellido alternadamente por um absorvente (brometo de lítio), por aquecimento ou arrefecimento da mistura.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Redução do consumo de combustível ou de outras fontes externas;</li> <li>▪ possível a adição de calor recuperado de outros processos (células de combustível, motores Stirling);</li> <li>▪ baixo COP (0,3 a 0,5);</li> <li>▪ custo da matéria-prima imprevisível (combustíveis fósseis);</li> <li>▪ muito utilizada na indústria alimentar.</li> </ul>
Termoelétrica	Eletrões excitados por uma fonte de tensão deslocam-se num material semicondutor, transportando calor de uma das suas faces para a outra (efeito Peltier).	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sem partes móveis;</li> <li>▪ controlo preciso da temperatura;</li> <li>▪ baixo peso e volume;</li> <li>▪ baixo COP (até 1,2);</li> <li>▪ baixa velocidade de extração de calor;</li> <li>▪ sensível a flutuações de tensão na rede;</li> <li>▪ crescente implementação no mercado.</li> </ul>
Termoacústica	Compressão / expansão dum gás num tubo por meio de ondas sonoras, cujas partículas se deslocam de modo periódico para transportar o calor.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sem gases inflamáveis;</li> <li>▪ temperaturas muito baixas (criogenia);</li> <li>▪ sem partes móveis;</li> <li>▪ baixo COP (máx. 1);</li> <li>▪ tecnologia muito prematura.</li> </ul>
Stirling	Movimento sincronizado de pistões comprimem / expandem o refrigerante (hélio) em 2 câmaras individuais, promovendo a absorção / expulsão de calor do sistema.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ COP moderado (1 a 3);</li> <li>▪ geração de temperaturas criogénicas;</li> <li>▪ encontra-se disponível no mercado;</li> <li>▪ preço elevado.</li> </ul>

### 1.5. Simulação do consumo energético em câmaras frigoríficas

Por simulação computacional entende-se como o ato de prever o comportamento ou a evolução de um conjunto de parâmetros associados a um sistema físico, a partir de dados iniciais previamente recolhidos e que são processados por um modelo matemático construído em computador. Este modelo recorre a equações matemáticas e algoritmos apropriados para o sistema que se deseja representar.

Adicionalmente, os modelos simuladores podem requerer a introdução de parâmetros de configuração, como a forma de apresentação dos resultados (outputs) ou o grau de precisão desejado para eles. O funcionamento genérico desses modelos encontra-se esquematizado na Figura 46.

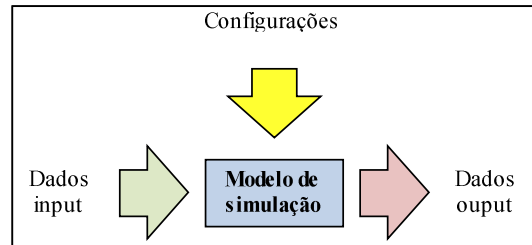


Figura 46 - Funcionamento de um modelo simulador (fonte: elaboração própria).

No caso do projeto e otimização do desempenho das câmaras frigoríficas, os modelos computacionais oferecem uma série de vantagens e desvantagens relativamente à construção de protótipos para experimentação, que são referidos na Tabela 8.

Tabela 8 - Vantagens e desvantagens da modelação computacional relativamente à prototipagem de câmaras frigoríficas (fonte: [30]).

Vantagens da modelação computacional	Desvantagens da modelação computacional
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Menor tempo de execução dos testes;</li> <li>▪ custos mais reduzidos (dispensa a conceção de protótipos);</li> <li>▪ desnecessária a aquisição de instrumentos de medida;</li> <li>▪ facilidade de modificação das condições de trabalho e dos aspetos construtivos do objeto modelado;</li> <li>▪ visualização gráfica dos resultados;</li> <li>▪ facilidade de adaptação a novos objetos a modelar (e. g. dum frigorífico para um aparelho de ar condicionado);</li> <li>▪ não requer a intervenção de uma grande equipa para a realização dos testes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Menos exata nos resultados;</li> <li>▪ falta de perceção do aspeto real do objeto;</li> <li>▪ não permite apurar todas as consequências de um problema passível de surgir (e. g. dimensão dos estragos causados pelo sobreaquecimento dum componente);</li> <li>▪ dificuldades na obtenção de uma opinião apreciativa do público sobre os resultados alcançados;</li> <li>▪ não cobre todas as condições de trabalho possíveis (limitação dos sistemas informáticos);</li> <li>▪ pode tornar-se instável durante a geração dos resultados.</li> </ul>

Apesar das desvantagens indicadas, a verdade é que nos últimos anos a simulação computacional tem vindo a ganhar maior relevo face à prototipagem, pois a evolução das capacidades de processamento dos computadores e a crescente qualificação de pessoal na área contribuíram para a melhoria da precisão dos resultados e para a modelação de sistemas e de ambientes de trabalho cada vez mais complexos.

A elaboração dum modelo simulador pressupõe, habitualmente, as seguintes etapas:

- definição específica do objeto e das condições de trabalho a modelar;
- divisão do objeto e das condições de trabalho em módulos mais simples (para facilitar a conceção);

- aplicação de expressões matemáticas para representar o funcionamento de cada módulo (e. g. equações de conservação de massa e energia);
- escrita do código computacional usando software adequado;
- validação do modelo, que permite apurar se os resultados obtidos se aproximam dos experimentais (precisão) e se o código executado é suficientemente rápido e estável.

Na etapa de afinação é comum o ajuste de coeficientes especiais utilizados em expressões matemáticas que servem para adequar os resultados obtidos à realidade. Na modelação de cada parte do objeto (etapa 2) é essencial a definição exata dos inputs e das condições dentro das quais o modelo deve operar, para não se correr o risco de o empregar em situações desajustadas.

Como se referiu, a modelação computacional de sistemas frigoríficos tornou-se num auxiliar precioso para a otimização daqueles, como se sucede com os dispositivos de distribuição do fluxo de ar e de calor no interior da câmara. Esta distribuição pode ser simulada recorrendo à técnica CFD (*Computational Fluid Dynamics*), que permite gerar uma representação visual das velocidades, temperaturas e sentido das massas de ar ao nível local e, em última instância, possibilita o cálculo da energia térmica contida no interior.

Uma simulação CFD pressupõe a execução de 3 passos [31]:

- **pré-processamento**, onde se define o desenho do espaço a simular e a sua divisão em elementos de volume numa quantidade suficiente que permita a obtenção de resultados com a precisão requerida; as condições iniciais (e. g. temperatura e pressão) e o tipo / propriedades do fluido em análise são aqui também determinadas (Figura 47).

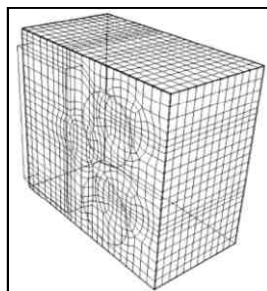


Figura 47 - Discretização do espaço interior de um chiller (fonte: [31]).

- **processamento**, durante a qual são resolvidas as equações do estado termodinâmico do fluido em cada célula da malha (baseadas na conservação de massa / energia). O processo é executado iterativamente em todo o espaço até que os resultados alcancem a

precisão desejada, apesar de vir a ser muito moroso se o número de células for muito elevado;

- **pós-processamento**, onde os resultados gerados são exportados para uma interface gráfica, que utiliza cores ou símbolos diferentes para os representar em cada ponto do espaço analisado. Nesta etapa procede-se ainda a uma avaliação crítica dos resultados, determinando se possuem significado físico e se se adequam à resolução do problema.

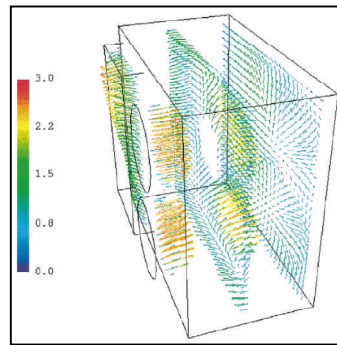


Figura 48 - Campo de velocidades e de sentidos dos fluxos de ar no interior dum chiller (fonte: [31]).

Existem estudos realizados com este método que conseguiram prever valores de temperatura interior com uma precisão de 3 por cento [32, 33], embora não possa ser utilizado para avaliar convenientemente o desempenho global do sistema de refrigeração pois não possibilita a simulação da parte que concerne aos componentes que efetuam as transformações físicas do fluido refrigerante.

A simulação do sistema de refrigeração como um todo passa por definir submodelos matemáticos para cada um dos quatro componentes básicos ali presentes (evaporador, compressor, condensador e dispositivo expensor), existindo partilha de dados entre eles conforme sugere a Figura 49 [30].

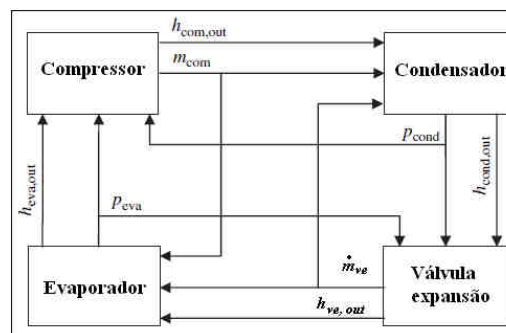


Figura 49 - Simulação de um sistema de refrigeração com partilha de dados entre os componentes (fonte: [30]).

Deste modo, um conjunto de inputs iniciais medidos em campo (temperatura exterior, características do produto acondicionado, ...) é processado pelo modelo através de equações para gerarem os outputs pretendidos (*COP*, temperatura da câmara, ...). A obtenção dos resultados finais e intermédios passa frequentemente pela aplicação de métodos iterativos que visam a resolução de equações diferenciais (método de Euler, Runge-Kutta, ...); neles, ocorre uma substituição sequencial dos inputs até que um critério de convergência para a precisão no resultado seja alcançado (Figura 50).

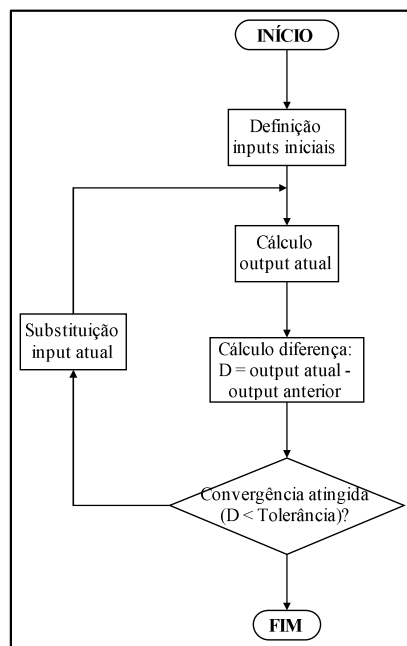


Figura 50 - Método iterativo para cálculo dos outputs (fonte: elaboração própria).

Em certas ocasiões, o número de inputs é relativamente grande, e aí já interessa estimar alguns deles indiretamente a partir de outros ou através de interpolações tabelares ou regressão polinomial [30].

O compressor é um elemento complexo de se modelar, e o método utilizado depende muito da precisão, do tempo disponível e da capacidade do computador para gerar os resultados. Existem duas técnicas de simulação básicas [30]:

- **simulação em regime estacionário**, onde se admite que o fluido circula de forma contínua e fluente, sem variação do fluxo mássico;
- **simulação em regime dinâmico**, o qual inclui o regime estacionário e ainda a fase transitória de arranque / paragem do compressor, durante a qual o fluido possui um fluxo e um escoamento irregular e complicado de se definir.

A simulação em regime dinâmico permite a geração de resultados para o consumo energético com erros na ordem de 2 por cento [34, 35]; apesar da boa precisão alcançada, necessita de um maior tempo de cálculo e de mais recursos do computador. Assim, a aplicação da técnica em regime estacionário simples pode ser vantajosa para suprimir aqueles inconvenientes à custa de uma precisão inferior (mínimo 5 por cento), nos casos em que tal se possa admitir [36].

São diversos os modelos de simulação que visam otimizar o desempenho de componentes específicos ou dos novos sistemas de refrigeração como os que aplicam o efeito Peltier [37, 38, 39]. Aquele que é referido em [40] permite a simulação de câmaras frigoríficas de um modo genérico: por alteração ou otimização de diversos parâmetros de entrada obtêm-se estimativas para grandezas finais de interesse como a energia consumida ou a temperatura interior. O método de cálculo baseia-se na modelação dos vários componentes (conforme explicado anteriormente) e, ainda, na determinação das várias cargas térmicas que penetram no interior (e. g. ar quente, iluminação e pessoas), um princípio que irá também ser aplicado no modelo do presente trabalho.

O futuro da modelação de sistemas frigoríficos prossegue no sentido de se desenvolver soluções que, tendo por base os resultados de uma simulação executada, sejam capazes de os analisar e de decidir qual a melhor estratégia para resolver um problema prévio, tarefa que até então cabia ao projetista [30]. Isto tem um enorme interesse na definição das melhores medidas de eficiência energética a aplicar a uma câmara, com vista a reduzir o consumo e a facilitar a tarefa do técnico nas situações em que a análise se torna demasiado complexa.

## **1.6. Objetivos gerais e específicos do trabalho**

Atendendo à importância que a racionalização energética desempenha nas receitas das empresas agroindustriais, na melhoria da competitividade e na responsabilidade ambiental, o presente trabalho vem assim com o objetivo geral de analisar o perfil energético desse setor e identificar práticas capazes de contribuir para a redução de consumos de energia e de custos associados.

Para o cumprimento dessa meta abrangente definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- analisar os dados recolhidos de uma amostra de empresas do ramo agroindustrial, com vista a caracterizar o perfil energético por fileira;
- desenvolver uma metodologia para simulação e otimização do consumo energético das câmaras frigoríficas existentes no processo produtivo;
- identificar medidas de eficiência energética aplicáveis em câmaras frigoríficas e avaliar a sua implementação em termos de poupança no consumo efetivo e nos custos de energia.

## **2. METODOLOGIA**

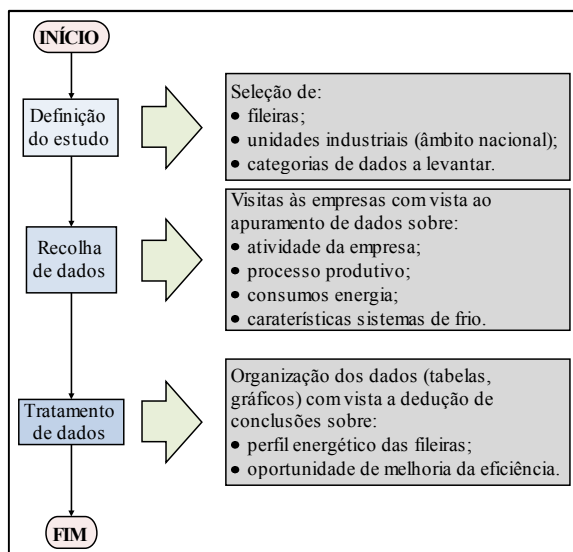
O trabalho que se apresenta encontra-se dividido em duas partes fundamentais e que correspondem a dois tipos de metodologia utilizadas, havendo pois necessidade de as explicar separadamente. Essas partes são:

- análise e melhoria do perfil energético no setor agroindustrial, que pretende caracterizar as empresas desse setor quanto aos hábitos de consumo de energia (em especial nos sistemas de refrigeração) e avaliar a relação entre esse consumo e a dimensão / nível de produção das empresas, através da análise aos dados recolhidos por inquérito e por auditoria energética. Posteriormente avaliou-se a influência de um conjunto de medidas no sentido de melhorar o desempenho energético das mesmas;
- definição e aplicação de uma metodologia para simular e otimizar o consumo energético em câmaras frigoríficas, através do cálculo das necessidades energéticas ideais para esses sistemas e da avaliação de viabilidade económica na implementação de um conjunto de medidas de eficiência energética (MEE) a testar.

Neste capítulo são expostas individualmente as metodologias adotadas em cada parte.

### **2.1. Análise e melhoria do perfil energético no setor agroindustrial alentejano**

Este estudo resume-se nas etapas descritas na Figura 51. O trabalho referido nas duas primeiras etapas foi previamente elaborado no âmbito do Projeto InovEnergy - Eficiência Energética no Setor Agroindustrial, financiado pelo programa Compete e enquadrado no QREN (Quadro de Referência Estratégica Nacional) que visa promover a competitividade empresarial ao nível regional [41].



**Figura 51 - Etapas para o estudo do perfil energético das empresas do setor agroindustrial (fonte: elaboração própria).**

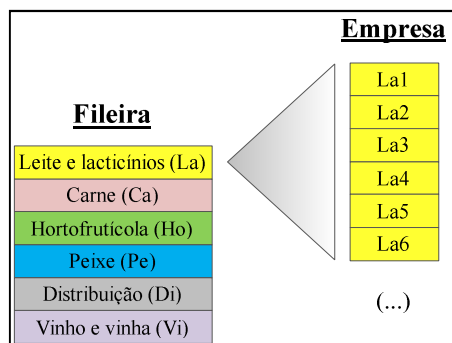
### 2.1.1. Seleção e recolha da informação

Considerando a vastidão dos produtos alimentares finais e dos processos de fabrico utilizados, a caracterização foi efetuada de forma independente para 6 fileiras de estudo, conforme se indica na Tabela 9.

**Tabela 9 - Fileiras de estudo seleccionadas e siglas de referência (fonte: elaboração própria).**

Fileira de estudo	Sigla
Leite e lacticínios	La
Carne	Ca
Hortofrutícola	Ho
Peixe	Pe
Distribuição	Di
Vinho e vinha	Vi

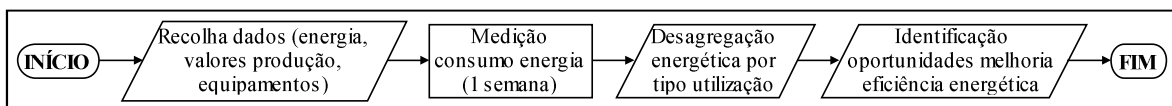
A análise foi efetuada para uma amostra de 36 empresas, distribuídas uniformemente pelas fileiras (6 em cada uma). As empresas não serão identificadas pelos respetivos nomes mas antes por designações de referência, compostas pela sigla da fileira seguida do respetivo número. A Figura 52 mostra um exemplo para a referenciação das empresas da fileira do leite e lacticínios, sendo a mesma técnica aplicável às restantes.



**Figura 52 - Designações usadas para referência das empresas na fileira leite e laticínios (fonte: elaboração própria).**

A informação obtida sobre cada empresa classifica-se em 6 categorias principais: identificação, recursos humanos e finanças, produção, fontes de energia e sistemas de refrigeração. Esta informação foi recolhida com base num inquérito inicial efetuado em campo e tem como referência o ano de 2010. Porém, nos casos em que se tornou inviável apurar dados para esse período, procedeu-se à sua recolha para os anos de 2011 e 2012, altura durante a qual o inquérito decorreu.

Posteriormente foi realizada uma auditoria energética por uma entidade independente em duas empresas por fileira (designadas por unidades piloto), para avaliar detalhadamente o padrão de consumo de energia durante uma semana e identificar oportunidades de melhoria geral com vista à respetiva otimização. A medição de energia foi efetuada ao nível global e por tipo de utilização (climatização, produção de frio e calor, iluminação, ...). Resumidamente, estas auditorias consistiram numa sequência de tarefas conforme explicita o fluxograma da Figura 53.



**Figura 53 - Resumo das etapas para a execução das auditorias energéticas (fonte: elaboração própria).**

As unidades piloto que foram auditadas em cada fileira são as que constam na Tabela 10.

**Tabela 10 - Unidades piloto que foram sujeitas à auditoria energética (fonte: elaboração própria).**

Fileira	Unidades piloto auditadas
La	La3, La4
Ca	Ca2, Ca5
Ho	Ho4, Ho5
Pe	Pe1, Pe6
Di	Di2, Di6
Vi	Vi2, Vi4 <sup>1</sup>

A Tabela 11 exhibe os dados utilizados no estudo elaborado, de modo a retirar conclusões a respeito da caracterização dimensional e tipologia das empresas, do perfil energético e da identificação de medidas previamente implementadas que visam otimizar os consumos e custos energéticos atuais.

**Tabela 11 - Categorias e questões introduzidas no inquérito (fonte: elaboração própria).**

Categoria	Questão
Identificação da empresa	Nome
	Atividade
Recursos humanos e finanças	N.º trabalhadores
	Investimento em equipamentos para melhoria da eficiência energética
Produção	Matéria-prima e quantidades
	Produtos finais e quantidades
	Fluxograma processo produtivo
Fontes de energia	Tipo de fontes utilizadas
	Consumos anuais por fonte
	Custos anuais por fonte
	Tipo de tarifário de energia elétrica
	Desagregação dos consumos por tipo de utilização (iluminação, aquecimento, arrefecimento, frio, ar comprimido, ventilação, produção vapor e AQS (águas quentes sanitárias))
	Equipamentos adquirido para melhoria da eficiência energética
Sistemas de refrigeração	Potência compressores
	Potência total sistemas de refrigeração
	Energia consumida
	Tipologia dos sistemas (câmaras, túneis do processo produtivo)
	N.º de sistemas existentes

### 2.1.2. Tratamento e análise estatística aos dados recolhidos

Com o conjunto de dados levantados anteriormente, procedeu-se à caracterização energética de cada fileira para avaliar o seu desempenho energético através da construção e análise de tabelas, gráficos e cálculo de variáveis relevantes associados ao processo produtivo das empresas de um ponto de vista global. Posteriormente efetuou-se um estudo mais específico e dirigido aos consumos e desempenhos energéticos dos sistemas de refrigeração existentes, como forma de neles identificar oportunidades de melhoria para redução da energia admitida.

<sup>1</sup> No momento da elaboração do trabalho, o relatório de auditoria para a empresa Vi4 ainda não se encontrava concluído, pelo que daqui em diante admitiu-se que a empresa Vi2 é representativa da fileira.

É de destacar que a presente análise não pretende estabelecer uma comparação ao desempenho energético entre as várias fileiras, porque os processos produtivos e as necessidades de cada uma são diferentes e variam em termos de complexidade.

De seguida apresenta-se a lista de tarefas que foram executadas durante este estudo:

- classificação dimensional das empresas;
- análise aos consumos e custos de energia;
- tipos de equipamentos previamente instalados para otimização da eficiência energética nos processos produtivos;
- cálculo de indicadores de análise energética;
- modelação da relação existente entre o consumo específico de energia (*CEE*) e a produção anual das empresas, por fileira;
- determinação da fração de energia elétrica utilizada para alimentar as câmaras frigoríficas, por fileira;
- avaliação do impacto da implementação de medidas de eficiência nas câmaras, em termos de poupança energética providenciada.

### **2.1.2.1. Classificação dimensional das empresas**

A classificação dimensional baseou-se no decreto-lei n.º 372/2007 (*cit. in IAPMEI [42]*), que define as classes a utilizar para todas aquelas que se inserem na categoria das PME (pequenas e médias empresas). Esta classificação é atribuída observando dois indicadores:

- n.º médio de trabalhadores efetivos;
- volume de negócios anual.

Devido à inexistência de alguns dados referentes ao volume de negócios gerados pelas empresas, a classificação dimensional apoiou-se exclusivamente no n.º de trabalhadores efetivos. A Tabela 12 explicita os critérios que foram adotados para determinar essa classificação.

**Tabela 12 - Critérios para a classificação dimensional das empresas em função do n.º de trabalhadores efetivos (fonte: [42]).**

Classificação	N.º trabalhadores efetivos
Micro	Menor que 10
Pequena	Entre 10 e 50
Média	Maior ou igual a 50

Com o n.º de trabalhadores apurados em cada empresa e recolhido através do inquérito (ver anexo I), construiu-se um gráfico comparativo com o número de empresas pertencentes a cada classificação, que se ilustra nos resultados do presente trabalho.

### 2.1.2.2. Consumos totais, custos totais e custos específicos de energia das empresas

Considerando que as empresas analisadas necessitaram de fontes energéticas diversas para o funcionamento dos respetivos processos operativos (energia elétrica, gasóleo e gás propano), houve necessidade de converter os consumos anuais de cada fonte para uma única unidade energética, o que facilita a comparação de valores. Deste modo, procedeu-se à conversão dos consumos de cada fonte para tep (tonelada equivalente de petróleo), aplicando os fatores constantes da Tabela 13.

**Tabela 13 - Fatores de conversão dos consumos das fontes energéticas para tep (fonte: [43]).**

Fonte energética	Fator conversão para tep, $F_{tep}$
Energia elétrica	$2,150 \times 10^{-4} \text{ tep} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$
Gasóleo	$1,022 \times 10^{-3} \text{ tep} \cdot \text{kg}^{-1}$
Gás propano	$1,115 \times 10^{-3} \text{ tep} \cdot \text{kg}^{-1}$

Como os dados relativos ao consumo de gasóleo encontram-se expressos em litro, houve necessidade de converter esses valores para quilograma recorrendo ao conceito de densidade mássica ( $\rho$ ). Para tal, admitiu-se que a sua densidade mássica é  $\rho_{\text{gasóleo}} = 845 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  [44].

Abaixo se apresenta a fórmula aplicada para a obtenção do valor energético em tep ( $E_{\text{fonte } i \text{ tep}}$ ) a partir dos consumos anuais da fonte  $i$  ( $E_{\text{fonte } i}$ , que pode ser a energia elétrica, o gasóleo e o gás), tendo em conta os fatores de conversão ( $F_{\text{tep}}$ ) indicados na Tabela 13.

$$E_{\text{fonte } i \text{ tep}} = F_{\text{tep}} \cdot E_{\text{fonte } i} \quad (2)$$

Para o gásóleo, a mesma fórmula teve de ser sujeita a uma modificação para contabilizar a conversão entre massa e volume recorrendo à densidade mássica  $\rho_{\text{gásóleo}}$ , o que resultou na seguinte expressão:

$$E_{\text{fonte } i \text{ tep}} = F_{\text{tep}} \cdot \rho_{\text{gásóleo}} \cdot E_{\text{fonte } i} \quad (3)$$

Por utilização das fórmulas anteriores e dos dados recolhidos associados aos consumos de energia anuais (2010<sup>2</sup>) das várias fontes (ver anexo I), construiu-se uma tabela com os resultados desses consumos convertidos para tep, juntamente com a indicação do peso de cada fonte relativamente ao consumo total. Foram também esboçados os gráficos correspondentes ao consumo de cada tipo de fonte para se proceder a uma análise comparativa entre empresas e aferir quais as fontes mais relevantes em termos de consumo.

Com o mesmo objetivo se procedeu igualmente relativamente aos custos que cada empresa suportou com as fontes energéticas utilizadas.

O custo específico de energia (ou custo por unidade de energia consumida) em cada empresa foi determinado segundo o tipo de fonte utilizada e, também, para o total global de energia admitida.

O cálculo do custo específico de energia para cada fonte ( $\bar{c}_{\text{fonte } i}$ , em €/tep) foi efetuado empregando a fórmula:

$$\bar{c}_{\text{fonte } i} = \frac{C_{\text{fonte } i}}{E_{\text{fonte } i}} \quad (4)$$

onde  $C_{\text{fonte } i}$  é o custo anual da energia proveniente da fonte  $i$  (em €) e  $E_{\text{fonte } i}$  é o consumo anual de energia da fonte  $i$  (em tep).

No custo específico de energia global ( $\bar{c}_{\text{global}}$ ) considerou-se o somatório de todas as fontes utilizadas, sendo determinado pela expressão:

$$c_{\text{global}} = \frac{C_{\text{total}}}{E_{\text{total}}} \quad (5)$$

---

<sup>2</sup> Alguns dados são relativos a 2011 e 2012, por não ter sido possível a sua obtenção para 2010.

Neste caso,  $C_{total}$  representa o custo do total anual da energia utilizada (em €) e  $E_{total}$  é a energia total anual que foi consumida (em tep).

O cálculo destas grandezas permitiu avaliar quais as empresas que pagaram mais pela energia consumida, através da comparação dos custos obtidos para cada uma delas.

### 2.1.2.3. Instalação de equipamentos para melhoria da eficiência energética

Para melhor entender o nível de adesão das empresas às novas tecnologias de eficiência energética e a sua preocupação com a utilização racional de energia, foi efetuado um estudo sobre os tipos de equipamentos para otimização energética que já foram instalados.

O levantamento desta informação encontra-se sumariado no anexo I, encontrando-se consolidada e avaliada nos resultados do trabalho.

### 2.1.2.4. Cálculo dos índices específicos de energia

Para avaliar a relação existente entre a energia consumida e as variáveis produção anual e emissão de GEE foram calculados dois índices específicos de energia, definidos no regulamento do SGCIE [5]:

- consumo específico de energia ( $CEE$ ) - relação entre o consumo energético anual ( $E_{total}$ ) e a produção total anual ( $m_{produção}$ ) registadas na empresa:

$$CEE = \frac{E_{total}}{m_{produção}} \quad (6)$$

- intensidade carbónica ( $IC$ ) - relação entre a quantidade emitida de GEE ( $m_{GEE}$ ) e o consumo energético ( $E_{total}$ ) registados na empresa ao longo do ano:

$$IC = \frac{m_{GEE}}{E_{total}} \quad (7)$$

O primeiro indicador permite adquirir uma perceção da quantidade de energia para

produzir 1 kg de produto, enquanto o segundo refere-se à quantidade de GEE expelidos por cada unidade de energia consumida. O *IC* depende, fundamentalmente, do tipo de fontes de energia utilizadas e das ponderações de cada uma relativamente à energia total admitida.

As quantidades de vinho levantadas na fase de inquérito foram quantificadas em litro, pelo que teve de se proceder à conversão desses volumes para massa por utilização da densidade mássica desse produto ( $0,99 \text{ kg.dm}^{-3}$  [45]).

A quantificação da emissão total de GEE ( $m_{GEE}$ ) gerados a partir da utilização das três fontes energéticas em consideração - energia elétrica, gasóleo e gás propano - foi determinada pela fórmula:

$$x_{GEE} = \sum_{i=1}^3 (F_{GEE} \times E_{\text{fonte } i \text{ tep}}) \quad (8)$$

Neste caso,  $F_{GEE}$  refere-se ao fator de emissão de GEE originados pela fonte energética  $i$  (ver Tabela 14) e  $E_{\text{fonte } i \text{ tep}}$  é o consumo energético anual dessa mesma fonte (em tep).

**Tabela 14 - Fatores de emissão de GEE associados às fontes energéticas empregues (fonte: [43]).**

Fonte energética	Fator emissão GEE, $F_{GEE}$
Energia elétrica	$0,47 \text{ kgCO}_2\text{eq.}(\text{kW.h})^{-1}$
Gasóleo	$3098 \text{ kgCO}_2\text{eq.tep}^{-1}$
Gás propano	$2637,7 \text{ kgCO}_2\text{eq.tep}^{-1}$

No cálculo da emissão de GEE, o fator de emissão para a energia elétrica indicado no quadro foi convertido para a unidade  $\text{kgCO}_2\text{eq.tep}^{-1}$  por utilização do fator de conversão entre tep e kW.h ( $F_{\text{tep}} = 2,15 \times 10^{-4} \text{ tep.}(\text{kW.h})^{-1}$ ), conforme indicado na Tabela 13. Assim, o novo fator de emissão vale:

$$F_{GEE} = 0,47 \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{kW.h}} = 0,47 \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{2,15 \times 10^{-4} \text{ tep}} \approx 2186 \text{ kgCO}_2\text{eq.tep}^{-1}$$

No anexo II são discriminadas as quantidades anuais de produto final recolhidos na fase de inquérito, ao longo de 2010.

Nos resultados deste trabalho são mencionados os valores de produção final convertidos para kg, juntamente com os índices *CEE* e *IC* relativos a cada empresa.

### 2.1.2.5. Modelação da função *CEE* vs produção total anual

Na avaliação do desempenho energético das diversas empresas, houve interesse em averiguar como varia o *CEE* com a produção total anual em cada uma delas. Espera-se que as curvas gráficas que definem a relação entre as duas variáveis possam servir como patamar de referência para definir que empresas possuem um *CEE* acima da média e que deverão ser alvo da aplicação de medidas de eficiência energética mais extensivas e prioritárias. Estas curvas apenas fazem sentido quando são construídas para cada fileira específica.

De acordo com os resultados do presente trabalho, a relação entre as variáveis *CEE* e a produção total segue um padrão inversamente proporcional em acordo com a equação

$$y = a \cdot x^b \quad (9)$$

onde  $y$  representa o *CEE* estimado (em tep/kg),  $x$  é a produção anual (em kg) e  $a$  e  $b$  são constantes a apurar mediante técnicas de regressão estatística.

A eq. 9 descreve uma correlação não linear e, para se determinar as constantes  $a$  e  $b$ , teve de ser transformada numa função afim para que seja possível a utilização do método de regressão linear [46]. Para esse fim, a mesma função pode ser reescrita para a seguinte forma:

$$y = a \cdot x^b \cdot u \quad (10)$$

onde  $u$  designa uma constante adicional representativa do erro médio entre a curva da função e os pares de pontos  $(x_i; y_i)$  que correspondem aos valores experimentais do *CEE* e de produção obtidos no inquérito. Neste caso e por observação da Figura 83, foi razoável admitir-se que o erro médio é aleatório, o que corresponde a dizer que  $u = 1$  [46].

Aplicando logaritmos naturais, a eq. 10 virá dada por

$$\ln(y) = \ln(a) + b \cdot \ln(x) + \ln(u) \Leftrightarrow \ln(y) = \ln(a) + b \cdot \ln(x) \quad (11)$$

Note-se que, na expressão anterior,  $\ln(u) = \ln(1) = 0$ .

Substituindo na eq. 11 as expressões  $y_l = \ln(y)$ ,  $a_l = \ln(a)$ ,  $b_l = b$  e  $x_l = \ln(x)$ , resulta

em:

$$y_1 = a_1 + b_1 \cdot x_1 \quad (12)$$

e a fórmula passou a ter a forma duma função afim, restando agora calcular os parâmetros de estimação  $a_1$  e  $b_1$  através das expressões de regressão linear [47]:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^6(x_{1i} \cdot y_{1i}) - \frac{1}{6} \times \sum_{i=1}^6(x_{1i}) \times \sum_{i=1}^6(y_{1i})}{\sum_{i=1}^6(y_{1i})^2 - \frac{1}{6} \times (\sum_{i=1}^6(x_{1i}))^2} \quad (13)$$

$$a_1 = \frac{1}{6} \times (\sum_{i=1}^6(y_{1i}) - b_1 \times \sum_{i=1}^6(x_{1i})) \quad (14)$$

Os valores de  $x_{1i}$  e  $y_{1i}$  correspondem, respetivamente, ao *CEE* e à produção anual total obtidos através do inquérito a cada uma das 6 empresas por fileira (sendo portanto  $n = 6$ ).

O coeficiente de correlação linear (isto é, de concordância entre os dados experimentais e a curve obtida pelas expressões) vem medido por

$$R^2 = \frac{b_1 \times \sum_{i=1}^6(x_{1i} \cdot y_{1i}) - \frac{1}{6} \times \sum_{i=1}^6(x_{1i}) \times \sum_{i=1}^6(y_{1i})}{\sum_{i=1}^6(y_{1i})^2 - \frac{1}{6} \times (\sum_{i=1}^6(y_{1i}))^2} \quad (15)$$

Efetuando a reconversão das variáveis do modelo de regressão linear ( $a_1$ ,  $b_1$ ,  $x_{1i}$  e  $y_{1i}$ ) para o modelo não linear ( $a$ ,  $b$ ,  $x_i$  e  $y_i$ ) vem:

$$y_{1i} = \ln(y_i) \quad (16)$$

$$x_{1i} = \ln(x_i) \quad (17)$$

$$a_1 = \ln(a) \Leftrightarrow a = \exp(a_1) \quad (18)$$

$$b = b_1 \quad (19)$$

Substituindo as eq. 16 - 19 nas eq. 13 - 15 obtiveram-se as expressões finais para o cálculo das constantes existentes no modelo de regressão potencial pretendido ( $y = a \cdot x^b$ ):

$$b = \frac{\sum_{i=1}^6 (\ln(x_i) \cdot \ln(y_i)) - \frac{1}{6} \times \sum_{i=1}^6 (\ln(x_i)) \times \sum_{i=1}^6 (\ln(y_i))}{\sum_{i=1}^6 (\ln(y_i))^2 - \frac{1}{6} \times (\sum_{i=1}^6 (\ln(x_i)))^2} \quad (20)$$

$$a = \exp\left(\frac{1}{6} \times (\sum_{i=1}^6 (\ln(y_i)) - b \times \sum_{i=1}^6 (\ln(x_i)))\right) \quad (21)$$

$$R^2 = \frac{b \times \sum_{i=1}^6 (\ln(x_i) \cdot \ln(y_i)) - \frac{1}{6} \times \sum_{i=1}^6 (\ln(x_i)) \times \sum_{i=1}^6 (\ln(y_i))}{\sum_{i=1}^6 (\ln(y_i) - \frac{1}{6} \times \sum_{i=1}^6 (\ln(y_i)))^2} \quad (22)$$

Para cada uma das fileiras foi determinada a equação de regressão potencial que melhor ajusta o *CEE* com a produção anual total, através do cálculo das constantes *a* e *b* com as fórmulas anteriormente deduzidas. A avaliação da associação entre a curva estimada e os dados experimentais levantados foi efetuada pelo coeficiente de correlação  $R^2$ . Esta análise encontra-se na secção dos resultados.

### 2.1.2.6. Peso do consumo das câmaras frigoríficas no total de energia elétrica admitida nas empresas

Este cálculo teve por base os dados referentes à desagregação dos consumos anuais de energia elétrica por tipologia de utilização nas 11 empresas que foram sujeitas à auditoria energética (2 por fileira<sup>3</sup>). De acordo com os relatórios obtidos, os resultados da desagregação anual referentes a 2012 estão discriminados segundo o tipo de uso e de processo operativo (ver anexo III).

A determinação do peso do consumo de energia elétrica dedicada às câmaras frigoríficas foi efetuada através das etapas:

- seleção e soma de todos os consumos medidos relacionados com as câmaras;
- cálculo do consumo de energia elétrica total relevante na empresa (somente associada à transformação de matéria-prima, pois o projeto diz respeito à indústria transformadora);
- cálculo do peso de energia dedicada às câmaras relativamente ao total consumido, para cada empresa;
- cálculo da média e da diferença absoluta dos pesos encontrados anteriormente, para

---

<sup>3</sup> Uma, no caso da fileira vinho e vinha, pelo motivo de um dos relatórios de auditoria não se encontrar concluído.

apurar a representatividade dos consumos dos sistemas de refrigeração por fileira.

Nas tabelas incluídas no anexo III, as câmaras frigoríficas fazem parte de processos operativos ou espaços industriais específicos (central de frio, armazéns, ...). Estes processos e espaços de interesse são identificados nos resultados do presente trabalho.

Os consumos considerados no cálculo da energia dedicada às câmaras para cada uma das empresas foram:

- o da iluminação existente no interior;
- o dos circuitos de refrigeração localizados nas instalações (compressor, ventiladores dos evaporadores e condensadores e restantes equipamentos acessórios);
- o das tomadas para carga dos sistemas de frio estático existentes nos veículos transportadores (fileira distribuição).

Desta forma e de acordo com os dados disponibilizados, o consumo de energia elétrica das câmaras resultou da soma dos valores presentes nas rubricas "Iluminação" e "Frio", dentro dos processos operativos e espaços onde elas estavam instaladas<sup>4</sup>.

Quanto ao consumo de energia elétrica total relevante, este teve apenas em conta os referentes aos processos de transformação de matéria-prima e não aos da sua colheita. Deste modo, esse consumo corresponde ao valor total medido nas empresas (linha "Total" das tabelas), com exceção da Ho5 onde existe um sistema para bombeamento de água de rega a distribuir num pomar (colheita de fruta). Neste caso, o consumo relevante será o valor total de energia subtraído do valor presente na rubrica "Sistema abastecimento de água e rega".

A percentagem de energia elétrica utilizada pelas câmaras em cada empresa ( $s_i$ ) foi determinada através do consumo efetivo a elas reservado ( $E_{câmara\ empresa\ i}$ ) e do consumo total relevante na empresa  $i$  ( $E_{relevante\ empresa\ i}$ ), por meio da expressão:

$$s_i = \frac{E_{câmara\ empresa\ i}}{E_{relevante\ empresa\ i}} \times 100 \quad (23)$$

A percentagem média de energia elétrica dedicada às câmaras por fileira ( $\bar{s}$ ) foi

---

<sup>4</sup> Exceto para o espaço "Parque de viaturas" existente na empresa Di2, onde apenas se considerou a rubrica "Frio". Nesse espaço não existem câmaras frigoríficas mas antes tomadas para carga dos sistemas de frio dos veículos.

apurada aplicando a média dos pesos calculados pela eq. 21 para cada uma das 2 empresas pertencentes à mesma fileira:

$$\bar{s} = \frac{s_1 + s_2}{2} \quad (24)$$

Para verificar o grau de confiança acerca da representatividade desta média em toda a fileira, foi ainda calculada a diferença absoluta entre as frações determinadas pela fórmula anterior ( $|\Delta s|$ ):

$$|\Delta s| = |s_1 - s_2| \quad (25)$$

### **2.1.2.7. Seleção e análise do impacto de MEE nos consumos e custos energéticos das empresas**

Para este estudo foram avaliadas duas das medidas de eficiência energética (MEE), de forma a aferir o impacto produzido nos consumos e custos globais de energia. As medidas selecionadas foram:

- MEE 1: instalação de dispositivos eCube<sup>5</sup>;
- MEE 2: instalação de variadores eletrónicos de velocidade (VEV) nos compressores<sup>6</sup>;
- MEE 3: afinação da bateria de condensadores;
- MEE 4: substituição das caldeiras a gás ou gasóleo por caldeiras a biomassa.

O estudo foi realizado apenas para as 12 empresas submetidas às auditorias energéticas (duas por fileira), dado que elas foram as únicas das quais se dispôs informação detalhada sobre a desagregação dos consumos e das potências dos equipamentos instalados. A análise de cada MEE seguiu as etapas da Figura 54.

---

<sup>5</sup> Não aplicável à empresa La3 por já ter integrado este dispositivo nas suas câmaras.

<sup>6</sup> Existentes nas câmaras frigoríficas e nos túneis de congelação do processo produtivo.

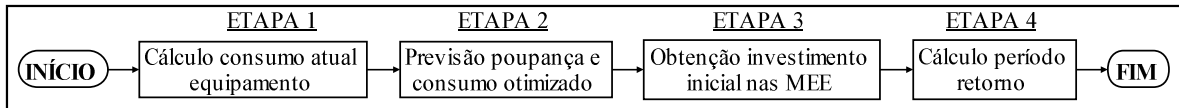


Figura 54 - Etapas para avaliação das MEE selecionadas (fonte: elaboração própria).

Abaixo se descreve cada uma das etapas:

- **etapa 1:** as MEE 1 e 2 implicaram a determinação quer do consumo atual do circuito de frio ( $E_{circuito\ frio\ atual}$ ), quer dos compressores no seu conjunto ( $E_{compressores\ atual}$ ). No caso da instalação do eCube, a poupança foi apurada relativamente ao consumo do circuito de frio determinado no subcapítulo anterior. Por outro lado, a análise da instalação dos VEV nos compressores pressupôs o conhecimento do consumo desses componentes. Admitindo que todos os órgãos dos sistemas de frio funcionam em simultâneo (compressores e ventiladores dos condensadores e evaporadores), a razão do consumo dos compressores ( $E_{compressores\ atual}$ ) relativamente à energia total absorvida pelo circuito de frio das câmaras ( $E_{circuito\ frio\ atual}$ ) é a mesma que existe entre a potência dos compressores ( $P_{compressores}$ ) e a potência total do circuito de frio ( $P_{circuito\ frio}$ ); a partir daqui, a energia dos compressores vem deduzida pela fórmula:

$$\frac{E_{compressores\ atual}}{E_{circuito\ frio\ atual}} = \frac{P_{compressores} \times t}{P_{circuito\ frio} \times t} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow E_{compressores\ atual} = \frac{P_{compressores} \times E_{circuito\ frio\ atual}}{P_{circuito\ frio}} \quad (26)$$

As potências em jogo encontram-se no anexo IV, enquanto os consumos energéticos dos circuitos de frio são os mesmos que se obtiveram no subcapítulo anterior<sup>7</sup>.

O custo associado aos consumos atuais dos circuitos de frio resultaram da multiplicação desses consumos pelo preço médio da energia elétrica, expresso em €/tep. A média baseou-se nos preços para as tarifas reguladas de 2014 definidas pela ERSE [22], correspondentes à baixa tensão normal (potência acima de 27,6 kVA), baixa tensão especial e média tensão, o que resultou num valor de  $\bar{c}_{energia\ elétrica} = 0,11$  €/kW.h ou 511,63 €/tep. O motivo da seleção daqueles tarifários e não de outros prende-se com o facto de terem sido adotados pela maioria das empresas em 2012.

Para a MEE 3 (afinação da bateria de condensadores) foram utilizados os valores de

<sup>7</sup> No caso da empresa Di2, apenas foi considerado o consumo das câmaras frigoríficas estáticas e não o das tomadas para carregamento dos sistemas de frio dos veículos.

energia reativa indutiva (consumida) e capacitiva (fornecida à rede) constantes nas faturas de energia elétrica e que são penalizados pelos respectivos fornecedores. Estes valores estão discriminados no anexo I, de acordo com os escalões definidos em função do fator de potência apurado pelos contadores das empresas (ver Tabela 15).

O custo atual de energia reativa foi determinado em função dos consumos por escalão e dos tarifários adotados. Dentro das empresas que foram auditadas, os tarifários utilizados são os da média tensão (MT), da baixa tensão especial (BTE) e baixa tensão normal (BTN), sendo que nos dois primeiros se consideram as penalizações por consumos de energia reativa. Assim, os preços utilizados (em €/kVAr.h) resultam da média entre a MT e a BTE e estão especificados na Tabela 15.

**Tabela 15 - Escalões e preços médios de energia reativa (fonte: [22]).**

Tipo energia reativa	Escalão	Intervalo fator de potência (cos(φ))	Preço (€/kVAr.h)
Indutiva	1	0,93 < cos(φ) ≤ 0,96	0,0081
	2	0,89 < cos(φ) ≤ 0,93	0,0246
	3	cos(φ) ≤ 0,89	0,0738
Capacitiva	-	-	0,0185

O custo total de energia reativa consumida ( $C_{reativa}$ ), em €, é dado pela expressão:

$$C_{reativa} = E_{indutiva\ esc\ 1} \times \bar{c}_{indutiva\ esc\ 1} + E_{indutiva\ esc\ 2} \times \bar{c}_{indutiva\ esc\ 2} + E_{indutiva\ esc\ 3} \times \bar{c}_{indutiva\ esc\ 3} + E_{capacitiva} \times \bar{c}_{capacitiva} \quad (27)$$

A MEE 4 (instalação de caldeiras a biomassa) foi efetuada nas unidades industriais que dispunham de caldeiras a gás propano ou gasóleo, estando os consumos registados no anexo IV e que foram levantados no âmbito das auditorias. Os custos totais de combustível associados a esses consumos foram calculados admitindo um preço para o gás propano de 964,19 €/tep e para o gasóleo de aquecimento de 1377,47 €/tep, registados em março de 2014 [48].

- **etapa 2:** a poupança ( $\Delta E$ ) e o consumo de energia otimizado do sistema de refrigeração ( $E_{ótimo}$ ), expressos em tep, e que resultam da implementação da MEE1 vêm dados pelas seguintes expressões:

$$\Delta E = E_{circuito\ frio\ atual} \times \frac{k_{MEE}}{100} \quad (28)$$

$$E_{\text{ótimo}} = E_{\text{circuito frio atual}} \times \left(1 - \frac{k_{MEE}}{100}\right) \quad (29)$$

No caso da MEE2, as mesmas grandezas foram determinadas pelas expressões:

$$\Delta E = E_{\text{compressores atual}} \times \frac{k_{MEE}}{100} \quad (30)$$

$$E_{\text{ótimo}} = E_{\text{circuito frio atual}} - E_{\text{compressores atual}} \times \frac{k_{MEE}}{100} \quad (31)$$

$E_{\text{circuito frio atual}}$  é o consumo total atual dos sistemas de refrigeração (em tep) e  $E_{\text{compressores atual}}$  o dos compressores das câmaras (em tep).

Relativamente às percentagens ou fatores de poupança admitidos por hipótese para cada uma das duas medidas ( $k_{MEE}$ ), estas são os que constam na Tabela 16 e foram extraídas de ensaios realizados ao nível industrial ou comercial, conforme descrito na introdução do trabalho. Por uma questão de contenção, foram utilizados os valores mínimos conhecidos desses testes.

**Tabela 16 - Fatores de poupança energética associados a cada medida (fonte: [18, 23, 24]).**

Medida	Fator poupança, $k_{MEE}$ (%)
MEE 1	10
MEE 2	25

O custo relativo à poupança energética obtida para as medidas foi determinado como na etapa anterior.

Para a MEE3, a poupança de energia reativa corresponde ao consumo total apurado na etapa anterior, considerando uma afinação adequada da bateria que elimine totalmente o consumo daquela energia (aumento do fator de potência para um valor acima de 0,95). Neste caso, o custo dessa poupança corresponde, pois, ao valor também determinado na etapa anterior.

Na MEE4 calculou-se a economia no custo de combustível ao se substituir o que é usado atualmente pela biomassa (pellets), assumindo o mesmo consumo térmico. Essa economia foi apurada pela diferença entre o custo do consumo de combustível atual (determinado na etapa anterior) e o consumo equivalente de pellets, ao preço de 599 €/tep cotado em março de 2014 [49].

- **etapa 3:** os investimentos iniciais corresponderam somente ao custo dos equipamentos utilizados e foram determinados para as medidas MEE1, MEE2 e MEE4; quanto à MEE3, considerou-se apenas a necessidade de uma intervenção humana para regular as baterias existentes, sem a instalação de equipamento adicional.

Os preços dos equipamentos considerados estão discriminados na Tabela 17.

**Tabela 17 - Preços dos equipamentos considerados para cada medida (fonte: [50, 51, 52, 53]).**

Medida	Equipamento	Marca / modelo	Caraterísticas	Preço (€)
MEE1	eCube	101	-	120
MEE2	VEV	Vacon VCH3L00034IP54	Potência 1100 W	341
		Vacon VCH3L00044IP54	Potência 1500 W	370
		Vacon VCH3L00054IP54	Potência 2200 W	399
		Vacon VCH3L00084IP54	Potência 3000 W	437
		Vacon VCH3L00094IP54	Potência 4000 W	488
		Vacon VCH3L00124IP54	Potência 5500 W	550
		Vacon VCH3L00164IP54	Potência 7500 W	655
		Vacon VCH3L00234IP54	Potência 11000 W	797
		Vacon VCH3L00314IP54	Potência 15000 W	956
		Vacon VCH3L00384IP54	Potência 18500 W	1125
		Vacon VCH3L00464IP54	Potência 22000 W	1290
		Vacon VCH3L00614IP54	Potência 30000 W	1514
		Vacon VCH3L01054IP54	Potência 55000 W	2757
MEE3	Caldeira pellets	D' Alessandro Termomeccanica TA V 1700	Potência térmica 1700 kW Fluido: vapor água	296700
		D' Alessandro Termomeccanica CS 500	Potência térmica 500 kW Fluido: água quente	70000
		Ambitermo SBL	Potência térmica 836 kW Fluido: vapor água	95000
		D' Alessandro Termomeccanica TA V 200	Potência térmica 200 kW Fluido: vapor água	60000

Deste modo, o número de eCubes a adquirir é igual ao número de câmaras existentes nas empresas (ver valores no anexo IV). O VEV selecionado na Tabela 17 para acoplamento a cada compressor foi o que possuiu a potência máxima suportada imediatamente acima da respetiva potência nominal (estes últimos valores estão no também registados no anexo IV).

As caldeiras a biomassa foram escolhidas de modo a que a potência térmica seja igual ou superior ao valor atual e que o fluido térmico seja o mesmo.

Com o número de equipamentos determinado, calculou-se os investimentos iniciais necessários para a execução das MEE testadas recorrendo aos custos unitários especificados na Tabela 17;

- **etapa 4:** o período de retorno do investimento ( $t_{\text{retorno}}$ , expresso em anos) para as medidas MEE1 e MEE2 foi deduzido pela fórmula, conforme Magueijo *et al* [23]:

$$t_{\text{retorno}} = \frac{I_{\text{inicial}}}{\bar{c}_{\text{energia elétrica}} \times \Delta E} \quad (32)$$

$I_{inicial}$  refere-se ao valor do investimento previsto (em €),  $\bar{c}_{energia\ elétrica}$  é o custo da energia elétrica (em €/tep) e  $\Delta E$  é a poupança energética presumida (em tep).

Para a MEE4 substituiu-se o denominador da fórmula pelo custo da energia economizada em resultado da substituição do combustível pela biomassa, obtido na etapa anterior.

## 2.2. Metodologia para simulação e otimização do consumo energético das câmaras frigoríficas

### 2.2.1. Objetivos e estrutura

Esta metodologia tem por objetivos específicos:

- estimar o consumo atual das câmaras frigoríficas, a partir de um conjunto de dados recolhidos acerca das suas características;
- auxiliar o utilizador na seleção das MEE mais apropriadas, em termos de poupanças e de custos totais;
- prever a potencial poupança energética resultante da simulação das MEE;
- determinar quais os aspetos estruturais e de funcionamento das câmaras com maior influência no consumo final;
- avaliar a viabilidade económica resultante da implementação das MEE selecionadas.

Para atingir os objetivos propostos procedeu-se à divisão da metodologia em duas grandes partes, conforme se ilustra na Figura 55.

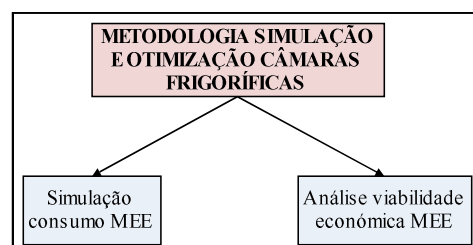


Figura 55 - Partes fundamentais que constituem a metodologia de simulação (fonte: elaboração própria).

Na primeira parte pretende-se estimar o consumo de energia elétrica da câmara (atual e otimizado pela integração das MEE), através de um conjunto de dados previamente recolhidos e que se referem às características da mesma (parâmetros de entrada ou inputs). A simulação é efetuada numa folha de cálculo criada no Microsoft Excel.

Na segunda parte procede-se a uma avaliação económica da medida ou conjunto de medidas de eficiência selecionadas durante a primeira parte, com vista a determinar se é viável a sua implementação em termos de custos associados. Esta parte é tendencialmente mais subjetiva, pois depende das intenções da administração e do capital disponível.

Nos subcapítulos seguintes será efetuado um desenvolvimento mais profundo de cada uma das partes identificadas.

### **2.2.2. Simulação e otimização do consumo energético da câmara**

Para se simular o consumo global é necessário quantificar todas as componentes térmicas que entram no interior da mesma e que necessitam de ser removidas pelo fluido que circula no sistema de refrigeração, de modo a manter a temperatura de arrefecimento para a conservação do produto. Essas componentes, designadas por cargas térmicas, referem-se à energia sob a forma de calor com diversas origens - a que atravessa as envolventes da câmara<sup>8</sup>, a que é libertada pelo produto introduzido, a que provém das infiltrações do ar exterior, etc..

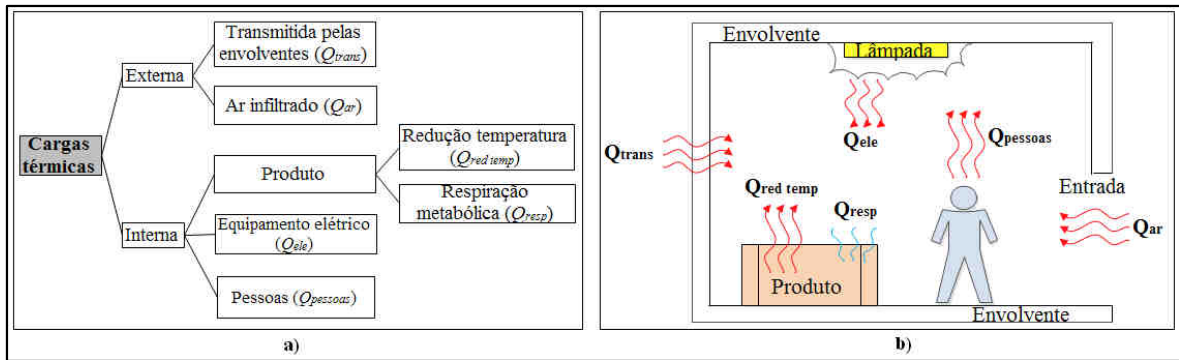
Matematicamente, o calor a ser removido da câmara ( $Q_{out}$ ) é igual à soma de todas as cargas térmicas penetrantes ( $Q_{in}$ ), tal como enuncia o princípio físico da conservação de energia:

$$Q_{out} = \sum_{i=1}^n Q_{in\ i} \quad (33)$$

As diversas cargas térmicas que se infiltram na câmara podem ser de origem interna e externa, dependendo da localização da fonte. Nas figuras seguintes identificam-se as cargas térmicas existentes e as respetivas origens [10].

---

<sup>8</sup> Paredes, chão e teto.



**Figura 56 - Identificação das cargas térmicas das câmaras frigoríficas segundo a) a classificação e b) a origem (fonte: [10]).**

Partindo de uma lista de dados (inputs) recolhidos a partir da câmara, cada carga térmica é determinada recorrendo à substituição desses dados iniciais em fórmulas matemáticas adequadas para então no final se apurar o consumo energético global desejado (output). Os inputs categorizam-se em 4 secções: aspetos construtivos (referente à estrutura e componentes da câmara), variáveis climáticas (condições do meio ambiente), modo de operação / utilização do sistema (atividade humana e tempo de funcionamento) e características do produto. A Tabela 18 apresentada abaixo classifica e discrimina os inputs necessários à simulação.

A modelação de uma MEE para apurar o consumo energético dela resultante foi efetuada pela variação adequada de um ou mais inputs definidos na tabela anterior (e. g. redução da potência da iluminação ( $P_{iluminação}$ ) para uma substituição das lâmpadas por modelos económicos, ou aumento do fator da barreira de proteção ( $E$ ) se se introduzir uma cortina de PVC à entrada). Desta forma, a partir do ajuste dos inputs tornou-se possível estimar o consumo otimizado e seleccionar as medidas mais indicadas.

Nos próximos subcapítulos será explicada detalhadamente cada carga térmica envolvida, assim como os processos de cálculo utilizados e o método aplicado para prever o consumo global da câmara.

**Tabela 18 - Classificação e lista dos parâmetros de entrada relativos à câmara para a simulação (fonte: elaboração própria).**

Classe	Nome parâmetro	Variável	Unidade
Aspetos construtivos	Comprimento câmara	$C_{câmara}$	m
	Largura câmara	$l_{câmara}$	m
	Altura câmara	$a_{câmara}$	m
	Largura entrada	$l_{entrada}$	m
	Altura entrada	$a_{entrada}$	m
	Eficiência barreira térmica de proteção à entrada	$E_b$	-
	Potência iluminação	$P_{iluminação}$	W
	Tipo lâmpadas de iluminação	-	-
	Tempo funcionamento iluminação	$t_{iluminação}$	s
	Potência térmica outro equipamento elétrico interno	$P_{equip. interno}$	W
	Tempo funcionamento outro equipamento elétrico interno	$t_{equip. interno}$	s
	Eficiência compressor	$\eta_{compressor}$	%
	Espaço exterior em contacto com cada envolvente	-	-
	Material da camada $j$ pertencente à envolvente $i^9$	-	-
Espeçura da camada $j$ pertencente à envolvente $i$	$e_{i,j}$	m	
Variáveis climáticas	Temperatura interior	$T_{int}$	K
	Temperatura exterior a cada envolvente	$T_{ext i}$	K
	Humidade relativa ar interior	$\phi_{int}$	%
	Humidade relativa ar exterior	$\phi_{ext}$	%
	Temperatura evaporador	$T_{evaporador}$	K
Temperatura condensador	$T_{condensador}$	K	
Caraterísticas produto	Tipo arrefecimento (refrigeração / congelação)	-	-
	Massa produto que entrou na câmara	$m_{in}$	kg
	Temperatura inicial do produto	$T_{produto ini}$	K
	Tipo produto	-	-
Modo operação	Massa total produto no interior	$m_{int}$	kg
	N.º pessoas na câmara	$n_{pessoas}$	-
	Tempo permanência pessoas na câmara por acesso	$t_{pessoas}$	s / acesso
	Tempo abertura porta por acesso	$t_{porta}$	s / acesso
	Frequência abertura porta	$f$	-
Tempo operação câmara	$t_{câmara}$	s	

### 2.2.2.1. Carga térmica transmitida pelas envolventes ( $Q_{trans}$ )

Esta carga está associada ao calor que atravessa cada envolvente da câmara devido à condutividade térmica dos seus materiais. Em geral, estas envolventes são constituídas por diversas camadas de materiais com espessuras diferentes (e. g. isolamento térmico, reforço mecânico e proteção), pelo que o cálculo do calor infiltrante deve ter em conta essa heterogeneidade.

A equação base de cálculo é a mesma que é aplicada para a transmissão de calor por condução ( $Q_{trans i}$ ) [15]:

$$Q_{trans i} = U_i \cdot A_i \cdot (T_{ext i} - T_{int}) \cdot t_{câmara} \quad (34)$$

<sup>9</sup> Supondo que cada envolvente é constituída por várias camadas internas de materiais (isolamento térmico, reforço mecânico, ...).

onde  $U_i$  designa o coeficiente de transmissão térmica da envolvente  $i$  (em  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ),  $A_i$  a área da envolvente  $i$  (em  $\text{m}^2$ ),  $T_{ext\ i}$  a temperatura exterior à envolvente  $i$  (em K),  $T_{int}$  a temperatura interior da câmara (em K) e  $t_{câmara}$  o tempo de funcionamento da câmara (em s).

Por sua vez, o coeficiente de transmissão térmica da envolvente  $i$  ( $U_i$ ) vem dado pela expressão [54]:

$$U_i = \frac{1}{R_{se\ i} + \sum_{j=1}^n \left( \frac{e_{i,j}}{\lambda_{i,j}} \right) + R_{si\ i}} \quad (35)$$

onde  $R_{se\ i}$  é a resistência térmica da superfície da envolvente  $i$  em contacto com o exterior (em  $\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$ ),  $R_{si\ i}$  a resistência térmica da superfície da envolvente  $i$  em contacto com o interior (em  $\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$ ),  $e_{i,j}$  a espessura da camada  $j$  pertencente à envolvente  $i$  (em m) e  $\lambda_{i,j}$  a condutividade térmica da camada  $j$  pertencente à envolvente  $i$  (em  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ).

Os valores utilizados para as constantes presentes na eq. 35 são indicados na Tabela 19.

Tabela 19 - Valores para  $R_{se}$ ,  $R_{si}$  e  $\lambda$  utilizados na eq. 3 (fonte: [54]).

Constante	Valor	Condições de aplicação
$R_{se}$	0,04 $\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$	Envolvente em contacto com o espaço interior da empresa.
	0,13 $\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$	Envolvente em contacto com a rua.
	0,1 $\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$	Envolvente em contacto com o solo.
	0,17 $\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$	Envolvente em contacto com outro espaço interior, acima do teto.
$\lambda$	1,55 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	Reboco
	0,357 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	Alvenaria tijolo
	0,037 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	EPS
	1,3 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	Betonilha
	2,3 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	Betão armado
	0,025 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	Ar
$R_{si}$	17 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	Chapa de aço
	0,13 $\text{m}^2.\text{°C}.\text{W}^{-1}$	Parede
	0,1 $\text{m}^2.\text{°C}.\text{W}^{-1}$	Chão
	0,17 $\text{m}^2.\text{°C}.\text{W}^{-1}$	Teto

Por substituição da eq. 35 na eq. 33 chegou-se a:

$$Q_{trans\ i} = \frac{A_i.(T_{ext\ i} - T_{int})}{R_{se\ i} + \sum_{j=1}^n \left( \frac{e_{i,j}}{\lambda_{i,j}} \right) + R_{si\ i}} . t_{câmara} \quad (36)$$

que corresponde à expressão simplificada utilizada na metodologia. A carga térmica total que atravessa as 6 envolventes ( $Q_{trans}$ ) é calculada a partir da soma dos valores

individuais de  $Q_{trans\ i}$ :

$$Q_{trans} = \sum_{i=1}^6 Q_{trans\ i} \quad (37)$$

### 2.2.2.2. Carga térmica libertada pela redução da temperatura do produto

( $Q_{red\ temp}$ )

O arrefecimento do produto acondicionado na câmara consegue-se pela remoção do calor sensível (associado ao abaixamento da temperatura) e do calor latente (proveniente da mudança de estado de líquido para sólido). Dependendo do tipo de arrefecimento pretendido, pode haver lugar somente à remoção de calor sensível (refrigeração) ou dos dois tipos de calor (congelação), sendo que no primeiro dos processos pretende-se reduzir a temperatura para um valor acima do ponto inicial de congelação do produto e no segundo para um valor abaixo desse mesmo ponto. Portanto, para executar a simulação é imperativo saber qual dos dois processos (refrigeração ou congelação) está a ser utilizado.

Se o processo for de refrigeração, a fórmula a utilizar para a carga térmica libertada pelo produto através da redução da sua temperatura ( $Q_{red\ temp}$ ) corresponde à do cálculo do calor sensível removido [15]:

$$Q_{red\ temp} = c_{p\ prod\ 1} \cdot m_{in} \cdot (T_{produto\ ini} - T_{int}) \quad (38)$$

onde  $c_{p\ prod\ 1}$  é o calor específico do produto acima do ponto de congelação (em J/(kg.K)),  $m_{in}$  é a massa inicial de produto que entrou na câmara (em kg),  $T_{produto\ ini}$  a temperatura inicial do produto (em K) e  $T_{int}$  a temperatura da câmara, para a qual tenderá a temperatura final do produto (em K).

De referir que na eq. 38 apenas aparece a massa de produto que **entrou** na câmara e não à do produto que já lá se encontrava armazenado, visto que se considera que este último se mantém sempre à temperatura interior ( $T_{int}$ ). Desta forma, o calor sensível libertado é nulo por não existir variação na temperatura do produto já armazenado; esta aproximação é razoável de se admitir porque, em geral, a flutuação dessa grandeza não é relevante na prática.

No caso da congelação, a carga térmica ( $Q_{red\ temp}$ ) resulta da soma de três parcelas

individuais: a do calor sensível acima do ponto inicial de congelação ( $Q_{sensível\ 1}$ ), a do calor latente ( $Q_{lat}$ ) e a do calor sensível abaixo do ponto inicial de congelação ( $Q_{sensível\ 2}$ ) [15]:

$$\begin{aligned}
 Q_{red\ temp} &= Q_{sensível\ 1} + Q_{lat} + Q_{sensível\ 2} = \\
 &= c_{p\ prod\ 1} \cdot m_{in} \cdot (T_{produto\ ini} - T_{congelação}) + L \cdot m_{in} + \\
 &+ c_{p\ prod\ 2} \cdot m_{in} \cdot (T_{congelação} - T_{int})
 \end{aligned} \tag{39}$$

Nesta situação,  $c_{p\ prod\ 2}$  refere-se ao calor específico do produto abaixo do ponto inicial de congelação (em  $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ),  $T_{congelação}$  é a temperatura inicial de congelação (em K) e  $L$  é a constante do calor latente de congelação (em  $J.kg^{-1}$ ). Todas as restantes variáveis possuem os mesmos significados que na fórmula anterior

Admitindo que o produto conservado é o alho, a Tabela 20 expõe alguns valores indicativos relativos às propriedades físicas desse vegetal, utilizados nas eq. 38 e 39

**Tabela 20 - Algumas propriedades físicas do alho (fonte: [10]).**

Constante	Valor
$c_{p\ prod\ 1}$	3170 $J.kg^{-1}.K^{-1}$
$c_{p\ prod\ 2}$	2190 $J.kg^{-1}.K^{-1}$
$L$	196 000 $J.kg^{-1}$
$T_{cong\ ini}$	272,35 K

### 2.2.2.3. Carga térmica libertada pela respiração metabólica do produto ( $Q_{resp}$ )

Os produtos como as frutas e vegetais têm tendência para libertar vapor de água resultante da atividade metabólica das células que ainda permanecem vivas. Esta atividade está intimamente ligada às reações químicas exotérmicas que ocorrem no interior, onde moléculas de glicose se combinam com o oxigénio do ar para produzir dióxido de carbono, vapor de água e calor. Isto significa que, para manter a temperatura interior estável, a câmara deve ainda remover o calor contido nesse vapor gerado pelo produto.

A carga térmica associada ao metabolismo das células ( $Q_{resp}$ ) depende de diversos fatores como a temperatura envolvente ( $T_{int}$ ), o tipo de produto, o seu tamanho e a sua massa no interior ( $m_{int}$ ), podendo ser calculada de forma expedita através da seguinte expressão [10]:

$$Q_{resp} = m_{int} \cdot \dot{q}_{resp} \cdot t_{câmara} \quad (40)$$

Neste caso,  $\dot{q}_{resp}$  é o fluxo do calor de respiração específico do produto e  $t_{câmara}$  é o tempo de funcionamento da câmara; para o caso do alho,  $\dot{q}_{resp} = 0,0206 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$  [10].

Esta carga torna-se insignificante ou mesmo nula para temperaturas abaixo do ponto de congelamento inicial do produto.

#### 2.2.2.4. Carga térmica do ar infiltrado ( $Q_{ar}$ )

Cada vez que a entrada da câmara é aberta, existe uma infiltração de ar quente provocada pela diferença de densidades mássicas entre o interior e o exterior, o que leva à penetração de uma fonte de calor adicional.

O estudo da carga térmica do ar infiltrado é difícil de quantificar. No entanto, e uma vez estabelecido um fluxo estacionário de corrente de ar, essa carga pode ser estimada por recurso à seguinte fórmula [10]:

$$Q_{ar} = 0,221 \times a_{entrada} \times l_{entrada} \times (h_{ar \text{ ext}} - h_{ar \text{ int}}) \times \\ \times f \times t_{porta} \times D_f \times (1 - E_b) \times \sqrt{\left(1 - \frac{\rho_{ar \text{ ext}}}{\rho_{ar \text{ int}}}\right) \times g} \times a_{entrada} \times \frac{2 \times \sqrt[3]{\rho_{ar \text{ ext}}}}{\sqrt[3]{\rho_{ar \text{ ext}}} + \sqrt[3]{\rho_{ar \text{ int}}}} \quad (41)$$

Aqui,  $a_{entrada}$  e  $l_{entrada}$  representam, respetivamente, a altura e a largura da entrada (ambos em m),  $h_{ar \text{ ext}}$  a entalpia específica do ar exterior (em  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $h_{ar \text{ int}}$  a entalpia específica do ar interior (em  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $f$  o n.º de vezes que a entrada é aberta,  $t_{porta}$  o tempo de abertura da entrada por cada acesso ao interior (em s),  $D_f$  o fator de fluxo de ar,  $E_b$  a eficiência da barreira térmica localizada à entrada contra a passagem do ar e  $g$  a aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ).

Em termos práticos, a constante  $D_f$  representa a razão entre o fluxo atual ar e o fluxo estacionário ideal de ar, sem a presença de qualquer barreira à entrada que impeça a livre troca entre o interior e o exterior (e. g. paletes ou caixas). Numa situação ideal, o ar quente exterior penetra livremente pela zona superior da entrada e o ar frio pela zona inferior. A área pela qual cada um dos fluxos passa corresponde exatamente a metade da área da entrada da câmara (ver Figura 57), embora esta ocorrência raramente se verifique na

prática devido ao movimento constante de pessoas ou de bens pela entrada.

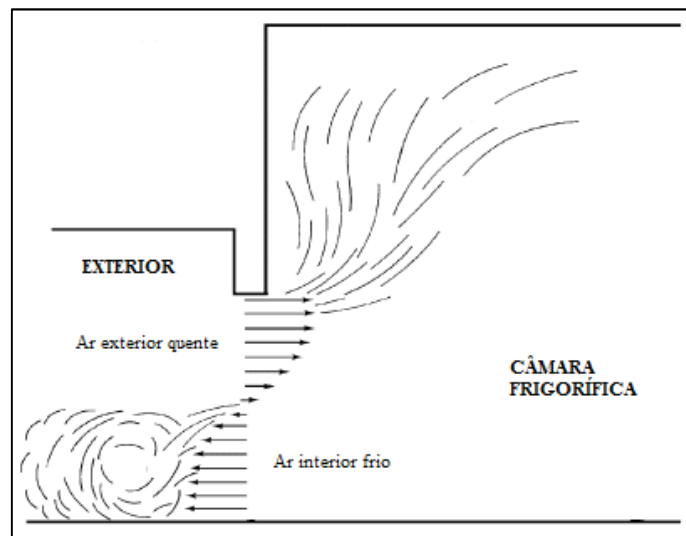


Figura 57 - Fluxos ideais de ar à entrada da câmara (fonte: [10] (adaptado)).

Os valores para  $D_f$  dependem da diferença entre as temperaturas exterior e interior da câmara (ver Tabela 21), embora possam ser sujeitos a pequenos refinamentos mais precisos devido, como se viu, à existência de obstáculos na entrada contra a passagem do ar.

Tabela 21 - Valores para  $D_f$  e condições de aplicação (fonte: [10]).

Valor $D_f$	Condição
0,8	$ T_{ext} - T_{int}  \geq 11 \text{ K}$
1,1	$ T_{ext} - T_{int}  < 11 \text{ K}$

A eficiência da barreira térmica contra a passagem do ar ( $E$ ) é um complemento adicional ao fator  $D_f$ , estando diretamente relacionado com a existência de dispositivos instalados na entrada (corinas em PVC ou de ar) que impedem a penetração avultada de ar quente no interior, assim que a porta é aberta. A Tabela 22 especifica os valores de  $E$  para os tipos de barreiras utilizados neste trabalho.

Tabela 22 - Valores para  $E$  em função do tipo de barreira à entrada (fonte: [10]).

Barreira	$E_b$
Sem barreira	0,00
Cortina de ar	0,70

As densidades mássicas do ar ( $\rho_{ar\ ext}$  e  $\rho_{ar\ int}$ ) e as respectivas entalpias específicas ( $h_{ar\ ext}$  e  $h_{ar\ int}$ ) foram obtidas por meio de fórmulas da psicrometria (ciência que estuda o estado

do ar e as suas propriedades), as quais estabelecem a relação existente com a temperatura do ar ( $T_{ar}$ ) e a humidade relativa ( $\varphi_{ar}$ ). Desta forma, consegue-se simplificar as medições pois estas duas grandezas são mais fáceis de medir na prática.

O ar atmosférico consiste numa mistura de uma massa de ar seco e de outra de vapor de água, cuja percentagem é variável em função do grau de humidade. Qualquer propriedade física que descreva o estado do ar (como a entalpia específica e a densidade mássica) deve ter em conta aquelas duas frações.

Assim, as entalpias específicas  $h_{ar\ ext}$  e  $h_{ar\ int}$  foram apuradas pela expressão da entalpia específica genérica do ar ( $h_{ar}$ ), variando apenas a temperatura ( $T_{ar}$ ) e a humidade relativa ( $\varphi_{ar}$ ) [15]:

$$h_{ar} = c_{p\ ar\ seco} \times (T_{ar} - 273,15) + \frac{0,622 \times \frac{\varphi_{ar}}{100} \times p_{sat\ vap}}{p_{atm} - \frac{\varphi_{ar}}{100} \times p_{sat\ vap}} \times (c_{p\ vap} \times (T_{ar} - 273,15) + h_{lat\ vap}) \quad (42)$$

Aqui,  $c_{p\ ar\ seco}$  é o calor específico da fração de ar seco (em  $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ),  $T_{ar}$  a temperatura do ar (em K),  $\varphi_{ar}$  a humidade relativa do ar (em %),  $p_{sat\ vap}$  a pressão de saturação do vapor de água contido no ar (em Pa),  $p_{atm}$  a pressão atmosférica (em Pa),  $c_{p\ vap}$  o calor específico do vapor de água (em  $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ) e  $h_{lat\ vap}$  o calor latente de evaporação da água (em  $J.kg^{-1}$ ).

A densidade mássica do ar ( $\rho_{ar}$ ) foi deduzida a partir da equação dos gases ideais e da fórmula para o cálculo da massa molar [15]:

$$p_{ar} \cdot V_{ar} = n_{ar} \cdot R \cdot T_{ar} \Leftrightarrow p_{ar} \cdot V_{ar} = \frac{m_{ar}}{M_{ar}} \cdot R \cdot T_{ar} \Leftrightarrow \frac{m_{ar}}{V_{ar}} = \frac{p_{ar} \cdot M_{ar}}{R \cdot T_{ar}} \Leftrightarrow \rho_{ar} = \frac{p_{ar} \cdot M_{ar}}{R \cdot T_{ar}} \quad (43)$$

Contudo, o ar divide-se numa fração seca e noutra onde existe vapor de água, pelo que

$$\rho_{ar} = \rho_{ar\ seco} + \rho_{vap} = \frac{p_{ar\ seco} \cdot M_{ar\ seco}}{R \cdot T_{ar}} + \frac{p_{vap} \cdot M_{vap}}{R \cdot T_{ar}} \quad (44)$$

Substituindo na eq. 44 as expressões seguintes obtidas de Moran *et al* [15]:

$$p_{ar\ seco} = p_{atm} - p_{vap} \quad (45)$$

$$p_{vap} = \varphi_{ar} \cdot p_{sat\ vap} \quad (46)$$

chega-se à fórmula final para o cálculo de  $\rho_{ar}$ :

$$\rho_{ar} = \frac{M_{ar\ seco} \cdot \left( p_{atm} - \frac{\varphi_{ar}}{100} \times p_{sat\ vap} \right) + \frac{\varphi_{ar}}{100} \times M_{vap} \times p_{sat\ vap}}{R \cdot T_{ar}} \quad (47)$$

Aqui,  $M_{ar\ seco}$  e  $M_{vap}$  designam, respetivamente, as massas molares do ar seco e do vapor de água (em  $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),  $R$  é a constante universal dos gases ideais (em  $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) e as restantes variáveis têm o mesmo significado que na fórmula de  $h_{ar}$ .

A pressão de saturação do vapor de água ( $p_{sat\ vap}$ ) usada nas expressões de  $h_{ar}$  e  $\rho_{ar}$  (eq. 42 e 47) foi estimada por uma fórmula empírica desenvolvida por Herman Wobus, que relaciona essa grandeza com a temperatura do ar [55]:

$$p_{sat\ vap} = c_0 \times (c_1 + T_{ar}(c_2 + T_{ar}(c_3 + T_{ar}(c_4 + T_{ar}(c_5 + T_{ar}(c_6 + T_{ar}(c_7 + T_{ar}(c_8 + T_{ar}(c_9 + T_{ar} \cdot c_{10}))))))))))^{-8} \quad (48)$$

Os valores das constantes presentes na eq. 48 são indicados na Tabela 23.

**Tabela 23 - Valores para as constantes usadas na fórmula de  $p_{sat\ vap}$  (fonte: [55]).**

Constante	Valor
$c_0$	6,10780000
$c_1$	0,99999683
$c_2$	$-0,90826951 \times 10^{-2}$
$c_3$	$0,78736169 \times 10^{-4}$
$c_4$	$-0,61117958 \times 10^{-6}$
$c_5$	$0,43884187 \times 10^{-8}$
$c_6$	$-0,29883885 \times 10^{-10}$
$c_7$	$0,21874425 \times 10^{-12}$
$c_8$	$-0,17892321 \times 10^{-14}$
$c_9$	$0,11112018 \times 10^{-16}$
$c_{10}$	$-0,30994571 \times 10^{-19}$

Relativamente às constantes empregues nas fórmulas apresentadas para  $h_{ar}$  e  $\rho_{ar}$  (eq. 42 e 47), a Tabela 24 sintetiza os valores utilizados.

**Tabela 24 - Constantes usadas nas fórmula de  $h_{ar}$  e  $\rho_{ar}$  (fonte: [15]).**

Constante	Valor
$c_{p\ ar\ seco}$	1006 J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$p_{atm}$	101325 Pa
$c_{p\ vap}$	1840 J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$h_{lat\ vap}$	2 501 000 J.kg <sup>-1</sup>
$M_{ar\ seco}$	0,02897 kg.mol <sup>-1</sup>
$M_{vap}$	0,018 kg.mol <sup>-1</sup>
$R$	8,314 Pa.m <sup>3</sup> .mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>

### 2.2.2.5. Carga térmica do equipamento elétrico interior ( $Q_{ele}$ )

Esta carga advém do calor gerado pelo equipamento elétrico localizado no interior da câmara, nomeadamente as lâmpadas e os ventiladores de circulação do ar.

Para um equipamento genérico  $i$  que debita uma potência térmica  $\dot{Q}_{equip\ i}$  (em W) durante um tempo de operação  $t_{equip\ i}$  (em s), o calor por ele libertado  $Q_{ele\ i}$  (em J) vale:

$$Q_{ele\ i} = \dot{Q}_{equip\ i} \times t_{equip\ i} \quad (49)$$

No caso da iluminação, a potência térmica foi determinada a partir da respetiva potência elétrica e do rendimento da lâmpada. O rendimento duma lâmpada incandescente situa-se nos 8 % [56] e, a partir dele, é possível determinar os rendimentos das lâmpadas fluorescentes e LED recorrendo aos consumos médios que estas últimas possuem relativamente à primeira. Esses consumos médios, expressos em percentagem, estão indicados na Tabela 25.

**Tabela 25 - Consumos médios das lâmpadas fluorescentes e LED relativamente à lâmpada incandescente (fonte: [57])**

Tipo lâmpada	Consumo médio relativamente à lâmpada incandescente (%)
Fluorescente	25
LED	20

A potência útil sob a forma de energia luminosa de cada tipo de lâmpada ( $P_{\text{útil iluminação}}$ ) vem dada pela eq. 50, deduzida a partir da definição geral de rendimento ( $\eta_{\text{iluminação}}$ ) e da potência total ( $P_{\text{iluminação}}$ ):

$$\eta_{\text{iluminação}} = \frac{P_{\text{útil iluminação}}}{P_{\text{iluminação}}} \Leftrightarrow P_{\text{útil iluminação}} = \frac{\eta_{\text{iluminação}} \times P_{\text{iluminação}}}{100} \quad (50)$$

O cálculo do rendimento das lâmpadas fluorescente e LED implica que as potências úteis a elas associadas sejam iguais à da lâmpada incandescente, de modo a que a luz produzida seja a mesma. Assim, se se igualar a potência útil das lâmpadas incandescente e fluorescente ( $P_{\text{útil inc}}$  e  $P_{\text{útil fluor}}$ ) e por substituição da eq. 50 obtém-se:

$$P_{\text{útil inc}} = P_{\text{útil fluor}} \Leftrightarrow \eta_{\text{inc}} \times P_{\text{inc}} = \eta_{\text{fluor}} \times P_{\text{fluor}} \quad (51)$$

onde  $P_{\text{fluor}}$  e  $P_{\text{inc}}$  são, respetivamente, as potências totais das lâmpadas fluorescente e incandescente (em W), sendo  $\eta_{\text{fluor}}$  e  $\eta_{\text{inc}}$  os rendimentos a elas associados (em %)

Porém, de acordo com a Tabela 25, a potência total da lâmpada fluorescente corresponde a 25 % da incandescente, pelo que

$$P_{\text{útil inc}} = P_{\text{útil fluor}} \Leftrightarrow \eta_{\text{inc}} \times P_{\text{inc}} = \eta_{\text{fluor}} \times 0,25 \times P_{\text{inc}} \Leftrightarrow \eta_{\text{fluor}} = \frac{\eta_{\text{inc}}}{0,25} \quad (52)$$

Procedendo de forma semelhante para o rendimento da lâmpada LED ( $\eta_{\text{LED}}$ ):

$$\eta_{\text{LED}} = \frac{\eta_{\text{inc}}}{0,2} \quad (53)$$

Por substituição do rendimento da lâmpada incandescente (8 %) nas eq. 52 e 53 resultam os rendimentos das lâmpadas fluorescente e LED referidos na Tabela 26, conforme desejado.

**Tabela 26 - Rendimentos energéticos dos vários tipos de lâmpadas utilizadas no trabalho (fonte: elaboração própria)**

Tipo lâmpada	Rendimento energético, $\eta_{\text{iluminação}}$ (%)
Incandescente	8,0
Fluorescente	30,0
LED	37,5

A potência térmica libertada por cada lâmpada ( $\dot{Q}_{\text{iluminação}}$ ) resulta da seguinte demonstração:

$$\eta_{\text{iluminação}} = \frac{P_{\text{útil iluminação}}}{P_{\text{iluminação}}} \times 100 \Leftrightarrow \eta_{\text{ele 1}} = \frac{P_{\text{iluminação}} - \dot{Q}_{\text{iluminação}}}{P_{\text{iluminação}}} \times 100 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \dot{Q}_{iluminação} = P_{iluminação} \cdot \left(1 - \frac{\eta_{iluminação}}{100}\right) \quad (54)$$

O tempo de funcionamento da iluminação ( $t_{iluminação}$ ) coincide com o tempo total de abertura da porta da entrada ( $f \times t_{porta}$ ), assumindo que aquela só é ativada enquanto os funcionários se encontram no interior para execução das tarefas, o que é comum de se observar na prática. Portanto,

$$t_{iluminação} = f \times t_{porta} \quad (55)$$

onde  $f$  é a frequência de abertura da porta e  $t_{porta}$  o tempo de abertura da mesma em cada acesso (em s/acesso).

No caso dos ventiladores de circulação de ar acoplados ao evaporador, a potência térmica é determinada por meio de uma tabela retirada de ASHRAE [10], conhecendo-se previamente a potência elétrica dos motores e a sua localização que relaciona essa grandeza e a localização do motor na câmara com a respectiva potência elétrica (ver Tabela 27, mais abaixo). Para as potências não listadas na tabela, essas poderão ser estimadas por interpolação de valores.

Foi admitido que o tempo de funcionamento dos ventiladores é o mesmo do compressor, seguindo sempre o regime de pára-arranca característico desse componente. Este tempo foi apurado por um analisador de rede a ele acoplado por contagem dos períodos em que lhe foi fornecida corrente elétrica. O processo de medição com este analisador será explorado mais à frente.

**Tabela 27 - Potências térmicas comuns debitadas por motores acoplados aos ventiladores das câmaras (fonte: [10]).**

Motor Rated, kW	Motor Type	Nominal rpm	Full Load Motor Efficiency, %	Location of Motor and Driven Equipment with Respect to Conditioned Space or Airstream		
				A	B	C
				Motor in, Driven Equipment in, W	Motor out, Driven Equipment in, W	Motor in, Driven Equipment out, W
0.04	Shaded pole	1500	35	105	35	70
0.06			35	170	59	110
0.09			35	264	94	173
0.12			35	340	117	223
0.19	Split phase	1750	54	346	188	158
0.25			56	439	246	194
0.37			60	621	372	249
0.56	3-Phase	1750	72	776	557	217
0.75			75	993	747	249
1.1			77	1453	1119	334
1.5			79	1887	1491	396
2.2			81	2763	2238	525
3.7			82	4541	3721	817
5.6			84	6651	5596	1066
7.5			85	8760	7178	1315
11.2			86	13 009	11 192	1820
14.9			87	17 140	14 913	2230
18.6			88	21 184	18 635	2545
22.4			89	25 110	22 370	2765
30			89	33 401	29 885	3690
37			89	41 900	37 210	4600
45			89	50 395	44 829	5538
56			90	62 115	55 962	6210
75			90	82 918	74 719	8290
93			90	103 430	93 172	10 342
110			91	123 060	111 925	11 075
150			91	163 785	149 135	14 738
190			91	204 805	186 346	18 430

### 2.2.2.6. Carga térmica libertada pelas pessoas no interior ( $Q_{pessoas}$ )

Esta carga provém do calor libertado pelos funcionários no interior da câmara devido à sua atividade física durante a execução do serviço.

De acordo com ASHRAE [10], existe uma fórmula expedita para o cálculo da potência térmica libertada pelos funcionários em função da temperatura. Considerando que estes permanecem por pouco tempo no interior e que de cada vez que o fazem uma pequena carga térmica do ar exterior adere à sua pele, é necessário adicionar o fator de ajuste proposto pela mesma publicação (1,25):

$$\dot{Q}_{pessoas} = 1,25 \times n_{pessoas} (272 - 6 \times (T_{int} - 273,15)) \quad (56)$$

Aqui,  $n_{pessoas}$  é o número médio de funcionários no interior por cada acesso e  $T_{int}$  a temperatura interna da câmara.

A conversão entre a potência ( $\dot{Q}_{pessoas}$ ) e a carga térmica sob a forma de energia ( $Q_{pessoas}$ ) faz-se mediante a multiplicação pelo tempo de permanência dos funcionários no interior, que se admite ser o mesmo que o período no qual a porta se mantém aberta ( $f \times t_{porta}$ ):

$$Q_{pessoas} = 1,25 \times n_{pessoas} \times f \times t_{porta} \times (272 - 6 \times (T_{int} - 273,15)) \quad (57)$$

Neste caso,  $f$  é a frequência de abertura da porta,  $t_{porta}$  o tempo de abertura da mesma por cada acesso e as restantes variáveis são as mesmas da fórmula anterior.

### 2.2.2.7. Consumo de energia global da câmara ( $E_{câmara}$ )

O consumo energético global foi aproximado ao do compressor existente no sistema de refrigeração, uma vez que este é o componente com o consumo mais relevante, conforme se observou anteriormente durante o estudo efetuado à aplicação das MEE nas empresas.

Para o cálculo desse consumo há que conhecer o rendimento do ciclo de refrigeração, definido pelo COP (coeficiente de performance), cuja estimativa vem dada por Sá [58]:

$$COP = \frac{T_{evaporador}}{2 \cdot (T_{condensador} - T_{evaporador})} \quad (58)$$

Aqui,  $T_{evaporador}$  e  $T_{condensador}$  designam, respetivamente, as temperaturas médias do fluido no evaporador e no condensador (em K). Como primeira aproximação, admitiu-se que  $T_{evaporador}$  é igual à temperatura da câmara pois ambos os valores são habitualmente similares na prática [59].

A definição básica de  $COP$  vem dada pela expressão [15]:

$$COP = \frac{Q_{câmara}}{E_{compressor\ útil}} \quad (59)$$

onde  $Q_{câmara}$  é a soma de todas as cargas térmicas a remover da câmara (em J) e  $E_{compressor\ útil}$  é o consumo de energia útil por parte do compressor (em J).

O rendimento elétrico do compressor vem dado pela sua definição básica:

$$\eta_{compressor} = \frac{E_{compressor\ útil}}{E_{compressor}} \times 100 \quad (60)$$

onde  $E_{compressor}$  é a energia elétrica consumida pelo compressor (em J).

Substituindo na eq. 60 as eq. 58 e 59, aplicando o fator apropriado de conversão de energia ( $1\text{ kW.h} = 3,6 \times 10^6\text{ J}$ ) e resolvendo em ordem a  $E_{compressor}$  obtém-se a expressão final do consumo simulado para a câmara ( $E_{câmara}$ ):

$$E_{câmara} = E_{compressor} = \frac{2 \times Q_{câmara} \times (T_{condensador} - T_{evaporador})}{\eta_{compressor} \times T_{evaporador} \times 3,6 \times 10^6} \quad (61)$$

Esta expressão pode ser desenvolvida substituindo  $Q_{câmara}$  pelo somatório de todas as cargas térmicas anteriormente descritas, ficando com a forma mais completa:

$$E_{câmara} = \frac{2 \times (Q_{trans} + Q_{ar} + Q_{red\ temp} + Q_{resp} + Q_{ele} + Q_{pess}) \times (T_{condensador} - T_{evaporador})}{\eta_{compressor} \times T_{evaporador} \times 3,6 \times 10^6} \quad (62)$$

### 2.2.3. Análise de viabilidade económica das MEE simuladas na câmara

A viabilidade económica é avaliada pelos seguintes indicadores:

- **investimento inicial ( $I_{inicial}$ ):** valor monetário necessário (em €) para a implementação da medida, no qual se considerou o custo do equipamento. Para tal, foram utilizados preços disponibilizados por algumas marcas comerciais em Portugal;
- **período de retorno do investimento ( $t_{retorno}$ ):** tempo (em anos) para recuperar todo o investimento aplicado na medida, através dos ganhos conferidos pelas poupanças energéticas previstas. Para tal, é necessário extrapolar para um ano a poupança energética obtida pela folha de cálculo durante o período de ensaio da câmara, admitindo um padrão de utilização homogéneo em termos de reposição de produto e de número de acessos. Essa extrapolação ( $\Delta E$ , em kW.h) foi obtida pela expressão

abaixo, a qual resultou de uma regra três simples:

$$\Delta E = \frac{3,1536 \times 10^7 \times (E_{\text{câmara atual}} - E_{\text{câmara otimizado}})}{t_{\text{câmara}}} \quad (63)$$

Aqui,  $E_{\text{câmara atual}}$  e  $E_{\text{câmara otimizado}}$  são, respectivamente, os consumos atual e otimizado da câmara (em kW.h), sendo este último o resultante da modelação das MEE. A variável  $t_{\text{câmara}}$  corresponde ao tempo de funcionamento da câmara nos ensaios experimentais e vem expresso em segundo; contudo, como a base de tempo aplicada na fórmula equivale a 1 ano, houve necessidade de se introduzir o fator de conversão indicado (1 ano =  $3,1536 \times 10^7$  s).

Considerando um custo para a energia elétrica de  $\bar{c}_{\text{energia elétrica}} = 0,11$  €/kW.h (conforme estimativa utilizada no subcapítulo sobre as MEE aplicadas na indústria agroindustrial), o período de retorno do investimento ( $t_{\text{retorno}}$ ) vem dado pela seguinte expressão [23]:

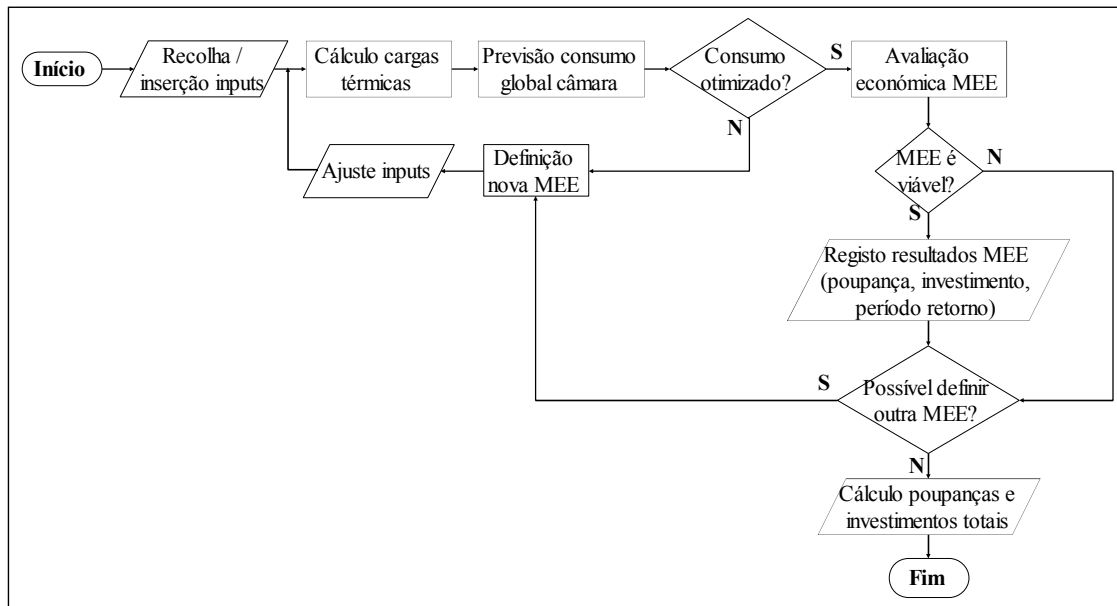
$$t_{\text{retorno}} = \frac{I_{\text{inicial}}}{\bar{c}_{\text{energia elétrica}} \times \Delta E} \quad (64)$$

Por substituição da eq. 63 na 64, obtém-se a fórmula final:

$$t_{\text{retorno}} = \frac{I_{\text{inicial}} \times t_{\text{câmara}}}{\bar{c}_{\text{energia elétrica}} \times 3,1536 \times 10^7 \times (E_{\text{câmara atual}} - E_{\text{câmara otimizado}})} \quad (65)$$

#### 2.2.4. Implementação da metodologia para simulação dos consumos das câmaras e avaliação das MEE propostas

O fluxograma da Figura 58 descreve a sequência de etapas para a previsão do consumo energético e avaliação das MEE mais apropriadas para a câmara.



**Figura 58 - Fluxograma da metodologia para simulação dos consumos e avaliação das MEE (fonte: elaboração própria)**

Na fase de recolha de dados são efetuadas medições de grandezas de modo a se apurar valores para cada um dos inputs necessários (Tabela 18), seguida da conversão para unidades SI (quando aplicável). Após esta ação, os dados estão prontos a serem introduzidos na folha de cálculo criada no Excel para simulação do consumo (Figura 59).

O processo de otimização inicia-se com a previsão do consumo atual da câmara a partir dos dados introduzidos, mediante a utilização das fórmulas para cada carga térmica. Os valores das cargas e o consumo global previsto são automaticamente calculados em folhas próprias existentes no ficheiro (Figura 60).

Tendo-se escolhida uma MEE a testar, procede-se ao ajuste dos inputs apropriados para a modelar (e. g. redução do número de acessos à câmara ( $f$ ) ou da potência da iluminação, que representa a utilização de lâmpadas económicas ( $P_{iluminação}$ )), para daí se obter o novo consumo otimizado. Se este for inferior ao valor determinado anteriormente (consumo original ou resultante da modelação dum outra MEE prévia), é efetuada a análise de viabilidade económica.

Caso se verifique que apresenta viabilidade, a medida é validada e registada, prosseguindo-se para a definição da próxima a testar. O processo de modelação repete-se pelo ajuste dos inputs, cálculo do consumo e avaliação económica, até que se esgote a possibilidade da definição de mais medidas. Neste patamar resultam os outputs esperados da metodologia:

- as MEE viáveis de se implementar;
- as poupanças energéticas, investimentos e períodos de retorno resultantes.

4	Grupo	Grandeza / item	Unidade	Valor
5	Condições teste	Data / hora início medição	DD-MM-AA HH:MM	12-11-13 10:02
6		Data / hora fim medição	DD-MM-AA HH:MM	13-11-13 10:02
7		Designação câmara	-	Câmara 2 Monforqueijo (ensaio 1)
8	Aspectos construtivos	Comprimento câmara	m	9,20
9		Largura câmara	m	6,40
10		Altura câmara	m	3,22
11		Largura porta	m	1,35
12		Altura porta	m	2,20
13		Eficiência das barreiras contra passagem do ar	-	Barreira inexistente (0)
14		Potência total iluminação	W	464
15		Tipo lâmpada	-	Fluorescente
16		Tempo funcionamento iluminação	s	3600
17		Potência térmica equipamento elétrico no interior	W	698
18	Tempo funcionamento outro equipamento elétrico no interior	s	83280	
19	Eficiência evaporador / condensador	%	100	
20	Eficiência compressor	%	50	
21	Variáveis climáticas	Temperatura interior câmara	K	286,35
22		Temperatura exterior parede 1 (contém entrada)	K	291,15
23		Temperatura exterior parede 2	K	289,15
24		Temperatura exterior parede 3	K	289,15
25		Temperatura exterior parede 4	K	289,15
26		Temperatura exterior chão	K	288,15
27		Temperatura exterior teto	K	291,15
28		Humidade relativa ar interior	%	90,3

4	Propriedade	Parede 1	Parede 2	Parede 3	Parede 4	Chão	Teto
5	Espaço em contato com superfície exterior	Divisão interior	Divisão interior	Divisão interior	Divisão interior	Divisão interior	Divisão interior
6	Material camada 1	Aço inox	Aço inox	Aço inox	Aço inox	Betonilha	Betonilha
7	Espessura camada 1 (m)	0,002	0,002	0,002	0,002	0,05	0,05
8	Material camada 2	PUR	PUR	PUR	PUR	EPS	EPS
9	Espessura camada 2 (m)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,25	0,05
10	Material camada 3	Aço inox	Aço inox	Aço inox	Aço inox	Betão armado	Betão armado
11	Espessura camada 3 (m)	0,002	0,002	0,002	0,002	0,1	0,15
12	Material camada 4					Ar	Aço inox
13	Espessura camada 4 (m)					0,1	0,002
14	Material camada 5						
15	Espessura camada 5 (m)						
16	Material camada 6						
17	Espessura camada 6 (m)						
18	Material camada 7						
19	Espessura camada 7 (m)						
20	Material camada 8						
21	Espessura camada 8 (m)						
22	Resistência térmica total (m <sup>2</sup> .°C.W <sup>-1</sup> )	1,612	1,612	1,612	1,612	11,039	1,795
23	Coefficiente transmissão térmica (W.m <sup>-2</sup> .°C <sup>-1</sup> )	0,62	0,62	0,62	0,62	0,091	0,557

Figura 59 - Aspeto da folha de cálculo para introdução de dados sobre a câmara (em cima) e sobre as envolventes (em baixo) (fonte: elaboração própria).

3	Designação câmara / medição	Energia térmica envolventes (J)	Energia térmica produtos (J)	Energia térmica pessoas (J)	Energia térmica ar infiltrado (J)	Energia térmica iluminação / outro equipamento elétrico (J)	Energia térmica respiração (J)
4	Câmara 2 Monforqueijo (ensaio 1)	32 676 944,486	0,000	2 776 320,000	1 525 610,798	58 867 756,800	0,000
5	Peso (%)	34,093	0,000	2,897	1,592	61,419	0,000

4	Grupo	Grandeza / item	Unidade	Valor	Observações
5	Energia	Energia elétrica total compressor	kW.h	10,174	
6		Validade energia simulada	-	Valido	
7					
8					
9		< Anterior			

Figura 60 - Aspeto da folha de cálculo para apresentação dos resultados de cada carga térmica (em cima) e do consumo global final (em baixo) (fonte: elaboração própria).

## 2.2.5. Validação experimental da metodologia

A parte experimental do trabalho serviu para os seguintes propósitos:

- avaliar o desvio entre o consumo numa situação real e simulada pela folha de cálculo;
- determinar as cargas térmicas mais preponderantes;
- elaborar uma análise de sensibilidade do consumo final face à variação de alguns inputs, com vista a apurar quais os mais influentes;
- estimar as poupanças e avaliar a viabilidade económica por modelação de algumas MEE.

O fluxograma da Figura 61 expõe a sequência de etapas na validação experimental.

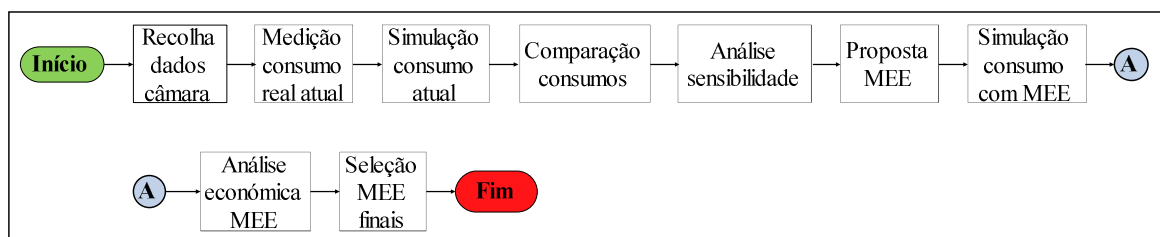


Figura 61 - Etapas da validação experimental da metodologia (fonte: elaboração própria).

Seguidamente descreve-se as características da câmara onde decorreram os ensaios, assim como cada etapa indicada no fluxograma.

### 2.2.5.1. Descrição da câmara de teste

Os ensaios experimentais e simulações foram conduzidos numa empresa de pequena dimensão, dedicada às atividades de compra, conservação e venda de frutas e vegetais variados ao público e outros retalhistas. Esta empresa foi a Ho4, uma das que figurou na análise ao perfil energético do setor agroindustrial efetuada na primeira parte deste trabalho.

Muitas das câmaras frigoríficas existentes destinavam-se à preservação de mais do que uma variedade de produto, pelo que para facilitar os ensaios e obter medições fidedignas optou-se por executar os testes numa câmara de congelação que contém

exclusivamente alhos. O layout e o aspeto desta câmara estão ilustrados na Figura 62.

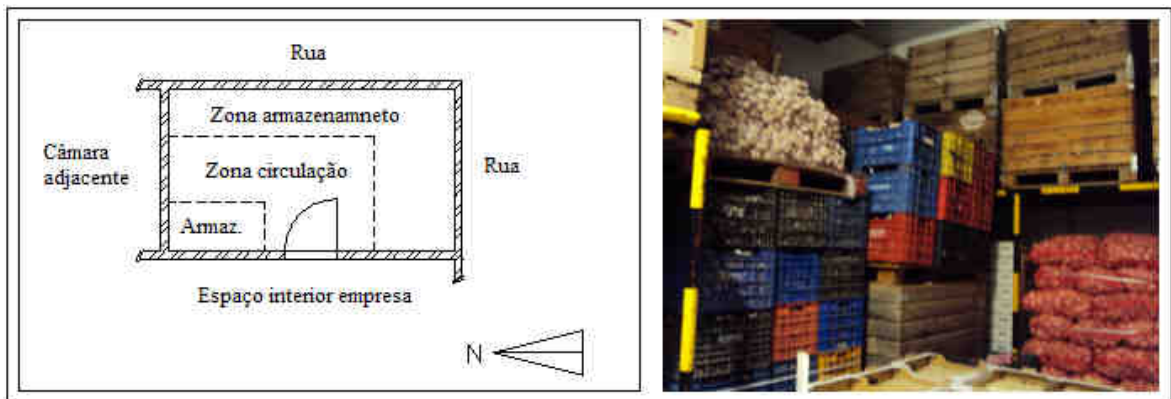


Figura 62 - Layout e acomodação de alho no interior da câmara de teste (fonte: Ho4).

As condições para a preservação do alho (temperatura e humidade relativa), monitorizadas e controladas através de um quadro de comando, estão descritas na Tabela 28.

Tabela 28 - Condições climáticas para a preservação do alho (fonte: Ho4).

Grandeza	Valor médio
Temperatura interior	-3 °C
Humidade relativa	85 %

O processo de arrefecimento é efetuado através da circulação forçada de ar frio em todo o espaço interior, por meio de dois ventiladores acoplados ao evaporador. Na entrada encontra-se uma porta corrediça e estanque sem qualquer tipo de barreira térmica adicional, quando aberta. Quanto à iluminação, esta é ativada manualmente por um interruptor que alimenta um projetor de halogéneo (Figura 63).

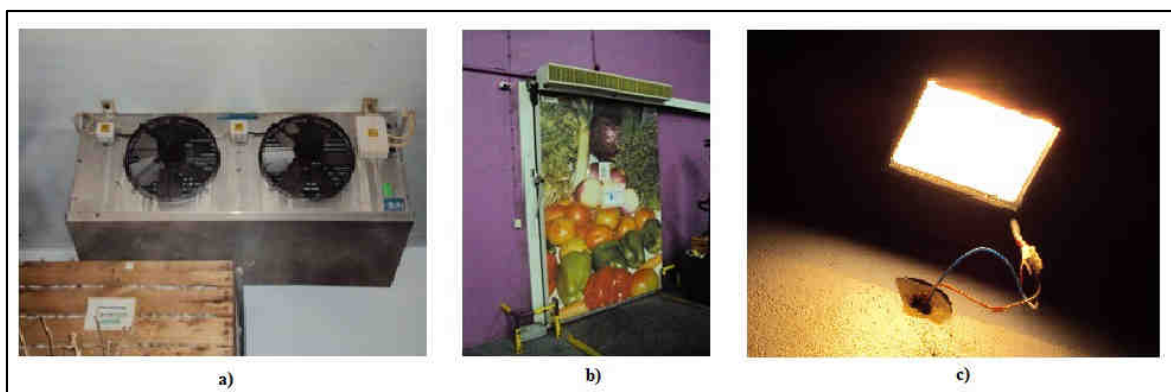


Figura 63 - Imagens da câmara de teste: (a) evaporador com circulação forçada de ar; (b) porta corrediça e (c) projetor de halogéneo (fonte: Ho4).

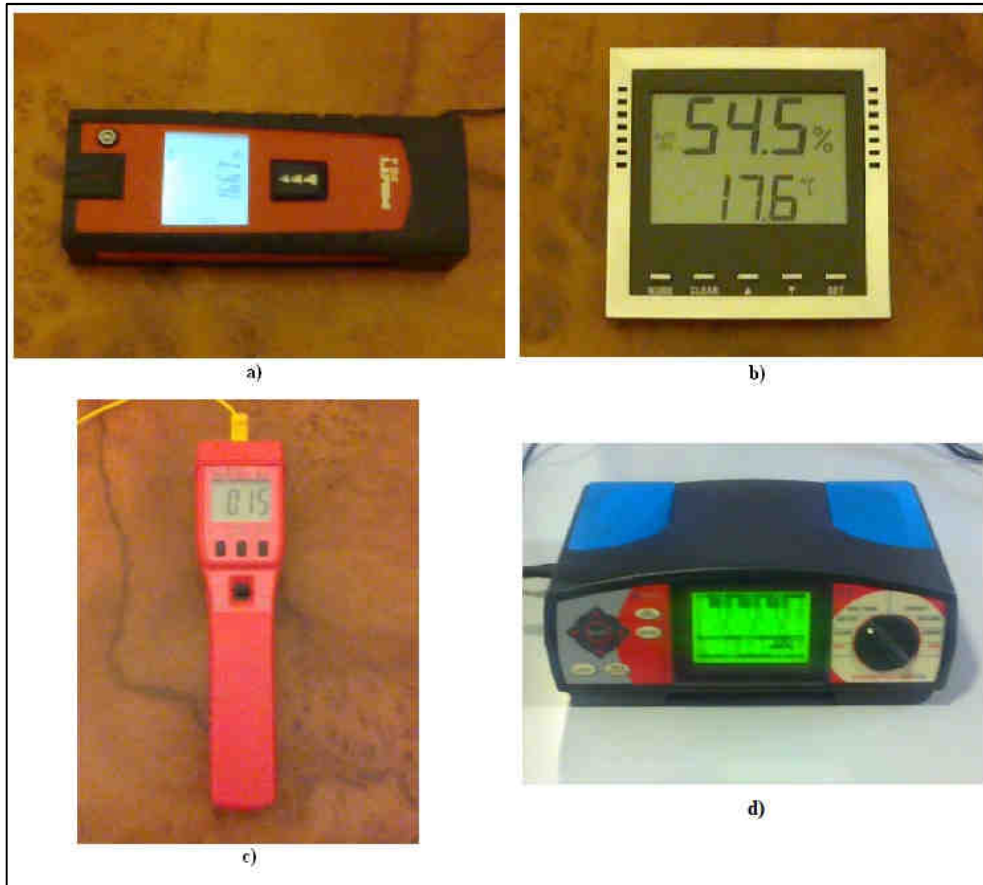
### 2.2.5.2. Recolha de dados e medição do consumo real de câmara

Durante as medições efetuadas e cujos resultados constituirão os inputs da metodologia a aplicar, foram utilizados os instrumentos de medição cujas características essenciais se resumem na Tabela 29. As imagens a eles referentes encontram-se na Figura 64.

Tabela 29 - Instrumentos de medição utilizados e características técnicas (fonte: elaboração própria).

Instrumento	Caraterísticas	Grandezas medidas
Medidor laser de distâncias	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Unidade medida: m.</li> <li>▪ Resolução: 3 c. d.<sup>10</sup>.</li> </ul>	Dimensões da câmara e da entrada.
Termo-higrómetro	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Unidades medida: °C (temperatura), % (humidade relativa).</li> <li>▪ Resolução: 1 c. d..</li> </ul>	Temperaturas e humidades relativas interior e exterior.
Termómetro com sonda de contacto	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Unidade medida: grau celsius.</li> <li>▪ Resolução: 1 c. d..</li> </ul>	Temperatura do condensador.
Analizador de rede elétrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Unidades medida: kW.h (energia ativa), s (tempo).</li> <li>▪ Resolução: 5 c. d. (energia ativa), 0 c. d. (tempo).</li> <li>▪ Períodos de medição programáveis em função da hora.</li> <li>▪ Intervalo amostragem: 5 s.</li> </ul>	Tempo funcionamento compressor, tempo total de ensaio.

<sup>10</sup> Casas decimais.

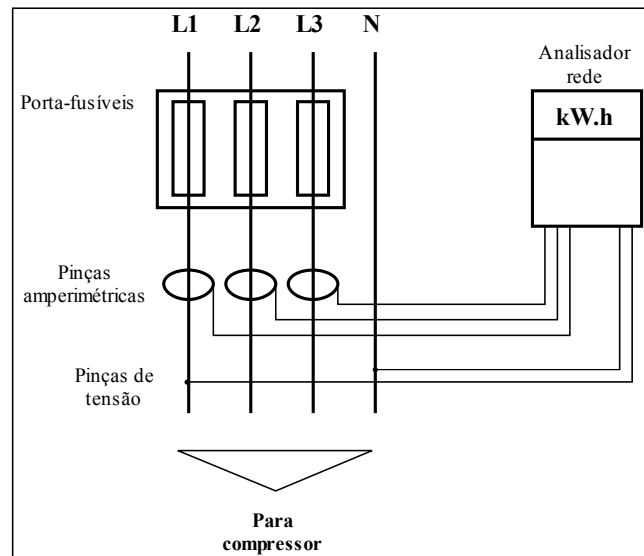


**Figura 64 - Imagens dos instrumentos de medição: a) medidor de distâncias a laser; b) termo-higrómetro; c) termómetro com sonda de contacto; d) analisador de rede (fonte: elaboração própria).**

O analisador de rede serviu para medir o consumo real do compressor, e foi instalado no quadro de comando com as três pinças amperimétricas<sup>11</sup> colocadas em cada fase do porta-fusível que protege o compressor.

Assumindo que as tensões entre cada fase e o condutor neutro são iguais, as duas pinças de tensão do analisador foram colocadas nos bornes de alimentação do quadro (fase e neutro). A Figura 65 esquematiza a ligação realizada.

<sup>11</sup> O compressor possui uma alimentação trifásica.



**Figura 65 - Esquema das ligações do analisador de rede ao quadro de comando (fonte: elaboração própria).**

A recolha de dados decorreu no verão, entre os dias 24 e 25/06/2013, altura em que foi previsível a ocorrência de picos de consumos energéticos associados à entrada de mais calor na câmara e em que a adoção de MEE apropriadas se tornou ainda mais relevante.

Com vista a uma análise mais completa foram executados dois ensaios (A e B) para apuramento de todos os inputs necessários, com durações e horários de realização diferentes.

### 2.2.5.3. Comparação entre os consumos real e simulado da câmara

A comparação entre os consumos real e simulado em cada ensaio A e B foi efetuada pelo cálculo do desvio relativo ( $D_{relativo}$ , em %), cuja fórmula é

$$D_{relativo} = \frac{E_{compressor\ simulado} - E_{compressor\ real}}{E_{compressor\ real}} \times 100 \quad (66)$$

onde  $E_{compressor\ simulado}$  é o consumo simulado do compressor e  $E_{compressor\ real}$  é o consumo medido pelo analisador de rede, ambos em kW.h.

#### 2.2.5.4. Análise de sensibilidade do consumo simulado

Para avaliar o grau de dependência do consumo simulado face à variação dos inputs foi elaborada uma análise de sensibilidade às variáveis.

Neste estudo foram selecionados alguns inputs que na prática são mais fáceis de se de otimizar por implementação de MEE comuns. A Tabela 30 lista os inputs utilizados e algumas considerações suplementares para a elaboração da análise.

**Tabela 30 - Inputs e considerações adicionais na análise de sensibilidade (fonte: elaboração própria).**

Input	Considerações adicionais
Temperatura interior ( $T_{int}$ )	-
Temperatura inicial do produto que entra na câmara ( $T_{produto\ ini}$ )	Massa de produto simulada que entrou na câmara: 1000 kg.
Frequência de abertura da porta ( $f$ )	Tempo de abertura da porta por acesso: 60 s.
Eficiência da barreira contra a entrada de ar ( $E_b$ )	Supondo a inexistência de barreira ( $E_b = 0$ ) ou a presença de uma cortina de ar ( $E_b = 0,7$ ).
Potência da iluminação ( $P_{iluminação}$ )	Iluminação é ativada durante os acessos ao interior.

O modo de variação de cada parâmetro foi programado e ajustado em função da evolução do consumo simulado, tendo como patamar de partida os resultados do ensaio B. Deste modo, cada input foi sujeito a uma variação por passos (e. g. 1 °C para  $T_{int}$  e  $T_{produto\ ini}$ ) e, em cada passo, foi determinado e registado num gráfico o consumo simulado obtido.

#### 2.2.5.5. Simulação e avaliação económica de MEE propostas

As MEE selecionadas para a otimização do consumo global resultante e avaliação económica, bem como os inputs usados na sua modelação, são referidos na Tabela 31.

**Tabela 31 - MEE selecionadas para o ensaio e inputs utilizados na sua modelação (fonte: elaboração própria).**

N.º MEE	Descrição MEE	Input alterado na folha de cálculo
1	Aumento do <i>set point</i> da temperatura interna para -2 °C	Temperatura interna ( $T_{int}$ ).
2	Instalação de uma cortina de ar na entrada	Fator de eficiência contra a passagem de ar ( $E$ ).
3	Instalação de lâmpadas LED	Potência da iluminação ( $P_{iluminação}$ ).

Na MEE 1 pretendeu-se aumentar ligeiramente a temperatura interior da câmara mas sempre de modo a que o alho permanecesse congelado ( $T_{int} < -0,8$  °C), esperando-se que o tempo de trabalho do compressor seja mais reduzido e, conseqüentemente, o consumo global ( $E_{câmara}$ ).

Para a avaliação da MEE 2 utilizaram-se, a título de exemplo, os dados técnicos e preços das cortinas de ar da marca Thermoscreen, comercializadas pela empresa Megaclima [60].

Quanto à MEE 3, a ideia consistiu em observar o impacto da substituição do projetor de halógeno por lâmpadas LED, que constituem uma versão mais económica. Tendo em conta que a iluminância recomendada para câmaras frigoríficas destinadas à conservação de vegetais vale  $200 \text{ lm.m}^{-2}$  [13], o número de lâmpadas LED ( $n_{\text{lâmpadas}}$ ) e a respetiva potência de iluminação ( $P_{\text{iluminação}}$ ) foram estimados pelas eq. 67 e 68 [20]:

$$n_{\text{lâmpadas}} = \frac{200 \times c_{\text{câmara}} \times l_{\text{câmara}}}{F_{\text{lâmpada}}} \quad (67)$$

$$P_{\text{iluminação}} = n_{\text{lâmpadas}} \times P_{\text{lâmpada}} \quad (68)$$

Nestas expressões,  $c_{\text{câmara}}$  é o comprimento da câmara (em m),  $l_{\text{câmara}}$  é a largura (em m),  $F_{\text{lâmpada}}$  é o fluxo luminoso da lâmpada LED selecionada (em lm) e  $P_{\text{lâmpada}}$  é a potência da lâmpada (em W).

Após a determinação das economias de energia produzidas por cada medida, procedeu-se ao cálculo dos investimentos necessários para as aplicar (considerando os custos do equipamento) e dos períodos de retorno associados por aplicação da eq. 65.

Na MEE 3 contemplou-se o preço das novas lâmpadas e das suas luminárias. Os dados técnicos foram retirados da Osram [61, 62] e os preços da empresa Zembe [63].

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Análise e melhoria do perfil energético no setor agroindustrial alentejano

##### 3.1.1. Classificação dimensional das empresas

A Figura 66 ilustra, para cada fileira, a proporção de empresas pertencentes a cada classe dimensional.

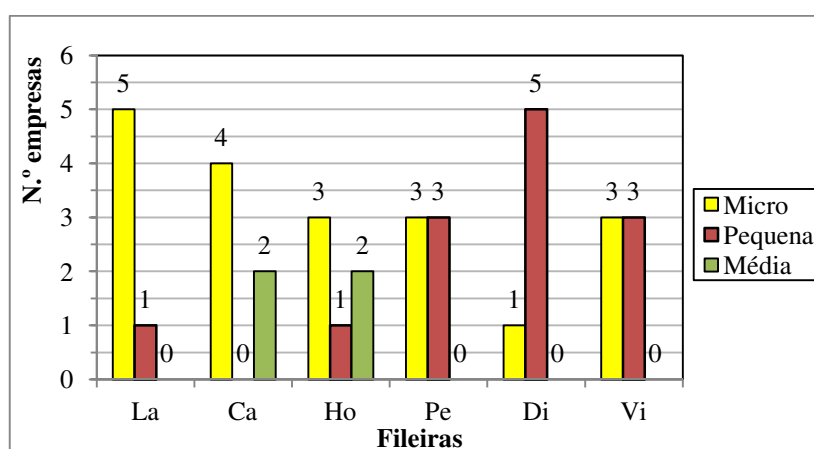


Figura 66 - Proporção das empresas pertencentes a cada classe dimensional, por fileira (fonte: elaboração própria).

A figura evidencia uma grande concentração das empresas nas classes de micro e pequena dimensão, perfazendo ambas uma percentagem de 83,3 % relativamente ao total de empresas analisadas. Este facto está em acordo com o que se havia constatado na distribuição das empresas segundo a sua dimensão, ao nível nacional (ver Figura 4, pág. 4). Deste modo, as empresas menores possuem uma grande relevância no setor agroindustrial alentejano, visto que ao se dispersarem pelo território (designadamente nos espaços rurais) e sendo elas em grande número, contribuem para o recrutamento de mão-de-obra local e para o estímulo das economias regionais e mesmo nacional.

##### 3.1.2. Consumos totais, custos totais e custos específicos de energia

A Tabela 32 mostra os consumos e os custos totais de energia em 2010, assim como

os custos específicos de energia apurados para cada empresa e cada fileira. São também referidos os valores médios do custo específico por fileira.

**Tabela 32 - Consumos totais, custos totais e custos específicos de energia por tipo de fonte - dados 2010**  
(fonte: elaboração própria).

Empresa	Energia elétrica			Gasóleo			Gás propano			Total		Custo espec. global (€/tep)
	Cons. (tep)	Custo (€)	Custo espec. (€/tep)	Cons. (tep)	Custo (€)	Custo espec. (€/tep)	Cons. (tep)	Custo (€)	Custo espec. (€/tep)	Cons. (tep)	Custo (€)	
La1	2,392	8020	3352,84	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	2,392	8020	3352,84
La2	4,198	18000	4287,76	8,880	8000	900,90	0,000	0	0,00	13,078	26000	1988,07
La3	4,537	23587	5198,81	10,447	27689	2650,43	0,000	0	0,00	14,984	51276	3422,05
La4	4,091	21690	5301,88	4,341	5158	1188,21	0,000	0	0,00	8,432	26848	3184,06
La5	1,422	9000	6329,11	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	1,422	9000	6329,11
La6	3,616	15200	4203,54	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	3,616	15200	4203,54
Média La	-	-	4778,99	-	-	1579,85	-	-	0,00	-	-	3746,61
Ca1	1,204	6820	5664,45	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	1,204	6820	5664,45
Ca2	231,291	100972	436,56	7,888	9004	1141,48	142,968	128222	896,86	382,147	238198	623,32
Ca3	4,338	4200	968,19	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	4,338	4200	968,19
Ca4	0,906	6740	7439,29	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	0,906	6740	7439,29
Ca5	19,617	85925	4380,13	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	19,617	85925	4380,13
Ca6	3,412	17410	5102,58	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	3,412	17410	5102,58
Média Ca	-	-	3998,53	-	-	1141,48	-	-	896,86	-	-	4029,66
Ho1	1698,500	634381	373,49	0,000	0	0,00	241,531	202703	839,24	1940,031	837084	431,48
Ho2	2,963	14456	4878,84	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	2,963	14456	4878,84
Ho3	3,438	16687	4853,69	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	3,438	16687	4853,69
Ho4	6,761	33933	5018,93	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	6,761	33933	5018,93
Ho5	5,748	32683	5685,98	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	5,748	32683	5685,98
Ho6	0,443	1766	3986,46	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	0,443	1766	3986,46
Média Ho	-	-	4132,90	-	-	0,00	-	-	839,24	-	-	4142,56
Pe1	17,097	77472	4531,32	41,506	53358	1285,55	0,000	0	0,00	58,603	130830	2232,48
Pe2	1,764	9533	5404,20	8,978	12000	1336,60	0,000	0	0,00	10,742	21533	2004,56
Pe3	17,827	82172	4609,41	27,797	33892	1219,27	0,000	0	0,00	45,624	116064	2543,92
Pe4	3,588	18232	5081,38	45,643	57721	1264,62	0,000	0	0,00	49,231	75953	1542,79
Pe5	10,217	48092	4707,06	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	10,217	48092	4707,06
Pe6	3,323	17397	5235,33	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	3,323	17397	5235,33
Média Pe	-	-	4928,12	-	-	1276,51	-	-	0,00	-	-	3044,36
Di1	11,482	54000	4703,01	101,952	114000	1118,17	0,000	0	0,00	113,434	168000	1481,04
Di2	9,672	44202	4570,10	55,986	65286	1166,11	0,000	0	0,00	65,658	109488	1667,55
Di3	3,309	16800	5077,06	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	3,309	16800	5077,06
Di4	3,745	15528	4146,33	20,088	22970	1143,47	0,000	0	0,00	23,833	38498	1615,32
Di5	2,004	8500	4241,52	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	2,004	8500	4241,52
Di6	1,402	7112	5072,75	9,707	17988	1853,10	0,000	0	0,00	11,109	25100	2259,43
Média Di	-	-	4635,13	-	-	1320,21	-	-	0,00	-	-	2723,65
Vi1	0,430	2600	6046,51	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	0,430	2600	6046,51
Vi2	4,296	18000	4189,94	5,184	4000	771,60	0,000	0	0,00	9,480	22000	2320,68
Vi3	3,595	15560	4328,23	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	3,595	15560	4328,23
Vi4	0,211	1611	7635,07	4,493	7500	1669,26	0,000	0	0,00	4,704	9111	1936,86
Vi5	0,413	2400	5811,14	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	0,413	2400	5811,14
Vi6	0,198	1320	6666,67	0,000	0	0,00	0,000	0	0,00	0,198	1320	6666,67
Média Vi	-	-	5779,59	-	-	1220,43	-	-	0,00	-	-	4518,35

Nas figuras seguintes esboçam-se os gráficos dos consumos de cada fonte energética por empresa.

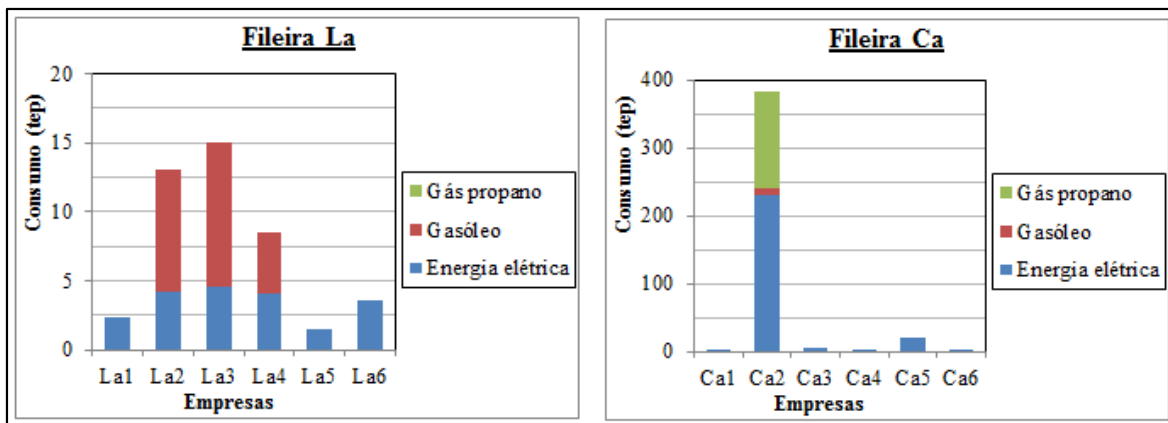


Figura 67 - Consumos de energia por tipo de fonte e empresa - fileiras La e Ca, dados 2010 (fonte: elaboração própria).

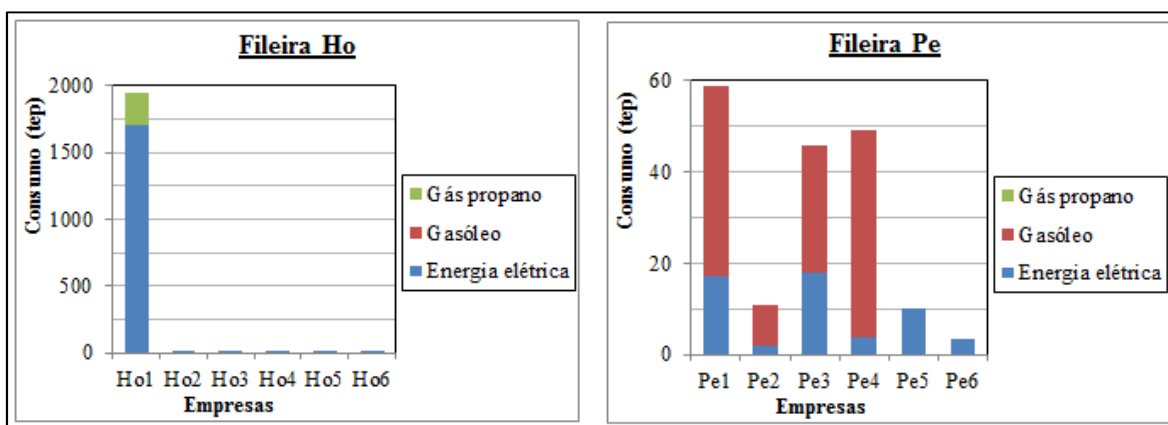


Figura 68 - Consumos de energia por tipo de fonte e empresa - fileiras Ho e Pe, dados 2010 (fonte: elaboração própria).

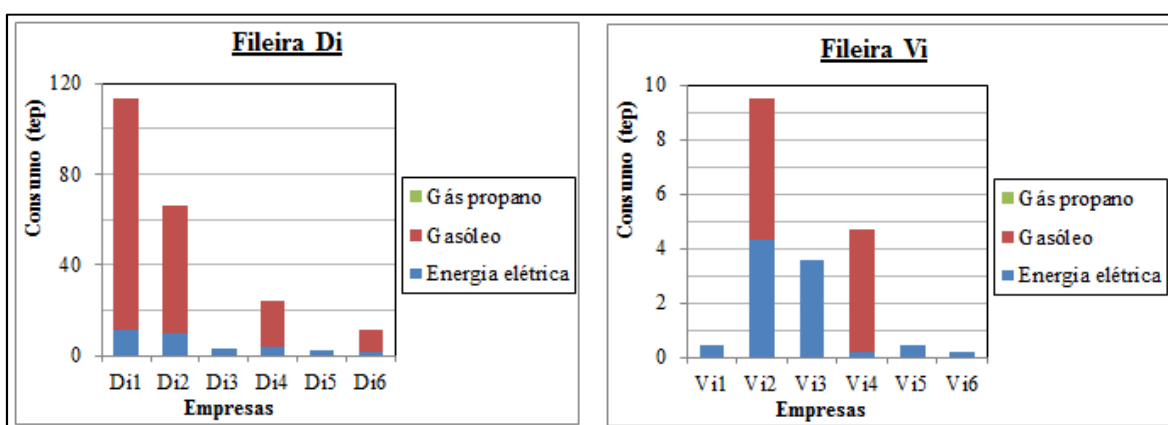


Figura 69 - Consumos de energia por tipo de fonte e empresa - fileiras Di e Vi, dados 2010 (fonte: elaboração própria).

De uma forma global, é possível observar que a energia elétrica e o gásóleo foram as

fontes com maior consumo em todas as fileiras, tendo ambas preenchido a totalidade das necessidades requeridas para a dos lácteos, peixe, distribuição e vinho e vinha. Somente as empresas Ca2 e Ho1 é que possuíram consumos significativos de gás propano, sendo estas efetivamente aquelas que registaram maiores exigências energéticas relativamente às outras por serem de média dimensão (382 tep e 1940 tep, respetivamente). De facto, a dimensão destas duas empresas justificou as grandes desproporções em termos de consumo que se verifica nas fileiras da carne e hortofrutícola.

O gasóleo mostrou-se como a fonte mais utilizada de um modo geral, conforme se observa nas fileiras dos lácteos (54 %), peixe (70 %), distribuição (86 %) e vinho e vinha (51 %). As aplicações desta fonte ocorreram sobretudo na frota de transportes (em especial na fileira da distribuição, com um consumo muito acentuado), nas caldeiras para produção de vapor e, em certas ocasiões, no gerador de emergência.

A energia elétrica apresentou-se como a segunda fonte mais utilizada entre as várias fileiras, exceto na das carnes e hortofrutícola com representatividades de 63 % e 88 %, respetivamente. Dentro da fileira das carnes, os processos produtivos mais complexos são os das empresas Ca2 (abate de animais, desmanche e tratamento das carnes, peles e outros produtos) e Ca5 (uma salsicharia que inclui dois processos - tratamento de carnes e fumagem), que necessitam de valores avultados de energia elétrica para alimentar diversos elementos do processo produtivo: iluminação, climatização, frio, ventilação e ar comprimido.

Já na fileira hortofrutícola, a empresa Ho1 registou um consumo acentuado de energia elétrica porque, para além do armazenamento e da embalagem dos produtos (típicos das unidades industriais desta fileira), efetua ainda a transformação dos mesmos (corte das frutas, lavagem, etc.).

O gás propano apresentou uma expressão pouco relevante nas várias fileiras, sendo apenas utilizado na unidade Ca2 (37 %) e Ho1 (13 %) dentro de processos como produção de calor nas caldeiras, fogões de refeitórios e outros equipamentos específicos (incineradoras, maçaricos, ...). A fraca expressão observada para este combustível pode justificar-se pela crescente adesão das empresas ao gás natural, que se torna mais vantajoso devido ao preço e à facilidade de transporte e de acesso.

Não foi registado algum consumo de biomassa como combustível durante o ano de 2010, embora dados recentes relativos a 2012 tenham apontado que a empresa Ca5 utilizou a madeira como fonte de calor durante a fumagem das carnes (representando 142 tep ou 29

% do consumo energético global). Considerando que muito poucas empresas recorreram à biomassa dentro dos processos produtivos, é possível antever um grande potencial de poupança no custo pela utilização daquela fonte em substituição dos combustíveis fósseis devido aos menores custos de aquisição e às menores emissões de gases nocivos ao meio ambiente. Este estudo será efetuado adiante em subcapítulo próprio, durante a análise às MEE sugeridas para as empresas.

Abaixo se esboçam os gráficos representativos do custo energético por tipo de fonte, suportado por cada empresa em 2010.

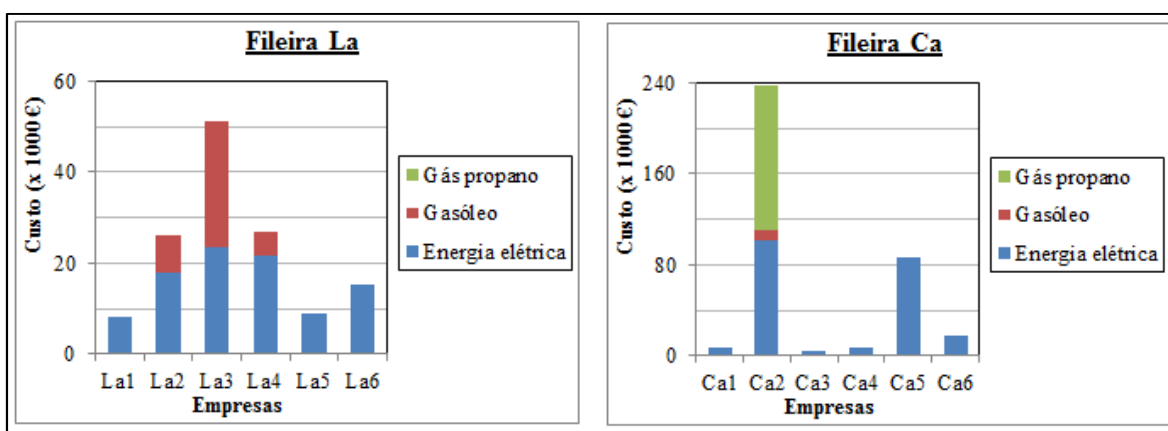


Figura 70 - Custos de energia anual por tipo de fonte - fileiras La e Ca, dados 2010 (fonte: elaboração própria).

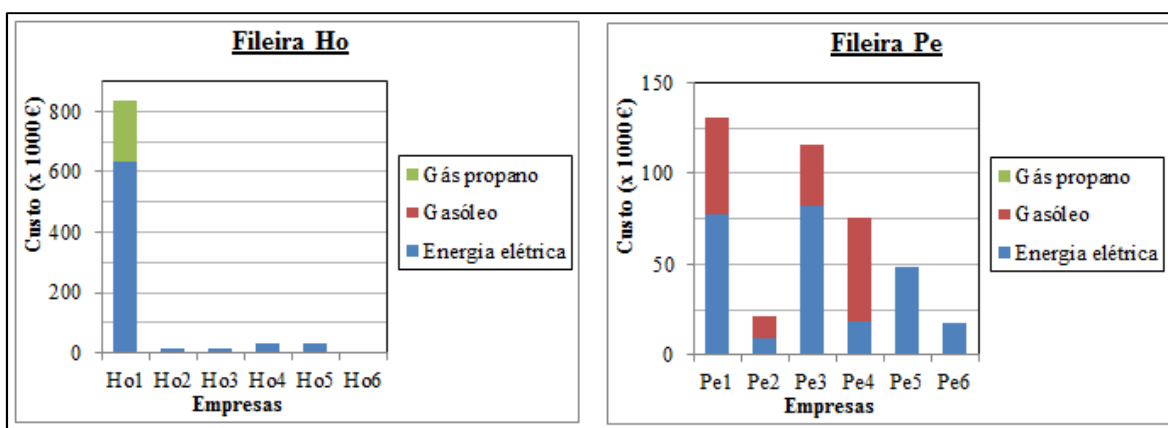


Figura 71 - Custos de energia anual por tipo de fonte - fileiras Ho e Pe, dados 2010 (fonte: elaboração própria).

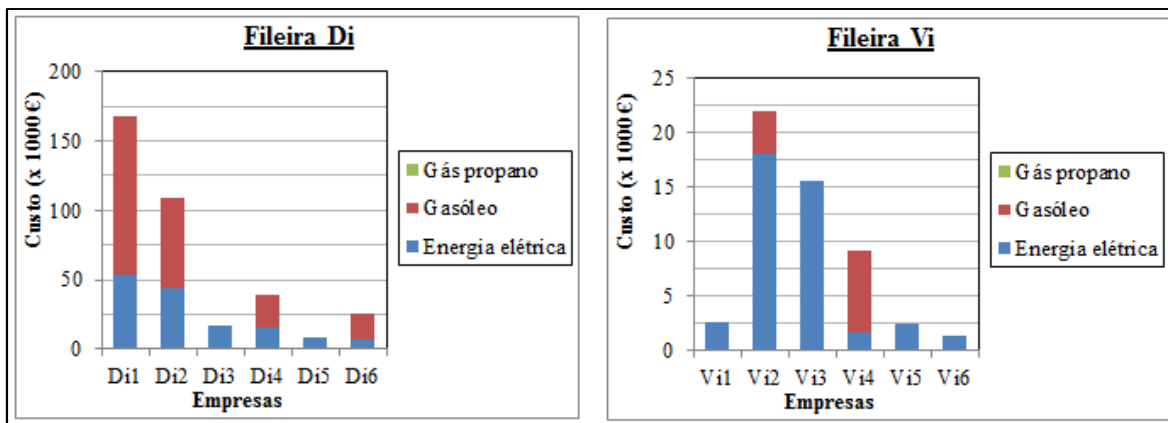


Figura 72 - Custos de energia anual por tipo de fonte - fileiras Di e Vi, dados 2010 (fonte: elaboração própria).

De um modo geral, observou-se uma relação de proporcionalidade direta entre o consumo e o custo totais de energia ao longo das várias empresas, com exceção da La5, Pe4 e Vi3. Diversos fatores contribuíram para a incoerência encontrada nestas empresas, como o preço da energia estabelecida no tarifário adotado, a potência elétrica contratada e os períodos de laboração dentro das horas normais ou económicas (o preço da energia elétrica varia em função da hora e do dia da semana).

Apesar de se ter observado o inverso no que se refere aos consumos, desta vez os custos de energia elétrica aparentaram ser superiores aos do gasóleo. De facto, verificou-se que algumas empresas, apesar de consumirem menos energia elétrica, tiveram um custo associado superior ao do gasóleo (La2, Pe1, Pe3 e Vi2), demonstrando que o custo por unidade de energia é superior na energia elétrica do que no gasóleo.

Por sua vez, o custo por tep do gás propano aparenta ser elevado quando comparado com o das outras duas fontes, pois observou-se um aumento acentuado da sua proporção entre os gráficos dos consumos (Figura 67) e dos custos totais (Figura 70), particularmente nas empresas Ca2 e Ho1. Este custo elevado mostra ser mais um motivo para a mudança para o gás natural. Sem grande surpresa, as mesmas empresas foram as que registaram os maiores custos de todas as analisadas.

Os gráficos que se reportam ao consumo específico de energia por empresa são ilustrados nas figuras seguintes.

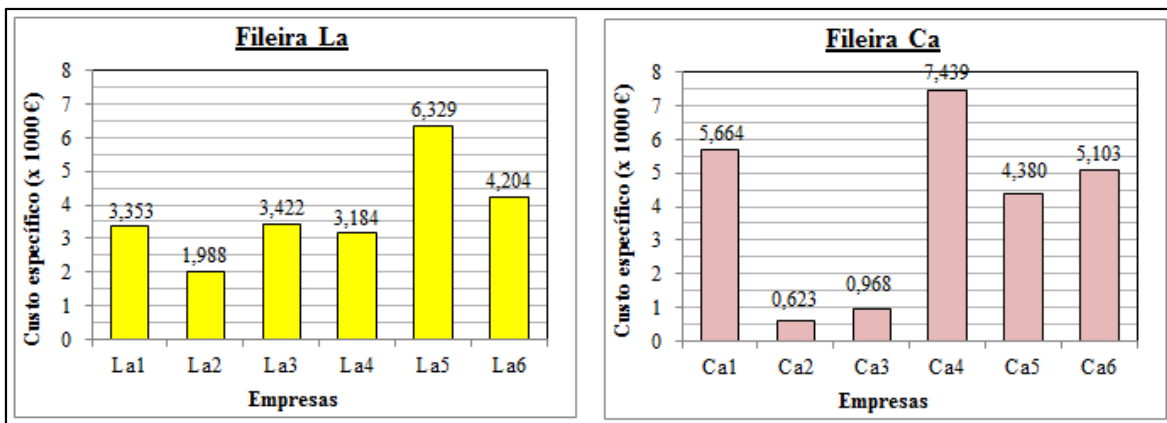


Figura 73 - Custos específicos de energia - fileiras La e Ca, dados 2010 (fonte: elaboração própria).

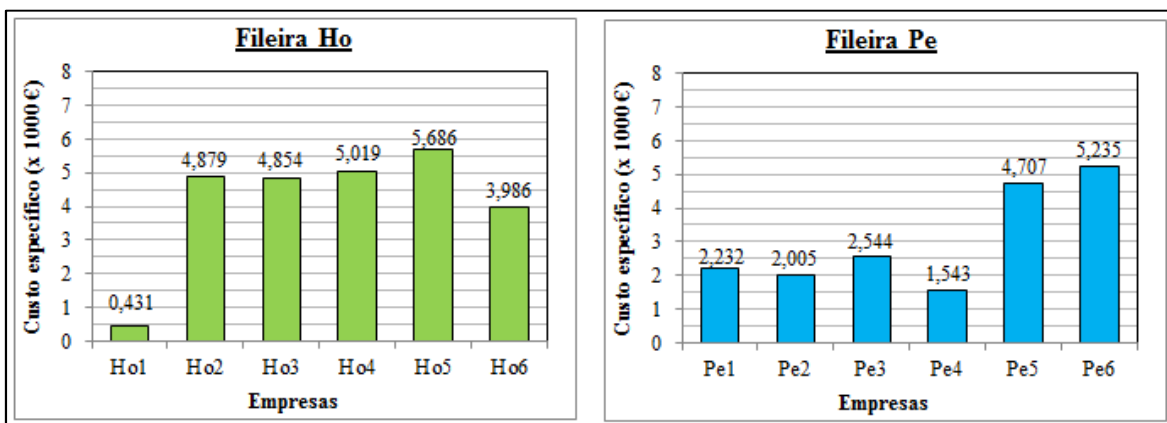


Figura 74 - Custos específicos de energia - fileiras Ho e Pe, dados 2010 (fonte: elaboração própria).

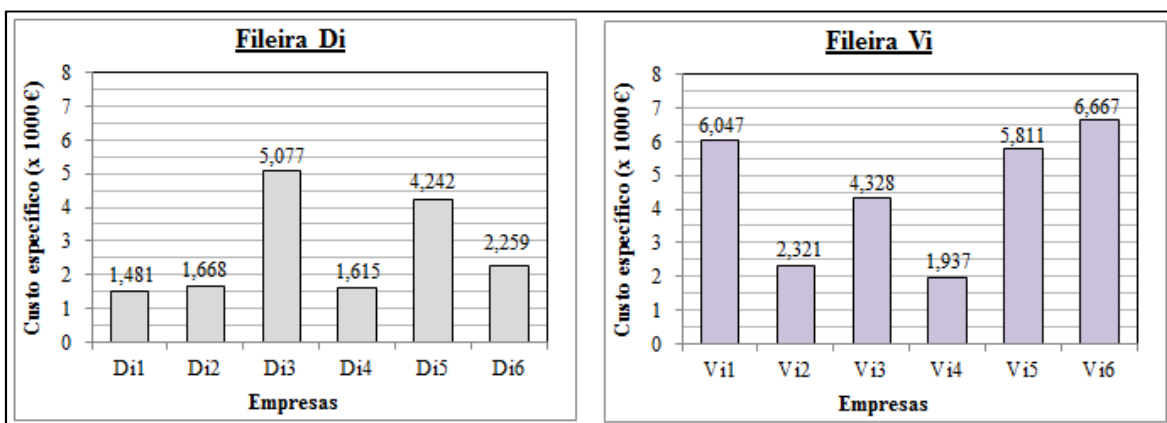


Figura 75 - Custos específicos de energia - fileiras Di e Vi, dados 2010 (fonte: elaboração própria).

Verificou-se que os custos específicos global e por fonte variaram de empresa para empresa e, em alguns casos, de um modo substancial, como se sucedeu na Ca2 e na Ca3 que registaram valores muito baixos. O desvio ocorrido entre os custos específicos globais

daquelas empresas e o valor médio da fileira das carnes rondou os 3400 €.tep<sup>-1</sup>.

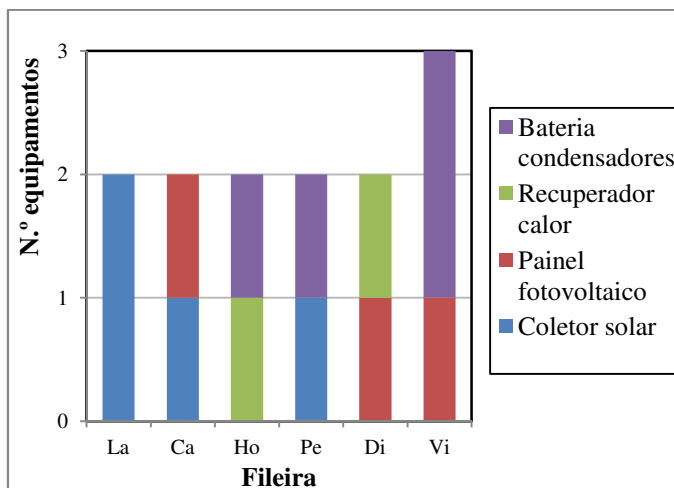
A fileira do vinho e vinha foi a que registou o maior valor de entre todas (4518,35 €.tep<sup>-1</sup>), devendo-se essa ocorrência ao facto de a atividade ser essencialmente sazonal, o que implica um consumo anual energético inferior. Deste modo, estas empresas são obrigadas a optar por tarifários de energia elétrica de baixo consumo onde o preço por kW.h é usualmente superior.

De um modo genérico, quanto maior o número de fontes energéticas utilizadas pelas empresas menor se tornou o custo específico global (caso da La2, Di1 e Vi2), pois este diluiu-se mais facilmente por essas fontes; isto sugere que se deve evitar a utilização exclusiva da energia elétrica em todos os processos operativos quando existem outras fontes alternativas que possam assegurar o seu funcionamento (ex.º uso do gásóleo para gerar calor). Outro motivo para se evitar essa exclusividade encontra-se no preço específico da energia elétrica, que em todas as empresas foi superior ao do gásóleo excetuando o caso de Ca2, devendo-se esse facto provavelmente ao tipo de contrato e aos preços estabelecidos com as companhias.

A avaliar pelas diferenças entre os custos específicos encontrados nas várias empresas, sugere-se como proposta para redução das despesas a revisão periódica dos contratos de fornecimento de energia existentes de modo a verificar se existe algum a um preço mais favorável. Outra solução consiste em averiguar a possibilidade de deslocar os períodos laborais para horários onde a energia elétrica é mais barata (horas de vazio e supervazio), que normalmente são fixados entre as 22 h e as 7 h ou aos fins de semana.

### **3.1.3. Instalação de equipamentos para melhoria da eficiência energética**

Relativamente aos equipamentos para otimização da eficiência energética previamente instalados nas empresas em 2010 ou em anos anteriores, a Figura 76 exhibe as quantidades e tipologias de cada um deles.



**Figura 76 - Tipologia e quantidade de equipamentos para melhoria de eficiência energética (fonte: elaboração própria).**

Os coletores solares e as baterias de condensadores foram os equipamentos mais requisitados (3 e 4 unidades no total), embora se tenha verificado nas faturas de energia elétrica de algumas empresas que existem consumos de energia reativa penalizados pelas companhias, mostrando que as baterias estão desafinadas e que necessitam de uma atualização.

Existe um equilíbrio em termos de número de empresas que efetuaram a instalação de equipamentos para otimização energética, o que mostra que, apesar da pequena dimensão, elas manifestam preocupação com as questões de eficiência nos seus processos produtivos. Considerando o universo em análise, 36 % efetuou a instalação de algum desses equipamentos. Existe, portanto, um potencial considerável para reduzir os consumos se mais empresas procederem do mesmo modo, podendo beneficiar de apoios estatais para decrementar o investimento inicial (veja-se o disposto no SGCIE - Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia [5]).

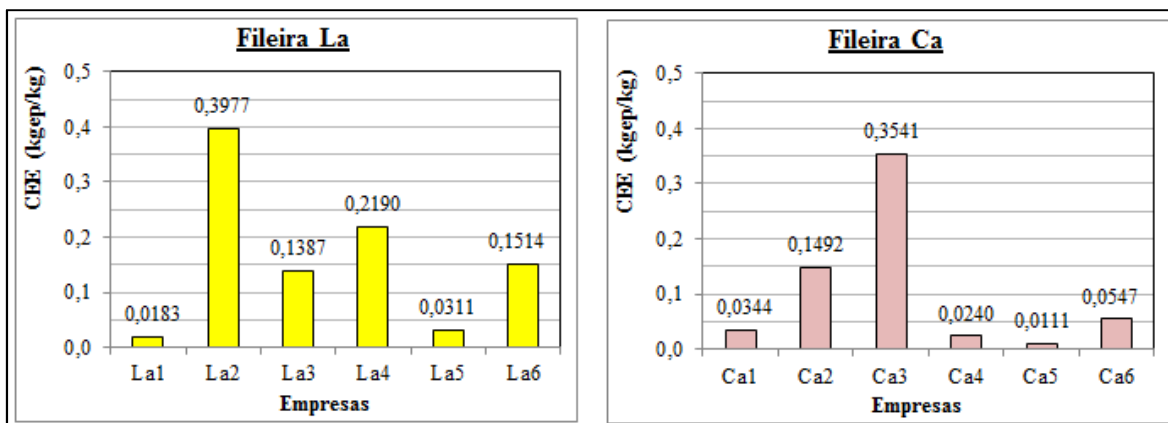
### 3.1.4. Cálculo dos índices específicos de energia

A Tabela 33 exhibe as quantidades de produto final convertidas para kg, as emissões de GEE e os resultados para os índices *CEE* e *IC*.

**Tabela 33 - Consumos energéticos, produções e CEE anuais para cada empresa (fonte:elaboração própria).**

Empresa	Consumo energia (tep)	Produção (kg)	Emissões GEE (kgCO <sub>2</sub> eq)	CEE (tep.kg <sup>-1</sup> )	IC (kgCO <sub>2</sub> eq.tep <sup>-1</sup> )
La1	2,392	130401	5228,912	0,0000183	2186,0
La2	13,078	32880	36688,844	0,0003977	2805,4
La3	14,984	108000	42284,777	0,0001387	2822,0
La4	8,432	38500	22392,212	0,0002190	2655,6
La5	1,422	45700	3108,492	0,0000311	2186,0
La6	3,616	23880	7904,576	0,0001514	2186,0
Ca1	1,204	35030	2631,944	0,0000344	2186,0
Ca2	382,147	2560808	907147,421	0,0001492	2373,8
Ca3	4,338	12251	9482,868	0,0003541	2186,0
Ca4	0,906	37723	1980,516	0,0000240	2186,0
Ca5	19,617	1770000	42882,762	0,0000111	2186,0
Ca6	3,412	62400	7458,632	0,0000547	2186,0
Ho1	1940,031	9568000	4350007,319	0,0002028	2242,2
Ho2	2,963	110000	6477,118	0,0000269	2186,0
Ho3	3,438	1480000	7515,468	0,0000023	2186,0
Ho4	6,761	2100000	14779,546	0,0000032	2186,0
Ho5	5,748	3500000	12565,128	0,0000016	2186,0
Ho6	0,443	28106	968,398	0,0000158	2186,0
Pe1	58,603	16463	165967,931	0,0035597	2832,1
Pe2	10,742	668230	31671,744	0,0000161	2948,4
Pe3	45,624	17575	125090,487	0,0025960	2741,8
Pe4	49,231	100000	149254,511	0,0004923	3031,7
Pe5	10,217	1387177	22334,362	0,0000074	2186,0
Pe6	3,323	120000	7264,078	0,0000277	2186,0
Di1	113,434	1480000	340967,338	0,0000766	3005,9
Di2	65,658	942356	194598,817	0,0000697	2963,8
Di3	3,309	620285	7233,474	0,0000053	2186,0
Di4	23,833	95000	70423,212	0,0002509	2954,9
Di5	2,004	419000	4380,744	0,0000048	2186,0
Di6	11,109	657512	33138,999	0,0000169	2983,1
Vi1	0,430	1980000	939,98	0,0000002	2186,0
Vi2	9,480	990000	25452,125	0,0000095	2684,8
Vi3	3,595	128700	7858,67	0,0000279	2186,0
Vi4	4,704	495000	14381,459	0,0000094	3057,3
Vi5	0,413	99000	902,818	0,0000042	2186,0
Vi6	0,198	396000	432,828	0,0000005	2186,0

Nas figuras seguintes ilustram-se os valores do *CEE* para cada empresa, expressos em kgep/kg.



**Figura 77 - CEE por empresa - fileiras La e Ca, dados de 2010 (fonte: elaboração própria).**

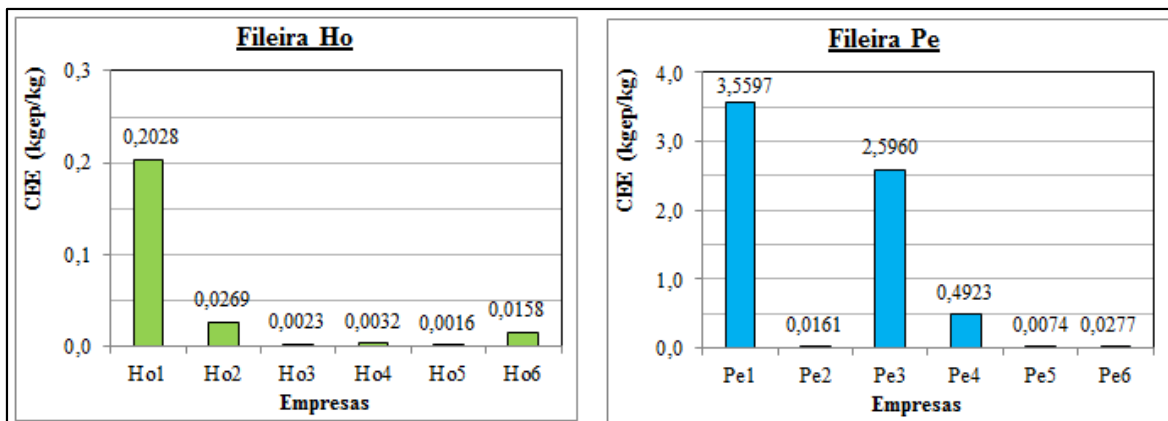


Figura 78 - CEE por empresa - fileiras Ho e Pe, dados de 2010 (fonte: elaboração própria).

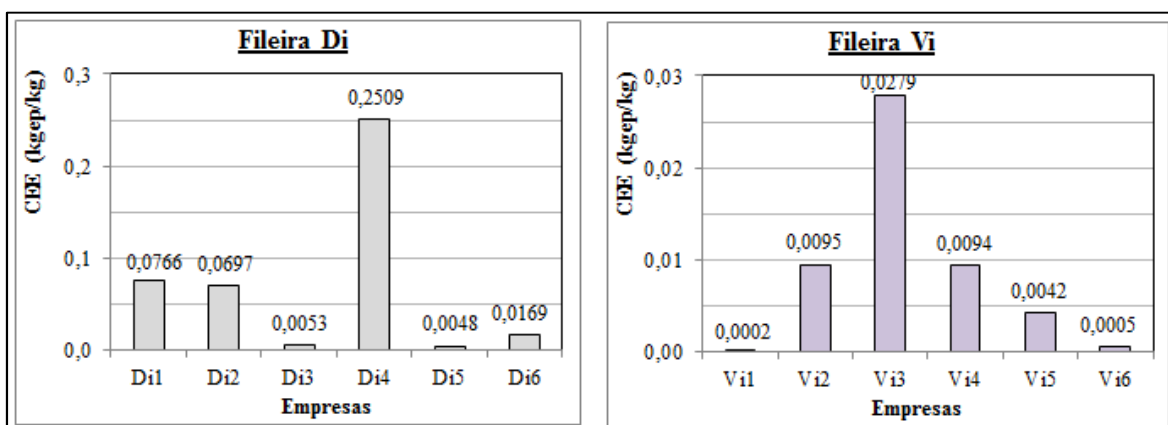


Figura 79 - CEE por empresa - fileiras Di e Vi, dados de 2010 (fonte: elaboração própria).

De acordo com as figuras e com os dados existentes constatou-se que:

- a fileira peixe regista os maiores valores de CEE (média 1,1165 kgep/kg) enquanto a dos vinhos exhibe os valores mais baixos (média 0,0227 kgep/kg). Tais observações explicam-se pela intensidade e grandes consumos dos sistemas de refrigeração, no caso da fileira peixe, e pelo processo de fabrico de cariz químico que decorre a temperaturas próximas da ambiente, sem grandes necessidades energéticas, no caso da fileira dos vinhos;
- em geral, as empresas com maiores volumes de produção geram CEE's menores devido ao processo de fabrico em série mais intensivo e rápido que dispensa a utilização de mais energia por unidade de produto. Além disso, os arranques e paragens das máquinas são em número menor, ocasionando um consumo de energia inferior para a preparação das mesmas (aquecimento ou refrigeração inicial);
- para a fileira lácteos, faz sentido comparar os valores de CEE e extrair daí o nível de

eficiência energética das empresas uma vez que todas fabricam o mesmo tipo de produto (queijo e requeijão) e dispõem de processos operativos semelhantes. Desta forma, a empresa La2 apresentou a menor eficiência por deter o *CEE* mais alto da fileira (0,3977 kgep/kg), em contraste com a La1 que mostrou o melhor desempenho (0,0183 kgep/kg);

- o alto *CEE* registado na La2 justifica-se, em parte, pela utilização de sistemas de calor baseados no consumo de energia elétrica, que acarretam maiores necessidades energéticas e custos associados. Recomenda-se uma análise para implementação de uma caldeira a gás, gasóleo ou biomassa;
- na fileira das carnes, a Ca2 dispõe de um processo operativo distinto por se dedicar ao abate e preparação de animais destinados a outras empresas do setor, enquanto as restantes dedicam-se à fabricação de enchidos e produtos fatiados. Assim, não é possível estabelecer uma comparação fidedigna daquela empresa com o resto da fileira;
- a Ca5 possui o melhor desempenho energético por causa do mais baixo *CEE* (0,0111 kgep/kg), resultado do elevado volume de produção e da utilização de coletores solares para aquecimento de águas, que reduzem os consumos energéticos. Esta última justificação também se aplica ao baixo *CEE* encontrado na Ca4;
- noutras empresas (Ca1, Ca2 e Ca4) foram detetados problemas nos sistemas de refrigeração responsáveis por maiores dispêndios de energia (juntas das portas e isolamentos deteriorados), o que se refletiu nos maiores *CEE's* observados;
- na fileira hortofrutícola, a Ho1 registou o maior *CEE* observado (0,2028 kgep/kg), o qual é 20 vezes superior à média das outras empresas. O principal motivo desta discrepância reside no processo produtivo mais complexo (conferição do produto, corte, lavagem, secagem e refrigeração), diferente do das restantes (conferição e refrigeração). Outro motivo encontrado está na maior variedade de produtos oferecidos pela Ho1;
- na Ho6 verificaram-se problemas nos isolamentos das câmaras (juntas das portas), um facto que pode justificar um dos maiores *CEE's* observados;
- para a fileira peixe, a Pe1 e Pe3 exibem *CEE's* superiores (média 3,078 kgep/kg) e distantes do das restantes empresas (média 0,017 kgep/kg) devido ao processo produtivo que contém operações adicionais (e. g. imersão e adição de água no peixe - vidragem) e aos volumes de produção inferiores;
- porque esta fileira possui um *CEE* mais elevado devido ao peso do consumo dos sistemas de refrigeração nas necessidades energéticas, é imperiosa a manutenção regular

e a adoção de medidas adequadas nesses sistemas de forma a reduzir os dispêndios frequentemente observados e que se concentram nas entradas térmicas através das portas e dos cantos das câmaras;

- na fileira distribuição, a Di4 destacou-se pelo seu baixo desempenho energético (*CEE* de 0,2509 kgep/kg) comparativamente às restantes empresas, sendo uma das causas os isolamentos deficientes das câmaras existentes nas instalações;
- a frota de transportes é maior nas empresas Di1 e Di2, justificando maiores consumos de gasóleo e, por conseguinte, maiores *CEE*'s;
- dentro da fileira vinho e vinha observaram-se ligeiras diferenças no esquema de fabricação dos vinhos adotados pelas empresas e que caracterizam a sua qualidade. Esta ocorrência foi responsável pelas disparidades nos *CEE*'s apurados;
- a Vi3 registou o pior desempenho energético ( $CEE = 0,0279$  kgep/kg), em parte por não dispor de equipamentos que melhoram a eficiência como se sucede com a Vi1 e Vi2, as quais procederam à instalação de baterias de condensadores e coletores solares;
- a Vi6 utiliza técnicas tradicionais na fabricação do vinho (e. g. esmagamento das uvas por pessoas), resultando daí um baixo *CEE*.

As figuras que se seguem indicam os valores de *IC* para cada empresa.

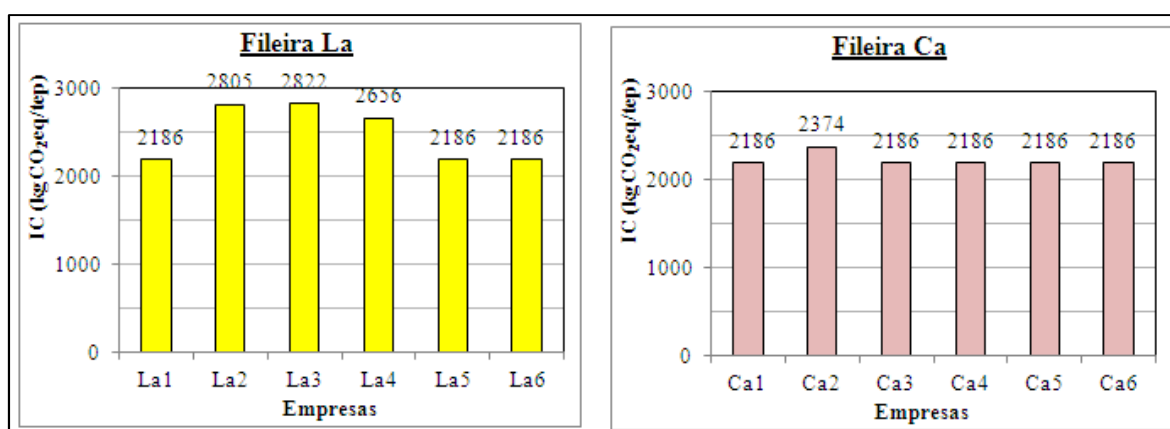


Figura 80 - *IC* por empresa - fileiras La e Ca, dados de 2010 (fonte: elaboração própria).

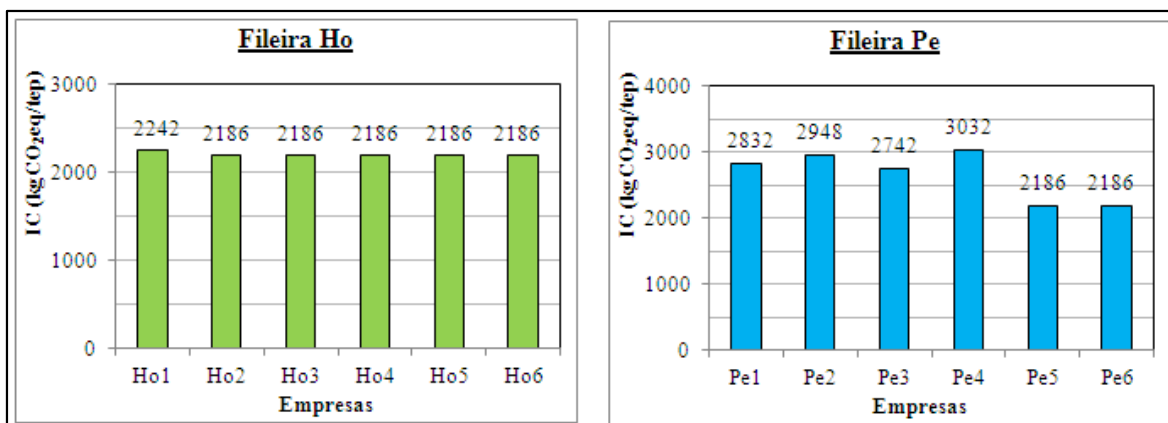


Figura 81 - IC por empresa - fileiras Ho e Pe, dados de 2010 (fonte: elaboração própria).

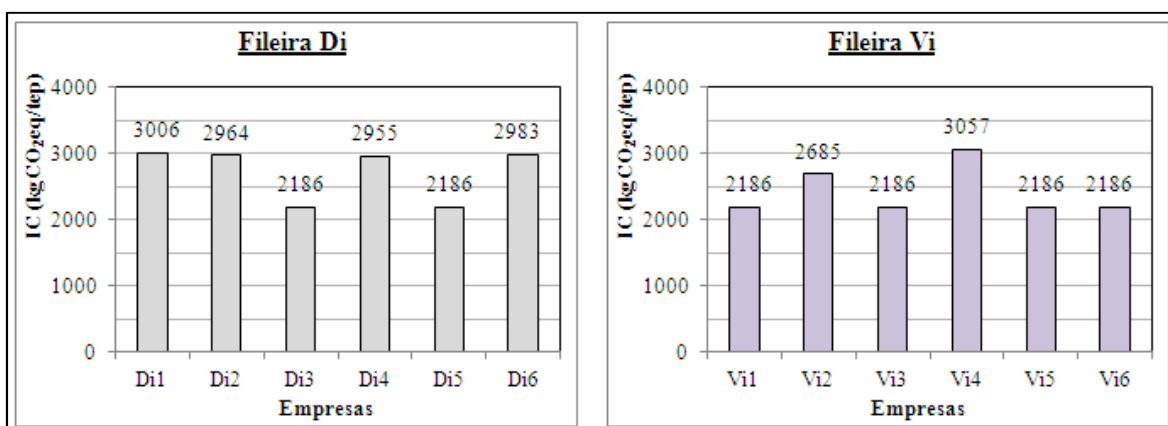


Figura 82 - IC por empresa - fileiras Di e Vi, dados de 2010 (fonte: elaboração própria).

Nas figuras anteriores verificou-se que:

- muitas das empresas possuem um IC de 2186 kgCO<sub>2</sub>eq/tep, o que é reflexo da utilização exclusiva de energia elétrica nos seus processos produtivos e é independente dos consumos registados. À medida que entram outras fontes energéticas (gasóleo e gás) e que os respetivos consumos se tornam maiores, o indicador aumenta;
- devido aos consumos de gasóleo substanciais por parte da frota de transportes da fileira distribuição, os valores de IC tornaram-se mais altos por causa das emissões de CO<sub>2</sub> superiores (média 2713 kgCO<sub>2</sub>eq/tep). É, pois, necessário gerir devidamente as viagens dos transportes para que sejam mais curtas tanto quanto possível, o que pode ser conseguido por meios informáticos designados por Sistemas de Gestão de Frotas;
- a fileira peixe também apresentou IC's elevadas devido à existência de uma frota de transportes particular que se encarrega de distribuir o peixe; o mesmo se sucede na fileira vinho e vinha.

- na fileira dos lácteos, as empresas La2, La3 e La4 registaram maiores emissões de CO<sub>2</sub> relativamente às restantes devido aos consumos de combustível por parte das caldeiras;
- os gráficos mostram que não existe relação direta entre o IC e o nível de produção por fileira; esse indicador é função do tipo e das fontes energéticas utilizadas por cada equipamento no processo produtivo.

### 3.1.5. Modelação da função CEE vs produção total anual

Para a função de regressão não linear  $y = a.x^b$ , as constantes  $a$ ,  $b$  e o coeficiente de regressão linear  $R^2$  apurados para cada fileira constam na Tabela 34.

Tabela 34 - Valores das constantes  $a$ ,  $b$  e  $R^2$  para a equação de regressão (fonte: elaboração própria).

Fileira	$a$	$b$	$R^2$
La	6,93977	-1,02621	0,34402
Ca	0,00035	-0,15788	0,07877
Ho	0,00002	-0,02967	0,00128
Pe	1970,35242	-1,39607	0,88809
Di	0,01734	-0,48533	0,08231
Vi	0,39323	-0,90675	0,29997

As figuras seguintes ilustram os valores do CEE em função da produção total e as curvas das equações de regressão que foram encontradas em cada fileira.

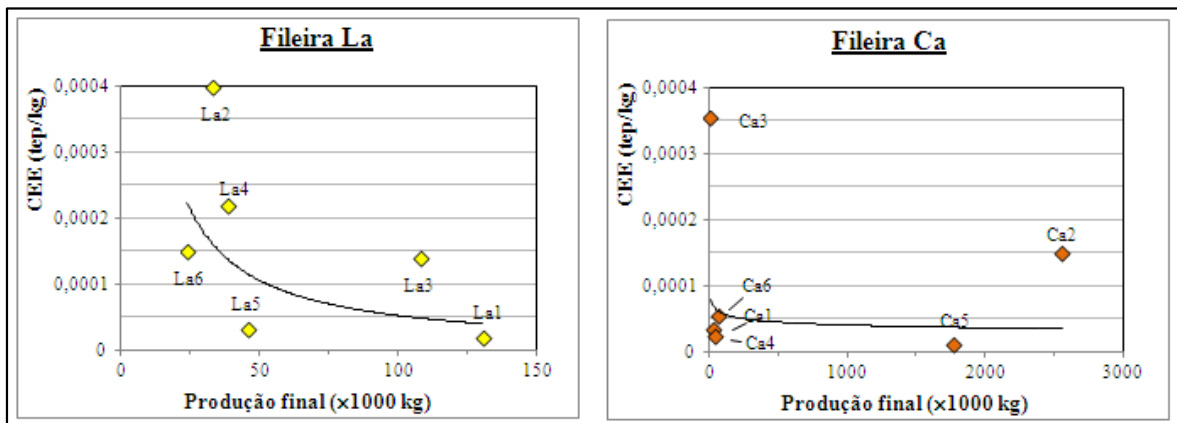


Figura 83 - Curva de regressão CEE vs produção - fileiras La e Ca (fonte: elaboração própria).

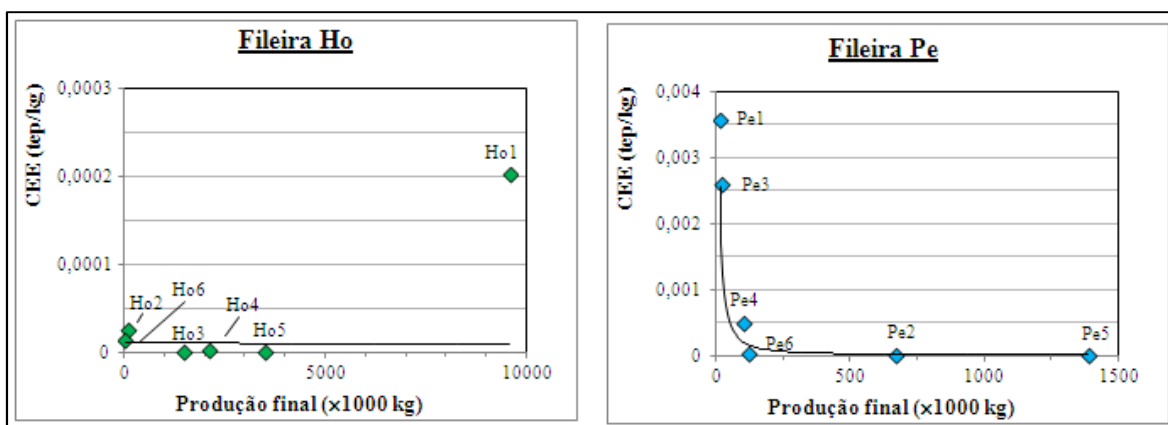


Figura 84 - Curva de regressão *CEE* vs produção - fileiras Ho e Pe (fonte: elaboração própria).

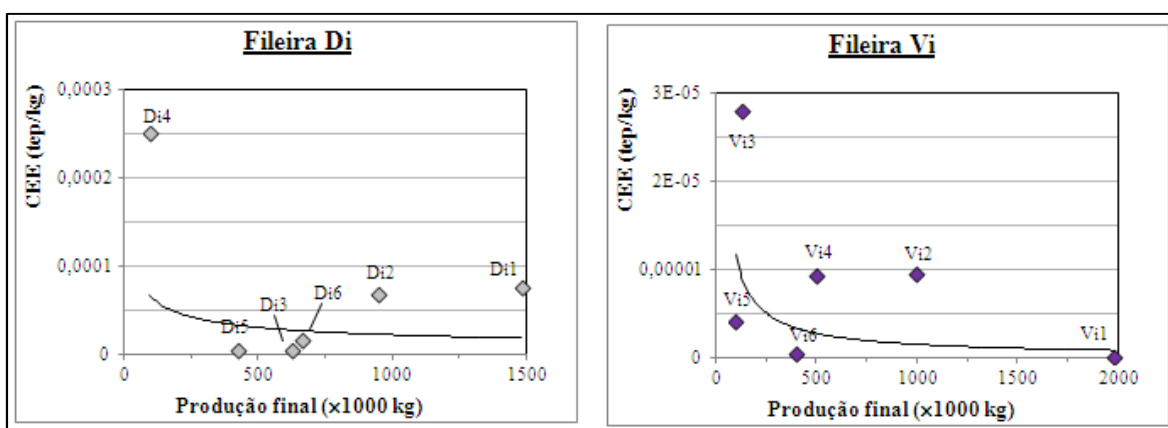


Figura 85 - Curva de regressão *CEE* vs produção - fileiras Di e Vi (fonte: elaboração própria).

A partir da figura anterior retiraram-se as seguintes conclusões:

- os pontos indicados nos gráficos demonstram que, de uma forma geral, maiores valores de produção correspondem a *CEE* mais baixos;
- de facto, a relação proporcionalmente inversa entre o *CEE* e a produção final tem sentido se se observar que as empresas com níveis de produção superior necessitam de menos tempo para fabricar uma unidade de produto e para efetuar o arranque / paragem das linhas produtivas. Além disso, as câmaras frigoríficas que tanta energia consomem encontram-se usualmente mais preenchidas e melhor aproveitadas. Conclui-se, portanto, que as empresas de maior dimensão efetuam geralmente uma melhor racionalização de energia;
- apenas na fileira hortofrutícola é que não se verifica a relação inversamente proporcional entre o *CEE* e a produção final devido, como já foi referido, à

complexidade e diferenças encontradas no processo produtivo da empresa Ho1 relativamente às restantes;

- também se notou disparidades relativamente ao índice *IC* calculado, mercê da utilização de várias fontes energéticas e em proporções heterogéneas;
- as empresas que registaram o *IC* mais baixo (2186 kgCO<sub>2</sub>eq.tep<sup>-1</sup>) correspondem àquelas que utilizam exclusivamente a energia elétrica nos seus processos produtivos (e. g. La1, Ca1 e Ho4). Para aquelas que utilizam outras fontes adicionais, o *IC* tornou-se superior em função das quantidades consumidas de cada uma (e. g. La2 e Ho1);
- são as fileiras peixe e distribuição que alcançaram valores médios de *IC* superiores, em virtude dos elevados consumos de gasóleo usado na frota de veículos e que emitem maiores quantidades de GEE para a atmosfera. Para um controlo eficaz sobre estas emissões, recomenda-se a utilização de meios informáticos para a gestão eficiente das deslocações dos veículos, como um sistema de gestão de frotas;
- as curvas de regressão linear ajustaram-se melhor aos pontos dos dados no caso da fileira peixe ( $R^2 \approx 0,888$ ), sendo que nas fileiras dos lácteos e vinho e vinha a concordância obtida foi ligeiramente inferior ( $R^2 \approx 0,344$  e  $R^2 \approx 0,300$ , respetivamente). Uma possível justificação para estas aproximações pode ser o facto de as empresas serem de reduzida dimensão, adotando processos de fabrico mais artesanais e, também, com grande semelhança entre si;
- nas restantes fileiras assistiu-se a uma fraca correlação entre as variáveis ( $R^2 \leq 0,082$ ) por dois motivos: a diferença considerável entre os processos produtivos, a diversidade dos produtos fabricados e, também, o facto de a equação de regressão não se ajustar com boa precisão aos pontos para valores muito altos de produção (*CEE* aumenta ligeiramente com a produção). Nesta última situação, a equação deverá sofrer um reajustamento para que a previsão seja mais fidedigna;
- apesar de os níveis de produção serem parecidos entre as fileiras peixe e distribuição (até 1500 toneladas), verifica-se que a curva não se ajusta devidamente na última fileira ( $R^2 \approx 0,082$ ). Esta ocorrência explica-se pela diversidade de produtos armazenados nas câmaras e nos transportes de carga (peixe, frango, legumes, gelados, ...) que não permitiu estabelecer uma relação adequada entre o *CEE* e a produção;
- atendendo à concordância da curva de regressão com os pontos experimentais em todas as fileiras, verificou-se que a equação não linear é válida para níveis de produção baixos (inferiores a  $2 \times 10^6$  kg), para empresas com processos produtivos similares e que

fabricam o mesmo tipo de produto.

### 3.1.6. Determinação do peso do consumo das câmaras frigoríficas relativamente ao total de energia elétrica admitida

Para cada uma das empresas auditadas, a Tabela 35 indica os resultados para os consumos anuais de energia elétrica dedicados às câmaras frigoríficas e os consumos de energia relevante apurados. Os processos operativos / espaços físicos onde as câmaras estão instaladas são referidos no mesmo quadro, assim como os valores das rúbricas "iluminação" e "frio" a elas associados e que foram retirados da desagregação dos consumos nas auditorias (constantes no anexo III).

**Tabela 35 - Valores de energia dedicada às câmaras e consumos totais relevantes (fonte: elaboração própria).**

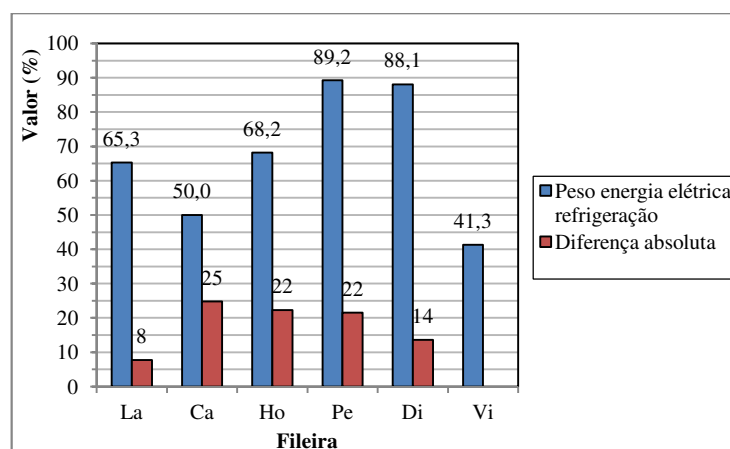
Fileira	Empresa	Processos operativos / espaços onde existem câmaras frigoríficas	Consumo iluminação, tep (a)	Consumo circuito frio, tep (b)	Consumo energia elétrica dedicada às câmaras, tep (a + b)	Consumo energia elétrica total relevante, tep
La	La3	Cura	0,000	34,059	34,059	49,235
	La4	Central frio	0,759	7,772	8,531	13,881
Ca	Ca2	Central frio	0,048	158,733	158,781	254,505
	Ca5	Central frio	0,025	82,501	82,526	219,370
Ho	Ho4	Armazém geral	0,726	32,494	33,220	41,887
	Ho5	Central frio	0,096	29,826	29,922	52,480 <sup>12</sup>
Pe	Pe1	Central frio	1,150	134,796	135,946	173,231
	Pe6	Sala 1, sala 2	0,017 (sala 1) + 0,007 (sala 2)	13,623 (sala 19) + 0,966 (sala 2)	14,613	14,615
Di	Di2	Armazém, parque viaturas	0,021 (armazém)	50,841 (armazém) + 3,455 (parque viaturas)	54,317	57,243
	Di6	Armazém geral	0,592	10,497	11,089	13,638
Vi	Vi2	Central frio, envelhecimento barricas	0,000 (central frio) + 0,032 (envelhecimento)	14,363 (central frio) + 1,812 (envelhecimento)	16,207	39,204

A fração de energia elétrica reservada às câmaras, em cada empresa e por fileira ( $s$  e  $\bar{s}$ , respetivamente), assim como a diferença absoluta entre essas mesmas frações ( $|\Delta s|$ ) estão discriminados na Tabela 36 e na Figura 86.

<sup>12</sup> Consumo total de energia elétrica na empresa excluindo o consumo associado ao sistema de abastecimento de água / rega.

**Tabela 36 - Percentagens de energia elétrica usadas nas câmaras e diferença absoluta apuradas (fonte: elaboração própria).**

Fileira	Empresa	s (%)	$\bar{s}$ (%)	$ \Delta s $ (%)
La	La3	69,176	65,317	7,718
	La4	61,458		
Ca	Ca2	62,388	50,004	24,768
	Ca5	37,620		
Ho	Ho4	79,309	68,163	22,293
	Ho5	57,016		
Pe	Pe1	78,477	89,232	21,509
	Pe6	99,986		
Di	Di2	94,888	88,099	13,578
	Di6	81,310		
Vi	Vi2	41,340	41,340	-



**Figura 86 - Percentagens de energia elétrica usadas nas câmaras e diferenças absolutas apuradas (fonte: elaboração própria).**

A análise à tabela e figura anteriores permitiu inferir o seguinte:

- a refrigeração é responsável por mais de metade do consumo de energia elétrica, em todas as empresas auditadas;
- as fileiras peixe e distribuição são as que possuem maiores fatias de energia elétrica dedicada às câmaras frigoríficas, com percentagens muito próximas dos 90 %, embora se tenham registado diferenças absolutas apreciáveis (22 e 14 %, respetivamente). Deste modo, as câmaras frigoríficas detêm uma importância superior nos processos operativos associados a estas duas fileiras quando comparada com as demais;
- o peso determinado na fileira lácteos (65,3 %) mostrou ser o mais fidedigno devido à menor diferença absoluta observada (8 %), o que se deve à semelhança entre os processos produtivos e produtos finais fabricados;
- a fração de energia consumida pelas câmaras na fileira das carnes e vinho e vinha são relativamente baixas (50,0 e 41,3 %, respetivamente) devido à maior preponderância dos aparelhos com força motriz (cortadoras, aspiradoras, ...) que são igualmente de

elevado consumo;

- as diferenças absolutas elevadas justificaram-se, no caso da fileira peixe, pelos altos consumos originados no carregamento das baterias dos monta-cargas e, no caso da fileira distribuição, pela existência de tomadas para carregamento das viaturas de frio estático, que necessitam de muita energia;
- no extremo oposto, a fileira das carnes registou a maior diferença absoluta apurada (25 %) devido à diferença entre os processos produtivos das empresas (uma delas é um matadouro e a outra uma salsicharia) e pela maior quantidade de câmaras presentes na Ca2;
- na fileira hortofrutícola, a grande diferença absoluta (22 %) deveu-se à maior complexidade do processo produtivo da empresa Ho5 relativamente à Ho4 que, além da conservação das frutas e legumes por refrigeração, necessita também de as preparar logo após a fase da colheita (seleção, lavagem, ...). Nessa empresa, os carregadores de baterias dos monta-cargas e a força motriz dos diversos equipamentos desempenharam tarefas onde os consumos energéticos são relevantes, desvalorizando assim a relevância dos sistemas de refrigeração;
- considerando a não uniformidade das diferenças absolutas calculadas para as várias fileiras, não se pode extrapolar as frações de energia consumidas pelas câmaras para as restantes empresas pertencentes ao universo e que não foram auditadas. Essa extrapolação terá de ter em conta outras variáveis de correlação como o tipo de processo produtivo e as máquinas utilizadas.

### **3.1.7. Impacto das MEE propostas no consumo e custo energético das empresas**

A Tabela 37 exhibe as poupanças em termos de energia e de custo associadas à instalação dos dispositivos eCube nas câmaras frigoríficas (MEE 1), bem como os investimentos iniciais necessários e os respetivos períodos de retorno. Os valores indicados são anuais e reportam-se aos dados recolhidos em 2012.

**Tabela 37 - Poupanças no consumo e no custo, investimentos iniciais e períodos de retorno para a MEE1 - instalação de eCubes nas câmaras frigoríficas<sup>13</sup> (fonte: elaboração própria).**

Empresa	Consumo circuito frio atual (tep)	Consumo circuito frio otimizado (tep)	Poupança		N.º eCubes	Investimento inicial (€)	Período retorno (ano)
			Energia (tep)	Custo (€)			
La4	7,772	6,995	0,777	397,54	7	840	2,1
Ca2	158,733	142,860	15,873	8121,10	19	2280	0,3
Ca5	82,501	74,251	8,250	4220,95	11	1320	0,3
Ho4	32,494	29,245	3,249	1662,29	8	960	0,6
Ho5	29,826	26,843	2,983	1526,19	7	840	0,6
Pe1	134,796	121,316	13,480	6896,77	6	720	0,1
Pe6	14,589	13,130	1,459	746,47	2	240	0,3
Di2	50,841	45,757	5,084	2601,13	4	480	0,2
Di6	10,497	9,447	1,050	537,21	2	240	0,4
Vi2	16,175	14,558	1,618	827,82	2	240	0,3

A partir dos resultados constatou-se o seguinte:

- a medida apresentou uma viabilidade económica aceitável em todas as empresas testadas mercê da eficácia em termos de poupança energética obtida (nunca inferior a 1 tep/ano) e dos baixos períodos de retorno do investimento (até cerca de 2 anos);
- as empresas com os consumos mais elevados (Ca2, Pe1 e Ca5) foram as que mais beneficiaram com esta medida, tendo-se observado que nelas é possível uma poupança energética anual até cerca de 143 tep correspondente a uma economia nas faturas de 8120 €;
- por outro lado, empresas com baixos consumos e um elevado número de câmaras viram uma maior dificuldade na recuperação do investimento (caso da La4, onde o período de retorno ultrapassou os 2 anos). Como medida de eficiência auxiliar, sugere-se às empresas com características semelhantes que utilizem as câmaras estritamente necessárias à produção, de modo a acondicionar a maior quantidade de produto no menor número possível delas;
- apesar dos valores dos investimentos iniciais que chegam a ultrapassar 1000 € em algumas empresas, é possível recuperá-los rapidamente em menos de um ano, de um modo geral.

Para o estudo do impacto da MEE 2, a Tabela 38 menciona, para cada empresa, os modelos de VEV's da marca Vacon a acoplar aos compressores em função das suas potências, assim como os investimentos necessários e as potências totais daqueles componentes e dos sistemas de refrigeração como um todo.

<sup>13</sup> Recorde-se que a empresa La3 não foi sujeita à análise porque as suas câmaras já se encontravam munidas de dispositivos eCube.

**Tabela 38 - Modelos de VEV's selecionados, investimentos iniciais e potências totais dos compressores e dos circuitos de refrigeração para cada empresa (fonte: elaboração própria).**

Empresa	Potência compressor (W)	N.º compressores e VEV's	Modelo VEV Vacon	Investimento por VEV (€)	Investimento total VEV's (€)	Potência total compressores (W)	Potência total circuito frio (W)
La3	2970	2	VCH3L00084IP54	874,00	3356,00	31540	88870
	3740	2	VCH3L00094IP54	976,00			
	4620	1	VCH3L00124IP54	550,00			
	13500	1	VCH3L00314IP54	956,00			
La4	740	2	VCH3L00034IP54	682,00	3957,00	35480	39010
	6800	5	VCH3L00164IP54	3275,00			
Ca2	18500	1	VCH3L00384IP54	1125,00	12153,00	238500	335150
	55000	4	VCH3L01054IP54	11028,00			
Ca5	2450	2	VCH3L00084IP54	874,00	14846	168760	194030
	2500	1	VCH3L00084IP54	437,00			
	2700	1	VCH3L00084IP54	437,00			
	3460	1	VCH3L00094IP54	488,00			
	4500	1	VCH3L00124IP54	550,00			
	4680	2	VCH3L00124IP54	1100,00			
	5300	1	VCH3L00124IP54	550,00			
	5940	3	VCH3L00164IP54	1965,00			
	9100	1	VCH3L00234IP54	797,00			
13640	8	VCH3L00314IP54	7648,00				
Ho4	1400	1	VCH3L00044IP54	370,00	5425	46140	64340
	5500	8	VCH3L00124IP54	4400,00			
	7400	1	VCH3L00164IP54	655,00			
Ho5	22370	5	VCH3L00614IP54	7570,00	7570	111850	144170
Pe1	700	1	VCH3L00034IP54	341,00	7546	63410	404900
	5590	9	VCH3L00164IP54	5895,00			
	6200	2	VCH3L00164IP54	1310,00			
Pe6	3670	2	VCH3L00094IP54	976,00	976,00	7340	10830
Di2	11000	2	VCH3L00234IP54	1594,00	4622	77400	112500
	27700	2	VCH3L00614IP54	3028,00			
Di6	750	1	VCH3L00034IP54	341,00	1585	8020	10980
	1470	1	VCH3L00044IP54	370,00			
	2900	2	VCH3L00084IP54	874,00			
Vi2	2450	1	VCH3L00084IP54	437,00	4979	75300	95150
	24900	2	VCH3L00614IP54	3028,00			
	25500	1	VCH3L00614IP54	1514,00			

Na Tabela 39 são indicados os consumos energéticos do circuito de frio (atual e otimizado), os consumos dos compressores, as poupanças em termos de energia e de custos associados, os investimentos iniciais e respetivos períodos de retorno associados à implementação de VEV's nos compressores. Os valores referidos têm uma base anual e foram determinados através dos dados de 2012.

**Tabela 39 - Poupanças de energia e de custos associados, investimentos iniciais e períodos de retorno para a MEE2 - instalação de VEV's nos compressores (fonte: elaboração própria).**

Empresa	Consumos energéticos			Poupança		Investimento inicial (€)	Período retorno (ano)
	Circuito frio - atual (tep)	Circuito frio - otimizado (tep)	Compressores - atual (tep)	Energia (tep)	Custo (€)		
La3	34,059	31,037	12,088	3,022	1546,15	3356,00	2,2
La4	7,772	6,005	7,069	1,767	904,05	3957,00	4,4
Ca2	158,733	130,494	112,958	28,240	14448,43	12153,00	0,8
Ca5	82,501	64,562	71,756	17,939	9178,13	14846,00	1,6
Ho4	32,494	26,669	23,302	5,826	2980,76	5425,00	1,8
Ho5	29,826	24,041	23,140	5,785	2959,78	7570,00	2,6
Pe1	134,796	129,519	21,110	5,278	2700,38	7546,00	2,8
Pe6	14,589	12,117	9,888	2,472	1264,75	976,00	0,8
Di2	50,841	42,096	34,979	8,745	4474,20	4622,00	1,0
Di6	10,497	8,580	7,667	1,917	980,79	1585,00	1,6
Vi2	16,175	12,975	12,801	3,200	1637,22	4979,00	3,0

Relativamente aos resultados conseguidos para a MEE2 foi possível deduzir o seguinte:

- a medida apresentou poupanças energéticas substanciais quando comparada com a instalação de eCubes (7,7 tep contra 5,2 tep), apesar de os elevados investimentos iniciais terem proporcionado períodos de retorno em média superiores (2,1 anos contra 0,5 anos);
- em geral, a medida aparenta possuir viabilidade na maioria das empresas analisadas, com períodos de retorno inferiores a 3 anos. O caso da empresa La4 requer um estudo mais minucioso por parte da administração financeira, visto que o período é superior a 4 anos devido à fraca expressão do consumo dos compressores (7 tep) e à pequena dimensão da empresa;
- o impacto da implementação de VEV's foi enorme na fileira das carnes (Ca2 e Ca5), atendendo aos custos energéticos que podem ser economizados (entre 9000 e 14500 €). Apesar de os investimentos iniciais serem muito altos (entre 12000 e 15000 €) devido ao número e dimensão das câmaras e ainda às potências elevadas dos compressores, os períodos de retorno foram dos mais baixos que se puderam registar (0,8 - 1,6 anos);
- a Tabela 39 mostrou que o consumo dos compressores não ocupou uma fatia relevante nos sistemas de refrigeração em algumas empresas (e. g. La3 e Ca2). Esses sistemas são ainda constituídos por ventiladores acoplados aos condensadores e evaporadores, o que significa que a instalação de VEV's nesses componentes poderá ampliar o potencial de poupança apresentado nos quadros anteriores; no entanto, o aumento do investimento inicial e a respetiva viabilidade deverá ser analisado por parte de cada administração;

- a empresa Pe1 registou uma potência muito elevada para o sistema de refrigeração global (404900 W), com os compressores a ocuparem nesse valor uma pequena porção (16 %). Tal ocorrência explicou-se pela existência de um compressor de elevada capacidade (233000 W) associado a um túnel de congelação, mas como na altura não existia informação suficiente sobre VEV's de grande potência não foi possível avaliar o impacto da medida naquele compressor;
- a aplicação das duas medidas em simultâneo (MEE1 e MEE2) contribuirá certamente para economias energéticas ainda maiores, mas estas não resultarão do somatório das percentagens que foram admitidas para cada medida. Isto explica-se pelo facto de o eCube reduzir o número de arranques do compressor (e consequentemente os picos de consumos iniciais) que fazem com que os VEV's sejam atuados menos vezes, desvalorizando a percentagem de poupança energética que foi considerada no estudo da sua implementação (25 %).

Recorrendo aos dados do anexo I e à metodologia de cálculo descrita, a Tabela 40 indica os custos de energia reativa anuais que se podem eliminar nas empresas auditadas através da implementação da medida MEE 3 (afinação da bateria de condensadores). Os dados reportam-se a 2012.

**Tabela 40 - Custos de energia reativa que se podem poupar através da MEE3 (fonte: elaboração própria).**

Empresa	Custo total energia reativa a eliminar (€)	Custo atual energia elétrica empresa (€)	Custo ótimo energia elétrica empresa (€)	% poupança no custo
La3	0	36716,00	36716,00	0,0
La4	0	9653,00	9653,00	0,0
Ca2	1253,13	138026,00	136772,87	0,9
Ca5	2346,12	111547,00	109200,88	2,1
Ho4	0	26000,00	26000,00	0,0
Ho5	4503,21	84417,00	79913,79	5,3
Pe1	1309,85	97026,00	95716,15	1,4
Pe6	0	12626,00	12626,00	0,0
Di2	166,02	35431,00	35264,98	0,5
Di6	0	10167,00	10167,00	0,0
Vi2	2154,69	17482,00	15327,31	12,3

Da observação da tabela concluiu-se que:

- existem cinco empresas que não apresentam consumos de energia reativa, sendo elas a La4, Pe6, Di6, La3 e Ho4. As três primeiras não sofrem qualquer penalização devido ao tarifário adotado (BTN, aplicável para potências inferiores a 41,4 kW) enquanto as duas últimas dispõem de baterias de condensadores eficientes e devidamente reguladas;

- para as empresas que utilizam baterias de compensação, verificou-se que um número significativo delas não efetua a manutenção e a atualização das mesmas em função das cargas indutivas instaladas (motores e transformadores). Recomenda-se, portanto, que as empresas procedam à regulação das baterias periodicamente, sobretudo quando se instala um novo equipamento ou se substitui algum existente. É também aconselhável avaliar a instalação de baterias individuais junto das máquinas indutivas de grande potência, visto que esta medida é mais eficaz do que a opção pela instalação no quadro geral;
- nas duas empresas da fileira carnes, a Ca5 apresenta um potencial de economia no custo superior à Ca2 (2,1 %) devido ao elevado número de compressores de grande potência associados aos sistemas de refrigeração;
- é na Vi2 que se verifica a maior poupança relativa previsível (12,3 %). Os altos consumos de energia reativa observados são originados pela densidade da maquinaria indutiva presente, superior à de outras empresas, como bombas de circulação de fluidos, chillers, prensas de esmagamento, motores da estação de tratamento de águas residuais e outros aparelhos típicos do processo de fabricação de vinhos;
- no caso da Ho5, o elevado custo de energia reativa (4503,21 €) está relacionado com a elevada ineficiência dos dois postos de transformação que alimentam a empresa. Num deles, verificou-se que a bateria existente não está afinada, enquanto no outro não existe sequer esse equipamento. Este problema deve, pois, requerer uma atenção especial por parte da empresa para que seja resolvido;
- o impacto da medida no conjunto de empresas analisado permite poupar, em média, 2 % no custo da energia elétrica total anual.

A Tabela 41 regista os custos do consumo de combustível atual (gás ou gasóleo) e ótimo (pellets), assim como as economias passíveis de se obter por implementação da MEE4 (substituição das caldeiras existentes pelas que funcionam a biomassa). Os valores são anuais e referem-se a 2012.

**Tabela 41 - Custo do consumo de combustível convencional e de biomassa por parte das caldeiras, e economias proporcionadas pela MEE4 (fonte: elaboração própria).**

Empresa	Consumo caldeira (tep)	Tipo combustível atual	Custo consumo combustível atual (€)	Custo consumo pellets (€)	Economia custo	
					€	%
La3	12,988	Gasóleo aquecimento	17890,58	7779,81	10110,77	56,51
La4	1,058	Gasóleo aquecimento	1457,36	633,74	823,62	56,51
Ca2	156,738	Gás propano	151125,21	93886,06	57239,15	37,88
Ca5	45,664	Gás propano	44028,77	27352,74	16676,03	37,88

A Tabela 42 indica os modelos e características das caldeiras a biomassa a substituir pelas existentes, bem como os investimentos necessários e períodos de retorno.

**Tabela 42 - Características das caldeiras a biomassa, investimento necessários e períodos de retorno (fonte: elaboração própria).**

Empresa	Caraterísticas caldeira			Investimento inicial (€)	Payback (ano)
	Marca e modelo	Potência térmica (kW)	Fluido aquecimento		
La3	Ambitermo SBL	702	Vapor água	95000	9,4
La4	D'Alessandro Termomeccanica TA V 200	232	Vapor água	60000	72,8
Ca2	D'Alessandro Termomeccanica TA V 1700	1700	Vapor água	296700	5,2
Ca5	D'Alessandro Termomeccanica CS 500	500	Água quente	69500	4,2

De acordo com as tabelas anteriores constatou-se que:

- a utilização de pellets como fonte de calor traz benefícios significativos em termos de custo energético sobre os combustíveis convencionais, gerando poupanças de 57 % relativamente ao gasóleo e de 38 % relativamente ao gás propano;
- os períodos de retorno do investimento aplicado nas novas caldeiras encontram-se numa faixa entre os 4 e os 10 anos (exceto para a La4), sendo progressivamente maiores à medida que o consumo energético diminui;
- no caso da La4, a instalação de uma caldeira a biomassa é notoriamente inviável devido ao tempo de retorno impraticável. O consumo anual desse equipamento é muito baixo (1,058 tep) e não se justifica a sua substituição;
- as empresas da fileira carnes são efetivamente as mais beneficiadas, pois mesmo apesar de utilizarem o gás propano que é mais barato que o gasóleo, verifica-se que o uso de biomassa lhes confere reduções ainda maiores na fatura energética que ultrapassam os 57000 € anuais;
- considerando as elevadas necessidades energéticas (até 157 tep/ano) e os baixos períodos de retorno encontrados (inferiores a 6 anos), a fileira das carnes mostra um grande potencial para implementar a medida MEE4, até porque a evolução das empresas implica um aumento dos consumos de energia nos próximos anos e também porque a queima de biomassa não liberta gases de efeito de estufa, o que contribui para

a melhoria do ambiente.

### 3.2. Aplicação em contexto real da metodologia para simulação e otimização do consumo das câmaras frigoríficas

A Tabela 43 mostra os dados recolhidos sobre as características da câmara de teste em cada ensaio A e B.

**Tabela 43 - Valores dos inputs recolhidos durante os ensaios (fonte: elaboração própria).**

Input	Ensaio	
	A	B
Tempo operação câmara (s)	49500	10800
Temperatura interna / evaporador (K)	270,15	269,15
Temperatura exterior parede 1 (K)	305,90	309,82
Temperatura exterior parede 2 (K)	276,15	279,15
Temperatura exterior parede 3 (K)	299,15	301,15
Temperatura exterior parede 4 (K)	304,90	308,82
Temperatura exterior chão (K)	289,15	289,15
Temperatura exterior teto (K)	299,15	301,15
Tempo funcionamento ventiladores evaporador (s) <sup>14</sup>	22925	4220
Humidade relativa interior (%)	78	78
Humidade relativa exterior (%)	40	31
Frequência de abertura da entrada	24,6	3
Tempo total de presença de funcionários no interior / abertura porta / iluminação ativa (s)	1474	180
Tempo de abertura da entrada por acesso (s)	60	
N.º médio funcionários no interior	1	
Temperatura condensador (K)	328,15	
Potência iluminação - lâmpada halogéneo (W)	400	
Eficiência lâmpada halogéneo (%)	7,5	
Potência térmica ventiladores evaporador (W)	316 <sup>15</sup>	
Dimensões câmara (C×L×A) (m)	8,98×5,09×4,33	
Dimensões entrada (L×A) (m)	1,63×2,63	
Eficiência barreira proteção da entrada (com porta aberta)	0	
Massa produto no interior (kg)	8000	
Eficiência compressor (%)	79 <sup>16</sup>	
Composição paredes*	0,02 m reboco + 0,15 m alvenaria + 0,10 m EPS	
Composição chão*	0,08 m betonilha + 0,10 m EPS + 0,10 m betão armado + 0,10 m caixa ar	
Composição teto*	0,010 m reboco + 0,150 m betão armado + 0,100 m EPS + 0,002 m chapa aço	

A Tabela 44 exhibe o consumo real e simulado na folha de cálculo para a câmara em questão, assim como os desvios relativos entre eles.

<sup>14</sup> Igual ao tempo de funcionamento do compressor, retirado do analisador de rede.

<sup>15</sup> Valor interpolado entre 264 W e 340 W (ver Tabela 27), correspondente a 2 motores cada um com uma potência elétrica de 55 W.

<sup>16</sup> Rendimento típico de um compressor num sistema de refrigeração [64].

\* Espessuras das camadas são aproximadas.

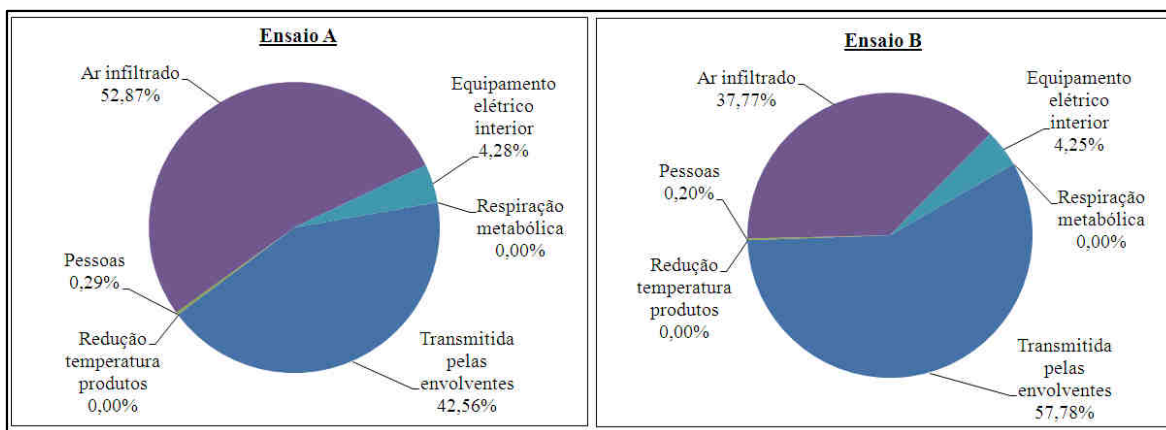
**Tabela 44 - Consumo real e simulado da câmara em cada ensaio (A e B) e desvios relativos apurados (fonte: elaboração própria).**

Ensaio	Consumo real (kW.h)	Consumo simulado (kW.h)	Desvio relativo (%)
A	34,920	27,466	-21,3
B	6,550	5,084	-22,3

Em ambos os ensaios observaram-se desvios relativos semelhantes na ordem dos 20 %, um valor relativamente alto considerando a precisão de outros modelos matemáticos desenvolvidos no âmbito de outros projetos e resumidamente apresentados na introdução deste trabalho. Este problema deve-se à falta de modelação por parte da folha de cálculo de outros fenómenos físicos que afetam igualmente o consumo da câmara, como a eficiência dos permutadores de calor (evaporador e condensador) e as entradas térmicas através das arestas e cantos das envolventes.

Outro fator responsável pela baixa precisão dos resultados prende-se com o facto de dificilmente se conhecer a estrutura das envolventes (nomeadamente as espessuras das suas camadas), havendo pois necessidade de apresentar valores aproximados.

A Figura 87 indica os pesos relativos de cada carga térmica relativamente ao total de energia consumida pelo compressor.



**Figura 87 - Peso das cargas térmicas relativamente ao total de energia consumida (fonte: elaboração própria).**

Em ambos os ensaios constatou-se que as cargas de maior peso foram a do ar infiltrado e a transmitida pelas envolventes, perfazendo as duas um total que rondou os 95 %. Este resultado preliminar sugere que, ao ser efetuado um estudo à melhoria de eficiência energética de uma câmara, deve ser dada prioridade na definição de medidas que visem atenuar o impacto daquelas duas cargas térmicas mencionadas seguindo-se

posteriormente o estudo de minimização das restantes.

Assistiu-se igualmente a uma redução significativa da carga do ar infiltrado ao se passar do ensaio A para o B (menos 15,1 %), um facto com origem no menor tempo de abertura da porta registado no segundo ensaio face ao tempo total de funcionamento da câmara.

As cargas associadas à redução da temperatura do produto e à respiração metabólica foram nulas porque:

- o alho conservado manteve-se a uma temperatura aproximadamente constante, não existindo portanto remoção de calor sensível;
- não foi efetuado qualquer abastecimento de alho durante a ocorrência dos ensaios;
- a temperatura interna encontrava-se abaixo do ponto de congelação inicial, não proporcionando uma atividade metabólica relevante dentro da estrutura celular dos alhos e, conseqüentemente, uma libertação de calor adicional.

As figuras que se seguem apresentam os gráficos da análise de sensibilidade realizada ao consumo da câmara e que foram obtidos pela variação dos inputs definidos na Tabela 30, tendo por referência os resultados do ensaio B.

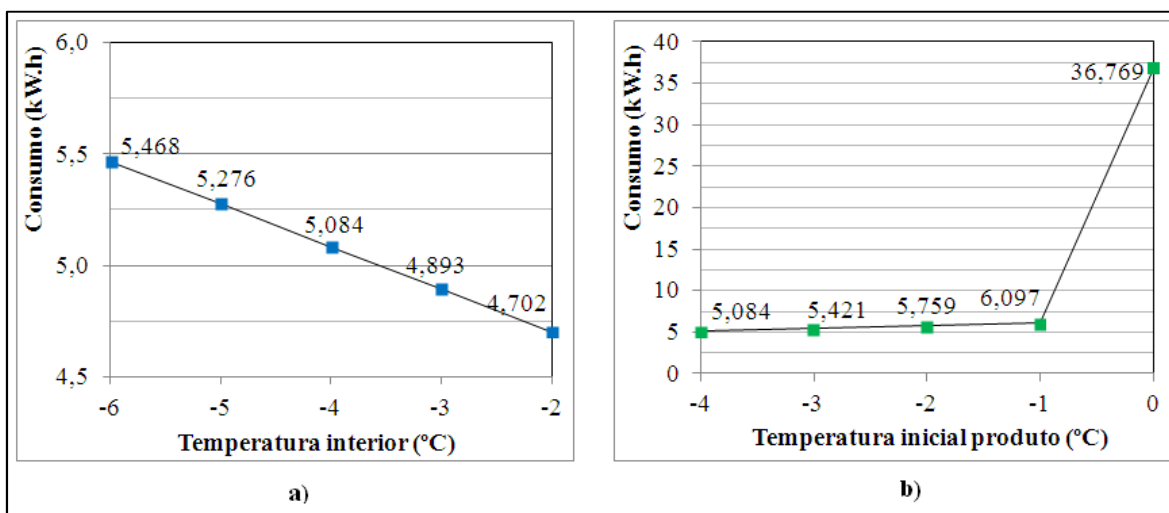


Figura 88 - Análise de sensibilidade efetuada por variação: (a) da temperatura interior; (b) da temperatura inicial do produto (fonte: elaboração própria).

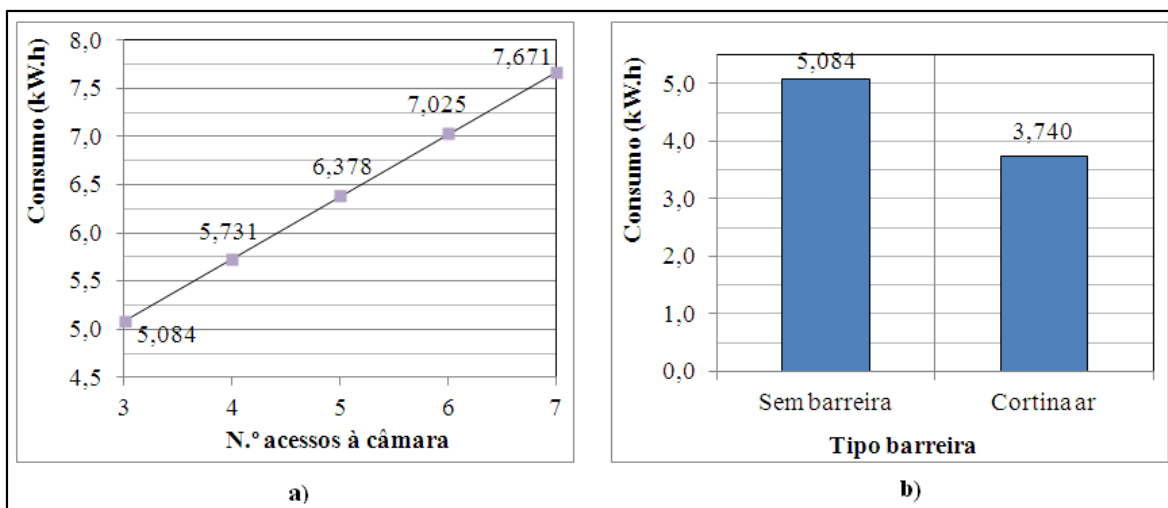


Figura 89 - Análise de sensibilidade por variação: (a) do n.º de acessos à câmara; (b) do tipo de barreira térmica à entrada (fonte: elaboração própria).

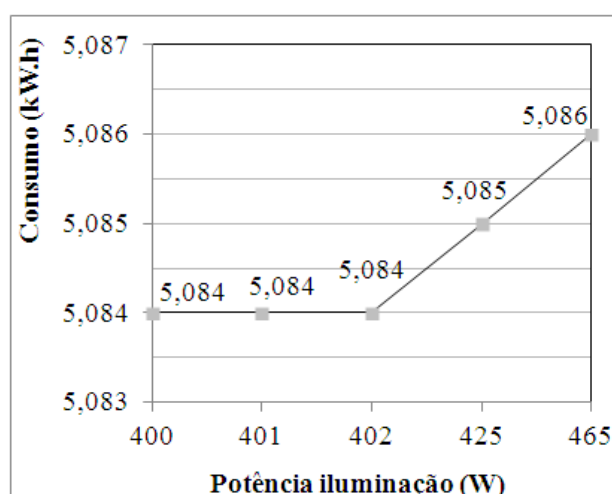


Figura 90 - Análise de sensibilidade por variação da potência da iluminação (fonte: elaboração própria).

De acordo com as figuras foi possível afirmar que os inputs com maior influência no consumo foram a temperatura interna (-0,19 kW.h/°C), o n.º de acessos à câmara (+0,65 kW.h/°C) e a instalação da cortina de ar (redução de 1,34 kW.h relativamente ao consumo original). Considerando que esses inputs estão diretamente relacionados com as cargas térmicas que tiveram maior peso (transmitida pelas envolventes e ar infiltrado), faz sentido observar os seus efeitos relevantes no consumo final.

A temperatura inicial do produto teve uma relevância intermédia na análise quando se encontra abaixo do ponto inicial de congelação do alho (-0,8 °C), ocorrendo nesta situação apenas a remoção de calor sensível (+0,34 kW.h/°C). Todavia, quando a

temperatura esteve acima do ponto inicial de congelamento, a variação no consumo foi enorme (+36,77 kW.h desde 0 até -1 °C) devido à remoção do calor latente durante a mudança de estado físico do alho. Para um abastecimento de 1000 kg a uma temperatura inicial de 0 °C, o consumo da câmara aumentou 7 vezes relativamente à situação similar em que o alho entra à mesma temperatura da câmara (-4 °C). Estas observações mostram que é desaconselhável a admissão de produto a uma elevada temperatura relativamente à da câmara e, sempre que possível, a empresa deve procurar que ele seja adquirido de modo a que o diferencial de temperaturas seja mínimo.

A potência da iluminação deteve um grau de influência desprezável no consumo, visto que esse sistema era ativado por um tempo muito curto (apenas alguns minutos, durante o acesso dos funcionários). A influência tornou-se mais visível quando a potência foi aumentada em algumas dezenas de watt (25 ou 65 W), gerando aumentos no consumo de 0,001 kW.h. Deste modo, a substituição da lâmpada de halogéneo por uma do tipo fluorescente ou LED melhorará a eficiência energética mas com um impacto menor.

Para a simulação do efeito das MEE no consumo final foram utilizados componentes cujos preços e características técnicas se resumem na Tabela 45.

**Tabela 45 - Características e preços das lâmpadas LED e das luminárias selecionadas para a simulação das MEE (fonte: [60, 61, 62, 63]).**

Equipamento	Lâmpada tubular LED	Luminária	Cortina ar
Marca	Osram	Osram	Thermoscreen
Modelo	ST8-HB5	Lumilux Duo T8 Prismatic	C2000A NT
Caraterísticas técnicas	Potência 22 W, Fluxo luminoso 2200 lm.	Potência máxima 2x58 W.	Comprimento: 2200 mm.
Preço	80,00 €	97,80 €	1474,00 €

Por aplicação das expressões para a determinação do número e da potência total das lâmpadas necessárias (eq. 67 e 68) chegaram-se aos seguintes resultados:

$$n_{lâmpadas} = \frac{E_{min} \times c_{câmara} \times l_{câmara}}{F_{lâmpada}} = \frac{200 \times 8,98 \times 5,09}{2200} \approx 5 \text{ lâmpadas}$$

$$P_{iluminação} = n_{lâmpadas} \times P_{lâmpada} = 5 \times 22 = 114 \text{ W}$$

O número de luminárias necessárias é 3, considerando que cada uma acomoda 2 lâmpadas, de acordo com as características da Tabela 45.

A Tabela 46 apresenta os consumos simulados e as poupanças energéticas resultantes

da modelação das três MEE selecionadas para o estudo (ver Tabela 31), em cada ensaio efetuado.

**Tabela 46 - Consumos e poupanças simuladas conferidas pelas MEE aplicadas na câmara de teste (fonte: elaboração própria).**

MEE	Ensaio A			Ensaio B		
	Consumo (kW.h)	Poupança		Consumo (kW.h)	Poupança	
		kW.h	%		kW.h	%
Nenhuma	27,466	-	-	5,084	-	-
Alteração da temperatura interna para -2 °C	26,274	1,192	4,34	4,702	0,382	7,51
Instalação da cortina de ar	17,301	10,165	37,01	3,740	1,344	26,44
Instalação de iluminação LED (5 × 22 W)	27,393	0,073	0,27	5,075	0,009	0,18
Conjunto das 3 MEE	16,569	10,897	39,67	3,482	1,602	31,51

A Tabela 47 resume os investimentos iniciais necessários para cada MEE e os respetivos períodos de retorno. Os investimentos foram apurados através dos preços unitários do equipamento, constantes na Tabela 45.

**Tabela 47 - Investimentos iniciais e períodos de retorno associados a cada MEE simulada nos 2 ensaios (fonte: elaboração própria).**

MEE	Equipamento necessário	Investimento inicial (€)	Período retorno ensaio A (ano)	Período retorno ensaio B (ano)
Alteração da temperatura interna para -2 °C	-	0,00	-	0,00
Instalação da cortina de ar	Cortina ar	1474,00	2,6	4,2
Instalação da iluminação LED	5 lâmpadas LED + 3 luminárias	693,4	135,5	239,9
Conjunto das 3 MEE	Cortina ar + 5 lâmpadas LED+ 3 luminárias	2167,4	2,8	4,2

De acordo com a Tabela 46, a integração das três medidas propostas resultou em poupanças energéticas situadas entre 30 e 40 %. Verificou-se que só a instalação da cortina de ar reduziu os consumos até 37 %, revelando-se numa medida de grande interesse para redução dos custos de energia, particularmente quando o número de acessos à câmara se torna elevado, como se sucedeu no ensaio A.

A análise económica a esta mesma medida (Tabela 47) permitiu concluir que a sua implementação é viável, com um período de retorno de investimento situado entre 2 e 5 anos. Este período tornou-se inferior no ensaio A devido à maior frequência de abertura da porta por unidade de tempo ( $f/t_{câmara} = 1,79$  aberturas por hora contra 1,03 aberturas por hora registado no ensaio B), o que ocasionou uma compensação mais rápida do investimento pois a cortina de ar reteve uma maior quantidade de calor que poderia ter entrado.

O ajuste da temperatura interna para -2 °C foi uma medida que proporcionou uma

economia energética moderada (entre 4 e 8 %), mas apesar desse facto e de não apresentar custos de investimento pode colocar em risco a preservação do alho. Este risco deriva do modo de operação do compressor que, ao trabalhar num regime de pára-arranca sucessivo, pode originar um aumento temporário da temperatura da câmara acima do ponto de congelação inicial do alho e, desse modo, acelerar a degradação e diminuir a validade do produto. Na utilização desta medida deve ser tomada a prudência necessária no ajuste do set point do termóstato, de modo a conceder uma folga adequada (2 a 3 °C) entre a temperatura interna e o ponto de congelação.

A instalação de iluminação LED não provocou grande impacto na redução do consumo (com poupanças inferiores a 0,1 %). Os períodos de retorno extremamente elevados (superiores a 135 anos) descartaram a viabilidade de aplicação desta medida isoladamente por dois motivos:

- a iluminação é ativada por um período muito curto (apenas 3 % do tempo total de funcionamento da câmara no ensaio A e 2 % no ensaio B);
- admitiu-se que o período de funcionamento diário da iluminação é o mesmo ao longo do ano. Na prática é provável que esta hipótese não ocorra devido a momentos como o reabastecimento da câmara ou a limpeza periódica, nos quais a iluminação terá necessariamente de ser ligada por muito mais tempo.

No entanto, a instalação da iluminação LED torna-se viável se ela for ativada por períodos mais longos ou, em alternativa, se for conjugada com as outras 2 MEE testadas, uma hipótese da qual resultaram períodos de retorno entre 2 e 4 anos assumindo padrões de utilização da câmara homogêneos e semelhantes aos verificados nos ensaios A e B.

## 4. CONCLUSÕES

Numa primeira fase do presente trabalho procedeu-se a uma análise dos consumos de energia e das características das instalações (designadamente os sistemas de refrigeração) existentes numa amostra de empresas do setor agroindustrial, localizadas no Alentejo. Com esta análise, avaliou-se o impacto técnico-económico de um conjunto de medidas de eficiência energética no sentido de reduzir os gastos e custos energéticos, contribuindo para a melhoria de competitividade das empresa e para a redução de emissões de gases de efeito de estufa.

Já numa segunda fase desenvolveu-se uma metodologia apoiada numa ferramenta de cálculo para simular os consumos energéticos das câmaras frigoríficas, as quais constituem habitualmente uma parcela significativa em termos de consumo de energia. Deste modo, tornou-se possível a estimação das economias energéticas e de custos resultantes da implementação de medidas de eficiência direcionadas para as câmaras, assim como o apuramento dos fenómenos com maior influência nos seus consumos.

Seguidamente se expõem as principais conclusões que se retiraram em cada fase. Posteriormente apresentam-se sugestões para investigações futuras como forma de dar continuidade ao tema do trabalho.

### 4.1. Análise e melhoria do perfil energético do setor agroindustrial alentejano

- Dentro de cada fileira, as empresas apresentaram custos por unidade de energia muito diversificados. O mesmo se sucedeu com os níveis de desempenho energético atendendo aos *CEE's* que foram apurados;
- de um modo geral, empresas com volumes de produção superiores detêm *CEE's* menores, isto é, melhores desempenhos energéticos;
- existe um considerável potencial para melhoria da eficiência energética na amostra, tendo em conta que foram poucas as que implementaram medidas de eficiência com um impacto relevante na redução dos consumos;
- o consumo dos sistemas de refrigeração ocupou em média mais de 40 % das necessidades de energia elétrica em todas as fileiras, constituindo pois um importante foco onde se deve melhorar a eficiência energética;

- foi na fileira peixe onde se observaram os piores desempenhos energéticos. Aqui, é urgente a implementação de medidas de eficiência nos sistemas de refrigeração, uma vez que estes ocupam quase a totalidade das necessidades de energia elétrica;
- a mesma fileira apresentou o melhor ajuste ao modelo de regressão entre o *CEE* e a produção total, demonstrando que a relação entre as variáveis é do tipo potencial ( $y = a.x^b$ );
- as MEE que se revelaram mais eficazes na redução de consumos e custos energéticos foram a instalação de VEV's e de caldeiras a biomassa, mas como contrapartidas apontam-se os elevados investimentos iniciais e períodos de retorno.

#### **4.2. Metodologia para simulação e otimização do consumo das câmaras frigoríficas**

- A ferramenta para simulação dos consumos apresenta ainda desvios relevantes face aos valores reais, necessitando de aperfeiçoamentos posteriores;
- de acordo com os resultados teóricos obtidos, as cargas térmicas transmitidas pelas envolventes e pela infiltração de ar (e. g. abertura da porta ou fendas no isolamento) são as que detêm maior peso nos consumos (até 95 %);
- de um modo mais específico, a análise de sensibilidade revelou que os parâmetros da câmara com maior influência nos consumos registados são a temperatura interior, a proteção térmica à entrada e a frequência de abertura da porta, destacando-se os dois últimos;
- a instalação da cortina de ar revelou-se como uma medida extremamente eficiente na redução da necessidade energética da câmara, enquanto a substituição da iluminação se revelou economicamente inviável devido à baixa poupança conferida.

#### **4.3. Sugestões para investigações futuras**

- De modo a aumentar a fidedignidade das economias calculadas para cada MEE durante a primeira fase do trabalho, teria interesse avaliar os novos consumos de energia após implementação das medidas sugeridas em empresas que estivessem dispostas a fazê-lo,

sendo assim possível a confrontação entre os valores reais e teóricos;

- as caldeiras para produção de calor apresentaram necessidades e dispêndios de energia elevados, podendo constituir no futuro um novo foco para o estabelecimento de novas medidas de eficiência mais acessíveis além da utilização de biomassa;
- o modelo de regressão *CEE* vs produção total pode ser aperfeiçoado pela utilização de funções estimadoras polinomiais e introdução de novas variáveis independentes, como o número de funcionários e dos veículos de transporte;
- no que respeita à ferramenta para simulação e otimização dos consumos das câmaras frigoríficas sugerem-se os seguintes aperfeiçoamentos:
  - inserção de um coeficiente corretivo que represente a eficiência na transmissão de calor entre o ar ambiente e o fluido refrigerante, dentro do condensador e do evaporador;
  - determinação da infiltração de cargas térmicas locais (através das arestas, cantos da câmara e juntas da porta);
  - cálculo do calor dissipado pelas tubagens de circulação do fluido considerando o tipo de isolamento existente.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Instituto Nacional de Estatística, I. P. (2014). *Anuários Estatísticos de Portugal*. Disponível em [http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_publicacoes](http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes). [Consult. em 11 de fevereiro 2014].
- [2] Instituto Nacional de Estatística, I. P. (2007). *Classificação Portuguesa das Atividades Económicas rev. 3*. Lisboa.
- [3] Federação das Indústrias Portuguesas Agroalimentares. *Dados estatísticos da indústria agroalimentar*. Disponível em <http://www.fipa.pt/sector/sector.php?tema=2>. [Consult. em 23 de novembro 2013].
- [4] CITEVE - Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e do Vestuário de Portugal (2012). *Plano setorial de melhoria da eficiência energética em PME - setor agroalimentar*. IAPMEI - Instituto de Apoio às Pequenas e Médias Empresas e à Inovação.
- [5] Decreto-Lei 71/2008. D. R. I série. 74 (15-04-2008) 2222 - 2226.
- [6] University of Veterinary and Pharmaceutical Sciences Brno. *Food preservation*. Disponível em [http://www2.vfu.cz/export/sites/default/univ\\_prac/jazyky/vyucothane\\_discipliny/Vyukove-materialy-FVHE-ZS-2011-2012-Mgr/FVHE\\_Food\\_Preservation.pdf](http://www2.vfu.cz/export/sites/default/univ_prac/jazyky/vyucothane_discipliny/Vyukove-materialy-FVHE-ZS-2011-2012-Mgr/FVHE_Food_Preservation.pdf). [Consult. em 1 de março 2014].
- [7] Google (2014). *Google Images*. Disponível em <https://www.google.pt/imghp>. [Consult. em 28 de março 2014].
- [8] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (2009). *Apostila de refrigeração*. Campus Santo Amaro - Bahia.
- [9] *Refrigeration and Freezing of Foods*. Disponível em <http://highered.mcgraw-hill.com/sites/dl/free/0073398128/835451/Chapter17.pdf>. [Consult. em 28 de março 2014].
- [10] ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2010). *ASHRAE Handbook - Refrigeration*. Atlanta.
- [11] Pinto, P. & Morais, A. (2000). *Boas práticas para a conservação de produtos hortícolas*. Porto: Associação para a Escola Superior de Biotecnologia da Universidade Católica.
- [12] Isocor. *Ficha técnica - Isolamento de Câmaras Frigoríficas*. Lisboa.

- [13] ISO - International Organization for Standardization (2002). *ISO 8995:2002 - Lighting of indoor work places*. Geneva.
- [14] Martínez, I. *Refrigeration*. Disponível em <http://webserver.dmt.upm.es/~isidorol/>. [Consult. em 4 de outubro 2013].
- [15] Moran, M. & Shapiro, H. (1993). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. John Wiley & Sons.
- [16] Silva, M. (2005). *Eficiência energética em sistemas de refrigeração industrial e comercial*. Rio de Janeiro.
- [17] ADENE - Agência para a Energia. *Guia prático - soluções para melhorar sistemas acionados por motores elétricos*. Disponível em <http://www.adene.pt/sites/default/files/Documentos/guidexamcp.pdf>. [Consult. em 28 de março 2014].
- [18] Eco Energy Sense Limited (2011). *eCube*. Disponível em <http://www.ecoenergysense.com/ecube>. [Consult. em 28 de março 2014].
- [19] *Saving Energy on Refrigeration*. Disponível em <http://savingenergy.co.za/saving-energy-on-refrigeration>. [Consult. em 21 de março 2014].
- [20] National Framework for Energy Efficiency (2009). *The Basic of Efficient Lighting*.
- [21] Gaspar, C. (2004). *Eficiência energética na indústria*. Vila Nova de Gaia: ADENE - Agência para a Energia.
- [22] ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (2013). *Tarifas transitórias de venda a clientes finais em Portugal Continental em 2014*. Disponível em [http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/2014/Documents/PrecoTVCF%20PTCont\\_2014.pdf](http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/2014/Documents/PrecoTVCF%20PTCont_2014.pdf). [Consult. em 28 de março 2014].
- [23] Magueijo, V. *et al* (2010). *Medidas de eficiência energética aplicáveis à indústria portuguesa: um enquadramento tecnológico sucinto*. ADENE - Agência para a Energia.
- [24] Almeida, A., Ferreira, F. & Both, D. (2005). Technical and economical considerations in the application of VSD's with electric motor systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41, pp. 188 - 199.
- [25] Dieckmann, J. *et al* (2010). VFD's for large chillers. *ASHRAE Journal*, june, pp. 58 - 62.
- [26] Pimenta, W. *et al* (2006). Avaliação da degradação do desempenho dum compressor operando com hidrocarbonetos. In *16.º Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*. Santa Mônica: Universidade Federal da Uberlândia.

- [27] Hy-Save Technologies. *Cold storage refrigeration*. Disponível em <http://www.hysave.com/wp-content/uploads/2010/07/case-study-cold-storage-energy-savings.pdf>. [Consult. em 28 de março 2014].
- [28] Carbon Trust (2012). *Chilling energy costs*. London.
- [29] Tassou, S. *et al* (2009). A review of emerging technologies for food refrigeration applications. *Applied Thermal Engineering*, 30, pp. 263-276.
- [30] Ding, G. (2007). Recent developments in simulation techniques for vapour-compression refrigeration systems. *International Journal of Refrigeration*, 30, pp. 1119-1133.
- [31] Xia, B. & Sun, D. (2002). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34, pp. 5-24.
- [32] Gaspar, P., Miranda, A. & Pitarma, R. (2003). Estudo comparativo do desempenho de códigos de DFC na modelação de equipamentos de refrigeração abertos. *In VII Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional*. Évora: Universidade de Évora.
- [33] Gupta, J., Ram Gopal, M. & Chakraborty, S. (2007). Modeling of a domestic frost-free refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, 30, pp. 311-322.
- [34] Borges, B. *et al* (2011). Transient simulation of household refrigerators: a semi-empirical quasi-steady approach. *Applied Energy*, 88, pp. 748-754.
- [35] Hermes, C. & Melo, C. (2008). A first-principles simulation model for the start-up and cycling transients of household refrigerators. *International Journal of Refrigeration*, 31, pp. 1341-1357.
- [36] Hermes, C. & Melo, C. (2009). Prediction of the energy consumption of household refrigerators and freezers via steady-state simulation. *Applied Energy*, 86, pp. 1311-1319.
- [37] Ge, Y & Cropper, R. (2008). Performance simulation of refrigerated display cabinets operating with refrigerants R22 and R404A. *Applied Energy*, 85, pp. 694-707.
- [38] Tao, W. *et al* (2010). Performance study of an energy-efficient display case refrigerator. *Chemical Engineering Communications*, 191(3), pp. 550-565.
- [39] Astrain, D., Vián, J. & Albizua, J. (2005). Computational model for refrigerators based on Peltier effect application. *Applied Thermal Engineering*, 25, pp. 3149-3162.
- [40] Eames, I. *et al* (2012). Description and validation of a computer based refrigeration system simulator. *Computer and Electronics in Agriculture*, 85, pp. 53-63.
- [41] Instituto Politécnico de Castelo Branco. *InovEnergy - Eficiência Energética no Setor*

- Agroindustrial*. Disponível em <http://inovenergy.inovcluster.pt>. [Consult. em 1 de dezembro 2013].
- [42] IAPMEI - Instituto de Apoio às Pequenas e Médias Empresas e à Inovação. *Definição de PME*. Disponível em <http://www.iapmei.pt/iapmei-art-03.php?id=1790>. [Consult. em 26 de dezembro 2013].
- [43] Despacho n.º 17313/2008. D. R. II Série. 122 (26-07-2008) 27912.
- [44] BP (2005). *Ficha de dados de segurança - gasóleo*. Disponível em [http://www.bp.com/content/dam/bp-country/pt\\_pt/produtos-servicos/fichasseguranca/pdf/Ficha\\_Seguranca\\_Gasoleo.pdf](http://www.bp.com/content/dam/bp-country/pt_pt/produtos-servicos/fichasseguranca/pdf/Ficha_Seguranca_Gasoleo.pdf). [Consult. em 28 de março 2014].
- [45] Charrondiere, U., Haytowitz, D. & Stadlmayr, B. (2012). *FAO / Infods Density database*. Food and Agriculture Organization of United Nations.
- [46] Baler, S. (2008). *Non-linear regression*. Disponível em <http://hspm.sph.sc.edu/Courses/J716/pdf/716-5%20Non-linear%20regression.pdf>. [Consult. em 28 de março 2014].
- [47] Montgomery, D. & Runger, G. (1999). *Applied Statistics and Probability for Engineers*. John Wiley & Sons.
- [48] Galp Energia (2010). *Gasóleo de aquecimento*. Disponível em <http://www.galpenergia.com/PT/ProdutosServicos/Produtos/Paginas/Gasoleo-aquecimento.aspx>. [Consult. em 23 de março 2014].
- [49] Casa do Lavrador (2014). Disponível em <http://www.casa-do-lavrador.com/produtos-1>. [Consult. em 23 de março 2014].
- [50] Master Vantagem (2013). *eCube 101 - Eficiência Energética*. Disponível em <http://www.mastervantagem.com/?funcao=navix&idmenu=&cod=461&cix=catpesq&lang=1>. [Consult. em 2 de fevereiro 2014].
- [51] Zebe - sistemas eletrónicos (2014). *Variadores de velocidade*. Disponível em <http://www.zeben.pt/?modulo=produtos&grupo=119&lang=pt>. [Consult. em 2 de fevereiro 2014].
- [52] Coprax, S. A. (2013). *Caldeiras a biomassa - pellets*. Disponível em [http://www.copraxbiomassa.com/pt/catalogo/listProdutos/categoria\\_id/26](http://www.copraxbiomassa.com/pt/catalogo/listProdutos/categoria_id/26). [Consult. em 23 de março 2014].
- [53] Ambitermo - Engenharia e equipamentos térmicos, S. A. *Caldeiras a vapor*. Disponível em <http://www.ambitermo.com/>. [Consult. em 23 de março 2014].

- [54] Santos, C. & Matias, L. (2006). *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*. Lisboa:LNEC.
- [55] International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (1991). Disponível em <http://icoads.noaa.gov/software/other/profs>. [Consult. em 24 de dezembro 2013].
- [56] Instituto Nacional de Eficiência Energética. *Conceito de eficiência energética*. Disponível em [http://www.inee.org.br/eficiencia\\_o\\_que\\_eh.asp?Cat=eficiencia](http://www.inee.org.br/eficiencia_o_que_eh.asp?Cat=eficiencia). [Consult. em 26 de fevereiro 2014].
- [57] Department of Energy of U. S. A. *Tips: lighting*. Disponível em <http://energy.gov/energysaver/articles/tips-lighting>. [Consult. em 26 de fevereiro 2014].
- [58] Sá, A. (2010). *Guia de aplicações de gestão de energia e eficiência energética*. Porto: Publindústria.
- [59] Çengel, Y. & Boles, M. (2006). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill.
- [60] Megaclima (2014). *Cortina de ar Thermoscreen Standard*. Disponível em <http://www.megaclima.pt/mostra-linha-cortina-standard.php?id=418&n=Thermoscreen+-+Standard>. [Consult. em 20 de fevereiro 2014].
- [61] Osram (2014). *SubstiTUBE Basic - LED tubes*. Disponível em [http://www.osram.com/osram\\_com/products/led-technology/lamps/led-tubes/substitube-basic/index.jsp](http://www.osram.com/osram_com/products/led-technology/lamps/led-tubes/substitube-basic/index.jsp). [Consult. em 22 de fevereiro 2014].
- [62] Osram (2014). *Luminaires Lumilux Duo T8 Prismatic*. Disponível em [http://www.osram.com/osram\\_com/products/luminaires/indoor-luminaires/ceiling-luminaires/lumilux-duo/lumilux-duo-t8-prismatic/index.jsp](http://www.osram.com/osram_com/products/luminaires/indoor-luminaires/ceiling-luminaires/lumilux-duo/lumilux-duo-t8-prismatic/index.jsp). [Consult. em 23 de fevereiro 2014].
- [63] Zembe - Sociedade Técnica e Comercial S. A. (2014). *Tabela de preços Osram - iluminação geral e luminárias*. Disponível em [http://www.osram.com/osram\\_com/products/luminaires/indoor-luminaires/ceiling-luminaires/lumilux-duo/lumilux-duo-t8-prismatic/index.jsp](http://www.osram.com/osram_com/products/luminaires/indoor-luminaires/ceiling-luminaires/lumilux-duo/lumilux-duo-t8-prismatic/index.jsp). [Consult. em 23 de fevereiro 2014].
- [64] Okamoto, N. *Compressors Introduction*. Disponível em <http://www.engr.sjsu.edu/ndejong/Compressors%20Introduction.pdf>. [Consult. em 26 de março 2014].

## ANEXO I - DADOS ENERGÉTICOS DAS EMPRESAS RECOLHIDOS DURANTE O INQUÉRITO (VALORES DE 2010)

Código empresa	N.º trabalhadores efetivos	Consumo anual energia			Consumo anual energia relativa (kVA.r.h) <sup>17</sup>			Custo anual energia (€)			Equipamentos eficiência energética	
		Elétrica (kW.h)	Gasóleo (L)	Gas propano (kg)	Indutiva escalação 1	Indutiva escalação 2	Indutiva escalação 3	Capacitiva	Elétrica	Gasóleo		Gas propano
La1	6	11124	0	0	-	-	-	-	8020	0	0	
La2	7	19527	10278	0	-	-	-	-	18000	8000	0	
La3	15	21100	12092	0	0	0	0	0	23587	27689	0	Coletor solar
La4*	4	19027	5024	0	0	0	0	0	21690	5158	0	Coletor solar
La5	4	6614	0	0	-	-	-	-	9000	0	0	
La6	6	16820	0	0	-	-	-	-	15200	0	0	
Ca1	2	5601	0	0	-	-	-	-	6820	0	0	
Ca2	80	1075774	9130	128222	74887	20360	238	828	100972	9004	128222	
Ca3	6	20175	0	0	-	-	-	-	4200	0	0	
Ca4	5	4216	0	0	-	-	-	-	6740	0	0	Coletor solar
Ca5	130	91244	0	0	50514	39524	9388	3356	85925	0	0	Panel fotovoltaico
Ca6	8	15872	0	0	-	-	-	-	17410	0	0	
Ho1	78	7900000	0	216620	-	-	-	-	634381	0	202703	Recuperador calor
Ho2	4	13783	0	0	-	-	-	-	14456	0	0	Bateria condensadores
Ho3	2	15989	0	0	-	-	-	-	16687	0	0	
Ho4	12	31446	0	0	0	0	0	0	33933	0	0	
Ho5	55	26733	0	0	36313	26206	29582	52743	32683	0	0	
Ho6	2	2059	0	0	-	-	-	-	1766	0	0	
Pe1	28	79522	48039	0	52137	27542	1255	1	77472	53358	0	
Pe2	2	8203	10391	0	-	-	-	-	9533	12000	0	
Pe3	12	82917	32172,21	0	-	-	-	-	82172	33892	0	
Pe4	8	16689	52827	0	-	-	-	-	18232	57721	0	
Pe5	20	47523	0	0	-	-	-	-	48092	0	0	Bateria condensadores
Pe6*	7	15457	0	0	0	0	0	0	17397	0	0	Coletor solar
Di1	45	53403	118000	0	-	-	-	-	54000	114000	0	Recuperador calor
Di2	22	44987	64799	0	2840	0	0	6898	44202	65286	0	
Di3	10	15389	0	0	-	-	-	-	16800	0	0	
Di4	24	17420	23250	0	-	-	-	-	15528	22970	0	
Di5	2	9320	0	0	-	-	-	-	8500	0	0	
Di6*	11	6523	11235	0	0	0	0	0	7112	17988	0	Panel fotovoltaico
Vi1	16	2000	0	0	-	-	-	-	2600	0	0	Bateria condensadores, panel fotovoltaico
Vi2	14	19983	6000	0	10573	10330	21989	23	18000	4000	0	Bateria condensadores, panel fotovoltaico
Vi3	5	16720	0	0	-	-	-	-	15560	0	0	
Vi4	2	980	5200	0	-	-	-	-	1611	7500	0	
Vi5	12	1920	0	0	-	-	-	-	2400	0	0	
Vi6	6	920	0	0	-	-	-	-	1320	0	0	

<sup>17</sup> Valores retirados das empresas que foram auditadas e que se referem a 2012.

\* Empresas auditadas que dispensaram a utilização de baterias de condensadores, devido aos tarifários de energia elétrica utilizados (BTN).

## ANEXO II - VALORES DE PRODUÇÃO ANUAL RECOLHIDOS DURANTE O INQUÉRITO (PERÍODO 2010)

Código empresa	Produção		Código empresa	Produção		Código empresa	Produção	
	Nome	Quantidade		Nome	Quantidade		Nome	Quantidade
La1	Queijo	98299 kg	Ho3	Ameixa	130000 kg	Di3	Carne	189000 kg
	Requeijão	32102 kg		Noz	180000 kg		Gelado	85 kg
La2	Queijo	31200 kg	Ho4	Alho	1500000 kg		Legume	159200 kg
	Requeijão	1680 kg		Fruta	600000 kg		Peixe congelado	272000 kg
La3	Queijo	108000 kg	Ho5	Fruta	3500000 kg		Gelado	8500 kg
La4	Queijo	38500 kg	Ho6	Fruta	17320 kg		logurte	6000 kg
La5	Queijo	43500 kg		Hortaliça	10786 kg	Outros produtos	80500 kg	
La6	Requeijão	2200 kg	Pe1	Carapau	2539 kg	Carne	184000 kg	
	Queijo	22800 kg		Cavala e cavalinho	2038 kg	Legume	83000 kg	
Ca1	Requeijão	1080 kg		Molusco	4061 kg	Peixe congelado	152000 kg	
	Cacholeira	9900 kg		Red fish	3342 kg	Peixe congelado	392800 kg	
	Farinheira	3180 kg		Sardinha	4483 kg	Pré-cozinhado	182230 kg	
	Morceia	4950 kg		Bacalhau salgado/seco	370000 kg	Snack	82482 kg	
	Paio	17000 kg	Bacalhau ultra congelado	298000 kg	Vinho	2000000 l		
	Desmancha	2473966 kg	Legumes secos	230 kg	Vinho	1000000 l		
Ca2	Fatiado	40118 kg	Pe2	Cavala	2917 kg	Vinho	130000 l	
	Transformado	46724 kg		Moluscos	6029 kg	Vinho	500000 l	
Ca3	Bucho	5625 kg	Pe3	Red fish	3017 kg	Vinho	100000 l	
	Cacholeira cozida	2403 kg		Sardinha	5612 kg	Vinho	100000 l	
	Morceia	3043 kg	Pe4	Marisco	80000 kg	Vinho	400000 l	
	Paio	1180 kg		Peixe	20000 kg			
Ca4	Cacholeira	18908 kg	Pe5	Bolo	102023 kg			
	Farinheira	4060 kg		Peixe congelado	627241 kg			
	Morceia	4875 kg	Ultracongelado	657913 kg				
	Paio	9880 kg	Pe6	Marisco congelado	30000 kg			
Carne fresca / congelados	1000000 kg	Marisco vivo		65000 kg				
Ca5	Fumado	770000 kg	Di1	Peixe	25000 kg			
Transformado	62400 kg	Bacalhau dourado		40000 kg				
Ho1	Brócolo	600000 kg	Di2	Carne vitelão	216000 kg			
	Courgette	951000 kg		Frango	48000 kg			
	Ervilha	1647000 kg		Ovino	456000 kg			
	Pimento	3869000 kg		Suino	720000 kg			
	Tomate	2430000 kg		Carne	212619 kg			
	Beringela	71000 kg		Legume	124000 kg			
Ho2	Fruta	80000 kg		Peixe congelado	526654 kg			
	Hortaliça	600000 kg		Snack	79083 kg			

**ANEXO III - DESAGREGAÇÃO DOS CONSUMOS DE ENERGIA ELÉTRICA POR TIPO DE UTILIZAÇÃO NAS EMPRESAS SUBMETIDAS À AUDITORIA ENERGÉTICA (DADOS 2012)**

<b>Empresa: La.3</b>											
Processo operativo (PO) ↓	Iluminação (tep)	Aquecimento (tep)	Arrefecimento (tep)	Ventilação (tep)	Frio (tep)	Produção vapor (tep)	Ar Comprimido (tep)	AQS (tep)	Sistema abastecimento água / rega (tep)	Outros Equipamentos (tep)	
Conservação do leite	0,000	0,000	0,000	0,000	0,093	0,000	0,000	0,000	0,000	0,221	
Coalhada	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,283	
Moldagem e prensagem	0,000	0,581	0,581	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,444	
Cura	0,000	0,000	0,000	0,000	34,059	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Revestimento, embalagem e expedição	0,000	0,163	0,160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,212	
ETAR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,747	
Serviços auxiliares	1,892	0,267	0,105	0,000	0,400	0,172	2,393	0,000	0,000	6,462	
Frota veículos	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
<b>Total (tep)</b>											<b>13,881</b>

<b>Empresa: La.4</b>											
Processo operativo (PO) ↓	Iluminação (tep)	Aquecimento (tep)	Arrefecimento (tep)	Ventilação (tep)	Frio (tep)	Produção vapor (tep)	Ar Comprimido (tep)	AQS (tep)	Sistema abastecimento água / rega (tep)	Outros Equipamentos (tep)	
Receção/Conservação do leite	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,133	
Sala de Fabrico	0,126	0,004	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	
Embalagem	0,073	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,574	
Expedição	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,418	
Central de Frio	0,759	0,000	0,000	0,000	7,772	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Serviços Auxiliares	0,290	0,532	0,022	0,000	0,649	0,000	0,172	0,015	0,000	2,327	
Frota de Veículos	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
<b>Total (tep)</b>											<b>13,881</b>

Empresa: Ca2		Tipo utilização →										
Processo operativo (PO) ↓	Iluminação (tep)	Aquecimento (tep)	Arrefecimento (tep)	Ventilação (tep)	Frio (tep)	Produção vapor (tep)	Ar Comprimido (tep)	AQS (tep)	Sistema abastecimento água / rega (tep)	Outros Equipamentos (tep)		
Abegoarria	0,021	0,049	0,007	0,107	0,362	0,000	0,000	0,000	0,000	0,254		
Abate	2,275	0,187	0,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,303		
Triparia	0,296	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,179		
Desmancha	1,556	0,000	0,000	0,589	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,606		
Embalagem	0,778	0,000	0,000	0,822	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,681		
Expedição	0,607	0,000	0,000	0,654	0,407	0,000	0,000	0,000	0,000	2,755		
Central frio	0,048	0,000	0,000	0,000	158,733	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
Sistema abastecimento água e ETAR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,565	0,000	32,123		
Serviços auxiliares	4,547	1,577	0,353	0,002	1,288	2,982	13,055	1,978	0,000	9,740		
Frota veículos	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
<b>Total (tep)</b>							<b>254,505</b>					

Empresa: Ca5		Tipo utilização →										
Processo operativo (PO) ↓	Iluminação (tep)	Aquecimento (tep)	Arrefecimento (tep)	Ventilação (tep)	Frio (tep)	Produção vapor (tep)	Ar Comprimido (tep)	AQS (tep)	Sistema abastecimento água / rega (tep)	Outros Equipamentos (tep)		
Receção	0,016	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,333		
Desmancha	0,231	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,455		
Corte fino	0,252	0,000	0,000	0,000	1,080	0,000	0,000	0,000	0,000	4,646		
Subprodutos	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,050		
Enchimento	0,093	0,000	0,000	0,000	0,081	0,000	0,000	0,000	0,000	2,142		
Embalagem	0,141	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	19,576		
Fumagem	0,083	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
Estufagem	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	11,019		
Expedição	0,250	0,076	0,294	0,000	0,633	0,000	0,000	0,000	0,000	2,192		
Armazém transformação e congelação	0,270	0,000	0,000	0,000	0,968	0,000	0,000	0,000	0,000	5,418		
Central frio	0,025	0,000	0,000	0,000	82,501	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
Higienização	0,041	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,270		
Sistema abastecimento água e ETAR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,781		
Serviços auxiliares	4,751	0,331	0,450	0,000	6,129	1,628	13,206	4,241	0,000	39,705		
Frota veículos	0,000	0,000	0,000	0,000	0,585	0,000	0,000	0,000	0,000	0,419		
<b>Total (tep)</b>							<b>219,370</b>					

<b>Empresa: Ho4</b>											
	Tipo utilização →										
Espaço ↓	Iluminação (tep)	Aquecimento (tep)	Arrefecimento (tep)	Ventilação (tep)	Frio (tep)	Produção vapor (tep)	Ar Comprimido (tep)	AQS (tep)	Sistema abastecimento água / rega (tep)	Outros Equipamentos (tep)	
Receção	0,064	0,054	0,026	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,886	
Armazém geral	0,726	0,000	0,000	0,000	32,494	0,000	0,000	0,000	0,000	5,867	
Refeitório	0,000	0,000	0,000	0,000	0,102	0,000	0,000	0,339	0,000	0,017	
Escritório	0,002	0,008	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,781	
Arquivo	0,001	0,046	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,029	
Instalações sanitárias	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Exterior	0,016	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,421	
<b>Total (tep)</b>											<b>41,887</b>

<b>Empresa: Ho5</b>											
	Tipo utilização →										
Processo operativo (PO) ↓	Iluminação (tep)	Aquecimento (tep)	Arrefecimento (tep)	Ventilação (tep)	Frio (tep)	Produção vapor (tep)	Ar Comprimido (tep)	AQS (tep)	Sistema abastecimento água / rega (tep)	Outros Equipamentos (tep)	
Receção	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,072	
Seleção lotes	0,165	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,555	
Embalagem	0,165	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,805	
Central frio	0,096	0,000	0,000	0,000	29,826	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Expedição	3,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	
Armazenamento caixas	0,097	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,494	
Sistema abastecimento água doméstica e rega	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	106,574	0,000	
Serviços auxiliares	0,559	0,025	0,025	0,000	0,255	0,000	0,368	0,751	0,000	2,202	
Frota veículos	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
<b>Total (tep)</b>											<b>159,054</b>

<b>Empresa: Pe1</b>											
	Tipo utilização →										
Processo operativo (PO) ↓	Iluminação (tep)	Aquecimento (tep)	Arrefecimento (tep)	Ventilação (tep)	Frio (tep)	Produção vapor (tep)	Ar Comprimido (tep)	AQS (tep)	Sistema abastecimento água / rega (tep)	Outros Equipamentos (tep)	
Receção e expedição peixe congelado	0,268	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	15,378	
Receção peixe fresco	1,459	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,353	
Processamento	0,698	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	11,539	
Central frio	1,150	0,000	0,000	0,000	134,796	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Serviços auxiliares	0,201	0,023	0,000	0,000	0,619	0,000	0,116	2,543	0,000	4,088	
Frota veículos	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
<b>Total (tep)</b>											<b>173,231</b>

<b>Empresa: Pe6</b>											
	Tipo utilização →										
Espaço ↓	Iluminação (tep)	Aquecimento (tep)	Arrefecimento (tep)	Ventilação (tep)	Frio (tep)	Produção vapor (tep)	Ar Comprimido (tep)	AQS (tep)	Sistema abastecimento água / rega (tep)	Outros Equipamentos (tep)	
Sala 1	0,017	0,000	0,000	0,000	13,623	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	
Sala 2	0,007	0,000	0,000	0,000	0,966	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Exterior	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
<b>Total (tep)</b>											<b>14,615</b>

Empresa: Di2		Tipo utilização →										
Espaço ↓	Iluminação (tep)	Aquecimento (tep)	Arrefecimento (tep)	Ventilação (tep)	Frio (tep)	Produção vapor (tep)	Ar Comprimido (tep)	AQS (tep)	Sistema abastecimento água / rega (tep)	Outros Equipamentos (tep)		
Hall entrada	0,002	0,000	0,000	0,000	0,090	0,000	0,000	0,000	0,000	0,094		
Sala produtos limpeza	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
Departamento vendas	0,064	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,086		
Arquivo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004		
Armazém	0,021	0,000	0,000	0,000	50,841	0,000	0,000	0,000	0,000	0,633		
Escritórios e serviços administrativos	0,097	0,148	0,035	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,216		
Vestiário e instalações sanitárias	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
Área circulação	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
Refeitório	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
Arrecadação	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
Oficina	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001		
Parque viaturas	0,041	0,000	0,000	0,000	3,455	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
Exterior	0,239	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,158		
<b>Total (tep)</b>							<b>57,243</b>					

Empresa: Di6		Tipo utilização →										
Espaço ↓	Iluminação (tep)	Aquecimento (tep)	Arrefecimento (tep)	Ventilação (tep)	Frio (tep)	Produção vapor (tep)	Ar Comprimido (tep)	AQS (tep)	Sistema abastecimento água / rega (tep)	Outros Equipamentos (tep)		
Armazém geral	0,592	0,000	0,000	0,000	10,497	0,000	0,000	0,000	0,000	0,249		
Escritório	0,052	0,076	0,032	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,890		
Arquivo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
Instalações sanitárias	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,024		
Exterior	0,219	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
<b>Total (tep)</b>						<b>13,638</b>						

Empresa: Vi2		Tipo utilização →										
Processo operativo (PO) ↓	Iluminação (tep)	Aquecimento (tep)	Arrefecimento (tep)	Ventilação (tep)	Frio (tep)	Produção vapor (tep)	Ar Comprimido (tep)	AQS (tep)	Sistema abastecimento água / rega (tep)	Outros Equipamentos (tep)		
Receção	0,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,228		
Desengace / esmagamento	0,194	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,273		
Fermentação, remontagem e armazenamento	1,217	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,323		
Central frio	0,000	0,000	0,000	0,000	14,363	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
Envelhecimento em barricas	0,032	0,000	0,000	0,000	1,812	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
Engarrafamento	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,363		
Sistema abastecimento água e ETAR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,547	0,000		
Serviços auxiliares	0,588	0,160	0,132	0,000	0,115	0,000	0,948	1,720	0,000	8,158		
Frota veiculos	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
<b>Total (tep)</b>						<b>39,204</b>						

**ANEXO IV - DADOS SOBRE OS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO E CALDEIRAS EXISTENTES NAS EMPRESAS AUDITADAS (VALORES 2012)**

Empresa	N.º câmaras frigoríficas	Características sistemas de refrigeração			Características caldeiras				
		Potência compressor (W)	N.º compressores	Potência total compressores (W)	Potência total circuito de frio (W)	Combustível	Consumo anual (tep)	Potência térmica (W)	Fluido térmico
La3	6	2970	2	31540	88870	Gasóleo	570000	Vapor água	12,988
		3740	2						
		4620	1						
La4	7	13500	1	35480	39010	Gasóleo	160000	Vapor água	1,058
		740	2						
		6800	5						
Ca2	19	18500	1	238500	335150	Gás propano	290000	Vapor água	156,738
		55000	4						
		2450	2						
Ca5	11	2500	1	168760	194030	Gás propano	420000	Água quente	45,664
		2700	1						
		3460	1						
		4500	1						
		4680	2						
		5300	1						
		5940	3						
		9100	1						
		13640	8						
		1400	1						
		5500	8						
Ho4	8	7400	1	46140	64340	-	-	-	-
		22370	5						
Ho5	7	700	1	111850	144170	-	-	-	-
		5590	9						
Pe1	6	6200	2	63410	404900	-	-	-	-
		3670	2						
Pe6	2	11000	2	7340	10830	-	-	-	-
		27700	2						
Di2 <sup>18</sup>	4	750	1	77400	112500	-	-	-	-
		1470	1						
		2900	2						
Di6	2	2450	1	8020	10980	-	-	-	-
		24900	2						
		25500	1						
Vi2	1	2450	1	75300	95150	-	-	-	-
		24900	2						
		25500	1						

<sup>18</sup> Considera somente os compressores e os circuitos de refrigeração das câmaras existentes nas instalações da empresa, e não da frota de transportes.