



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

# Ferramenta computacional de previsão e análise do desempenho energético de empresas do setor agroindustrial

**Diogo Pinto Neves**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletromecânica**  
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Dinis Gaspar  
Co-orientador: Prof. Doutor Pedro Dinho Silva

**Covilhã, Outubro de 2013**



---

# Agradecimentos

O trabalho desenvolvido para a elaboração da presente dissertação foi fruto muito esforço, dedicação e trabalho tendo sempre o devido apoio por parte da família, amigos e professores.

Primeiramente agradeço aos meus pais, pelo amor, pela educação, pelo apoio e pelo investimento que fizeram em mim ao me proporcionarem a oportunidade de me formar como Engenheiro Eletromecânico, bem como ao meu irmão Vasco e a toda a minha família pela força e incentivo que me foi transmitido ao longo dos vários obstáculos que foram surgindo, quer a nível de trabalho quer a nível pessoal.

À Mariana, agradeço o apoio e a presença que me ajudaram a seguir o caminho no sentido levar o trabalho a bom porto.

Ao meu orientador o Professor Doutor Pedro Dinis Gaspar e co-orientador Professor Doutor Pedro Dinho Silva, um grande obrigado pela disponibilidade e prontidão no auxílio prestado ao longo de todas as etapas de trabalho, bem como na orientação e no apoio científico que foi sendo dado.

Ao Professor José Nunes, demonstro o meu apreço pelo apoio transmitido, pela disponibilidade e pela partilha de informação.

Agradeço também aos meus colegas de trabalho que acompanharam com mais proximidade o trabalho desenvolvido, nomeadamente o Emanuel Bastos, o Artur Cruz e o Miguel Vicente, os bons momentos que se passaram e o companheirismo durante toda a fase de trabalho.

Demonstro ainda gratidão a todos os meus colegas de curso e amigos pelo acompanhamento e interesse no trabalho desenvolvido.

Por fim, agradeço a todos os Professores do curso de Engenharia Eletromecânica e das restantes fases da minha vida, 1º, 2º, 3º ciclo e Ensino Secundário, que contribuíram para a minha boa formação.



---

## Resumo

O processamento de alimentos e a sua conservação representam fatores decisivos para a sustentabilidade do planeta dado o crescimento significativo da população mundial nas últimas décadas. Por esse motivo, a refrigeração dos produtos alimentares tem vindo a ser objeto de estudo e aperfeiçoamento de modo a ser possível garantir o abastecimento de alimentos com boa qualidade, controlando a qualidade do frio durante os processos de fabrico e armazenamento. Foi com o intuito de promover uma melhoria do desempenho energético das indústrias do frio que se desenvolveu uma ferramenta computacional recorrendo ao Matlab e à toolbox GUIDE (*Graphical User Interface Design Environment*), para análise do comportamento de um conjunto de parâmetros característicos, nomeadamente a quantidade de matéria-prima, o consumo de energia anual da empresa, o volume das câmaras de refrigeração e a potência dos compressores. Esta ferramenta computacional foi criada com base em algoritmos de desenvolvidos através de dados estatísticos recolhidos em trabalho de campo, sendo depois aplicada a várias empresas de diferentes subcategorias da indústria da carne, mais concretamente aos matadouros, aos presuntos e às salsicharias. Estas simulações permitiram validar a ferramenta desenvolvida, uma vez que os resultados obtidos foram de encontro aos dados recolhidos nas visitas efetuadas às empresas, permitindo identificar o seu perfil energético apontando algumas falhas ou ineficiências energéticas das empresas.

## Palavras-chave

Eficiência Energética, sustentabilidade, produtos perecíveis, conservação, câmaras de frio, indústria de frio, ferramenta computacional, Matlab, GUIDE.



---

# Abstract

Food processing and conservation represent decisive factors for the sustainability of the planet given the significant growth of the world population in the last decades. Therefore, the cooling of food products has been subject of study and improvement in order to be able to guarantee the food supply with good quality, controlling the quality of the cold during the process of manufacture and storage. It was with the purpose of promoting an improvement of the energy performance in cold industries that a computational tool was developed using the Matlab toolbox and GUIDE (Graphical User Interface Design Environment) for analysis of the behavior of a set of characteristic parameters, including the amount raw material, the annual energy consumption of the company, the volume of cooling chambers and compressor nominal power. This software tool was created based on algorithms developed by statistical data collected in field work, then applied to several companies in different subcategories of the meat industry, specifically to slaughterhouses, hams and sausages. These simulations allow to validate the developed tool, since the results were consistent with data collected during visits made to companies, allowing to identify their energy profile pointing out some possible flaws or inefficiencies of energy companies.

## Keywords

Energetic efficiency, sustainability, perishable products, cold storage, computational tool, cold industry, Matlab, GUIDE



---

# Índice

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	iii
Abstract .....	v
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas .....	xi
Nomenclatura .....	xiii
<b>1. Introdução .....</b>	<b>15</b>
1.1. Enquadramento .....	15
1.2. O problema em estudo e a sua relevância .....	17
1.3. Objetivos e contribuição da dissertação .....	19
1.4. Visão geral e organização da dissertação .....	20
<b>2. Estado da arte .....</b>	<b>23</b>
2.1. Revisão bibliográfica .....	23
<b>3. Ferramenta computacional de previsão e análise do desempenho energético: Cool-OP</b>	<b>39</b>
3.1. Introdução .....	39
3.2. MATLAB e GUIDE .....	40
3.3. Estrutura e Layout do programa .....	43
3.4. Programação.....	49
<b>4. Validação do Cool-OP - casos de estudo .....</b>	<b>53</b>
4.1. Apresentação das empresas .....	53
4.2. Simulação de resultados.....	56
4.3. Análise e discussão de resultados.....	61
<b>5. Conclusões.....</b>	<b>65</b>
5.1. Nota conclusiva .....	65
5.2. Sugestões de trabalhos futuros.....	66
<b>6. Referências bibliográficas.....</b>	<b>67</b>



---

# Lista de Figuras

Figura 1 - Janela exemplificativa do programa QEEAT, desenvolvido no âmbito do projeto FRISBEE ( <a href="http://frisbee-project.eu">http://frisbee-project.eu</a> ). .....	25
Figura 2 -Evolução de um indicador de qualidade para presuntos a diferentes temperaturas ( <a href="http://frisbee-project.eu">http://frisbee-project.eu</a> ). .....	26
Figura 3 - Identificação das falhas/ineficiências com maior expressão detetadas nas auditorias do ICE-E (Foster <i>et al.</i> , 2013). .....	27
Figura 4 - Potencial de poupança de energia para as falhas/ineficiências identificadas (Foster <i>et al.</i> , 2013). .....	28
Figura 5 - Poupança previsível face ao tipo de produto armazenado. (Foster, 2013) .....	29
Figura 6 - Janela exemplificativa de introdução de dados no Simple Model v2.5 ICE-E (Foster <i>et al.</i> , 2013). .....	30
Figura 7 - Exemplo de resultados do modelo simples (Foster <i>et al.</i> , 2013). .....	31
Figura 8 - Resultados do consumo elétrico e da potência do modelo complexo (Foster <i>et al.</i> , 2013). .....	32
Figura 9 - Temáticas abordadas e ferramentas desenvolvidas (CHILL-ON Final Report, 2006). .....	33
Figura 10 - Processo de comunicação do sistema TRACECHILL desenvolvido pelo Chill-On (CHILL-ON Final Report, 2006). .....	34
Figura 11 - Sistema NECS completo (sensores, unidade de entradas e saídas e software) (Night Wind implementation plan, 2006). .....	36
Figura 12 - Interface de controlo do NWCS (Night Wind implementation plan, 2006). .....	37
Figura 13 - Ambiente de trabalho do MATLAB com o GUIDE aberto (Matlab, 2012b). .....	41
Figura 14 - Exemplo de itens criados através do GUIDE. ....	41
Figura 15 - <i>Property Inspector</i> do componente <i>pushbutton</i> do GUIDE. ....	43
Figura 16 - Árvore de menus da ferramenta computacional Cool-OP. ....	44
Figura 17- Janela inicial da ferramenta computacional. ....	45
Figura 18 - a) Janela do Menu; b) Janela do menu das Carnes; c) Janela de introdução de parâmetros para os Matadouros. ....	46
Figura 19 - Janela dos resultados gerais com um exemplo de simulação. ....	46
Figura 20 - Exemplo de caso específico do Matadouro. Gráfico Volume das câmaras Vs. Matéria-prima. ..	47
Figura 21 - Relatório de desempenho energético gerado pelo Cool-OP. ....	48
Figura 22 - a) Corredor climatizado da empresa A; b) Evaporadores de uma câmara de frio. ....	54
Figura 23 - Câmara de frio da empresa B. ....	55
Figura 24 - Interior de câmara de frio da empresa C. ....	56
Figura 25- Resultados gerais Empresa A. ....	58
Figura 26- Resultados gerais Empresa B. ....	59
Figura 27- Resultados gerais Empresa C. ....	60
Figura 28 - Relatório de desempenho energético para a empresa A. ....	64



---

# Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Domínio de aplicação de cada um dos parâmetros da ferramenta computacional 38

Tabela 4.1 - Valores dos parâmetros das empresas analisadas a introduzir no Cool-OP. 56

---

---

# Nomenclatura

°C - graus Celcius

kW - kilowatt

kWh/day - kilowatt hora por dia

kWh/ton MP - kilowatt hora por tonelada de matéria-prima

m<sup>2</sup> - metro quadrado

m<sup>3</sup> - metro cúbico

Mtep - mega tonelada equivalente de petróleo

MWh - megawatt hora

MWh/yr - megawatt hora por ano

ton - tonelada

## **Acrónimos:**

<i>BSI</i>	Bubble Slurry Ice
<i>CCP</i>	Cold Chain Predictor
<i>Cool-OP</i>	Cooling Optimization Program
<i>DSS</i>	Decision Support System
<i>GUIDE</i>	Graphical User Interface Design Environment
<i>ICE-E</i>	Improving Cold storage Equipment in Europe
<i>MBDs</i>	Molecular Biological Diagnostics
<i>NWCS</i>	Night Wind Control System
<i>OCDE</i>	Organização para a Cooperação do Desenvolvimento Económico
<i>QEEAT.</i>	Quality Energy Environment Assessment Tool
<i>QMRA</i>	Quantitive Microbial Risk Assessment
<i>RFID</i>	Radio Frequency Identification
<i>SCM</i>	Supply Chain Management
<i>SLP</i>	Shelf Life Predictor
<i>TEWI</i>	Total Equivalent Warming Impact
<i>TTI</i>	Time-Temperature-Indicator
<i>UBI</i>	Universidade da Beira Interior

---

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

No que toca à conservação de produtos alimentares, os sistemas de frio industrial são os equipamentos mais utilizados atualmente, se bem que outrora foram técnicas como a salga, a salmoura, o fumeiro e a secagem que permitiram uma conservação eficaz dos alimentos. É de notar que estas técnicas ainda são utilizadas em determinados tipos de alimentos, principalmente no que toca a enchidos, presuntos, queijos, ou ainda peixes, como o caso do bacalhau. Porém, o organismo do ser humano requer alimentos frescos e variados em todas as alturas do ano e, infelizmente, estas técnicas mais antigas apresentam como desvantagem a alteração das características orgânicas dos alimentos, nomeadamente o seu aspeto, sabor e odor, conforme afirma Pachai (2013). Quando possível, nos países de climas frios, era normal preservar alimentos como o leite deixando-os expostos ao relento ou mergulhando-os em lagoas ou rios de águas frias (Utterback, 1994). A utilização do gelo para refrigerar e conservar alimentos surge já desde a pré-história e existem evidências que, por exemplo os chineses, utilizaram neve e gelo para arrefecer bebidas, sendo esta civilização a pioneira a recolher e armazenar gelo durante o inverno para utilizar durante o verão. Após a recolha do gelo nas devidas épocas, este era armazenado em cavernas protegidos com materiais isolantes, como por exemplo, palha seca. Nos países nórdicos, onde as temperaturas são naturalmente mais baixas, o gelo era normalmente recolhido durante a noite ou de madrugada para uso imediato no dia seguinte, não sendo por isso necessário fazer qualquer tipo de armazenamento do mesmo. O gelo passou a ganhar tal importância que começaram a surgir empresas com a finalidade de comercializar este recurso natural para locais onde não fosse possível de obter. Foi Frederic Tudor, um jovem visionário do século XIX (Klein, 2012), que sonhou em exportar este recurso natural, de modo a poder ser utilizado para arrefecer bebidas, preservar comida e acalmar o sofrimento de pacientes que sofressem da febre-amarela. O grande desafio deste jovem consistiu em transportar o gelo sem que este derretesse. Na primeira exportação que fez em 1806, transportou cerca de 130 toneladas de gelo carregadas num barco com destino a Martinique. O negócio teve um prejuízo enorme. No ano seguinte tenta novamente uma viagem mas desta vez com cerca de 240 toneladas de gelo, onde mais uma vez não teve sucesso. Uns anos mais tarde, Nathaniel Wyeth, um dos sócios de Tudor, desenvolveu uma ferramenta para cortar o gelo permitindo que este fosse arrumado sem espaços de ar e com um melhor aproveitamento do volume do local onde era armazenado (Herold, 2011). Com isto conseguiu aumentar a capacidade de armazenamento e reduziu o descongelamento durante as viagens,

uma vez que os blocos cortados eram uniformes e encaixavam perfeitamente uns nos outros. Com esta técnica, Tudor exportou gelo pelo mundo chegando a fazer viagens até à Índia, Austrália e Japão transformando este negócio num alicerce do comércio em New England. Em 1864 Frederic faleceu milionário e conhecido mundialmente como o Rei do Gelo, alterando a percepção do gelo para a sociedade deixando de ser considerado como uma luxúria, mais concretamente por estar disponível apenas ao acesso da nobreza (em terras onde não existia gelo) para refrescar as suas bebidas, passando a ser uma necessidade.

Mais tarde, em 1918, desenvolveu-se o primeiro frigorífico automático (Ferraz & Gomes, 2008), e revelou-se de imediato como um método de conservação eficaz, que para além de ter a capacidade de preservar as características originais dos alimentos mantendo as suas propriedades orgânicas e nutricionais, reduz ainda os desperdícios dos alimentos por deterioração e maturação. Convém por isso mencionar que existem dois ramos diferentes de refrigeração, em que num deles o objetivo é o de armazenar produtos a temperaturas próximas de 0°C, para que estes estejam aptos a ser consumidos prontamente, e no outro os produtos são armazenados a temperaturas negativas com a finalidade de aumentar o tempo de vida útil dos produtos podendo ser consumidos fora da sua época normal (exemplo das frutas sazonais), conforme afirma Chagas *et al.* (2006). A refrigeração passou a desempenhar um papel fundamental na manutenção da qualidade e da segurança alimentar uma vez que cerca de 40% dos produtos alimentares produzidos em todo o mundo necessitam de refrigeração para a sua conservação a longo prazo (James & James, 2010).

É de notar a importância da eletricidade nos dias de hoje, uma vez que a economia e a sociedade do planeta assentam numa enorme dependência deste bem. Posto isto, o trabalho desenvolvido tem por objetivo identificar os perfis de consumo energético atuais das unidades agroindustriais e à promoção e desenvolvimento de ações que contribuam para uma melhoria efetiva da eficiência energética e da competitividade deste sector, uma vez que segundo James & James (2010) cerca de 15% do consumo mundial de eletricidade é utilizado para refrigeração. O trabalho desenvolvido e apresentado consiste na elaboração e implementação de uma ferramenta computacional de análise e simulação do desempenho de indústrias agroalimentares, denominada Cool-OP (*Cooling Optimization Program*), para ser validado com empresas fora do universo das empresas visitadas/estudadas. Trata-se de uma ferramenta de apoio à tomada de decisões estratégicas, a nível empresarial, que fazendo uso de correlações oriundas de trabalho de campo, permite perspetivar o desempenho energético de uma empresa utilizadora de frio, apontando soluções que conduzam a uma melhoria efetiva da eficiência energética. Reforça-se a ideia de que o programa desenvolvido não visa a caracterização individual das várias unidades utilizadoras de frio no seu processo produtivo, mas sim a caracterização por fileira, nomeadamente na fileira das carnes, do peixe, dos lacticínios, dos

hortofrutícolas, do vinho e vinha e da distribuição, de forma a obter dados reais que possam constituir no input do modelo/ algoritmo.

Convém referir que no caso concreto de Portugal, em 2011, o número de pequenas e médias empresas rondava os 1.112.000, oferecendo emprego a cerca de 78,5% da população portuguesa empregada (IAPMEI, 2011), fator que caracteriza a economia portuguesa. Para além disso, de acordo com um estudo efetuado pela OCDE (Organização para a Cooperação do Desenvolvimento Económico), Portugal foi considerado, em 2005, como um dos países cuja população possuía menos habilitações literárias ficando ao nível do Brasil e da Turquia. No estudo foram inquiridos indivíduos entre os 25 e os 65 anos de idade pertencentes à população ativa, e 59% destes possuíam habilitações literárias inferiores ao sexto ano de escolaridade enquanto na Dinamarca, país europeu, este valor era de apenas 1%. Esta conjuntura foi tida em consideração para o desenvolvimento da ferramenta computacional descrita nesta dissertação. Neste contexto, foi criada uma ferramenta computacional intuitiva e de fácil compreensão de modo a estar acessível a todos os agentes da indústria do frio independentemente das suas habilitações.

## **1.2. O problema em estudo e a sua relevância**

São diversas as temáticas que são alvos de pesquisa ou estudos científicos, e tanto a sustentabilidade como a segurança alimentar não fogem à exceção. No início do século XX, a população mundial rondava 1.500 milhões de pessoas, no entanto, com o passar de um século, o número de habitantes subiu para aproximadamente 7.000 milhões (Pachai, 2013). Consequentemente, a procura de alimentos é cada vez maior, tornando-se imperativo encontrar soluções a curto prazo que visem a sustentabilidade do planeta e produtos alimentares com qualidade à população, colocando-se uma enorme pressão sobre a cadeia de produção alimentar e na conservação dos alimentos. É neste contexto que o arrefecimento desempenha um papel importante, permitindo fazer o armazenamento de alimentos em épocas de maior produção, quando o mercado não tem capacidade para escoamento do produto, ou apenas para que estejam disponíveis quando necessários. A refrigeração por si só é um processo com a capacidade de preservar os produtos garantindo que estes mantêm as suas características químicas, físicas e nutricionais, mas que também é indispensável no processamento de alimentos perecíveis, nomeadamente da carne e os seus derivados.

Outra temática que também tem influência direta neste assunto é a energia, dado que representa um fator de máxima importância não só para a economia do país, mas sobretudo para o bem-estar dos seus cidadãos. Em 1971 registou-se um consumo mundial de eletricidade

na ordem dos 439 Mtep e, em 2010, este valor subiu para 1.536 Mtep (IEA, 2012), um aumento correlacionado com o aumento da população, sendo a indústria responsável por cerca de 35,2% do consumo de energia a nível mundial em 2010. Resumidamente, pode afirmar-se que segundo Pachai (2013), a energia consumida a nível mundial em processos de refrigeração representa 15% do consumo de energia (Pearson, 2003). Para uma melhor noção da dimensão e da importância desta temática, verifica-se que a produção mundial de carne em 1999 foi cerca de 229 milhões de toneladas e estima-se que em 2050 este valor duplique para 470 milhões de toneladas. No caso concreto de Portugal, foi a indústria da carne que em 2009 teve o maior índice de volume de negócios dentro do sector alimentar (INE, 2010). Para além disso, cerca de 20% (Pachai *et al.*, 2013) das perdas a nível mundial dos produtos ou alimentos perecíveis deve-se ao facto de uma refrigeração inadequada dos mesmos, durante as fases de produção, transporte, armazenamento, distribuição e comercialização.

No entanto, as tecnologias de refrigeração no sector industrial representam um dos domínios em que se têm registado maiores avanços tecnológicos nos últimos tempos, tornando-se um fator cada vez mais decisivo para a competitividade das empresas do sector agroalimentar e de outros sectores industriais ou económicos que façam uso deste processo, nomeadamente o da logística (transporte, armazenamento e distribuição). Trata-se portanto de uma tecnologia com um enorme leque de aplicação, sendo neste caso aplicado à conservação, transformação e armazenamento de alimentos o que permite garantir um abastecimento de produtos alimentares ao consumidor em períodos de crise ou de uma produção insuficiente.

Deste modo considera-se que a refrigeração desempenhou um papel fundamental para a globalização dos mercados no sector agroindustrial, contribuindo para uma crescente relativização de fatores outrora decisivos, como as épocas de produção (produtos sazonais) ou a distância entre as fontes de produção e os mercados finais.

À escala mundial, foi desde meados da década de 1970 que as questões energéticas e ambientais começaram a ser alvo de preocupação por parte de várias entidades, organismos e instituições, alertando assim para a necessidade da criação de um novo paradigma de desenvolvimento. Com base nestas considerações, a promoção de políticas energéticas mais sustentáveis revelaram alguns progressos, mas nos últimos anos tem-se assistido a um aumento do consumo de energia, cuja causa é justificável pelo rápido desenvolvimento de economias emergentes sendo inegável que este incremento se continue a verificar nos próximos anos ou décadas. A presente dissertação incorpora objetivos que se dirigem à identificação dos perfis energéticos atuais das unidades agroindustriais e à promoção do desenvolvimento de ações que

contribuam para uma melhoria da eficiência energética do sector, contribuindo assim para o aumento da competitividade do mesmo.

Assim, considera-se relevante o desenvolvimento de estudos e ferramentas que permitam melhorar a eficiência dos processos industriais de processamento e de refrigeração associados ao sector agroindustrial, garantindo-lhes uma melhor sustentabilidade, aumentando a sua eficiência e reduzindo/monitorizando os consumos de energia e as emissões de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono). Porém, é de salientar que são escassos os estudos ou projetos desenvolvidos nesta área, mais concretamente na criação de ferramentas computacionais que permitam fazer uma análise de diversos pontos relacionados com os processos de refrigeração (tanto a nível de consumos de energia como de impacto ambiental) e com as respetivas empresas com o objetivo de reduzir custos.

### **1.3. Objetivos e contribuição da dissertação**

O tema proposto tem por objetivo a criação de uma ferramenta computacional capaz de caracterizar o perfil energético de uma qualquer empresa do sector agroindustrial com base em quatro parâmetros característicos, nomeadamente o consumo de energia anual, a quantidade de matéria-prima processada anualmente, o volume total das câmaras de refrigeração e a potência nominal dos compressores responsáveis pela refrigeração. A ferramenta é validada pelos resultados da sua aplicação a várias empresas (simulação e visitas de campo) que não fizeram parte integrante das empresas consultadas para desenvolvimento das correlações entre os vários parâmetros característicos. A grande contribuição do desenvolvimento desta ferramenta computacional, o Cool-OP, é que irá permitir aos gerentes/funcionários de qualquer entidade deste sector identificar em que patamar se encontra uma determinada empresa no que toca ao consumo de energia face à média nacional, podendo deste modo identificar através dos diferentes perfis característicos quais os pontos ou aspetos que merecem ser alvos de intervenção, caso apresentem valores desenquadrados face ao esperado. Assim, a análise da eficiência energética das empresas do sector agroindustrial permitirá, não só caracterizar energeticamente o sector agroindustrial, mas também desenvolver ferramentas que possam ser utilizadas pelas empresas de modo a promover a melhoria da sua eficiência energética.

Ao fazer a caracterização das empresas recorrendo a este software, cabe aos responsáveis tomar decisões em prol da redução do consumo de energia da empresa, e se tal for feito, as

empresas tornar-se-ão mais competitivas uma vez que a sua despesa no que se refere ao consumo de energia elétrica poderá reduzida.

Neste sentido, entende-se que a implementação generalizada da ferramenta poderá fornecer um contributo decisivo para a identificação e promoção das intervenções que se afigurarem mais adequadas para a melhoria da eficiência energética das empresas do sector agroindustrial. Para além dos benefícios que uma empresa adquire de um ponto de vista individual através do melhoramento dos pontos fracos apontados pelo Cool-OP, ao implementar este software a todas as empresas do sector, assumindo que serão alvo de uma intervenção adequada permitindo corrigir os parâmetros que se encontrem desajustados, prevê-se que o consumo de energia nacional reduza, passando assim a contribuir também para a economia do país. É óbvio que por detrás deste consumo de energia elétrica se encontram problemas de outra dimensão como as emissões de dióxido de carbono e a gestão de recursos naturais, que são inerentes à produção de eletricidade e que também devem ser tidos em consideração.

### **1.4. Visão geral e organização da dissertação**

Como já explanado, o primeiro capítulo da presente dissertação é introdutório fazendo um devido enquadramento do trabalho a ser desenvolvido, salientando a sua importância com base em valores que alertam à preocupação do leitor perante o tema apresentado. Neste capítulo expõe-se o problema, fazendo referência aos pontos mais importantes para, seguidamente, apresentar os objetivos da dissertação bem como a contribuição esperada.

No segundo capítulo, intitulado como “Estado da arte”, são apresentados alguns trabalhos relacionados com o desenvolvimento de ferramentas computacionais que envolvem a temática do frio industrial, a conservação de produtos e a eficiência energética.

Posteriormente, no terceiro capítulo da dissertação, aborda-se a secção do desenvolvimento da ferramenta computacional, o Cool-OP, explicando o software utilizado para a programação (Matlab e GUIDE) bem como as suas funcionalidades. É ainda fundamentado e justificado o layout do programa, apresentando a sua configuração e a sua estrutura bem como uma árvore de menus. São também apresentados alguns exemplos de código.

No quarto capítulo é realizada a validação da ferramenta computacional, apresentando-se os dados das empresas selecionadas de diferentes fileiras do sector da carne, mais concretamente de matadouros, de indústrias de presuntos e de salsicharias, para depois se exporem os

resultados obtidos através da simulação efetuada no Cool-OP. Este capítulo integra uma discussão e análise dos resultados, pois os resultados das previsões computacionais são comparados com as visitas efetuadas às instalações das empresas alvo de estudo.

No último capítulo, são apresentadas as conclusões gerais do trabalho de dissertação, tendo em consideração os resultados das previsões numéricas fornecidas pela ferramenta, o seu cruzamento com os resultados experimentais das visitas de campo às empresas selecionadas, assim como as sugestões de melhoria de eficiência energética apontadas pela ferramenta.



## 2. Estado da arte

### 2.1. Revisão bibliográfica

O FRISBEE (*Food Refrigeration Innovations for Safety consumers Benefit, Environmental impact and Energy optimization along the cold chains in Europe*) é um projeto Europeu com o objetivo de desenvolver ferramentas, conceitos e soluções de modo a melhorar as tecnologias de refrigeração na cadeia de frio Europeia. Como é normal num estudo deste género, foram desenvolvidos modelos matemáticos que combinam a qualidade e segurança dos alimentos, com os aspetos económicos, energéticos e ambientais com o intuito de prever e gerir a qualidade dos produtos alimentares na respetiva cadeia de frio (Gogou *et al.* 2013).

Este projeto é inovador não só por permitir simular determinados comportamentos da cadeia de frio a nível europeu, mas principalmente porque possui três vertentes muito importantes na refrigeração: a qualidade do produto refrigerado, o consumo de energia para refrigerar o mesmo e o seu impacto ambiental. Note-se que este último é contabilizado quer através das emissões de CO<sub>2</sub> para a produção da eletricidade, quer pela escolha dos gases utilizados na refrigeração. O FRISBEE abrange cinco categorias de alimentos, nomeadamente a fruta, a carne, o peixe, os lacticínios e os vegetais (Gogou *et al.* 2013) e é com base na seleção de determinada categoria que os resultados são apresentados. Os objetivos deste projeto para a gestão das cadeias de frio consistem na recolha de dados sobre as diferentes fases do processo da cadeia recorrendo à plataforma online dando depois entrada na base de dados, a *Cold Chain Database*.

O referido projeto foi estruturado em oito fases de trabalho: (1) planeamento adequado das tarefas a desenvolver e dos objetivos a cumprir do ponto de vista científico, tecnológico, administrativo e financeiro; (2) criação de uma base de dados da cadeia de frio Europeia identificando as maiores necessidades deste sector, e investigando a expectativa dos consumidores face aos alimentos sujeitos a este processo; (3) desenvolvimento de ferramentas (desde sensores a equipamentos, métodos, software e protocolos) que permitissem avaliar e melhorar a tecnologia de refrigeração existente e emergente no que toca à qualidade dos produtos refrigerados, à eficiência energética e à sustentabilidade; (4) tecnologias de refrigeração existentes de modo a melhorar a eficiência dos presentes processos dando ênfase a um modelo de controlo preditivo; (5) estudo de algumas das tecnologias de refrigeração emergentes e promissoras; (6) desenvolvimento à escala industrial das tecnologias de refrigeração estudadas anteriormente; (7) demonstração dos resultados tomando decisões

acerca do desenvolvimento de algumas aplicações em particular; e por fim, (8) publicação dos resultados mais relevantes e inovadores do projeto de modo consciencializar o maior número de pessoas possível, desde os consumidores, à indústria do sector e aos políticos responsáveis por tomar decisões no que toca à temática da refrigeração.

Foi nesta última fase do FRISBEE que foi desenvolvida uma plataforma virtual com todas as ferramentas, modelos e software, permitindo aos utilizadores comparar e avaliar as suas tecnologias de refrigeração em relação às disponíveis na base de dados do projeto, tendo assim possibilidade de identificar pontos que permitam reduzir o consumo de energia mantendo a qualidade e a segurança alimentar. Para além disso, esta plataforma foi desenvolvida também com o intuito de recolher dados de várias empresas espalhadas pela Europa criando assim uma base de dados sólida com cerca de 5500 registos (Gogou *et al.*, 2013).

O modelo de controlo preditivo de refrigeração CCP (*Cold Chain Predictor*) tem em consideração a otimização do consumo de energia, o custo de operação e a qualidade dos produtos. O princípio do modelo desenvolvido baseia-se na análise de eventos ou tarefas futuras, como alterações climáticas ou receção de mercadorias para armazenar, de modo a que seja possível fazer uma preparação adequada para este tipo de acontecimentos. No caso de se saber que se vai receber matéria-prima para conservar numa câmara a uma determinada temperatura, torna-se possível estimar a carga térmica associada, adquirindo assim noção da energia que se vai precisar nas próximas 24 horas. De outro modo, ao ter conhecimento acerca das mudanças climáticas (aumento ou redução da temperatura do ar ambiente) torna-se possível otimizar a eficiência dos condensadores ligando-os durante as horas em que as temperaturas exteriores são mais baixas para que o frio produzido se possa armazenar para usar quando necessário. Portanto, o CCP permite realizar simulações sobre condições específicas definidas pelo utilizador, construindo gráficos representativos da variação da temperatura ao longo do tempo e estimando o restante tempo de validade do produto. Estas simulações são realizadas com base no método de Monte Carlo (Gogou *et al.*, 2013) gerando distribuições de tempo/temperatura para a fase da cadeia de frio e o produto selecionado. Os resultados obtidos representam cenários realistas para o comportamento dos produtos alimentares e com base nestes torna-se possível tomar ações corretivas com o objetivo de otimizar a eficiência da cadeia de frio garantindo a qualidade dos produtos e aumentando a sua validade.

Por fim, foi desenvolvido o QEEAT (*Quality Energy Environment Assessment Tool*), uma ferramenta que permite avaliar as cadeias de frio no que toca à qualidade dos produtos, ao consumo de energia e ao impacto ambiental da tecnologia da indústria de frio envolvida. Este programa permite prever a temperatura dos produtos sobre determinadas circunstâncias

calculando a validade/qualidade de determinado alimento em diferentes estágios da cadeia de frio, mas para além disso calcula ainda o TEWI (*Total Equivalent Warming Impact*), ou seja, o impacto ambiental no que toca ao aquecimento global. O valor deste parâmetro é calculado com base na soma de duas parcelas, nomeadamente na quantidade de refrigerante que é perdido durante o tempo de vida do equipamento incluindo perdas irrecuperáveis aquando da sua eliminação definitiva e ainda o impacto das emissões de CO<sub>2</sub> derivadas ao uso de combustíveis fósseis utilizados para produzir energia consumida pelo equipamento (AIRAH, 2012). Assim, este software permite ao utilizador selecionar o tipo de produtos alimentares na simulação, podendo alterar as suas propriedades bem como a configuração dos blocos da cadeia de frio até um máximo de seis cadeias em paralelo. Note-se que é possível utilizarem-se modelos já testados incluídos no programa, não sendo necessário fazer a construção da rede de uma cadeia de frio. Na figura 1 é possível observar o aspeto da janela do QEEAT.

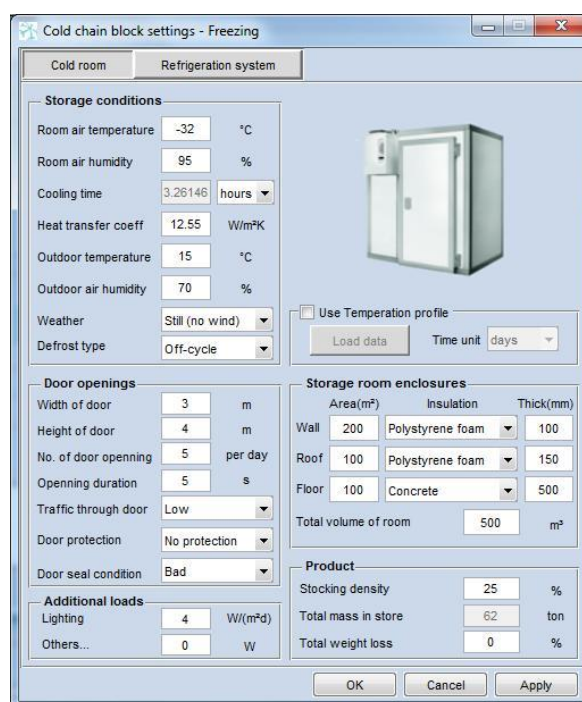


Figura 1 - Janela exemplificativa do programa QEEAT, desenvolvido no âmbito do projeto FRISBEE (<http://frisbee-project.eu>).

A título de exemplo observe-se a figura 2 que representa a simulação da evolução de um indicador de qualidade relacionado com a deterioração de presunto cru, fumado e salgado. É possível identificar duas cadeias de frio distintas, onde na primeira a temperatura de referência para o armazenamento do presunto é de 2°C e na segunda é de 5°C.

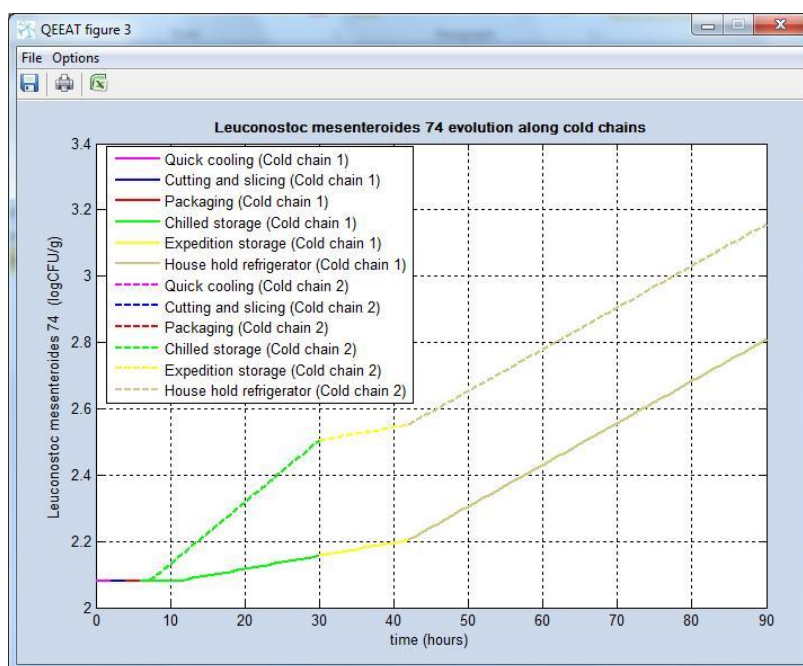


Figura 2 -Evolução de um indicador de qualidade para presuntos a diferentes temperaturas (<http://frisbee-project.eu>).

A nível europeu, estima-se que existam cerca de 1,5 milhões de empresas que trabalhem com câmaras de refrigeração, desde as mais pequenas (10-20 m<sup>3</sup>) até as maiores (milhares de m<sup>3</sup>). Note-se que deste universo, as pequenas empresas, com câmaras inferiores a 400 m<sup>3</sup>, representam 67%.

Neste sector, a energia consumida para a refrigeração das câmaras representa cerca de 60% a 70% do consumo total da empresa. Estudos realizados anteriormente (Evans & Gigiél, 2007, 2010) revelam que é possível atingir poupanças energéticas na ordem dos 30%-40% através da otimização/reparação do equipamento presente nas empresas e através da aquisição de equipamento com melhor eficiência energética. No entanto, os proprietários nem sempre se mostram aptos a investir sem ter noção do retorno no que toca à poupança energética. São poucos os estudos publicados que comparam o desempenho energético de diferentes empresas, no entanto, em 2006 foi levado a cabo um projeto (Werner *et al.*, 2006) com esse intuito, comparando 34 empresas diferentes na Nova Zelândia. O estudo revelou que existe uma grande variação no consumo de energia entre as empresas analisadas, sendo alcançadas melhorias de eficiência energética entre 15% a 26% através da aplicação de boas práticas tecnológicas.

Uma vez que a configuração das empresas é diferente, quer a nível estrutural, quer a nível do equipamento instalado, são diversas as possíveis causas que conduzem a um gasto desnecessário de energia elétrica. O estudo realizado a nível europeu por Evans *et al.* (2013)

destina-se à análise do desempenho e das possíveis falhas ou ineficiências de diversas empresas situadas por vários países da Europa. O projeto ICE-E (*Improving Cold storage Equipment in Europe*), determinou que as falhas/ineficiências mais frequentes são as seguintes (por ordem decrescente): projeto do sistema; controlo dos ventiladores; controlo dos compressores; redução da pressão de condensação; infiltrações/proteção da porta; e iluminação, entre outras. Na Figura 3 são apresentadas as falhas/ineficiências identificadas pelo projeto ICE-E em empresas utilizadoras de frio.

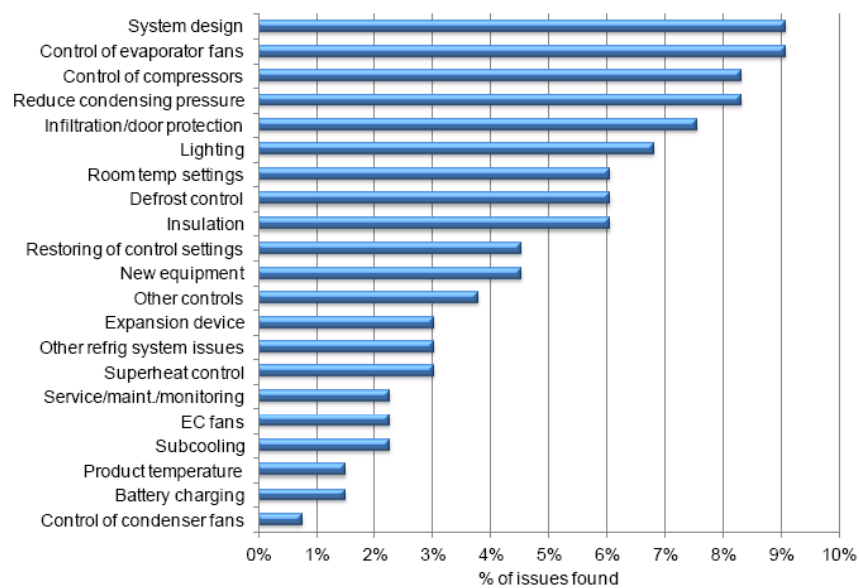


Figura 3 - Identificação das falhas/ineficiências com maior expressão detetadas nas auditorias do ICE-E (Foster *et al.*, 2013).

Repare-se que quantos mais falhas/ineficiências forem identificadas numa empresa, maior é a poupança de energia esperada. No caso em particular deste estudo, a percentagem de poupança de energia anual variou entre 8% e 72%, considerando desde pequenos ajustes até substituição completa dos equipamentos.

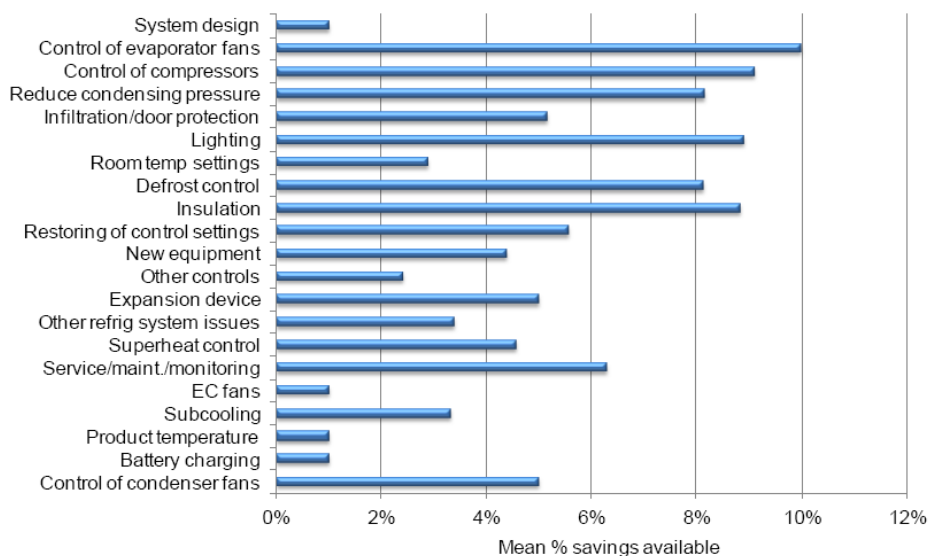


Figura 4 - Potencial de poupança de energia para as falhas/ineficiências identificadas (Foster *et al.*, 2013).

É importante salientar que quando se fala em câmaras de refrigeração, estas podem funcionar com o objetivo de congelar produtos ou apenas de os refrigerar, sendo atingidas poupanças maiores para refrigeração sem congelamento (Foster *et al.*, 2013). Na figura 4 é apresentada a média percentual da poupança espectável face às várias falhas ou eficiências detetadas. Os maiores valores de poupança que se podem atingir rondam entre os 6% e 10% e dizem respeito ao controlo das ventoinhas do evaporador, ao controlo do compressor, à iluminação, à redução da pressão de condensação, ao controlo de descongelamento, ao isolamento e à manutenção inadequada.

Dado que todas as empresas têm em conta os seus gastos, quer de despesas fixas quer de possíveis imprevistos, o estudo realizado Evans *et al.* (2013) identifica e quantifica a poupança de energia alcançável através da identificação e correção das falhas/ineficiências tendo em conta o nível de experiência e de qualificação de diferentes indivíduos, sendo de 24% para um utilizador comum e de 43% para um engenheiro especializado na área de refrigeração. Referem-se ainda os valores de poupança energética passíveis de se alcançar para a refrigeração de diferentes produtos, como se pode observar pelo gráfico exposto na Figura 5.

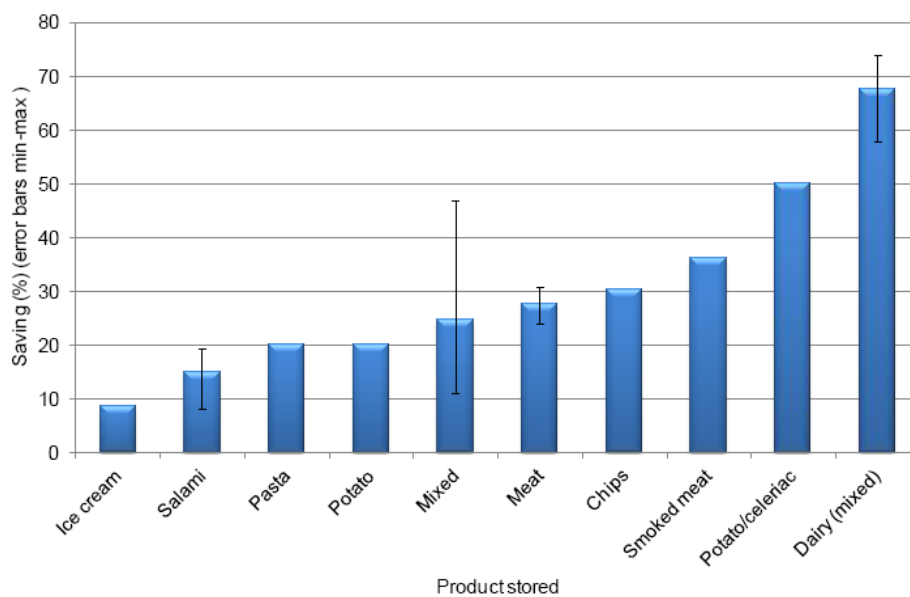


Figura 5 - Poupança previsível face ao tipo de produto armazenado. (Foster, 2013)

Neste mesmo contexto, Foster *et al.* (2013) descrevem o ICE-E destinado à criação de ferramentas com os mesmos objetivos num outro projeto. Este visa a redução do consumo de energia e da emissão dos gases de estufa da indústria do frio através da aplicação de equipamentos mais eficientes e tendo sempre em conta as normas energéticas e ambientais da EU. A base de dados deste projeto engloba não só pequenas e médias empresas mas também grandes multinacionais, sendo os dados recolhidos através de uma plataforma online. No entanto, é ainda possível solicitar uma auditoria no local a uma determinada empresa se assim se desejar, uma vez que está disponível uma equipa de 25 engenheiros com esse propósito (Foster *et al.*, 2013). Ao nível de complexidade, o FRISBEE é um projeto mais elaborado englobando cálculos e modelos matemáticos com maior rigor, uma base de dados extensa, e avalia não só a componente de eficiência energética e de impacto ambiental (poluição e emissões de CO<sub>2</sub>), tal como o ICE-E, mas também analisa a qualidade dos alimentos refrigerados com os respetivos indicadores de segurança e qualidade.

Uma das ferramentas desenvolvidas no âmbito projeto ICE-E encontra-se disponível no respetivo *website* em formato Excel (<http://www.khlim-inet.be/drupalice/models#model1>). Para fazer a simulação de uma determinada câmara de frio, é necessário definir as condições fronteira da envolvente (paredes, chão, teto e porta da câmara de frio) indicando a área das superfícies, a temperatura no exterior de cada uma delas e se estão ou não expostas ao sol. Para o chão, é necessário definir-se a potência média da capacidade de aquecimento. No caso concreto da porta, para além de se definirem as dimensões e a temperatura exterior, existem outros fatores a considerar como o número de aberturas de porta por dia, a duração de cada abertura e a proteção da porta (cortina normal, cortina de ar ou sem proteção). Seguidamente define-se o tipo de isolamento das câmaras de frio e as cargas térmicas, nomeadamente o tipo

de iluminação no interior e o seu tempo de operação, o pessoal que entra e o tempo que permanece na câmara, caracterizam-se também os produtos a refrigerar e o equipamento responsável por este processo, os evaporadores e os condensadores. No que toca ao processo de refrigeração em si, é necessário indicar a temperatura no interior da câmara, o tipo de refrigerante que é usado, a temperatura do meio onde se encontra o condensador e o seu rendimento isentrópico. Na figura 6 é possível observar a janela onde estes valores são introduzidos.

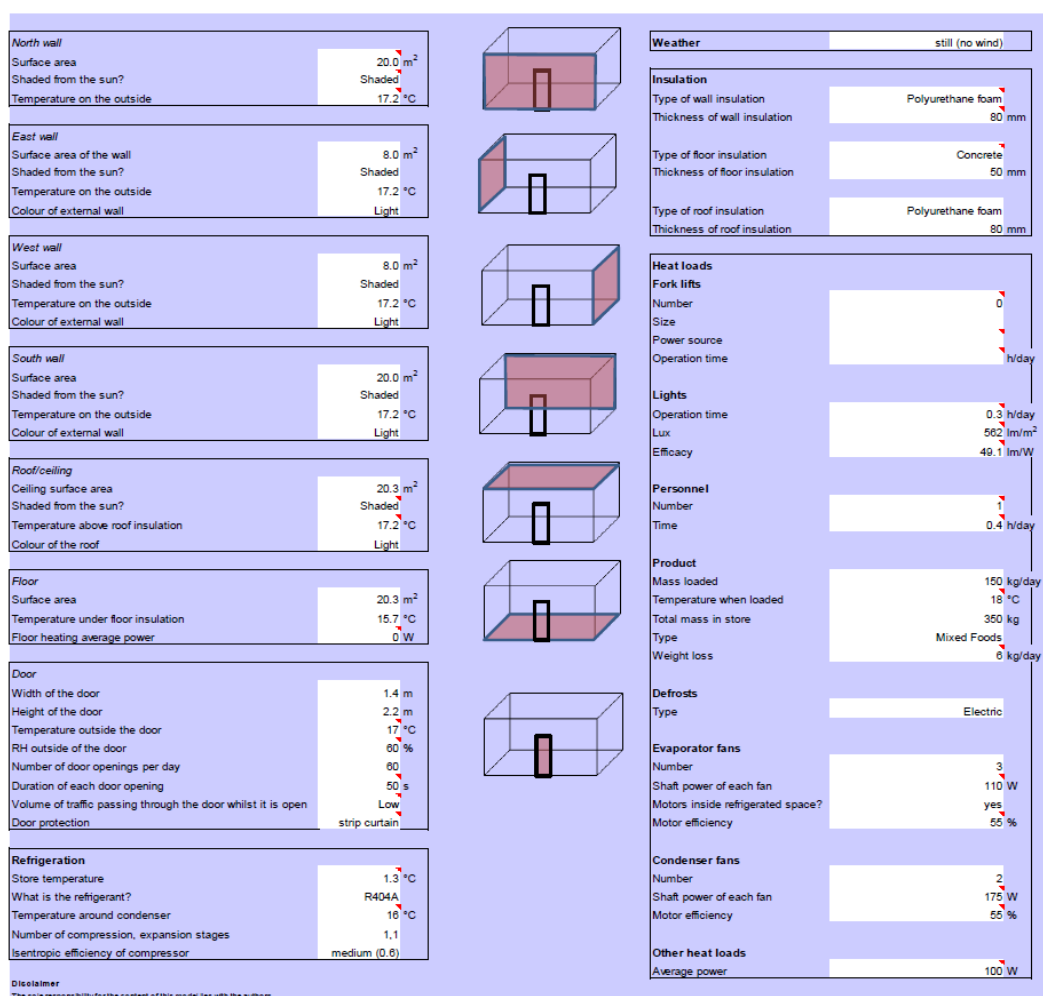


Figura 6 - Janela exemplificativa de introdução de dados no Simple Model v2.5 ICE-E (Foster *et al.*, 2013).

Após a introdução de todos os parâmetros é possível fazer a simulação dos resultados, no entanto existem dois tipos de output diferentes, um composto por um modelo simples e o outro por um modelo complexo. No modelo simples, os resultados que se obtêm permitem ao utilizador adquirir conhecimento acerca do consumo de eletricidade atual e o que gasta cada parcela, para depois comparar com a poupança energética expectável que é possível atingir. A figura 7 ilustra um exemplo gráfico dos resultados que se obtêm através do modelo simples.

Note-se que no final do quadro de resultados é calculado um valor global da poupança expectável, sendo no caso do exemplo apresentado de 29,5%.



Figura 7 - Exemplo de resultados do modelo simples (Foster *et al.*, 2013).

No modelo complexo, os resultados que se obtêm são exatamente os mesmos mudando apenas a sua representação. Os gráficos permitem prever o consumo de energia e as cargas térmicas diárias de cada mês, como se pode observar pela figura 8. Como seria de prever, durante os meses mais quentes, o consumo de energia aumenta, uma vez que a diferença térmica entre o exterior e o interior da câmara é maior. Num outro gráfico, representado na figura 8, é apresentado o consumo da potência eléctrica média por mês ao longo das 24 horas do dia.

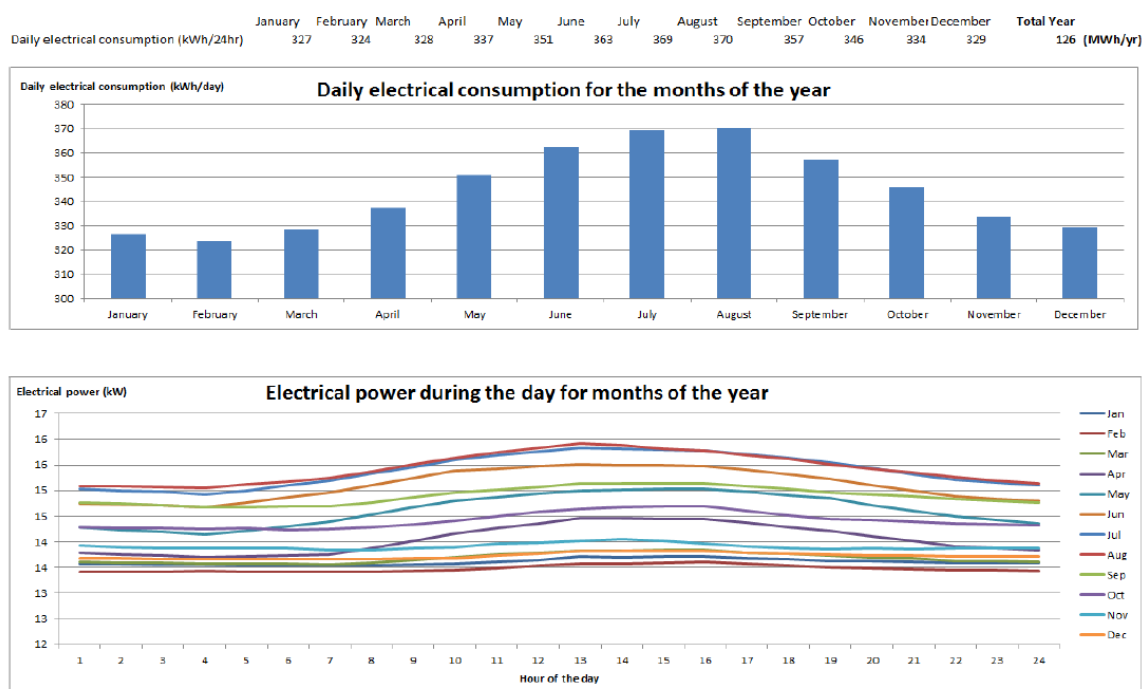


Figura 8 - Resultados do consumo elétrico e da potência do modelo complexo (Foster *et al.*, 2013).

Adicionalmente, Eden *et al.* (2010) descrevem outro projeto semelhante, o Chill-ON, que foi desenvolvido na mesma área e com preocupações semelhantes, no entanto, é de salientar que este projeto foca-se sobretudo na qualidade dos produtos refrigerados, principalmente peixe e aves, fazendo um estudo profundo ao nível da microbiologia.

De acordo com estudos realizados no âmbito do projeto, pode dizer-se que o peixe é o terceiro produto alimentar mais consumido na Europa e por ser altamente sensível e propício a intoxicações alimentares, foi selecionada a sua cadeia, desde que é pescado até ao tratamento e refrigeração, como objeto de estudo. O Chill-ON foi dividido em cinco etapas diferentes (CHILL-ON Final Report, 2006) para garantir que os objetivos propostos foram atingidos (ver Figura 9), sendo elas: (1) o desenvolvimento de um modelo que permita quantificar o risco microbiano através da avaliação da cadeia de abastecimento alimentar destes produtos; (2) desenvolver e validar tecnologias economicamente eficazes na deteção qualitativa e quantitativa de micro organismos a baixas temperaturas; (3) a pesquisa e o desenvolvimento de aplicações que permitam uma refrigeração mais eficiente e económica a aplicar no sector da distribuição e no transporte de produtos refrigerados; (4) a investigação e a implementação de uma nova geração de rotulagem denominada por “eChillOn - Smart Labels”, que consiste na combinação das tecnologias TTI (*Time-Temperature-Indicator*) com RFID (*Radio Frequency Identification*); e por fim, na última etapa, (5) a criação de um modelo complexo que permita

o rastreio dos produtos refrigerados. Na figura 9 é possível observar as três principais áreas abordadas por este projeto e as respetivas ferramentas ou estudos desenvolvidos.

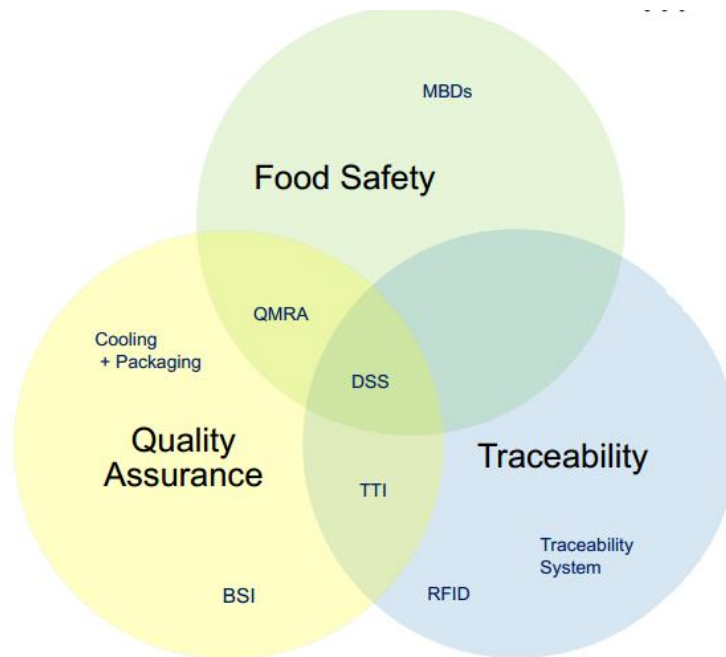


Figura 9 - Temáticas abordadas e ferramentas desenvolvidas (CHILL-ON Final Report, 2006).

Para tal, foi desenvolvida uma ferramenta computacional, o QMRA (*Quantitative Microbial Risk Assessment*) (Colmer *et al.* 2009), que combinada com o princípio do *Hazard Analysis and Critical Control Points* (HACCP) permite melhorar a qualidade e a segurança dos alimentos numa abordagem preventiva. Mais concretamente, estas ferramentas permitem estimar o risco do crescimento de patogénicos com base nas temperaturas e nas características químicas e nutricionais dos alimentos. Como resultado desenvolveu-se o SLP (*Shelf Life Predictor*) (Eden & Colmer, 2010), com capacidade para prever o verdadeiro e restante tempo de validade dos produtos refrigerados. Para além da qualidade e da segurança dos alimentos outra vertente deste projeto é a rastreabilidade (*Traceability System*) dos mesmos de modo a saber os locais onde se encontram em tempo real. Deste modo o consumidor pode usufruir de uma informação fidedigna quanto à origem dos alimentos e para que o seu processo de fabrico desde a recolha de matéria-prima até à ultimateção possa ser acompanhado ajudando assim a assegurar a qualidade e a segurança. Para além disso é ainda abrangido pelo projeto Chill-ON, o desenvolvimento de novas tecnologias na área da refrigeração bem como a introdução de “*smart labels*”. Segundo Colmer, (2009, 2010) estas etiquetas utilizam uma tecnologia TTI (*Time Temperature Indicators or Integrators*) e refletem o tempo e a temperatura a que determinado produto esteve sujeito. O seu princípio é baseado em fatores enzimáticos, microbiológicos e químicos dependentes da temperatura, variando assim a coloração das mesmas conforme as condições a que forem sujeitas. Associando a esta tecnologia ao RFID (*Radio Frequency Identification*), tornou-se possível enviar um sinal ótico e eletrónico através

de uma ligação wireless diretamente para um software que calcula a restante validade do produto. O BSI (*Bubble Slurry Ice*) consiste na introdução de gelo líquido cujos cristais assumem uma dimensão inferior a 5 µm garantindo uma refrigeração quase instantânea durante o embalamento dos produtos. No que toca à segurança alimentar, o MBDs (*Molecular Biological Diagnostics*) tem o papel de analisar os alimentos de modo a detetar se estes possuem bactérias ou micro organismos prejudiciais à saúde humana fora dos valores padrão aconselháveis. Por fim, é o DSS (*Decision Support System*) que vai auxiliar na identificação dos pontos mais críticos fazendo uma previsão de possíveis riscos microbiológicos presentes na cadeia de frio. Na Figura 10 é possível perceber o encadeamento do processo definido por esta tecnologia implementada pelo projeto Chill-ON.

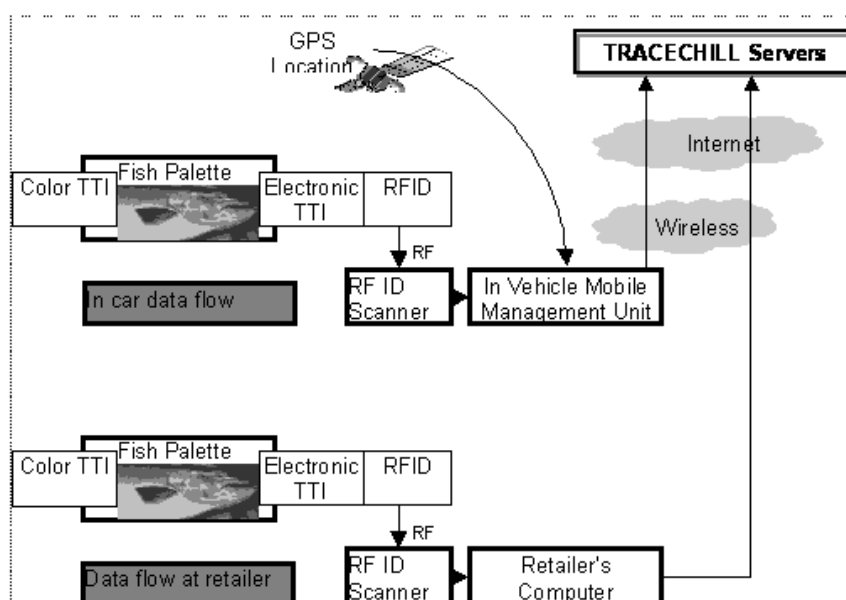


Figura 10 - Processo de comunicação do sistema TRACECHILL desenvolvido pelo Chill-On (CHILL-ON Final Report, 2006).

Do ponto de vista estrutural do processo, o indicador eletrónico TTI faz uma leitura da cor da etiqueta comunicando o devido sinal através de um RFID. Este sinal é recolhido com o propósito de, através de um sistema *wireless*, ser armazenado nos servidores do projeto para que a informação acerca do seu estado e da sua localização possam ser consultadas em tempo real. Portanto, através da implementação das tecnologias desenvolvidas pelo Chill-ON, torna-se possível adquirir informações em tempo real acerca da qualidade e do tempo de vida útil de determinado produto, quer se encontre armazenado, quer em distribuição numa carrinha. Segundo Colmer *et al.* (2009), o SCM (*Supply Chain Management*) consiste na gestão da cadeia de abastecimento de alimentos, e coordena a colaboração de todos os intervenientes na cadeia, desde a recolha, a distribuição, o tratamento e o armazenamento das matérias-primas,

até chegarem ao consumidor final, de modo a que as necessidades dos clientes sejam satisfeitas o mais eficientemente possível. Este software, o SCM, desempenha um papel fundamental, uma vez que articula a comunicação entre todas as fases do processo, com o objetivo ajudar os gestores das empresas a terem uma melhor noção, não só do ponto de vista da qualidade dos produtos que estão a comercializar e da validade dos mesmos, mas também permitirá fazer uma análise do ponto de vista do escoamento dos produtos, da gestão de stock e de produção.

Butler (2007) descreve os resultados de um outro projeto europeu, o NIGHT WIND, que se pode relacionar com estas temáticas. O seu principal objetivo consiste na redução do consumo de energia da indústria do frio. O conceito deste projeto é muito simples, passando por fazer das câmaras de frio existentes, “baterias” gigantes que irão acumular frio, ou seja, energia térmica (Saint trofee, Night Wind Project). É proposta a criação de um software que faça a gestão da temperatura dos armazéns de frio tendo em conta o preço da eletricidade e o perfil de consumo diário da empresa. Por outras palavras, pode-se indicar que os compressores irão trabalhar durante os períodos em que a eletricidade é mais barata por ter uma procura menor, de modo a acumular energia na forma de frio para utilizar racionalmente nas horas de pico. No entanto, este procedimento é somente aplicável caso as instalações tenham capacidade para armazenar o frio necessário durante o dia.

Este projeto considera-se extremamente atrativo para indústrias de frio de grandes dimensões uma vez que ao fazerem um maior uso de eletricidade no período em que esta é mais barata, vão diminuir o consumo da mesma durante o dia, quando é mais cara, uma vez que foi armazenada energia na forma de frio durante a noite. A grande vantagem é a possibilidade de implementação deste conceito sem grandes custos acrescidos uma vez que as infra estruturas existentes nas empresas representam a base do projeto, sendo o software de controlo do NWCS (*Night Wind Control System*) a única despesa.

Note-se que a ideia de utilizar as câmaras frigoríficas como “baterias” é interessante mas não pode ser esquecida a sua função principal que é a de armazenar e conservar produtos. Portanto, é fundamental certificar que o funcionamento das câmaras neste contexto não interfere com a qualidade dos produtos refrigerados. Por este motivo foram realizados testes paralelos com 10 tipos de alimentos diferentes durante oito meses e regimes de temperatura constante e variável (ver Figura 11). Os produtos refrigerados consistiram em amostras de carne, peixe, frutas, verduras e gelados e foram embalados em sacos e caixas próprias para o efeito a uma temperatura constante de  $-19^{\circ}\text{C}$  ou então com temperaturas em variações cíclicas de  $-16/-18^{\circ}\text{C}$  até  $-26/-28^{\circ}\text{C}$ . Seguidamente as amostras foram descongeladas em períodos temporais diferentes, nomeadamente 2, 4, 6 e 8 meses, para serem avaliados vários aspetos como a textura, a cor, o sabor e a consistência. Através dos resultados desta análise, notou-se

que os alimentos refrigerados a uma temperatura constante apresentam uma qualidade ligeiramente superior face aos que são refrigerados com flutuações significativas de temperatura. Porém, essa pequena melhoria de qualidade não é muito relevante uma vez que os valores dos parâmetros que foram analisados encontram-se dentro do intervalo válido.



Figura 11 - Sistema NECS completo (sensores, unidade de entradas e saídas e software) (Night Wind implementation plan, 2006).

O software desenvolvido pelo Night Wind, NWCS (ver Figura 12), tem por objetivo fazer a gestão de uma câmara frigorífica como se esta se tratasse de uma “bateria”. Para tal necessita de obter um *input* de informação no que toca à previsão da energia eólica produzida nos três dias seguintes e do custo da eletricidade nas próximas 24 horas. Com base nesta informação, o NWCS calcula a capacidade ideal para obter os custos mais reduzidos e a melhor grelha de capacidade de controlo, sempre sem pôr em risco a qualidade dos produtos no interior da câmara. Para além disso, prevê ainda a temperatura dentro da câmara e dos respetivos produtos que são depois comparadas com as temperaturas reais ajustando assim o controlo dos compressores.

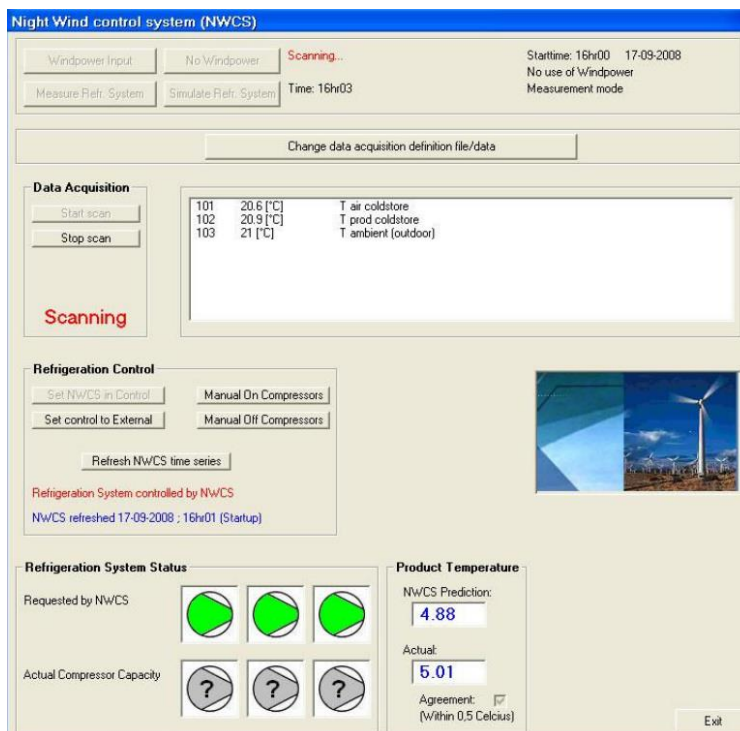


Figura 12 - Interface de controlo do NWCS (Night Wind implementation plan, 2006).

É de salientar que apesar de as palavras-chave dos projetos apresentados serem análogas, não foi possível encontrar nenhuma referência que fizesse a simulação do índice do desempenho energético de determinada empresa classificando-a face às restantes empresas que laboram no mesmo sector e na mesma zona geográfica. Pode observar-se que nos projetos apresentados, nomeadamente o FRISBEE, o ICE-E, o Chill-On e o Night Wind, são focados outros pormenores que não a caracterização do perfil energético de empresas, porém foram desenvolvidas ferramentas computacionais no âmbito dos diferentes projetos cuja preocupação incide sobre a eficiência energética, a qualidade dos alimentos e a pegada ambiental.



## 3. Ferramenta computacional de previsão e análise do desempenho energético: Cool-OP

No presente capítulo são apresentadas as ferramentas utilizadas para a programação do Cool-OP bem como a estrutura e as considerações tidas em conta durante o seu desenvolvimento.

### 3.1. Introdução

Após uma recolha intensiva de dados no terreno sobre as características de uma determinada amostra de empresas, foram desenvolvidas correlações analíticas baseadas no trabalho de Nunes *et al.* [15] de modo a representar o comportamento médio, numa perspetiva energética, na indústria da carne existente na região interior de Portugal.

Considerando as correlações representativas das diferentes fileiras, desenvolveu-se uma ferramenta computacional que permite posicionar o comportamento energético de uma empresa em particular face à média nacional e que, simultaneamente, permite auxiliar na tomada de decisões com o intuito de melhorar o seu desempenho. A dissertação contempla o desenvolvimento da ferramenta na fileira das carnes, isto é, para a indústria dos matadouros, das salsicharias e dos presuntos.

A ferramenta computacional foi desenvolvida no *software MATLAB*, que através do *GUIDE (Graphical User Interface Design Environment)* permite criar janelas de menus e janelas que ilustram graficamente as correlações, permitindo que qualquer utilizador visualize o estado atual da sua empresa em termos de consumo energético e possa verificar pontos sugestivos para redução do mesmo.

As correlações utilizadas foram criadas estatisticamente e incidem sobre vários parâmetros essenciais que caracterizam as empresas deste tipo de indústria, nomeadamente: a matéria-prima processada; o consumo de energia; o volume das câmaras de refrigeração; e a potência nominal dos compressores. Note-se que o parâmetro do consumo de energia contabiliza não só a energia consumida para a refrigeração ou processamento dos produtos, mas também os restantes gastos da empresa (iluminação, escritório e outros). Uma vez que as correlações que incorporam o programa foram desenvolvidas com base em valores reais recolhidos em empresas, torna-se imperativo definir o domínio de cada um dos parâmetros para que os resultados sejam válidos.

Estas restrições de utilização da ferramenta computacional encontram-se expostas na Tabela 1.

Tabela 3.1 - Domínio de aplicação de cada um dos parâmetros da ferramenta computacional.

Indústria	Matéria-prima [ton]		Volume das câmaras [m <sup>3</sup> ]		Potência nominal dos compressores [kW]	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Matadouros	1000	5000	500	3000	25	300
Salsicharias	50	1100	10	1000	10	100
Presuntos	50	2500	1500	11000	80	350

### 3.2. MATLAB e GUIDE

O MATLAB consiste num programa muito utilizado por matemáticos, engenheiros, cientistas e programadores por todo o mundo, uma vez que possui uma enorme aplicabilidade devido às diferentes caixas de ferramentas, comumente conhecidas por *toolboxes*, que podem ser utilizadas de acordo com as várias necessidades do utilizador. Para se ter uma melhor noção, pode fazer-se referência a algumas das aplicações abrangidas pelo Matlab, nomeadamente o processamento de sinal, de imagem e de vídeo, computação numérica, análise e tratamento de dados, programação e desenvolvimento de algoritmos e muitas outras.

No entanto, apesar do MATLAB permitir fazer a programação em C do Cool-OP, foi devido à *toolbox* GUIDE que se criou toda a interface gráfica. Esta *toolbox* é utilizada por programadores avançados conferindo-lhes a habilidade de criarem o aspeto gráfico do programa com mais facilidade do que utilizando os métodos antigos, que consistia na programação normal em código definindo a posição dos componentes da interface gráfica através de coordenadas. O GUIDE veio facilitar essa área da programação permitindo reduzir o tempo de desenvolvimento do interface gráfico. Na figura 13 é possível observar o ambiente de trabalho do MATLAB com o GUIDE aberto.

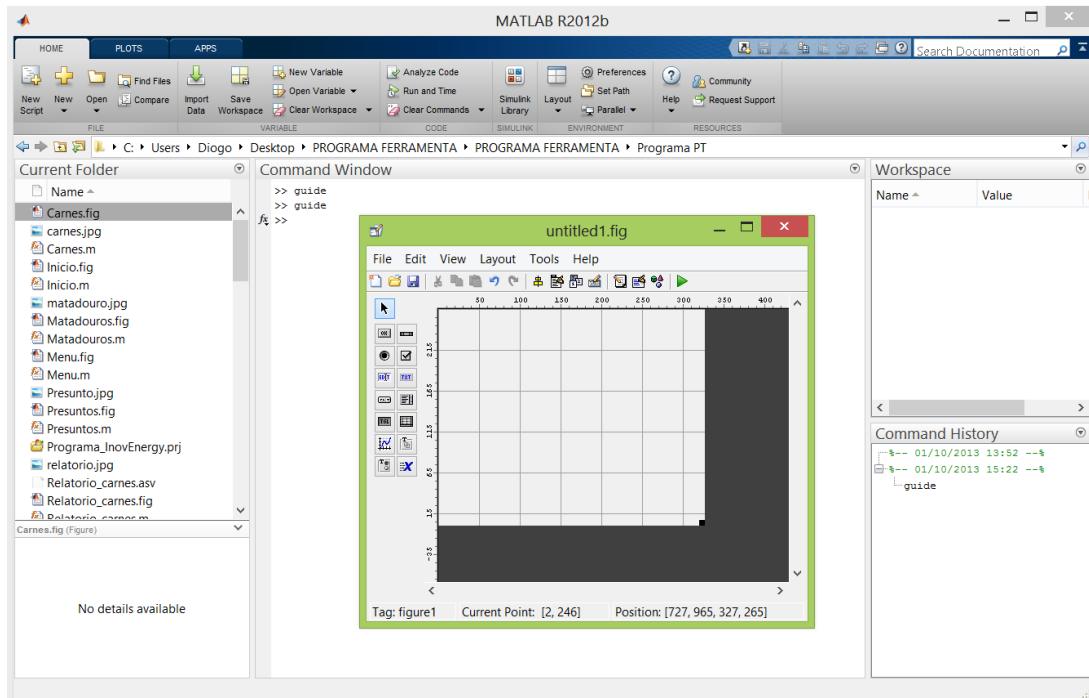


Figura 13 - Ambiente de trabalho do MATLAB com o GUIDE aberto (Matlab, 2012b).

Recorrendo a esta aplicação é possível criar janelas com o tamanho desejado, adicionando os vários ícones através dos quais o utilizador interage com o programa, desde botões, a caixas de texto estáticas ou dinâmicas e muitos outros que podem ser identificados observando a figura 14.

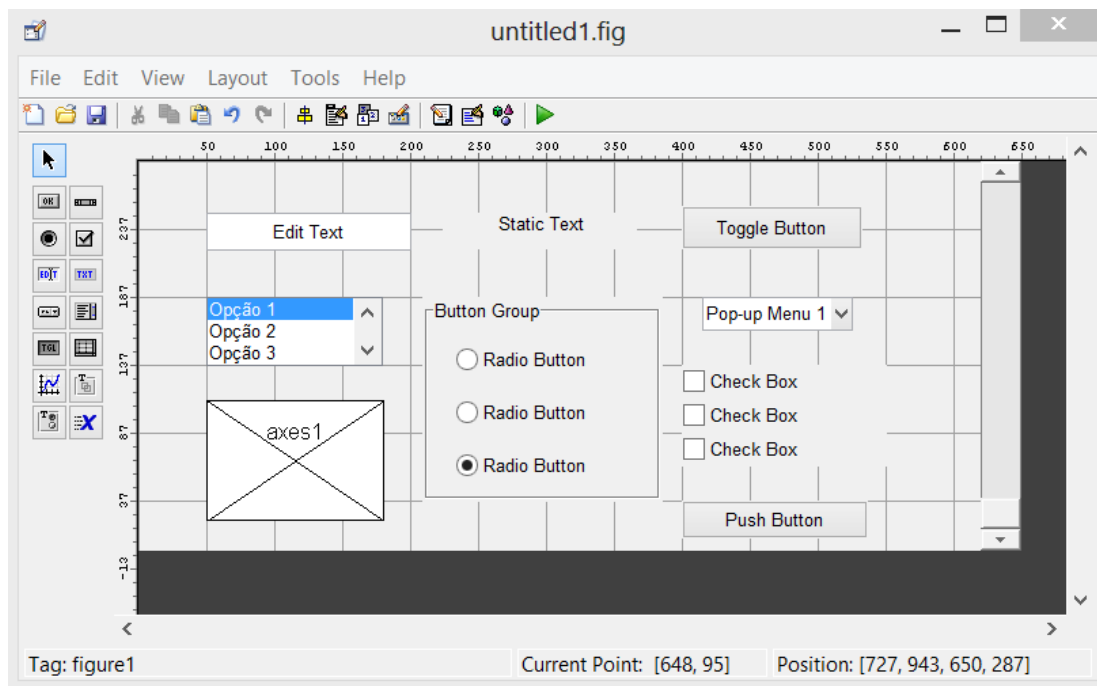


Figura 14 - Exemplo de itens criados através do GUIDE.

Antes de mais é importante referir que todos os ficheiros criados pelo GUIDE são em formato .fig e têm obrigatoriamente um ficheiro .m associado no qual é programada a função de cada componente gráfica caso o utilizador interaja com ela (Marchand & Holland, 2003). Explorando um pouco as funcionalidades desta *toolbox* pode dizer-se que o programador pode adicionar caixas de texto estáticas na janela criada não tendo qualquer tipo de interação com o utilizador do programa, uma vez que servem para transmitir informação ao mesmo, como por exemplo um título ou uma legenda. De outro modo, as caixas de texto editáveis podem ter duas funções distintas, nomeadamente a leitura de um valor ou texto que seja introduzido pelo utilizador, sendo alvo de análise integrando o programa, ou então a exibição de informação com base no código do ficheiro .m associado. Os sistemas de eixos que se inserem podem ter várias funções, sendo sempre a de servir de referência para introdução de uma imagem ou de um gráfico. Existem ainda várias opções diferentes que permitem fazer a seleção de determinada condição, conforme for o programa, podendo variar entre botões de rádio, caixas de seleção, menus *pop-up* ou em lista. Por fim existem ainda os botões normais, aos quais está normalmente associada uma hiperligação a uma janela diferente ou a uma acção, como por exemplo o fechar de um programa, e os botões de comutação podendo estar seleccionados ou não.

Repare-se que independentemente da componente que se escolha para incorporar um ficheiro .fig, tem sempre associada uma *tag*, ou seja, uma etiqueta ou nome pelo qual vai ser identificada no ficheiro de código .m. através da criação de um *callback*. É importante referir que um *callback* representa uma função que está associada a um componente específico de um ficheiro criado pelo GUIDE (.fig) e controlam o comportamento do respetivo componente tomando uma acção face ao acontecimento de determinado evento (The Mathworks Inc, 2012). Estes eventos podem ser o clique de um botão, a selecção de uma opção de um menu ou a introdução de um valor. Por exemplo, suponha-se que se tem um ficheiro .fig com um botão que inicia o desenho de um gráfico. Quando o utilizador clica no botão, o software lê a função do *callback* associado ao botão, executando de seguida a função de desenhar o gráfico tendo este sido programado pelo respetivo autor.

Convém ainda referir que todos os componentes são configuráveis através do *Property Inspector* (ver figura 15), havendo opções que variam de componente para componente. Considere-se um *push button* (botão normal) como exemplo. Como seria de esperar é possível alterar o tamanho do botão, o tipo, o tamanho e a cor da letra, o alinhamento do texto, a cor de fundo, entre outros. Mas para além disso existem alguns parâmetros da vertente de programação que também são editáveis, nomeadamente o valor que assume sendo ou não pressionado, a definição de atalhos de teclas para acionar o botão, o nome que o identifica no ficheiro de programação (.m), a criação automática ou manual do *callback*, entre outros.

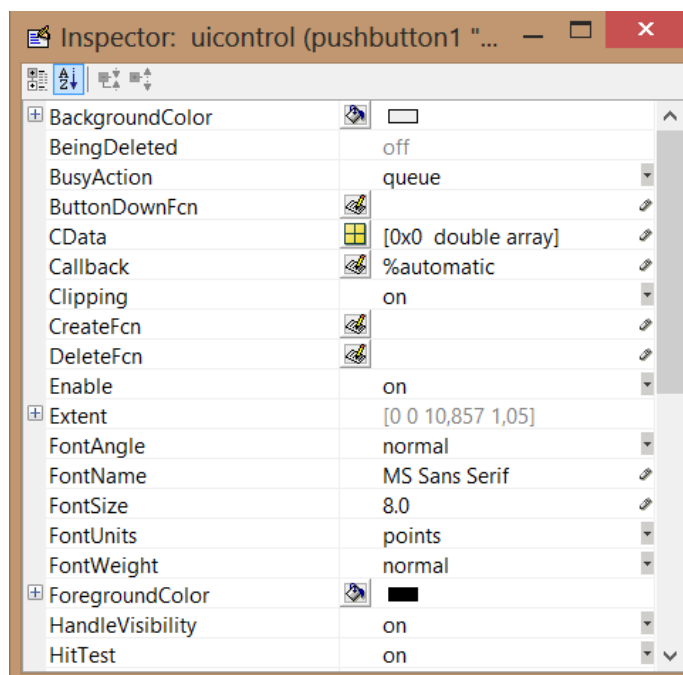


Figura 15 - Property Inspector do componente *pushbutton* do GUIDE.

### 3.3. Estrutura e Layout do programa

Como mencionado anteriormente, o programa permite avaliar o desempenho energético global de uma empresa no sector agroindustrial, sabendo que as câmaras frigoríficas são responsáveis por cerca de 60% a 70% (Evans *et al.*, 2013) do consumo total, sendo por isso alvo de grande necessidade de análise. O programa apresentado neste estudo surge na sequência do trabalho desenvolvido por Santos *et al.* (2012, 2013) e contém correlações apenas de empresas da Beira interior desenvolvidas por Nunes *et al.* (2011). No desenvolvimento da ferramenta computacional Cool-OP foram tidos em consideração vários aspetos como a facilidade de uso do mesmo por parte de utilizadores com poucas habilitações literárias conferindo-lhe uma interface homem/máquina adequada. A nível de apresentação gráfica, a ferramenta computacional desenvolvida considera-se simples e intuitiva, indo assim de encontro ao ponto mencionado anteriormente.

Na página seguinte observe-se a figura 16 onde é apresentada uma árvore de menus do programa de modo ilustrar e a facilitar a compreensão da organização mesmo. Repare que para as janelas (5) - Salsicharias - e (6) - Presuntos - não se deu continuidade à árvore uma vez que o Cool-OP assume a mesma configuração que possui a janela (4) - Matadouros -, sendo a (7) - Resultados Gerais - igual para as anteriores.

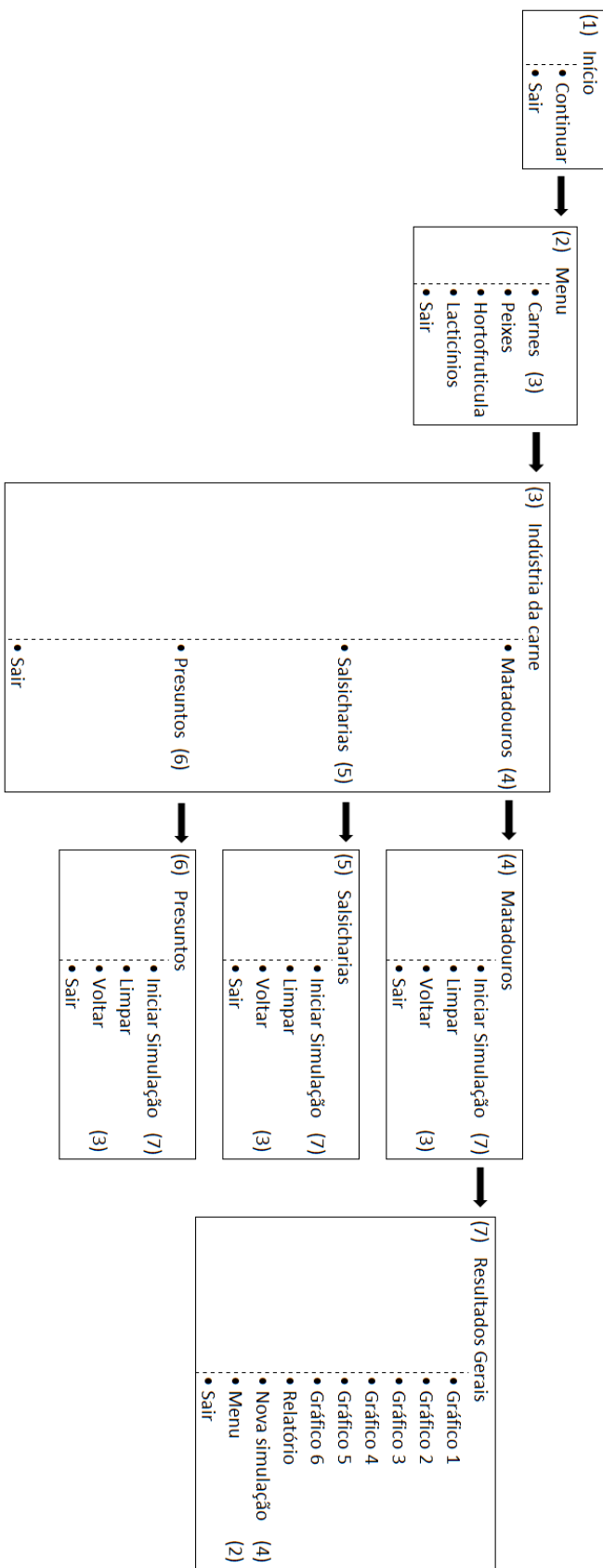


Figura 16 - Árvore de menus da ferramenta computacional Cool-OP.

A primeira janela apresentada na figura 17 ((1) - Início) contém uma breve descrição da ferramenta computacional, informando o utilizador sobre as suas funções e qual a informação necessária para que este esteja apto a fazer a simulação do desempenho energético da sua empresa. Tanto nesta janela como nas que se seguem o botão “Sair” tem sempre a função de fechar o programa, não sendo por isso realizada mais nenhuma referência ao mesmo. No entanto ao premir o botão “Continuar”, é possível aceder à janela seguinte.



Figura 17- Janela inicial da ferramenta computacional.

Na janela seguinte encontra-se o Menu (2) onde é possível seleccionar qual a indústria em que se enquadra a empresa a analisar (ver Figura 18-a)), nomeadamente a indústria da carne (3), do peixe, da fruta/vegetais e dos produtos derivados de leite. Dentro de cada uma das diferentes fileiras deste sector existem subcategorias e no caso concreto que se vai analisar, a Indústria da Carne, encontram-se os matadouros (4), as salsicharias (5) e os presuntos (6) (ver Figura 18-b)). Ao seleccionar a categoria pretendida é exibida uma janela que indica os parâmetros através dos quais a empresa vai ser avaliada para determinar o seu desempenho energético, sendo eles: quantidade de matéria-prima processada anualmente [ton], consumo de energia eléctrica anual [MWh], volume total das câmaras de refrigeração [m<sup>3</sup>] e potência nominal dos compressores [kW]. Caso o utilizador se tenha enganado a seleccionar a categoria da sua empresa é sempre possível voltar ao menu anterior ou fechar a janela utilizando os respetivos botões de navegação, nomeadamente o botão “Voltar” que abre novamente o Menu (2) e o botão “Sair” que fecha o programa. Note que qualquer uma das subcategorias da indústria de carne, quer matadouros (4), quer salsicharias (5), quer presuntos (6), abre uma janela idêntica à da Figura 18-c), solicitando os mesmos elementos.



Figura 18 - a) Janela do Menu; b) Janela do menu das Carnes; c) Janela de introdução de parâmetros para os Matadouros.

Após a introdução correta dos dados respeitando as unidades do sistema e o domínio válido de cada parâmetro exposto na tabela 3.1, prime-se o botão “Iniciar Simulação” para que o utilizador tenha acesso aos resultados gerais que sumarizam o estado energético atual da empresa, abrindo a janela dos resultados gerais (7). Na presente janela (ver Figura 19), a ferramenta processa de imediato a informação introduzida anteriormente, gerando os gráficos que relacionam os diversos parâmetros de avaliação da empresa. Todos os gráficos apresentados possuem um sombreado a verde que representa um intervalo de confiança de 95% tendo em conta os valores estatísticos utilizados para criar as correlações. Para além disso, é ainda exibido em cada gráfico o valor percentual do desvio do ponto em análise (ponto da empresa) face ao valor da média nacional portuguesa.

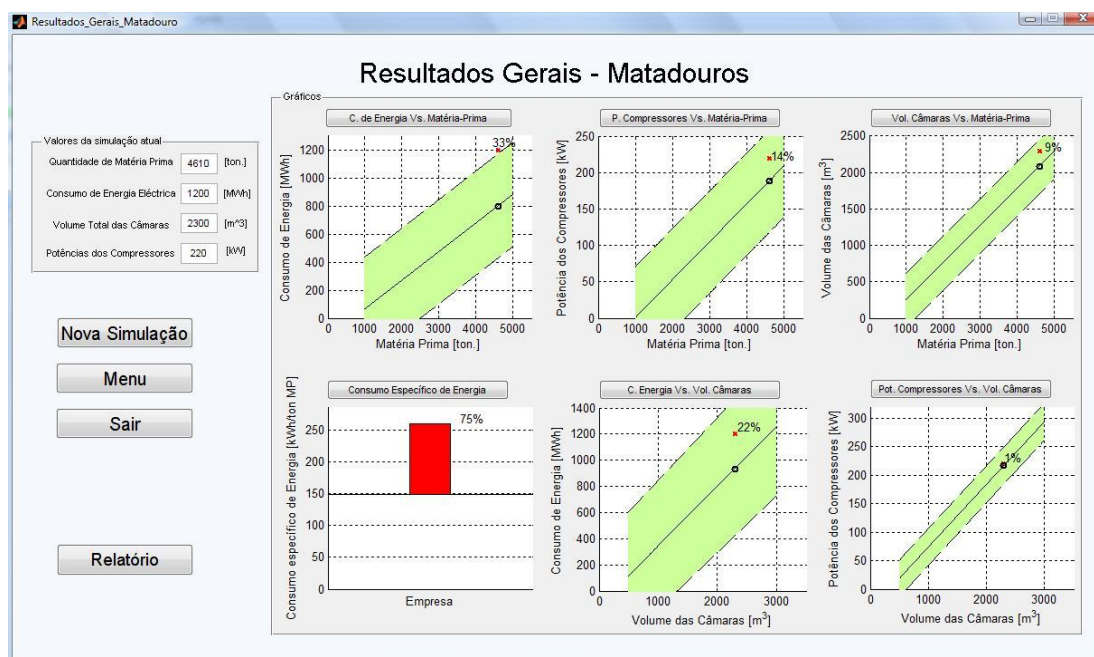


Figura 19 - Janela dos resultados gerais com um exemplo de simulação.

Caso se pretenda analisar um gráfico em particular, é possível pressionar o botão acima do mesmo abrindo uma nova janela com maior resolução para que o utilizador consiga ler os valores com mais facilidade, como se pode observar na figura 20. Para além disso, é ainda possível imprimir ou guardar o gráfico através dos respetivos botões que se encontram no canto superior esquerdo.

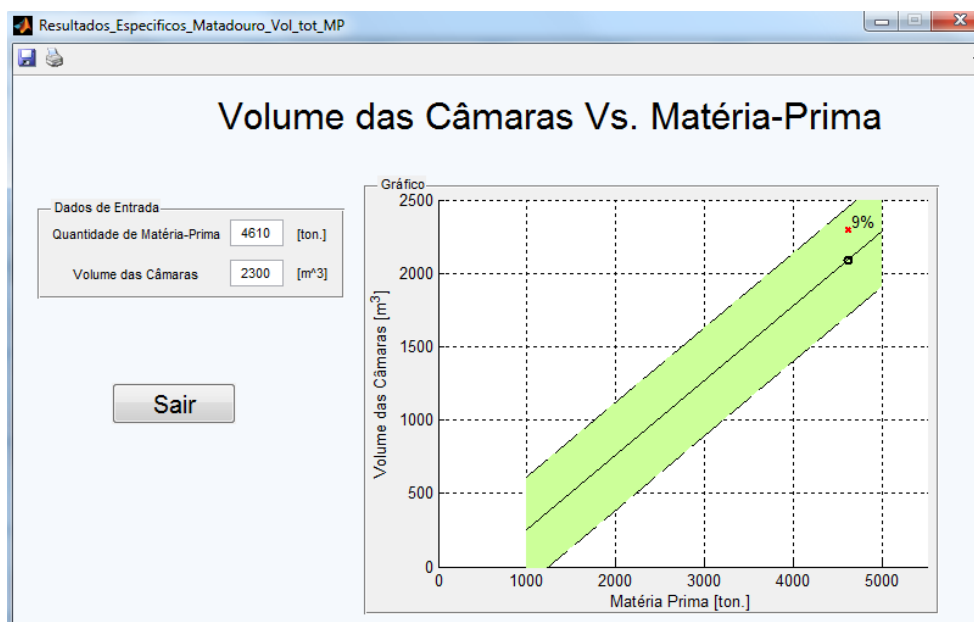


Figura 20 - Exemplo de caso específico do Matadouro. Gráfico Volume das câmaras Vs. Matéria-prima.

Na janela que apresenta os resultados gerais, é ainda possível observar o botão “Relatório”, que ao ser premido abre uma nova janela onde são expostos os valores analisados nos gráficos. É comparado o volume das câmaras com a quantidade de matéria-prima processada anualmente, indicando se a relação entre estes parâmetros é adequada ou não, com base no ponto teórico ideal (assinalado a preto “o”) e no ponto de análise da empresa (assinalado a vermelho “x”). São também comparados os valores dos restantes gráficos como se pode observar pela figura 21, mais concretamente o volume das câmaras e quantidade de matéria-prima com o consumo de energia elétrica, e a potência nominal dos compressores com o volume das câmaras. Seguidamente é feita alusão ao gráfico mais conclusivo que corresponde ao consumo específico de energia que relaciona a quantidade de matéria-prima com o consumo de energia elétrica.

No caso de a empresa apresentar um consumo específico de energia abaixo da média prevista, os resultados do relatório irão indicar ao utilizador para que continue a fazer

uma manutenção adequada dos equipamentos, entre outras sugestões. Porém, assume um papel de maior importância quando uma empresa é identificada com um consumo específico de energia acima da média, como é o caso do exemplo dado. Deste modo, com base na bibliografia estudada e nas visitas de campo efetuadas, o relatório aponta alguns dos aspetos que foram identificados com mais frequência nas empresas, responsáveis por conduzir a perdas de eficiência energética.

Porém, note-se que cabe ao utilizador do Cool-OP ter sensibilidade para avaliar e identificar quais as ineficiências da sua empresa, uma vez que cada caso é um caso, apesar das sugestões fornecidas pelo “Relatório de desempenho energético”.

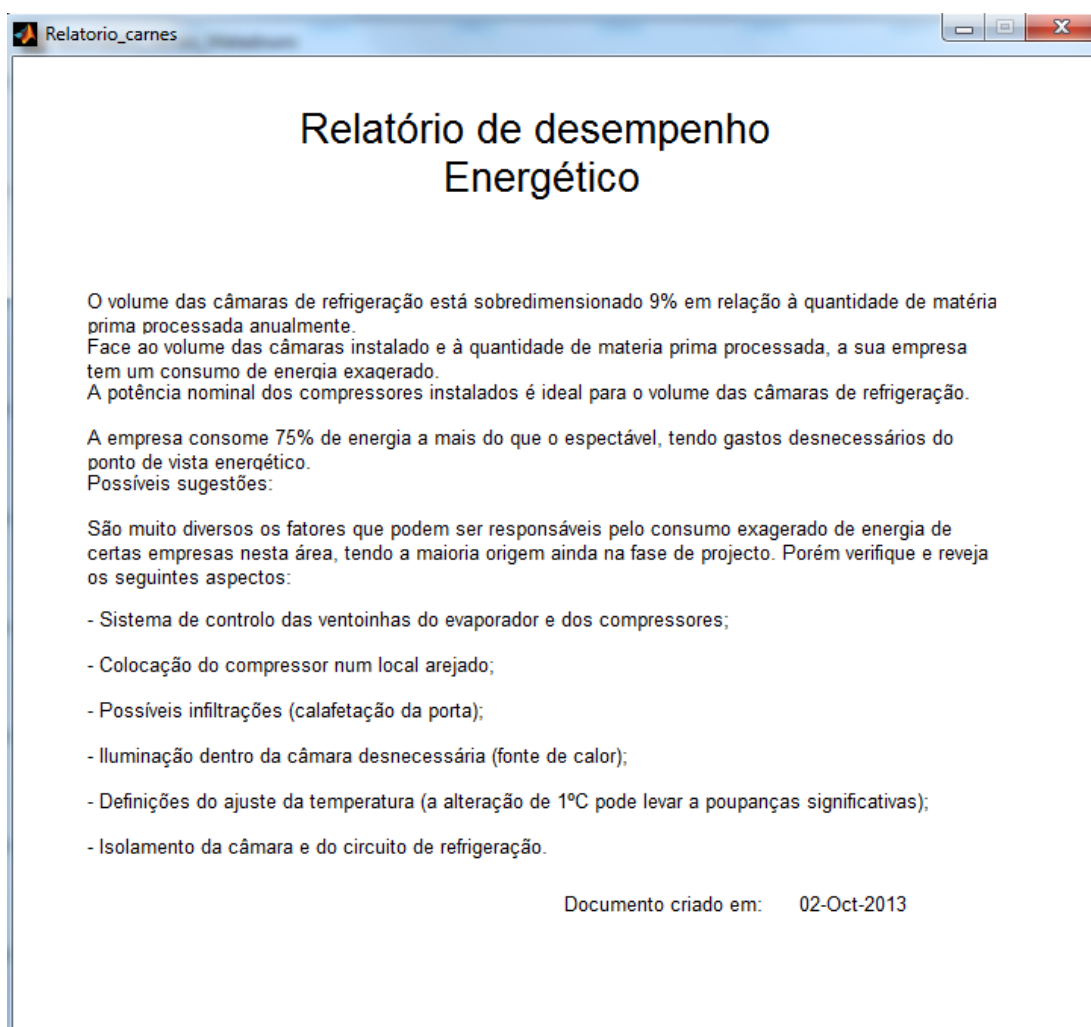


Figura 21 - Relatório de desempenho energético gerado pelo Cool-OP.

### 3.4. Programação

Como seria de esperar, o desenvolvimento da programação do Cool-OP foi um processo demorado e complexo, gerando um código algo extenso e replicado de ramificação para ramificação. Pretende-se portanto ilustrar alguns exemplos de código de modo a elucidar o leitor no que toca ao trabalho realizado, sem tornar este subcapítulo demasiado extenso.

Antes de mais, segue-se um exemplo da programação de uma função *callback* de um *pushbutton* introduzido através do GUIDE. É importante ter em conta a definição da *tag* que se atribui ao componente de interface gráfica que se pretende programar, sendo neste caso o botão “Voltar”, cuja *tag* tem o mesmo nome. O código que se colocar logo de seguida irá ser processado assim que o utilizador pressiona o respetivo botão. Este excerto de código diz respeito à janela de introdução de parâmetros no matadouro (4). Ao ser premido, apaga todas as variáveis, garantindo que as simulações seguintes estão livres de possíveis, mas pouco prováveis erros de programação, fechando a janela atual e abrindo a anterior, a da indústria das carnes (3).

```
function Voltar_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all
close
Carnes
```

Seguidamente é apresentado um exemplo da programação de um gráfico dos resultados gerais. Primeiramente é necessário definir que as variáveis introduzidas na janela dos matadouros (4) estão acessíveis numa janela diferente, ou seja, num ficheiro .m distinto. Para isso é necessário utilizar a função *global* seguida do nome da variável que se pretende importar. Recorrendo ao *set* é possível preencher os campos com os valores dos parâmetros introduzidos na janela anterior, definindo a respetiva *tag* (por exemplo M\_P\_2) como sendo um campo de texto, ou seja *string*, e convertendo a variável M\_P, importada da janela anterior, com o comando *num2str* para que seja possível ser visível no campo de texto respetivo.

```
varargout{1} = handles.output;
global M_P
set(handles.M_P_2, 'String', num2str(M_P));
global C_E
set(handles.C_E_2, 'String', num2str(C_E));
global Vol_tot
set(handles.Vol_tot_2, 'String', num2str(Vol_tot));
global P_C
set(handles.P_C_2, 'String', num2str(P_C));
```

De seguida definem-se variáveis com o mesmo nome mas com outro índice para serem utilizadas na programação gráfica da análise do algoritmo face aos parâmetros introduzidos.

```
M_P_3 = M_P;  
C_E_3 = C_E;  
Vol_tot_3 = Vol_tot;  
P_C_3 = P_C;
```

No caso do desenho dos gráficos foi necessário definir um vetor que corresponde ao domínio de validade dos resultados ( $M\_P\_2$  - eixo das abcissas do gráfico), para depois criar um outro com base no algoritmo desenvolvido por Nunes *et al.* (2011), ( $C\_E\_2$  - eixo das ordenadas). Do mesmo modo, as equações que representam as fronteiras que dizem respeito ao intervalo de confiança também foram adquiridas com base no algoritmo desenvolvido e na amostra das empresas da base de dados. Atribui-se então a função de gráfico com o comando *axes* ao eixo introduzido no GUIDE com a tag  $E\_MP$ , para que este seja desenhado no respetivo local. Posteriormente com o comando *fill* define-se a área a sombreado com a cor verde [.8 1 .6] onde cada um dos números corresponde à quantidade de vermelho, verde e azul que a caracterizam [r g b]. Desenham-se também os limites superiores e inferiores com o comando *plot* a tracejado.

```
% (1) Consumo de Energia Elétrica - Quantidade de Matéria-Prima  
M_P_2 = 1000:1:5000;  
C_E_2 = 0.2041 .* M_P_2 - 139.01;  
  
axes(handles.E_MP);  
grid on  
hold on  
x=1000:10:5000;  
%INTERVALO DE CONFIANÇA 5%  
%Função de limite inferior  
yi=0.2041*x-510.9;  
%Função de limite superior  
ys=0.2041*x+232.9;  
%Sombreado  
X=[x, fliplr(x)];  
Y=[yi, fliplr(ys)];  
f=fill(X,Y,[.8 1 .6]);  
set(f,'LineStyle','none');  
%Limites a tracejado  
plot(x,yi,'--k');  
plot(x,ys,'--k');
```

No excerto de código que se segue foi configurado o nome dos eixos das abcissas,  $x$ , e das ordenadas,  $y$ , do gráfico, e também os valores do domínio de  $x$ . Recorrendo novamente ao comando *plot* traça-se o gráfico definido pelos vetores  $M\_P\_2$  e  $C\_E\_2$ , que fica no centro do sombreado a verde apresentado anteriormente. Para marcar os pontos de análise e ideal utiliza-se o mesmo comando mas como neste caso não se utiliza um vetor de com várias coordenadas o programa cria apenas um ponto. Repare que são definidas mais

propriedades com o mesmo comando para marcar um ponto do que quando se traçou o gráfico, mais concretamente o símbolo do ponto 'x' e o tamanho do mesmo 'markersize'.

```
xlabel('Matéria Prima [ton.]');
ylabel('Consumo de Energia [MWh]');
xlim([0 5500]);
%TRAÇA O GRÁFICO
plot(M_P_2,C_E_2,'LineWidth',1,'Color','k');
%MARCA O PONTO DE ANÁLISE
plot(M_P_3,C_E_3,'x','LineWidth',2,'MarkerSize',5,'Color','r');
```

Para marcar o ponto ideal, o procedimento é exatamente o mesmo, contudo é necessário calcular a ordenada correspondente através do algoritmo, dado que a abcissa é a mesma (matéria-prima). Para se ter uma noção da diferença entre o valor real (ponto de análise) e o valor teórico (ponto ideal), calcula-se o módulo do erro relativo que com o comando *text* se apresenta no gráfico nas coordenadas definidas.

```
%MARCA O PONTO IDEAL
C_E_4 = 0.2041 .* M_P_3 - 139.01;
plot(M_P_3,C_E_4,'o','LineWidth',2,'MarkerSize',5,'Color','k');
%Erro
a1 = abs(round(((C_E_3 - C_E_4) ./ C_E_3) .* 100));
text(M_P_3-150, C_E_3+50,[num2str(a1),'%']);
```

Outra consideração importante tida em conta foi o ajuste do eixo das ordenadas de todos os gráficos em função dos valores introduzidos pelo utilizador, ou seja, suponhamos que para o exemplo de código apresentado abaixo C\_E\_4, a ordenada do ponto ideal para o consumo de energia, assume um valor de 800 que por sua vez é inferior a 1300. Isto iria originar um ajuste automático que iria cortar o gráfico sem que este apresentasse o valor máximo do algoritmo e para além disso, caso o ponto ideal ficasse abaixo do ponto que corresponde à empresa, o anterior podia nem aparecer no gráfico. Note-se que o mesmo aconteceria caso a programação fosse feita em função do ponto real e ocorressem as mesmas circunstâncias. Com o intuito de evitar esta situação o comando *if* e *else* permitiu estabelecer uma condição para ajustar o contradomínio.

```
if C_E_4>1300
    ylim([0 1.2*C_E_4]);
else
    ylim([0 1300]);
end
```

Para elaborar o código no que toca ao Relatório de Desempenho Energético utilizou-se o comando *set* associado a componentes *edit text* no GUIDE definindo-os como *string* para que o texto que se pretende apresentar seja exibido. Seguidamente é com base em comandos *if* e *else* que se estabelecem condições comparando os pontos de análise com os pontos ideais ou teóricos para que sejam apresentadas as frases que descrevem a situação

energética atual da empresa. Pelo exemplo de gráfico que se observa seguidamente, é possível observar que a primeira condição verifica se o valor real é superior ao valor teórico dando uma margem de 5% acima. Se tal for verificado, são apresentadas as frases subsequentes. Repare-se que foi necessário dividir a frase em várias parcelas, uma vez que se introduz um valor variável, nomeadamente o erro relativo, com base na simulação realizada, definindo assim o vetor *g6*. A segunda condição funciona do mesmo modo mudando a condição para inferior com a mesma margem de 5%. Caso o valor real se encontre dentro de uma margem de +/- 5% conclui-se que a potência dos compressores se encontra bem dimensionada quando comparada com o volume das câmaras de refrigeração.

```
%Gráfico 6 -Potencia dos compressores/volume das camaras
if P_C_3>P_C_4_6*1.05
    a='A potência nominal dos compressores instalados é superior ao
recomendado em ';
    b='% para o volume das câmaras de refrigeração.';
    g6=[a,num2str(a6),b];
    set(handles.text4,'string',g6);
elseif P_C_3<P_C_4_6*0.95
    a='A potência nominal dos compressores instalados é inferior ao
recomendado em ';
    b='% para o volume das câmaras de refrigeração.';
    g6=[a,num2str(a6),b];
    set(handles.text4,'string',g6);
else
    set(handles.text4,'string','A potência nominal dos compressores
instalados é ideal para o volume das câmaras de refrigeração.');
```

```
end
clear a b g6
```

No final, as variáveis utilizadas para definir o vetor que representa o *string* da *editbox* são apagadas para evitar possíveis incongruências de programação que possam surgir.

## 4. Validação do Cool-OP - casos de estudo

### 4.1. Apresentação das empresas

Para validar a ferramenta foram selecionadas três empresas, doravante denominadas de empresa A, empresa B e empresa C, enquadradas em cada uma das subcategorias da indústria da carne, e que não fizeram parte dos dados estatísticos utilizados no desenvolvimento dos algoritmos.

A empresa A, consiste num matadouro com 12 anos de atividade, tendo no seu quadro 13 trabalhadores. De acordo com a legislação portuguesa é classificada como sendo uma micro empresa e dedica-se à produção de carnes, processando anualmente cerca de 1473 toneladas de matéria-prima, onde se inclui carne de bovino (que representa cerca de 80% do total), carne de suíno, ovina e caprina. Nas suas instalações encontram-se nove câmaras de frio (exclusivamente para refrigeração) com um volume total de cerca de 638 m<sup>3</sup>, sendo a sua área coberta total de 1117 m<sup>2</sup>. Algumas câmaras são constituídas por painel sandwich e outras por alvenaria com isolamento de poliuretano. A iluminação dentro das câmaras é feita recorrendo a lâmpadas fluorescentes e as tubagens dos evaporadores possuem um isolamento em neoprene. Os compressores existentes nas instalações possuem uma potência nominal total de 43 kW distribuída igualmente por quatro compressores Bitzer (circuito central direto). O consumo global de energia anual é de 209 MWh e a tarifa contratada é de média tensão com uma potência contratada de 80 kW. O seu fator de potência é de 0,97 e possui uma bateria de condensadores. Esta empresa possui ainda corredores climatizados para evitar perdas quando se acede às câmaras de frio, como se pode observar pela figura 22. Foi ainda identificado um recuperador de calor na empresa, e a caldeira utiliza gasóleo como combustível.



Figura 22 - a) Corredor climatizado da empresa A; b) Evaporadores de uma câmara de frio.

A empresa B trabalha no sector da carne, mais concretamente com presuntos, e conta com uma experiência de 24 anos de atividade, tendo no seu quadro técnico 15 trabalhadores e com uma área coberta de 3000 m<sup>2</sup>. De acordo com a legislação portuguesa, é classificada como sendo uma pequena empresa e dedica-se à produção de carnes, processando anualmente cerca de 2029,5 toneladas de matéria-prima, exclusivamente carne de suíno. Nas suas instalações encontram-se dezoito câmaras de frio (congelação, refrigeração e secagem artificial) com um volume total de cerca de 6668 m<sup>3</sup>, das quais oito são feitas em alvenaria com isolamento de cortiça e as restantes dez são em sandwich com painel de isolamento de poliuretano. No entanto, a iluminação das câmaras em alvenaria é realizada recorrendo a lâmpadas incandescentes e as restantes com lâmpadas fluorescentes. Esta empresa não possui corredores climatizados mas tem um recuperador de calor. Os compressores existentes nas instalações possuem uma potência nominal total de 221 kW distribuída por 18 compressores da marca Bitzer, Copeland e Dorin (circuitos de refrigeração individual). O consumo global de energia anual é de 1662,05 MWh e a empresa possui um fator de potência de 0,91, tendo nas suas instalações uma bateria de condensadores para fazer a correção do mesmo. A caldeira presente nas instalações funciona com gasóleo de aquecimento. Repare-se na figura 23 onde é possível observar a arrumação dos presuntos dentro de uma câmara de frio da empresa.

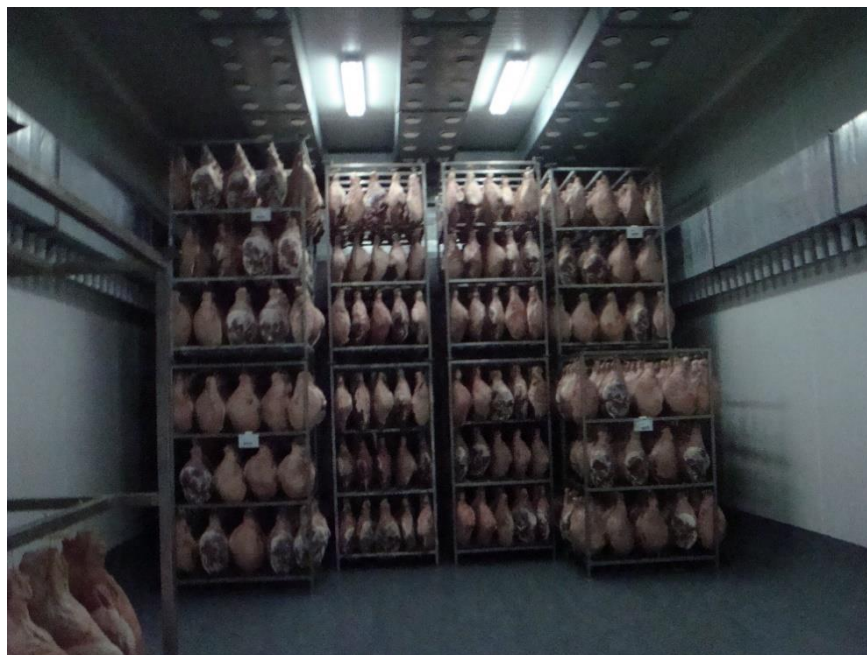


Figura 23 - Câmara de frio da empresa B.

A empresa C consiste numa salsicharia com 15 anos de atividade, tendo no seu quadro 4 trabalhadores. De acordo com a legislação portuguesa, é classificada como sendo uma micro empresa e dedica-se à produção de carnes, processando anualmente cerca de 44,8 toneladas de matéria-prima, nomeadamente carne de suíno. Nas suas instalações encontram-se três câmaras de frio (apenas refrigeração) com um volume total de cerca de 142 m<sup>3</sup>, no entanto a sua área coberta é de 600 m<sup>2</sup> dado que existe ainda uma sala de fabrico e um fumeiro para secagem dos enchidos. No que toca às câmaras de refrigeração, estas são feitas em painéis sandwich de poliuretano, possuindo no seu interior iluminação proveniente de lâmpadas fluorescentes. Relativamente aos acessos às camaras de frio, não existem corredores climatizados, no entanto o isolamento das tubagens dos evaporadores é em poliuretano. Os compressores existentes nas instalações possuem uma potência nominal total de 10,52 kW distribuída por 4 compressores da marca Bitzer (circuitos de refrigeração individual) e consumo global de energia anual da empresa é de 22,1 MWh. O fator de potência identificado é de 0,86, não possuindo nenhum equipamento para correção do mesmo. Esta empresa em particular não possui recuperador de calor e a sua caldeira funciona a eletricidade, não tendo por isso gastos em gásóleo de aquecimento.



Figura 24 - Interior de câmara de frio da empresa C.

## 4.2. Simulação de resultados

Nesta secção da presente dissertação são apresentados os resultados obtidos através da introdução dos parâmetros que a ferramenta computacional desenvolvida avalia, nomeadamente a quantidade de matéria-prima processada anualmente, o consumo de energia elétrica, a potência dos compressores e o volume total das câmaras de refrigeração. Na tabela 2 estão sumariados os valores correspondentes a cada empresa, para facilitar a consulta e comparação dos mesmos. Para além disso acrescentou-se ainda o valor do volume de negócios de cada empresa para enfatizar a sua dimensão.

Tabela 4.1 - Valores dos parâmetros das empresas analisadas a introduzir no Cool-OP.

	Empresa A	Empresa B	Empresa C
Quantidade de Matéria-prima [ton]	1.473,0	2.029,5	44,8
Consumo de energia elétrica [MWh]	209,0	1.662,1	21,2
Volume total das Câmaras de frio [m <sup>3</sup> ]	638	6.668	142

Potência dos compressores [kW]	43,00	221,00	10,52
Volume de negócios [€]	1.400.000	4.901.131	620.000

As figuras 25, 26 e 27 representam os resultados obtidos através da simulação no Cool-OP para as empresas A, B e C, respetivamente. Repare-se que nestes casos de estudo é possível observar o ajuste correto do domínio e do contradomínio de cada gráfico dos resultados obtidos, como foi explicado anteriormente.

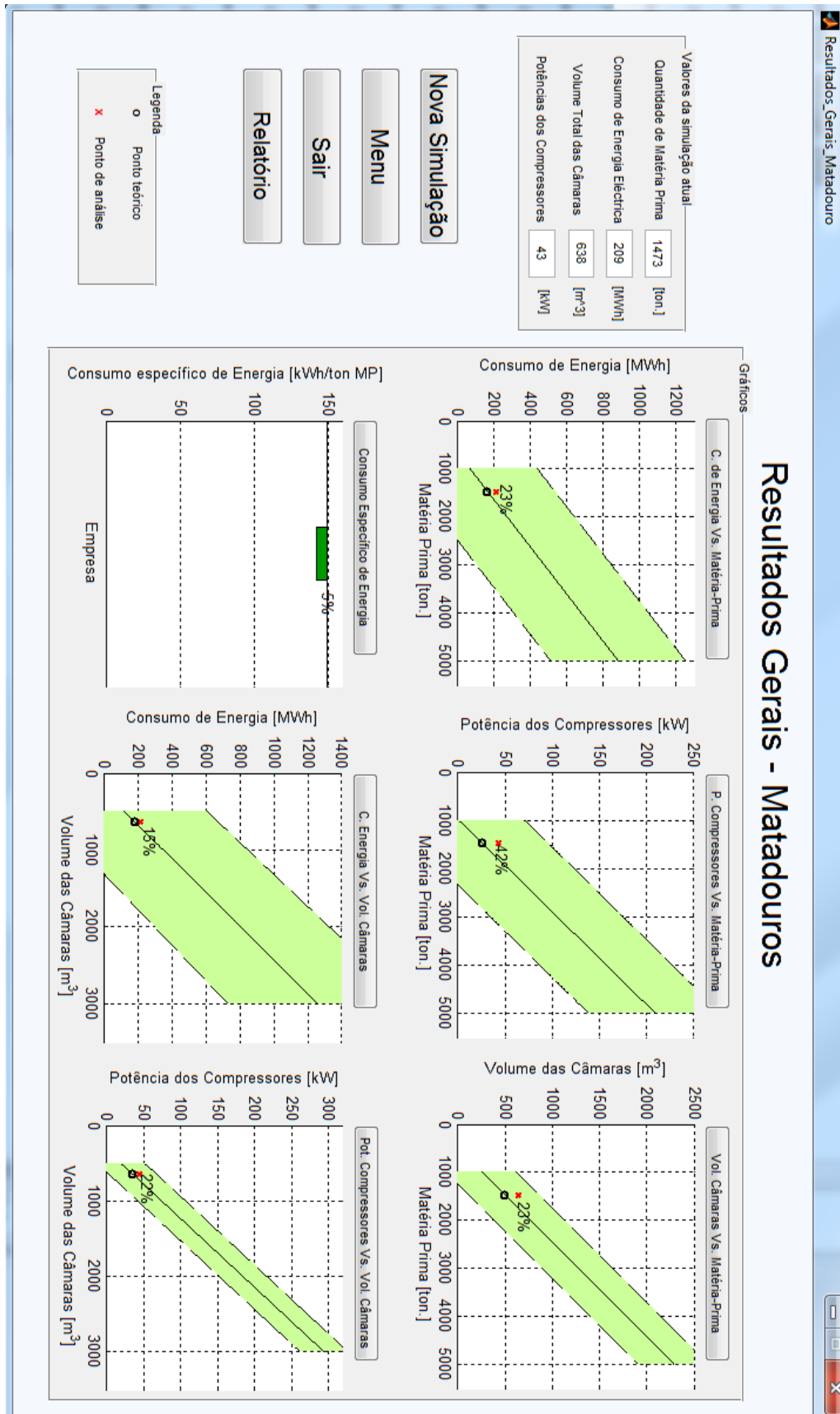


Figura 25- Resultados gerais Empresa A.

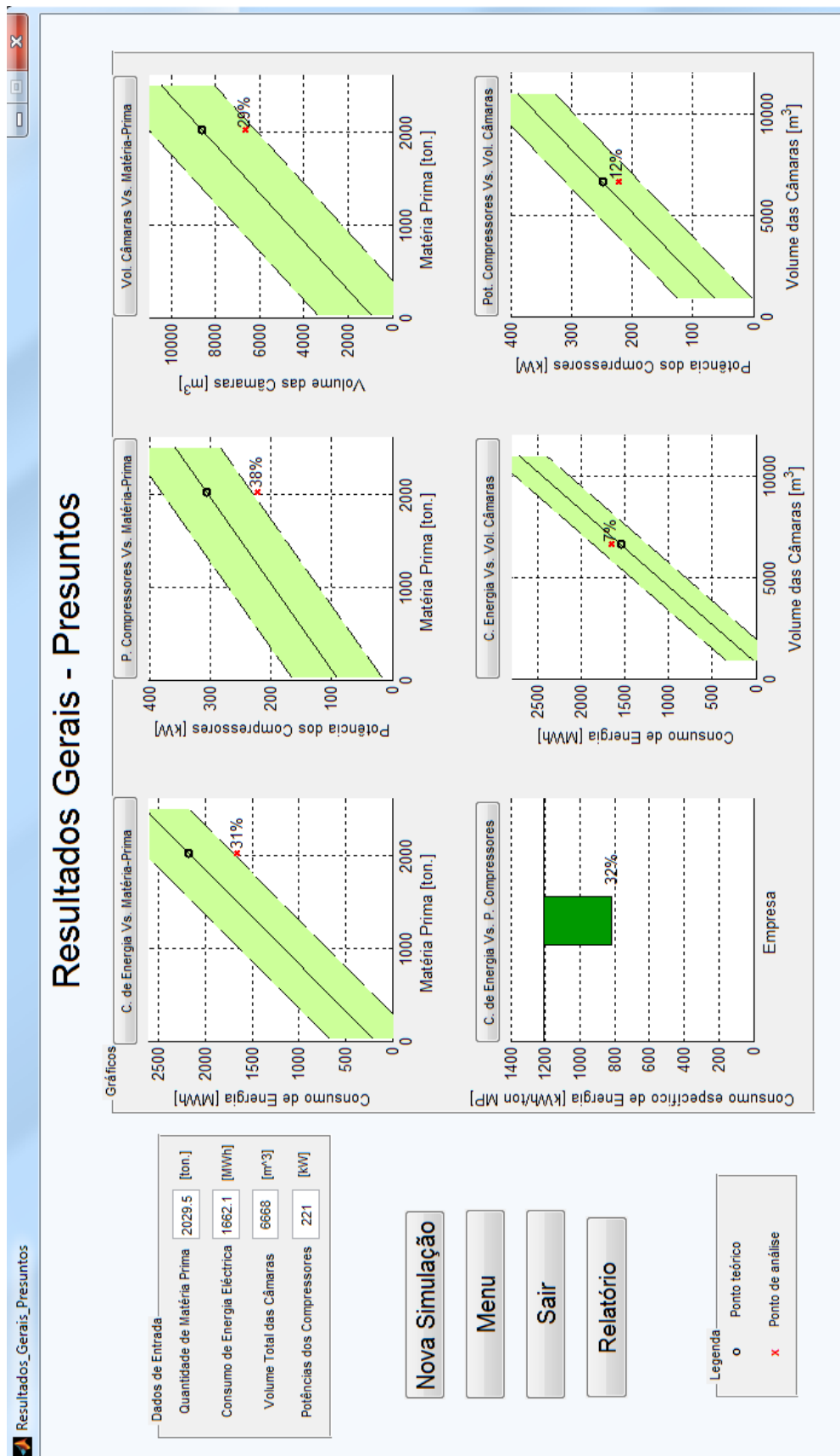


Figura 26- Resultados gerais Empresa B.

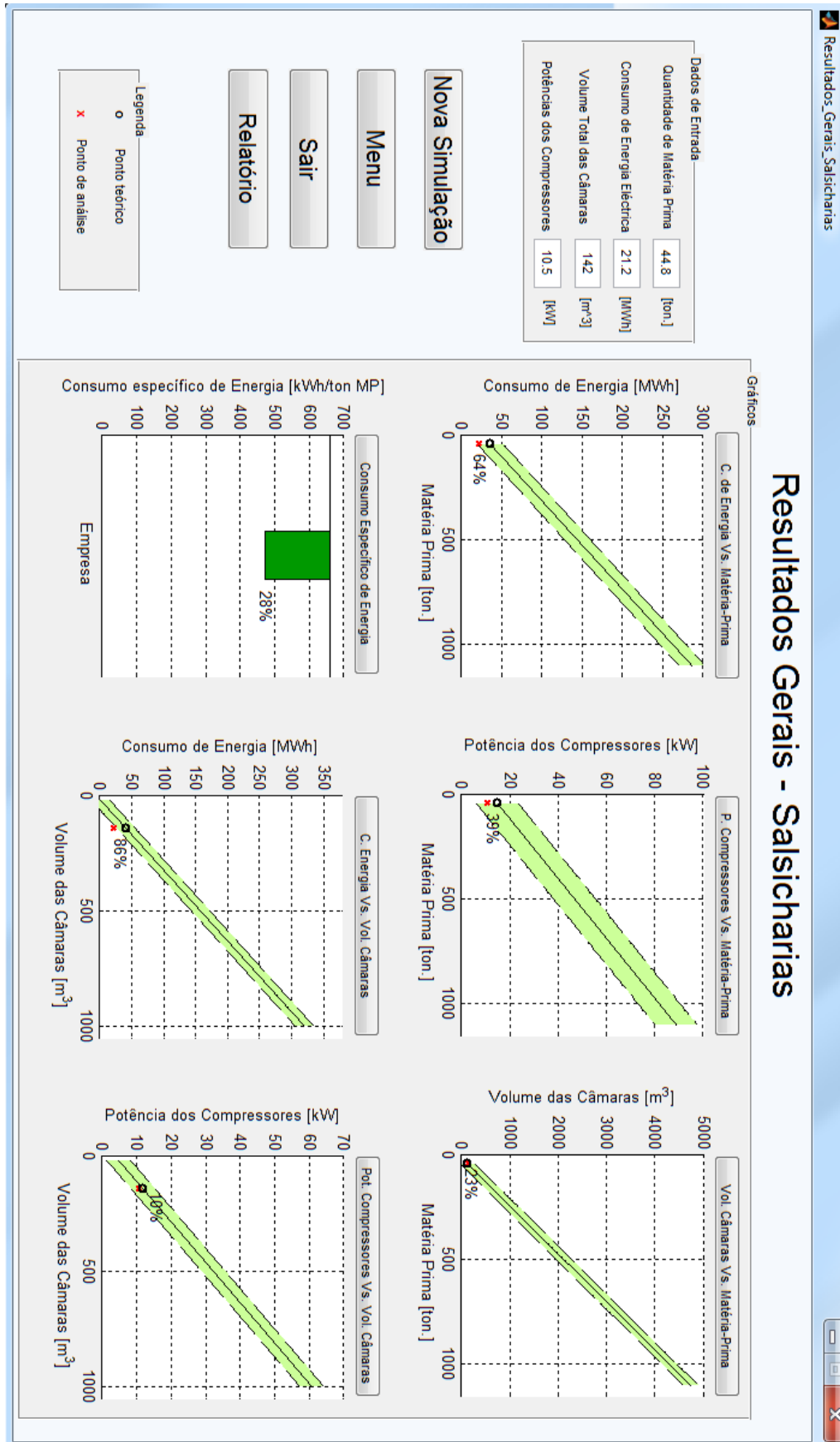


Figura 27- Resultados gerais Empresa C.

### 4.3. Análise e discussão de resultados

Com base nos valores apresentados nos resultados, é de notar que todas as empresas apresentam valores de consumo específico de energia abaixo da média, caracterizando-as como empresas competitivas.

No caso concreto da empresa A, repare-se que em todos os gráficos da Figura 25 que comparam dois parâmetros existe sempre um pequeno incremento face à média nacional, como por exemplo no consumo de energia em ordem à matéria-prima, sendo o valor de 23% acima da média. Deste gráfico conclui-se que para o consumo de energia anual da empresa, 209 MWh, seria expectável que processasse mais matéria-prima (aproximadamente 2000 toneladas). No gráfico que relaciona o volume das câmaras com a matéria-prima, torna-se perceptível que as câmaras têm capacidade para armazenar mais 23% da carne processada anualmente. Algo importante de salientar consiste no facto de que todos os valores dos pontos de análise em cada gráfico se encontram dentro do intervalo de confiança de 95% (sombreado a verde). Por fim, o gráfico do consumo específico de energia permite concluir que esta empresa tem um consumo de 5% abaixo da média nacional, sendo por isso mais eficiente e competitiva tendo vantagem face às restantes com consumo superior, podendo praticar preços mais competitivos. Caso a empresa processe mais matéria-prima, uma vez que tem capacidade para isso, o valor da potência dos compressores face à quantidade de matéria-prima processada e ao volume das câmaras passaria a enquadrar-se mais com o previsto. Repare-se que no gráfico 6 da figura 25, a potência dos compressores encontra-se 22% acima do esperado, o que permite ao utilizador concluir que poderia ter câmaras de frio com maior volume utilizando a potência instalada, ou então aumentando a carga (matéria-prima) nas mesmas. Porém, com base na visita efetuada à empresa verificou-se que seria possível melhorar alguns aspetos com o intuito de melhorar a eficiência energética da mesma, como por exemplo a substituição das lâmpadas fluorescentes por lâmpadas de LED's. Para além disso e de acordo com os dados recolhidos junto da empresa, entra em média uma pessoa por hora dentro das câmaras e apesar de possuir corredores climatizados existem sempre perdas significativas que levam ao aumento do consumo de energia uma vez que os compressores passam a ter de trabalhar durante um período de tempo maior para compensar as perdas. Apesar de possuir um recuperador de calor como foi apresentado anteriormente, o isolamento da caldeira encontra-se em más condições. Por outro lado, o fator de potência da empresa assume um valor perto do ideal, sendo uma mais-valia a apontar.

Relativamente à empresa B, é de referir que das empresas analisadas, esta é a que possui um quadro técnico com mais pessoal e laborando há mais tempo no sector, sendo por isso de maior dimensão. Tal é visível pelo enorme volume de negócios apresentado. Deste

modo, é de esperar que os valores dos parâmetros introduzidos sejam também superiores. Numa primeira análise observa-se que a maioria dos valores expostos nos gráficos da Figura 26 se encontram dentro do intervalo de confiança ou mesmo abaixo deste. No primeiro gráfico, onde se compara o consumo de energia com a matéria-prima processada, nota-se que a empresa tem um consumo 31% abaixo do esperado, podendo-se logo apontar que é uma empresa competitiva. No entanto, ao analisar os restantes gráficos, nomeadamente o gráfico que compara a potência nominal dos compressores com a quantidade de matéria-prima é evidente que a potência dos mesmos é 38% inferior ao padrão nacional. No que toca ao consumo elétrico de energia e à potência nominal dos compressores quando comparado com o volume das câmaras, os valores encontram-se dentro do intervalo de confiança, sendo de 7% acima da média e de 12% abaixo da média, respetivamente. Estes valores são justificáveis como um possível consumo de energia em excesso e uma potência dos compressores inferior ao esperado, já que no gráfico que compara o volume das câmaras com a quantidade de matéria-prima prevê-se um valor 29% abaixo do esperado. Assim, seria possível à empresa processar mais matéria-prima caso fosse necessário, ajustando assim os valores do quinto e do sexto gráficos. No entanto, é de realçar que todos estes valores se encontram dentro do intervalo de confiança. O consumo específico de energia da empresa B assume um valor 32% abaixo da média nacional, sendo por isso a empresa mais eficiente das analisadas na presente dissertação. A arrumação da matéria-prima nas câmaras de refrigeração (figura 23) é considerada como um ponto de grande vantagem. Um dos problemas detetados nas instalações da respetiva empresa foi a falta de isolamento na caldeira, a ausência de corredores climatizados e novamente o tipo de iluminação utilizado. Relativamente ao fator de potência, o banco de condensadores da empresa garante que este valor se mantenha dentro dos parâmetros normais.

A salsicharia analisada que corresponde à empresa C é a mais pequena das estudadas. Corresponde a uma micro empresa e os valores a introduzir nos parâmetros de avaliação do desempenho energético encontram-se no limite do domínio de validade dos resultados. No primeiro gráfico da Figura 27, observa-se que o consumo de energia se encontra 64% abaixo da média face à quantidade de matéria-prima processada. Nos restantes gráficos, as conclusões que se retiram são semelhantes, sendo todos os valores analisados inferiores à média. A potência dos compressores é inferior ao previsto em 39% quando comparada com a matéria-prima, do mesmo modo que o volume das câmaras também é inferior em 23% quando comparado com a mesma. Observando agora o quinto e o sexto gráfico, onde se compara o consumo de energia elétrica e a potência nominal dos compressores com o volume das câmaras de refrigeração, nota-se que os valores analisados são inferiores à média 86% e 10%, respetivamente. O valor do quinto gráfico (86%) encontra-se fora do

intervalo de confiança, o que se deve ao facto da quantidade de matéria-prima processada ser inferior em 23% face à capacidade do volume das câmaras, diminuindo assim o consumo de energia numa grande variação face ao previsto. Recorrendo novamente ao gráfico 1, é evidente que se a empresa processar mais quantidade de matéria-prima, o consumo de energia irá aumentar. Por fim, ao avaliar o gráfico que representa o consumo específico de energia da figura 27, esta empresa desfruta de um gasto de energia inferior em 28% quando comparado com a média prevista. Um ponto importante de mencionar é o facto de esta empresa recorrer a eletricidade para o aquecimento de água. Como consequência, o fator de potência apresentado pela empresa é de 0,86, aumentando o custo da fatura de eletricidade devido a uma maior presença da potência reativa. Este ponto pode ser corrigido com a instalação de uma pequena bateria de condensadores para ajustar o valor do fator de potência para perto da unidade. Repare-se que apesar dos resultados obtidos na simulação desta empresa terem validade, é de apontar que o valor da matéria-prima se encontra ligeiramente abaixo do domínio de validade, podendo comprometer um pouco os resultados, daí a oscilação entre desvio dos valores dos diferentes gráficos (86% quinto gráfico, 10% sexto gráfico).

Para estas empresas foi também gerado o Relatório de Desempenho Energético. No entanto, uma vez que o consumo específico de energia é sempre inferior à média nacional (fator de comparação no código gerado para classificar a empresa quanto ao desempenho energético), este documento apresenta apenas os valores do desvio dos parâmetros dos diferentes gráficos dos resultados. Deste modo, não existem sugestões de possíveis melhorias, sendo apenas recomendado a continuação de uma manutenção adequada dos equipamentos e assegurando o bom estado dos isolamentos. Na figura 28 é apresentado o relatório gerado para o caso da empresa A. Note-se que não se apresenta o mesmo relatório para as restantes empresas, uma vez que a única diferença seria apenas os valores dos desvios dos gráficos, não havendo alterações na exibição de possíveis sugestões.

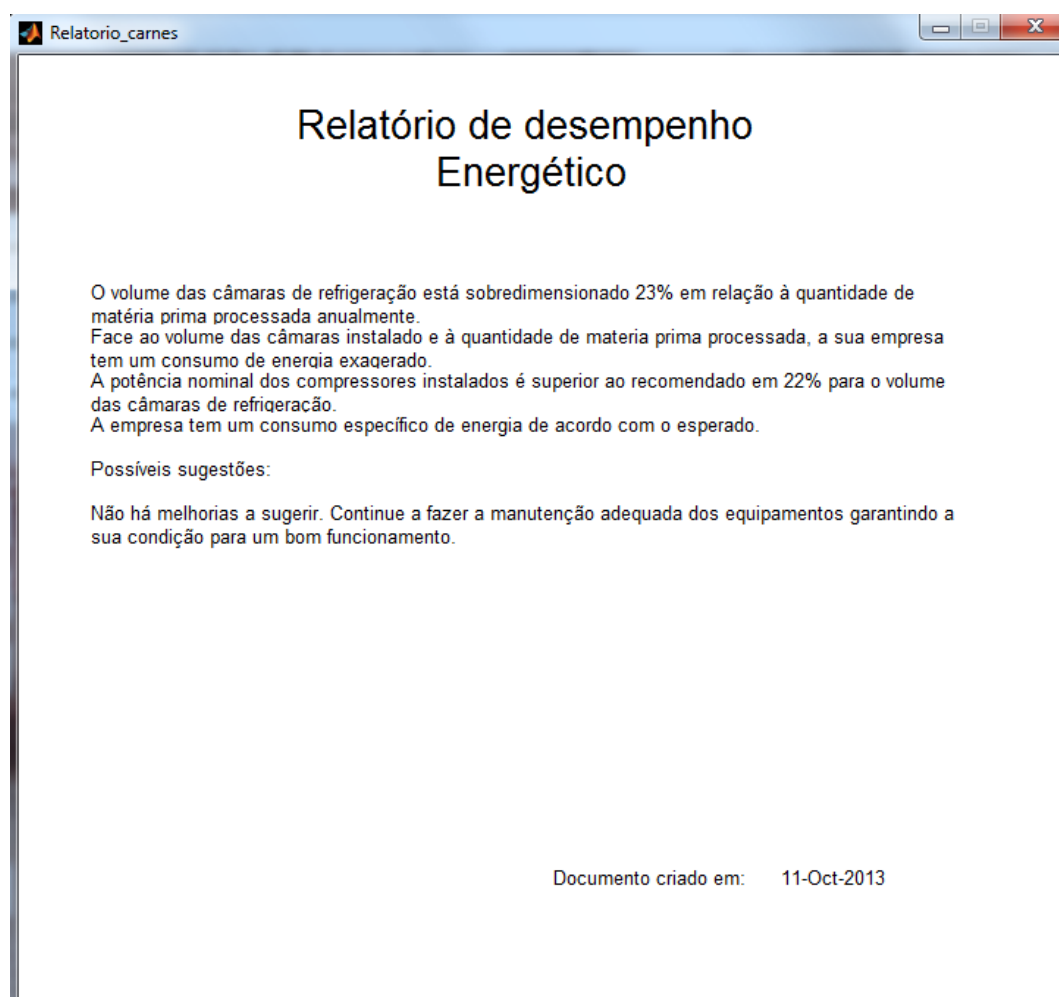


Figura 28 - Relatório de desempenho energético para a empresa A.

É de salientar que estas conclusões são meramente indicativas, e permitem aos responsáveis das empresas do sector agroindustrial tomar conhecimento sobre o posicionamento da sua empresa relativamente à média nacional em termos de eficiência energética. Porém, qualquer modificação na empresa ou alteração dos processos deverá ser baseada num estudo *in-situ* detalhado sobre os consumos de energia dos diferentes dispositivos que fazem parte do processo produtivo e de refrigeração, tendo em consideração as diferentes ineficiências que poderão existir. Porém, é de referir que os resultados obtidos pela ferramenta computacional desenvolvida para a previsão do desempenho energético das empresas são congruentes com as falhas ou ineficiências detetadas no trabalho de campo realizado.

## 5. Conclusões

### 5.1. Nota conclusiva

Esta dissertação apresenta uma versão da ferramenta computacional dirigida à fileira das carnes. A fim de demonstrar a sua aplicabilidade, casos de estudos de empresas nas subfileiras dos matadouros, indústria dos presuntos e salsicharias são apresentados. A partir da análise gráfica dos resultados de previsão são apresentadas algumas conclusões sobre o posicionamento do desempenho da empresa em relação à média nacional.

Esta ferramenta computacional, o Cool-OP, permitiu fazer uma avaliação do desempenho energético de empresas do sector agroindustrial comparando diferentes parâmetros com os valores médios nacionais de modo a que o utilizador tenha a capacidade de concluir quais os possíveis pontos fracos ou fortes da entidade empresarial. O gráfico do consumo específico de energia é bastante conclusivo, uma vez que relaciona o consumo de energia por tonelada de matéria-prima. No entanto, é de mencionar que o programa desenvolvido consiste apenas numa ferramenta de auxílio a ser utilizada na análise do desempenho energético, sendo por isso necessário que o utilizador tenha sensibilidade para identificar possíveis problemas de origem técnica nas instalações da empresa.

Todavia, a análise não elimina a necessidade de um estudo mais detalhado para determinar as condições particulares que podem ser melhoradas, pois ao comparar os resultados obtidos nas várias simulações com uma visita no campo às respetivas empresas tornou-se claro que estas apresentaram condições de trabalho adequadas bem como a devida manutenção dos equipamentos, desde os compressores, às canalizações do refrigerante e o seu devido isolamento, até à qualidade e conservação das câmaras de refrigeração.

O estado atual da ferramenta computacional permite que o utilizador insira os dados de consumo anual de energia, matéria-prima processada anualmente, volume de câmaras de refrigeração e potência nominal dos compressores. Com estas previsões de desempenho, o utilizador pode decidir como melhorar o desempenho energético da sua empresa. A aplicação prática desta ferramenta demonstra a sua utilidade em ajudar a tomada de decisão na implementação de medidas de eficiência energética.

## 5.2. Sugestões de trabalhos futuros

À semelhança da grande maioria dos estudos, também no presente caso é possível implementar melhorias no trabalho desenvolvido. O programa desenvolvido mostrou-se capaz e funcional, contudo a temática onde se insere está em constante desenvolvimento e avanço tecnológico, sendo por isso importante promover uma melhoria contínua do mesmo. Sugere-se portanto a criação de uma versão que permita comparar pequenas alterações na simulação dos resultados nas empresas sem que se tenha de efetuar nova simulação apresentando no mesmo gráfico os dois pontos de análise, um para o caso presente da empresa e outro que sirva de comparação caso se altere determinado parâmetro, apresentando ao utilizador a poupança expectável, ou não, com base na alteração efetuada.

Para além disso, o aumento da base de dados do programa também seria uma mais-valia que se poderia acrescentar, criando correlações que cobrissem a indústria de frio a nível nacional e não apenas do interior. Esta alteração iria permitir que os resultados apresentados pelo Cool-OP apresentassem uma melhor precisão e validade.

Relativamente à apresentação do programa e à organização dos componentes nas janelas é possível fazer alterações com o intuito de melhorar a interface do utilizador com a ferramenta desenvolvida.

No futuro, esta ferramenta irá incluir outras fileiras do setor agroindustrial, tais como: peixe, laticínios, hortofrutícolas, vinha e do vinho, distribuição, entre outros. Além disso, e tendo em consideração a fileira em que se integra a empresa em análise, irá fornecer sugestões automáticas para a melhoria do desempenho energético, melhorando assim a componente do Relatório de Desempenho Energético.

## 6. Referências bibliográficas

- Baptista, P., Gaspar, P.D. & Oliveira, J., "*Higiene e Segurança Alimentar na distribuição de Produtos Alimentares*", Forvisão, Guimarães, 2007.
- Billiard, F., "*Refrigerating Equipment, Energy Efficiency and Refrigerants*", International Institute of Refrigeration, 2008.
- Butler, D., "*Fridges could save power for a rainy day*", Nature (2007).
- Chagas, J. A. C., "*Projeto e construção de câmaras frigoríficas*", York Refrigeration, Joinville, 2006.
- CHILL-ON, "*Developing and integrating novel technologies to improve safety, transparency and quality assurance of the chilled/frozen food supply chain - test case fish and poultry*", Publishable final activity report, 2006.
- Colmer, C., Kuck, M., Lohmann, M., Bunke, M., "*Novel Technologies to improve safety and transparency of the chilled food supply chain*", *Innovation in the nordic marine sector*, 2009.
- Eden, M., Colmer, C. "*Improved Cold Chain Management: efficiency and food safety through international project results*", Food Safety and Technology 24(1) (2010), pp. 30- 32.
- Evans, J.A., Hammond, E.C., Gigiel, A.J., Reinholdt, L., Fikiin, K., Zilio, C., "*Improving the energy performance of cold stores*", ICCO 2013, Paris, France, 2013.
- Ferraz, F. Gomes, M., "*O histórico da refrigeração*", Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia, Bahia, Brasil, 2008.
- Foster, A., Zilio, C., Corradi, M., Reinholdt, L., Evans, J., "*Freely available cold store energy models*", ICCO 2013, Paris, France, 2013.
- Gaspar, P. D., Domingues, C., Gonçalves, L., & Andrade, L., "Avaliação da qualidade e segurança alimentar pela previsão do crescimento microbiano em diferentes condições de conservação" V congresso Ibérico y III Congreso Iberoamericano de ciencias y técnicas del frio (CYTEF 2009), 2009.

Gogou, E., Katsaros, G., Derens, E., Li, L., Alvarez, G., Taoukis, P., "Development and applications of the European Cold Chain Database as a tool for cold chain management", ICCC 2013, Paris, France, 2013.

Herold, M.W., "Gelo nos trópicos: a exportação de "Blocos de cristais da frieza ianque" para Índia e Brasil", Revista Espaço Académicos nº 126, 2011.

IAPMEI, "PME em números", Instituto de Apoio às Pequenas e Médias Empresas e à Inovação (IAPMEI), 2004.

ICE-E, "Improving cold storage equipment in Europe", <http://www.khliminet.be/drupalice/>, 2013.

IEA, "2012 Key World Energy Statistics", International Energy Agency (IEA), 2013.

INE, "Estatísticas da Produção Industrial 2009", Instituto Nacional de Estatística (INE), Lisboa, 2010.

James, S.J. & James, C., "Improving energy efficiency within the food cold-chain", Food Research International, 43 (2010), pp. 1944-1956.

Klein, C., "The man who shipped New England ice around the world", History in the headlines, 2012.

Marchand, P., Holland, O. T., "Graphics and GUIs with Matlab", 3ª Edição, Chapman & Hall/CRC, London, 2003.

AIRAH, "Methods of calculating Total Equivalent Warming Impact (TEWI) 2012", Australian Institute of Refrigeration, Air conditioning and Heating (AIRAH), Austrália, 2012.

Night Wind, "Grid Architecture for Wind Power Production with Energy Storage through load shifting in Refrigerated Warehouses", Implementation Outline Plan, 2008.

Nunes, J., Silva, P.D., Andrade, L.P., "Energetic efficiency evaluation in refrigeration systems of meat industries", Proc. 23rd International Congress of Refrigeration - ICR 2011, August 21 - 26, Prague, Czech Republic, 2011.

Pachai, A.C., "From Cradle to table - cooling and freezing of food". ICCC 2013, Paris, France, 2013.

Pearson, S. F., *“How to improve energy efficiency in refrigerating equipment”*, 2003, International Institute of Refrigeration, 2003.

Saint Trofee - Refrigeration Tools, <http://www.nightwind.eu/night-wind.html>, 2013.

Santos, R., Nunes, J., Silva, P.D., Gaspar, P.D., Andrade, L.P., *“Ferramenta computacional de análise e simulação do desempenho de unidades de conservação de carne através de frio industrial”*, VI Congreso Ibérico y IV Congreso Iberoamericano de Ciencias y Técnicas del Frío (CYTEF-2012), Madrid, Spain, 2012.

Santos, R., Nunes, J., Silva, P.D., Gaspar, P.D., Andrade, L.P., *“Computational tool for the analysis and simulation of cold room performance in perishable products industry”*, ICC 2013, Paris, France, 2013.

Sluis, M., *“Cold Storage of Wind Energy - Cold Storage Economics”*, Saint Troffe - Night Wind Project, Dinamarca, 2008.

Stahl, V., Alvarez, G., Derens, E., Hoang, H. M., Lintz, A., Hezard, B., El Jabri, M., Lepage, J. F. Ndoye, F. T., Thuault, D., Gwanpua, S. G., Verboven, P., Geeraerd, A., *“An essential part of the FRISBEE software tool: Identification and validation of models quantifying the impact of the cold chain on the RTE pork products”*, ICC 2013, Paris, France, 2013.

MathWorks, *“MATLAB: Creating Graphical User Interfaces”*, The MathWorks Inc, 2012.

MathWorks, *“Matlab: The Language of Technical Computing - Building GUIs with MATLAB, Version 5”*, The MathWorks Inc, 1997.

Thompson, J., *“Energy Conservation in Cold Storage and Cooling Operations”*, Perishables Handling 105 (2001), pp. 7-9.

Utterback, J., *“The Dynamics of Innovation”*, MIT, Massachusetts, 1994.

Welcome to the Chill-on Project, <http://www.chill-on.com/>, 2013.