



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Avaliação do Desempenho Energético de Câmaras de Refrigeração Industrial**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

**Autor**

**João André Beltrão Madeira da Silva**

**Orientadores**

**Engenheiro Francisco José Craveiro Bispo Pocinho Lamas**

**Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar**

**Júri**

**Presidente Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo**

**Vogais Professor Doutor José Manuel Baranda Ribeiro**

**Orientador Engenheiro Francisco José Craveiro Bispo Pocinho Lamas**

**Coimbra, Setembro, 2014**

Ao Henrique.

## Agradecimentos

Esta dissertação coloca um ponto final na minha carreira académica no curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, contudo considerar-me-ei um estudante para a vida. A conclusão desta etapa não seria possível sem o apoio de algumas pessoas a quem gostaria aqui de expressar o meu sincero agradecimento.

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus Pais, Irmão, Tia e Avós que sempre partilharam a felicidade dos bons momentos e, em alturas mais importantes, com a força das palavras me incentivaram e procuraram soluções para ultrapassar os momentos mais difíceis.

Ao Engenheiro Francisco Lamas e ao Professor Doutor Adélio Gaspar, pela orientação necessária dada em todos os momentos essenciais na realização deste trabalho.

Ao Engenheiro Nuno Correia pelas inúmeras vezes que se mostrou disponível a facultar ferramentas úteis para o desenvolver deste projeto.

À Marlene Melo que ao mesmo tempo foi desenvolvendo a sua dissertação e no mesmo local de trabalho e com quem fui sempre trocando ideias.

Ao João António e Carlos Marques, sendo grandes amigos e também colegas de curso, conseguiram apoiar-me tanto a nível psicológico como a nível de conteúdo técnico na realização da presente dissertação.

A todos os meus grandes amigos que, conhecendo a minha pessoa, acompanharam e me foram incentivando com palavras amigas e que, sem eles, certamente não teria superado tão bem alguns obstáculos presentes nestes meses de trabalho.

A todos, um sincero muito obrigado.

João André Silva

## Resumo

Um dos principais custos da indústria portuguesa e que reduz a sua competitividade prende-se com a fatura energética. Na indústria agroalimentar, nomeadamente a conservação e tratamento de peixe, essa fatura reflete-se com maior incidência no consumo dos sistemas de refrigeração.

Na refrigeração industrial existem vários tipos de ganhos térmicos que podem ser amenizados com pequenas alterações ao sistema com o objetivo de melhorar a eficiência energética e, ao mesmo tempo, controlar de forma eficiente a temperatura no interior das câmaras de refrigeração. Portas abertas, envolvente, dimensionamento dos equipamentos de frio, iluminação e equipamentos que produzem calor são os principais contribuintes para os ganhos térmicos. Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho energético de câmaras de refrigeração industrial, estimar os principais ganhos térmicos, e avaliar medidas de melhoria para redução de consumos a custos coerentes.

Para isso foi utilizado o *software* de simulação dinâmica *EnergyPlus*. Construiu-se o modelo de edifício com o apoio da ferramenta de desenho *Sketchup* e utilizou-se o *EnergyPlus* para realizar a avaliação do desempenho térmico e energético. Para conjugar o modelo criado na ferramenta de desenho com o *software* de simulação, foi utilizado o *plugin* *OpenStudio*, que nos permite exportar os dados do modelo tridimensional para o *EnergyPlus*. Finalmente foram testadas as propostas de melhoria que se consideraram convenientes através de simulações dinâmicas. Alterações ao nível do sistema de refrigeração utilizado, alteração de proteções de portas e também de envolvente das câmaras de refrigeração são propostas apresentadas no presente trabalho.

Analisando os resultados obtidos verifica-se que a proposta mais eficaz passa pela utilização de um sistema a operar com compressores de duplo estágio de compressão para o ciclo de baixas temperaturas. No entanto, dado o elevado investimento que esta medida teria, a sua aplicação será mais adequada numa instalação nova. Verifica-se também que a proteção de porta cortinas de PVC é a medida a instalar que mais reduz o consumo energético.

**Palavras-chave:** Desempenho energético, refrigeração industrial, ganhos térmicos, simulação dinâmica.

## Abstract

One of the main costs reducing the competitiveness of the Portuguese industry derives from energy consumption. In agro-food industry, and specifically in fish processing and conservation, this cost mainly reflects the consumption related to refrigeration systems.

There are several types of thermal gains that cause inefficiency of the industrial refrigeration system. Major contributions to such gains include door openings, building envelope, size of the refrigerated system, lighting and equipment that releases heat. Those costs can be effectively lowered with minor changes to the system in order to improve energy efficiency. This does not affect the system's overall ability to regulate the indoor air in cooling chambers, allowing an efficient control over the temperature

This work aims to evaluate the energy performance of industrial refrigeration chambers, calculate thermal gains and analyze them in order to evaluate, which improvement measures might be taken to reduce consumption of consistent costs.

For that, the dynamic simulation software EnergyPlus was used. The Building model was generated with the support of Sketchup's drawing tool and then exported, by the plugin OpenStudio, to EnergyPlus, where its thermal and energy performances were assessed. Finally, proposals for improvements, which were considered suitable, were tested through dynamic simulations. This work proposes changes to the used cooling system, replacement of doors protection and cooling chambers envelope, in order to maximize overall efficiency of the refrigeration system.

After analyzing the simulation results it is concluded that the most efficient way to improve energy efficiency will be a two stage compression system. However, the advantages of this system are only fully demonstrated when used at the time of installation of a new system, rather than by being used in an existing system. In the case of existing systems, rather than replace the compression system, the most efficient way to lower energy consumption is to use Strip Curtains to minimize the airflow between two zones when the doors are opened.

**Keywords** Industrial Refrigeration, internal gains, energy efficiency, dynamic simulations.

## Índice

Índice de Tabelas .....	viii
Simbologia e Siglas .....	ix
Simbologia.....	ix
Siglas e Acrónimos.....	ix
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e Objetivo .....	1
1.2. Plano e Organização da Tese .....	2
1.3. Ferramentas Utilizadas .....	3
2. Sistemas De Refrigeração.....	4
2.1. Ciclo de compressão a vapor simples .....	4
2.1.1. Compressão (1-2) .....	5
2.1.2. Condensação (2-3).....	5
2.1.3. Expansão (3-4).....	6
2.1.4. Evaporação (4-1) .....	6
2.1.1. Coeficiente de Performance.....	6
2.2. Sistema de Refrigeração com Dois Estágios de Compressão .....	7
3. Descrição do Caso de Estudo .....	8
3.1. Edifício em estudo .....	8
3.2. Soluções Construtivas.....	10
3.3. Modelo tridimensional .....	12
3.4. Ganhos Internos .....	13
3.4.1. Iluminação .....	13
3.5. Equipamento .....	15
3.6. Ocupação .....	16
3.7. Sistema de Refrigeração Instalado.....	16
3.7.1. Evaporadores .....	17
3.7.2. Condensadores.....	17
3.7.3. Compressores .....	17
4. Modelação do Desempenho Energético .....	19
4.1. <i>Software</i> Utilizado .....	19
4.1.1. Parâmetros Gerais.....	19
4.1.2. Perfis.....	20
4.1.3. Materiais e Construção .....	23
4.1.4. Edifício .....	25
4.1.5. Ganhos Internos.....	28
4.1.6. Carga Térmica do Pescado .....	29
4.1.7. Abertura de Portas .....	31
4.1.8. Controlo do Ar Interior.....	32
4.1.9. Componentes do Sistema de Refrigeração .....	33
4.1.10. Curvas Características dos Compressores .....	36
4.2. Simulações Dinâmicas .....	38

---

4.2.1.	Simulação Base .....	38
4.2.2.	Medida de melhoria 1 - Isolamento 200mm.....	40
4.2.3.	Medida de melhoria 2 - Proteções de Portas .....	41
4.2.4.	Medida de melhoria 3 – Duplo Estágio de Compressão .....	44
4.2.5.	Medida de melhoria 4 – <i>Air Curtain + TwoStageComp</i> .....	46
4.2.6.	Análise de Temperatura.....	47
5.	Conclusões.....	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	50
	Caraterísticas Dos Equipamentos .....	51
	Perfis.....	52

## Índice de Figuras

Figura 2.1 Ciclo de compressão a vapor simples. Diagrama p-h e representação esquemática, (EnergyPlus, 2013). .....	5
Figura 2.2 Ciclo de refrigeração com duplo estágio de compressão, (EnergyPlus, 2013). ...	7
Figura 3.1 Disposição das zonas do edifício .....	9
Figura 3.2 Esquema representativo de paredes exteriores.....	10
Figura 3.3 Esquema representativo de paredes interiores .....	10
Figura 3.4 Disposição das Soluções Construtivas Exteriores .....	11
Figura 3.5 Modelo Tridimensional em <i>Sketchup</i> .....	12
Figura 3.6 Densidade de Iluminação .....	14
Figura 3.7 Densidade de Equipamento Elétrico .....	15
Figura 3.8 Níveis de ocupação .....	16
Figura 4.1 E+ Parâmetros Gerais.....	19
Figura 4.2 E+ Limites e Tipo de Perfis .....	21
Figura 4.3 E+ Perfis.....	21
Figura 4.4 E+ Materiais e Construção .....	23
Figura 4.5 E+ Materiais.....	23
Figura 4.6 E+ Edifício .....	25
Figura 4.7 E+ Parâmetros Gerais 1.....	25
Figura 4.8 E+ Ganhos Internos.....	28
Figura 4.9 E+ Ocupação .....	28
Figura 4.10 Características dos Tipos de Iluminação (EnergyPlus, 2013).....	29
Figura 4.11 Tipos de Iluminação (EnergyPlus, 2013).....	29
Figura 4.12 E+ Portas .....	32
Figura 4.13 E+ Termostatos .....	33
Figura 4.14 E+ Curvas Características dos Compressores.....	37
Figura 4.15 E+ Mensagem Final da Simulação.....	38
Figura 4.16 Consumo Energético Mensal (Simulação básica).....	39
Figura 4.17 Consumo Energético Mensal (Isolamento).....	40
Figura 4.18 Consumo Energético Mensal ( <i>Air Curtain</i> ).....	42
Figura 4.19 Consumo Energético Mensal ( <i>Strip Curtain</i> ) .....	43
Figura 4.20 Consumo Energético Mensal ( <i>Two Stage Comp.</i> ) .....	44
Figura 4.21 Consumo Energético Mensal (Conjunto de Melhorias).....	46



---

Figura 4.22 Evolução Anual da Temperatura – Zona 1 .....	47
Figura 4.23 Evolução Anual da Temperatura – Zona 2 .....	47
Figura 4.24 Evolução Anual da Temperatura – Zona 3 .....	48
Figure 0.1 Caraterísticas da cortina de ar (Thermal-Varme).....	51
Figure 0.2 Caraterísticas dos evaporadores .....	51

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 Medidas de comprimento e Temperaturas.....	9
Tabela 3.2 Dados de iluminação .....	13
Tabela 3.3 Dados dos evaporadores .....	17
Tabela 4.1 Soluções Construtivas Exteriores .....	24
Tabela 4.2 Soluções Construtivas Interiores 1 .....	24
Tabela 4.3 Soluções Construtivas Interiores 2 .....	24
Tabela 4.4 Lista de zonas de acordo com as temperaturas .....	27
Tabela 4.5 Características das Portas .....	31
Tabela 4.6 Características dos Evaporadores .....	36
Tabela 4.7 Consumo Energético Mensal (Simulação básica) .....	39
Tabela 4.8 Percentagem de Redução no Consumo Energético Mensal (Isolamento) .....	40
Tabela 4.9 Percentagem de Redução no Consumo Energético Mensal ( <i>Air Curtain</i> ) .....	42
Tabela 4.10 Percentagem de Redução no Consumo Energético Mensal ( <i>Strip Curtain</i> ) ..	43
Tabela 4.11 Percentagem de Redução no Consumo Energético Mensal ( <i>Two Stage Comp.</i> ) .....	45
Tabela 4.12 Percentagem de Redução no Consumo Energético Mensal (Conjunto de Melhorias) .....	46

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$c_{p1}$  – calor específico do pescado com temperatura acima da temperatura de congelação em [kJ/kgK]

$c_{p2}$  – calor específico do pescado com temperatura abaixo da temperatura de congelação em [kJ/kgK]

$h_1, h_2, h_3$  e  $h_4$  – entalpias específicas em [J/kg]

$h_c$  – calor latente do produto na congelação em [kJ/kg]

$m$  – massa do produto em [kg]

$\dot{m}$  – débito mássico em [kg/s]

$\dot{Q}_h$  – calor rejeitado pelo condensador em [W]

$\dot{Q}_l$  – capacidade de refrigeração em [W]

$T_1$  – temperatura inicial do produto acima da temperatura de congelação em [°C]

$T_2$  – temperatura final do produto abaixo da temperatura de congelação em [°C]

$T_c$  – temperatura de congelação do produto em [°C]

$\dot{W}_c$  – trabalho do compressor em [W]

### Siglas e Acrónimos

AE – Armazém de Embalagens

CAD – *Computer Aided Design*

CC1 – Câmara de Congelados 1

CC2 – Câmara de Congelados 2

CIRC – Circulação

CR1 – Câmara de Refrigerados 1

CR2 – Câmara de Refrigerados 2

DOE – *Department Of Energy*

E+ – *EnergyPlus*

EXTW – *Exterior Wall*

INTW – *Interior Wall*

OA – Oficina de Apoio

PUR – Poliuretano

RP – Recepção de Pescado

SG – Silo de Gelo

SM – Sala de Máquinas

ST – Sala de Trabalho

THZ – *Thermal Zone*

ZT – Zona de Trabalho

ZT2 – Zona de Trabalho 2

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento e Objetivo

O processo de globalização e a instauração de uma economia altamente competitiva exige às empresas uma maior eficiência nas suas atividades. O uso eficiente da energia não significa apenas uma redução nas despesas, mas também uma redução nos impactos ambientais. Além disso, a eficiência energética muitas vezes está ligada à melhoria na qualidade do ambiente de trabalho e do processo produtivo.

Neste sentido, a modelação do desempenho energético assume, cada vez mais, um papel fundamental. Com esta ferramenta podemos simular diversos cenários a partir de informações climáticas horárias da região, descrição arquitetónica e construtiva do edifício, padrões de utilização e ocupação, potência instalada em iluminação, equipamentos, características do sistema de refrigeração e planos tarifários. Conhecer bem onde se localizam os consumos de energia, definir estratégias para os diminuir e verificar a eficácia destas estratégias, traduzida na fatura energética versus investimento de implementação são uma ferramenta atual de extrema importância, (Mansk, 1999).

Assim, e num processo crescente com as preocupações com a redução dos desperdícios energéticos e preservação do ambiente, foram criados programas para atingir mais rapidamente esses objetivos. O projeto InovEnergy – Eficiência Energética no Setor Agroindustrial, COMPETE/SIAC – AAC1/SIAC/ 2011 – onde este trabalho se insere com o projeto número 18462.

Neste trabalho será simulado o desempenho energético do sistema de refrigeração de uma unidade de tratamento de pescado com a ajuda do programa de simulação energética *EnergyPlus*. Este trabalho tem como objetivo estudar alterações ao sistema de refrigeração e envolvente das câmaras de congelação e túnel de arrefecimento, com o intuito de melhorar a eficiência energética do edifício. Com o apoio desta ferramenta consegue avaliar-se, com bastante rigor, os consumos energéticos de uma instalação de pescado e aferir a eficácia das soluções de melhoria para a redução do consumo.

O processo de refrigeração tem como objetivo transferir a energia térmica em forma de calor de uma zona de baixa temperatura para uma de maior temperatura. Desta forma são mantidas as temperaturas baixas necessárias à conservação dos produtos alimentares. No tratamento de pescado e para garantir a qualidade do produto final, a manutenção destas temperaturas é um processo de extrema importância e deve ser executado com o maior rigor. Os vários estágios por onde passa o pescado, obrigam a zonas com diferentes temperaturas, nomeadamente a receção do pescado e preparação a 10°C, câmaras de refrigerados a 0°C, silo de gelo a -5°C e câmaras de congelação a -25°C.

No entanto vários fatores dificultam a manutenção destas temperaturas pelo facto de existirem ganhos térmicos indesejados. Portas abertas, fraco isolamento das paredes, equipamento e iluminação mal dimensionados ou desajustados são exemplos da origem desses ganhos térmicos, que provocam um aumento no consumo de energia. É o impacto de alguns destes fatores no consumo energético que irei analisar ao longo do trabalho.

Obtidos os valores dos consumos com as soluções propostas há finalmente que verificar a sua viabilidade financeira, através da análise do período de retorno.

## **1.2. Plano e Organização da Tese**

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos.

Neste primeiro capítulo é descrito o enquadramento e objetivo do trabalho bem como a metodologia adotada.

No segundo capítulo é feita uma análise teórica de um ciclo de refrigeração básico por compressão a vapor e de um ciclo de refrigeração em cascata. Estes ciclos são os mais utilizados nesta indústria e os sistemas de frio os responsáveis pelo sucesso da mesma. Para além da análise destes ciclos, ainda é feito um pequeno resumo do funcionamento de ciclos de refrigeração com duplo estágio de compressão. Neste trabalho, para além dos sistemas de refrigeração, não se pretende analisar o impacto de outros consumidores de energia (também importantes no consumo final do edifício).

O terceiro capítulo apresenta a descrição do caso de estudo, onde é feito o levantamento de todos os dados necessários para se iniciar a construção do edifício. O

conhecimento do edifício, não só da sua envolvente, mas da interação dos espaços, é fundamental para a compreensão de todo o processo.

No quarto capítulo é feita a modelação do desempenho energético e a análise de resultados. Aqui, pretende-se expor o modo de funcionamento do *software* de simulação *EnergyPlus* com base no modelo primário, sem propostas de melhoria. Serão explicados praticamente todos os *inputs* necessários para a realização das simulações. Neste penúltimo capítulo são apresentadas medidas de melhoria e é feita uma análise aos resultados obtidos através das simulações energéticas. Nesta secção cada subcapítulo apresentará uma proposta de melhoria diferente onde é feita uma análise à evolução da temperatura das câmaras de congelação e túnel de arrefecimento e ao consumo energético do edifício durante um período anual.

Por fim, no último capítulo (5) é apresentada uma conclusão sobre os resultados obtidos nas simulações realizadas no capítulo anterior.

### 1.3. Ferramentas Utilizadas

Ao longo da elaboração deste trabalho foram utilizados vários tipos de ferramentas. Inicialmente foram fornecidos, em formato de desenho (CAD), todo o tipo de informação necessária para o levantamento de dados - plantas do edifício, cortes, soluções construtivas, alçados, equipamento produtivo e iluminação.

Com o apoio do *software* de desenho *Sketchup*, obtido no website <http://www.sketchup.com/products/sketchup>, foi criado o modelo tridimensional do edifício.

Para o estudo do desempenho energético do edifício foi utilizada a ferramenta de simulação energética *EnergyPlus* que pode ser obtida gratuitamente em (<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>). Este *software* contém um *plugin* muito útil, o *OpenStudio* que se pode obter também gratuitamente, e que nos permite conjugar a elaboração do modelo 3D com o programa *EnergyPlus* (<https://openstudio.nrel.gov/>).

## 2. SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Geralmente, define-se a refrigeração como qualquer processo de remoção de calor. Mais especificamente, a refrigeração é definida como o ramo da ciência que trata dos processos de redução e conservação da temperatura de um espaço ou material, abaixo da temperatura do ambiente circundante, (Dossat, 2004).

Existem três principais tipos de sistemas de refrigeração:

- Por absorção
- Por efeitos termoelétricos
- Por compressão a vapor

Neste presente trabalho apenas serão analisados ciclos de compressão a vapor, sendo os mais utilizados nesta indústria. Inicialmente é explicado o funcionamento de um ciclo por compressão a vapor simples, sendo de seguida feita uma análise a um ciclo de refrigeração com duplo estágio de compressão.

### 2.1. Ciclo de compressão a vapor simples

Sistemas por compressão a vapor são os mais utilizados em instalações industriais para processamento e armazenamento de alimentos e o fluido frigorígeno mais utilizado nestes sistemas é o amoníaco (R-717), (Welch e Trott, 1999).

O ciclo de compressão a vapor é composto por quatro processos básicos: compressão, evaporação, expansão e condensação.

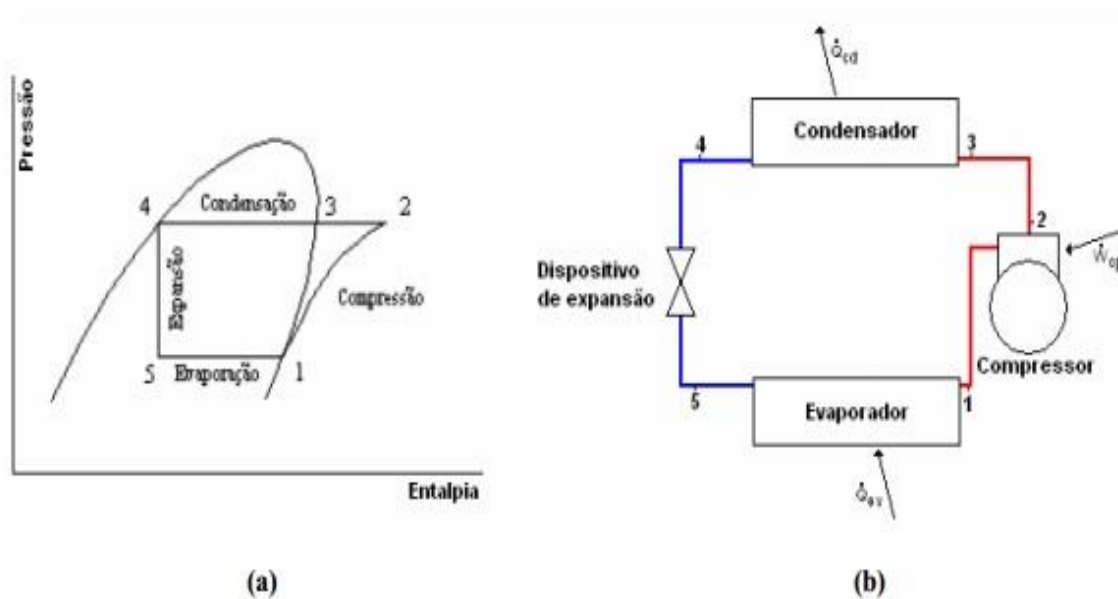


Figura 2.1 Ciclo de compressão a vapor simples. Diagrama p-h e representação esquemática, (EnergyPlus, 2013).

### 2.1.1. Compressão (1-2)

O fluido refrigerante entra no compressor no estado de vapor saturado [1b] onde é comprimido, elevando a sua pressão e a sua temperatura. O vapor saturado tem, nesta fase, as condições necessárias de temperatura e pressão para ser condensado através de água ou ar.

Num ciclo ideal, a compressão é considerada adiabática, desprezando-se as perdas. Mas, na prática, perde-se calor para o ambiente, o que não é significativo em relação à potência de compressão necessária. A potência de compressão ( $W$ ) pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\dot{W}_c = \dot{m} \times (h_2 - h_1) \quad (2.1)$$

### 2.1.2. Condensação (2-3)

É a etapa onde acontece a rejeição de calor, o vapor perde calor para o meio (ar ou água). O vapor sobreaquecido segue para o condensador onde é arrefecido e condensado atingindo assim o estado líquido. A condensação diz-se isobárica pelo facto de, neste processo, a pressão ser constante.

A capacidade de rejeição de calor do condensador pode-se exprimir-se através da seguinte equação:



$$\dot{Q}_h = \dot{m} \times (h_2 - h_3) \quad (2.2)$$

### 2.1.3. Expansão (3-4)

Seguido da condensação, o fluido é encaminhado para uma válvula de expansão onde é submetido a uma queda brusca de pressão, onde passa a ter dois estados, o líquido e o gasoso. O fluido frigorígeno é denominado '*flash-gas*' neste ponto. Num ciclo ideal, a expansão é considerada isentálpica, desprezando-se as variações de energia potencial e cinética.

$$h_3 = h_4 \quad (2.3)$$

### 2.1.4. Evaporação (4-1)

O fluido frigorígeno, no estado líquido, é então conduzido pelas serpentinas do evaporador, onde absorverá o calor do ar a ser refrigerado, evaporando-se. O ventilador efetua a circulação do ar a ser refrigerado, fazendo com que este entre em contacto com as serpentinas do evaporador. A capacidade de refrigeração é dada por:

$$\dot{Q}_l = \dot{m} \times (h_1 - h_4) \quad (2.4)$$

### 2.1.1. Coeficiente de Performance

O Coeficiente de Performance, ou COP (*'Coefficient Of Performance'*) é uma forma de avaliar o desempenho do sistema de refrigeração. É a razão da capacidade de retirar calor do espaço a refrigerar com a potência fornecida ao compressor. É dada através da seguinte equação:

$$COP = \dot{Q}_l / \dot{W}_c \quad (2.5)$$

Onde:

$\dot{m}$  – débito mássico em [kg / s]

$\dot{Q}_l$  – capacidade de refrigeração em [W]

$\dot{Q}_h$  – capacidade de rejeição de calor do condensador em [W]

$\dot{W}_c$  – potência do compressor em [W]

$h_1, h_2, h_3$  e  $h_4$  – entalpias específicas em [J / kg]

## 2.2. Sistema de Refrigeração com Dois Estágios de Compressão

Na refrigeração industrial, por vezes há necessidade de controlar diferentes espaços com temperaturas bastante diversas. Essa diferença de temperatura significa também que há um grande intervalo de pressões e um mau desempenho do compressor. Assim, um único ciclo de refrigeração por compressão não é a solução mais adequada, exigindo que se apliquem dois compressores a operar em série, executando assim uma refrigeração em dois estágios de compressão. Num ciclo de dois estágios, é necessária a introdução de um depósito de expansão com arrefecedor intermédio (*flash intercooler*) entre os dois sistemas. Para um arrefecedor de expansão intermédio bem isolado, a relação entre os caudais mássicos deve ser a razão entre as variações de entalpias (a de entrada menos a de saída) dos fluidos que estão no arrefecedor intermédio. Um facto a ser observado é que os fluidos frigorígenos usados nos dois ciclos têm que ser os mesmos (Stoecker e Jabardo, 2002).

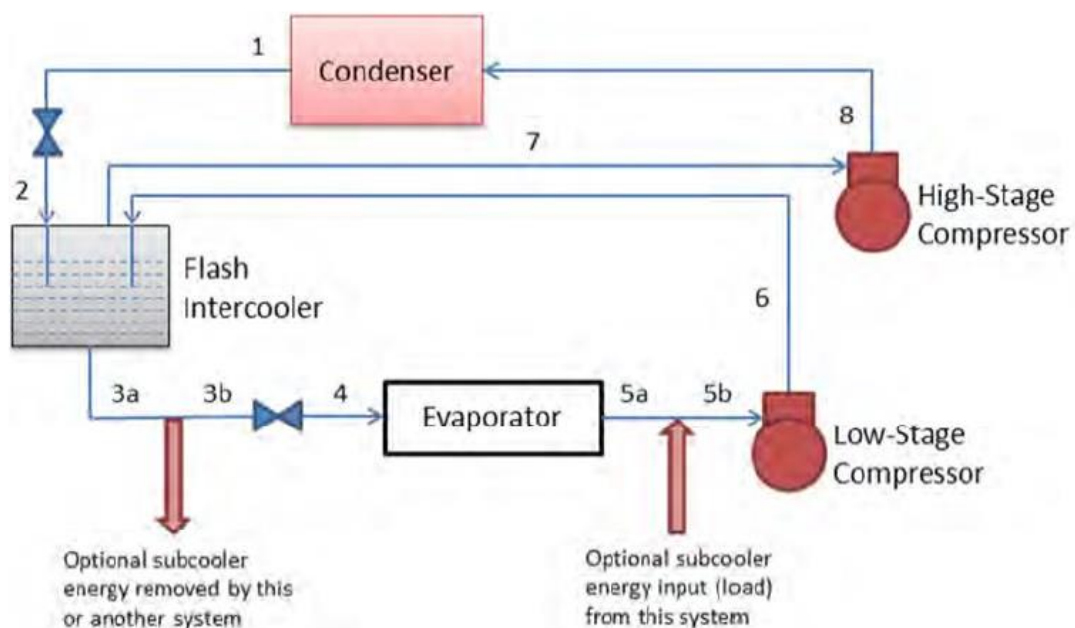


Figura 2.2 Ciclo de refrigeração com duplo estágio de compressão, (EnergyPlus, 2013).

### **3. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO**

#### **3.1. Edifício em estudo**

O edifício em estudo trata-se de um armazém de pescados, situado na zona industrial da Figueira da Foz junto ao porto.

Tem uma área de 3817m<sup>2</sup> e está dividido em 17 zonas, representadas na figura 3.1, sendo que dessas, 13 são zonas refrigeradas. As zonas 15 e 17 (dois pisos) são zonas de escritórios que, sendo climatizadas, não são contempladas no plano de trabalho. Já a zona 6 (sala de produtos de limpeza) e a zona 14 (Sala de Máquinas) são zonas que não se encontram controladas por qualquer tipo de sistema. As 13 zonas estudadas dividem-se em 4 níveis de temperatura. As zonas 1 e 2 (câmaras de congelação) e a zona 3 (túnel de arrefecimento) são zonas de baixa temperatura e funcionam a -25°C. A zona 13 (silo de gelo) necessita de estar a uma temperatura cerca de -5°C para a produção de gelo. As zonas 4 e 5 (câmaras de refrigeração) servem para armazenar temporariamente o pescado e estão a 0°C. As restantes são zonas de trabalho, armazenamento, circulação e sala de máquinas e requerem uma temperatura de 10°C.

As câmaras de congelação 1 e 2 têm respetivamente 410m<sup>2</sup> e 857m<sup>2</sup> de área. O túnel de arrefecimento tem 50m<sup>2</sup>, bem como a câmara de refrigerados 1 (zona4). Já a câmara de refrigerados 2 (zona5) tem uma área de 93m<sup>2</sup>.

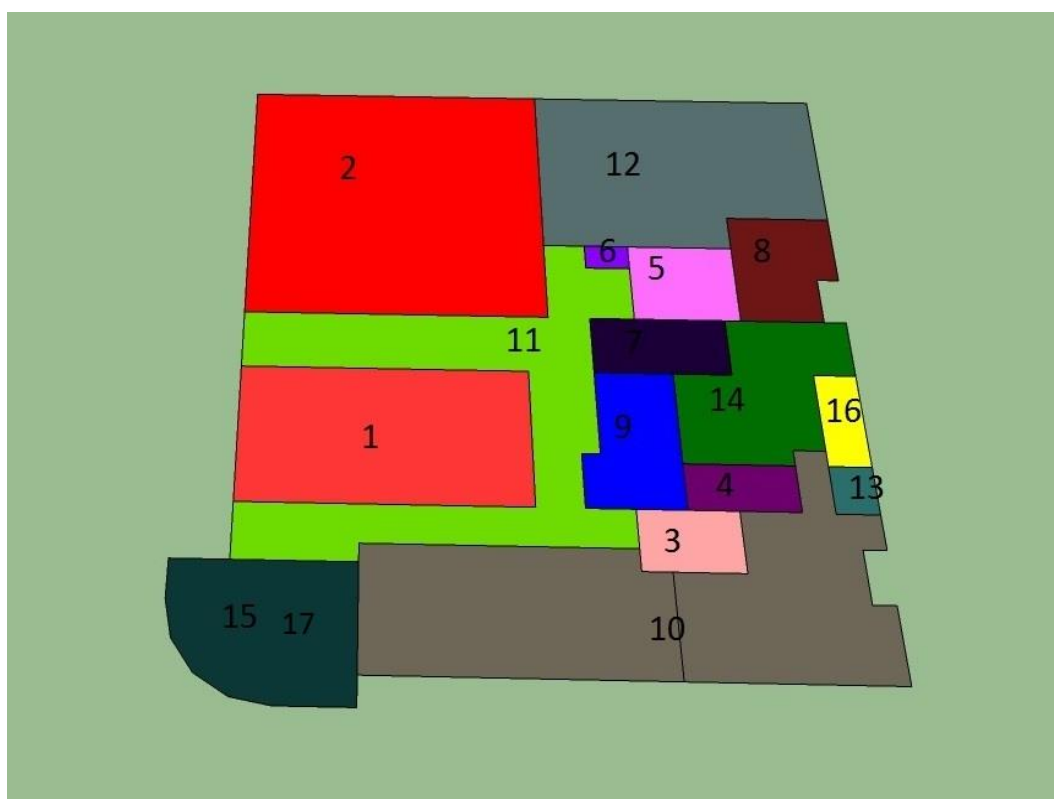


Figura 3.1 Disposição das zonas do edifício

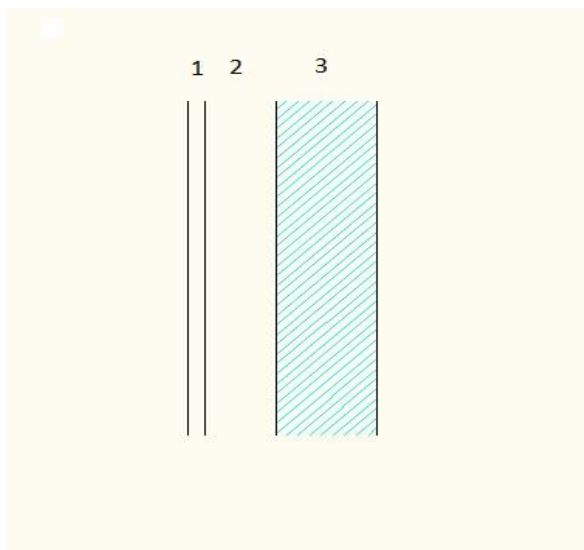
Tabela 3.1 Medidas de comprimento e Temperaturas

Zona	Sala	Área [m <sup>2</sup> ]	Altura [m]	Temperatura [°C]
1	Câmara de Congelação 1	410	6.5	-25
2	Câmara de Congelação 2	857	6.5	-25
3	Túnel de Arrefecimento	60	4	-25
4	Câmara de Refrigerados 1	51	4	0
5	Câmara de Refrigerados 2	93	4	0
7	Armazém de Embalagens	85	4	10
8	Receção de Pescado	121	5.5	10
9	Sala de trabalho	123	6.5	10
10	Zona de Trabalho	642	5.5	10
11	Circulação	534	4	10
12	Zona de Trabalho 2	578	5.5	10
13	Silo de Gelo	20	4.5	-5
16	Oficina de Apoio	40	4	10

### 3.2. Soluções Construtivas

O edifício é constituído por duas soluções construtivas: uma para a envolvente exterior e outra para o interior. As duas soluções diferem pelo facto das paredes exteriores terem uma caixa-de-ar e uma camada de chapa antes do isolamento em poliuretano. Para ambas as soluções, a espessura do material isolante varia consoante as temperaturas desejadas para cada zona e a orientação do edifício. Por exemplo, para as câmaras de congelação a espessura de poliuretano é de 150mm e para zonas de trabalho, não estando a temperaturas tão baixas, apenas 60mm de isolante é suficiente. No subcapítulo 4.1.3.2 estas soluções estão apresentadas numa tabela, juntamente com os seus valores de coeficiente de transmissão de calor ( $U$ ).

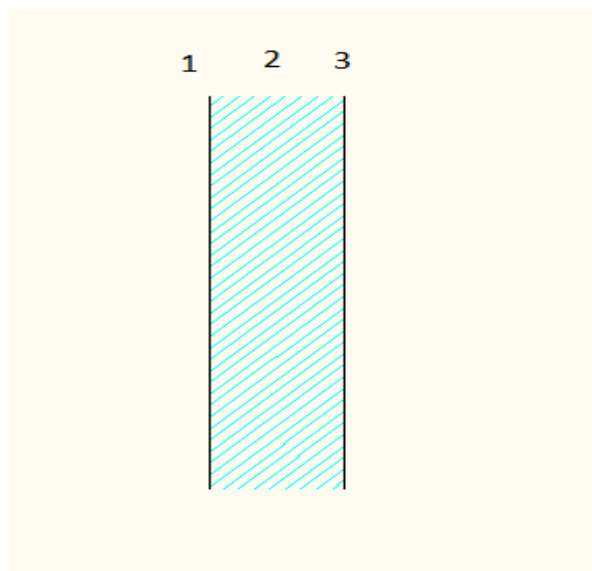
#### Paredes Exteriores



- 1- Chapa lacada ondulada  $e=1\text{mm}$
- 2- Caixa-de-Ar  $e=35\text{mm}$
- 3- PUR (150mm, 100mm e 60mm) entre duas placas de chapa lacada cada uma com 0,63mm de espessura.

Figura 3.2 Esquema representativo de paredes exteriores

#### Paredes Interiores



- 1- Chapa lacada  $e=0,63\text{mm}$
- 2- PUR (150mm, 100mm e 80mm)
- 3- Chapa Lacada  $e=0,63\text{mm}$

Figura 3.3 Esquema representativo de paredes interiores

### Esquema das soluções Construtivas

Para a envolvente das câmaras de congelação e túnel de arrefecimento o isolamento utilizado tem uma espessura de 150mm. Nas zonas das câmaras de refrigerados a espessura de isolamento é de 80mm. Para a zona do silo de gelo utiliza-se 100mm de poliuretano e, para as restantes zonas, a envolvente está isolada com 60mm de espessura de PUR.

Nota: A parede da zona de trabalho (zona 10) em contacto com a circulação tem um isolamento de 80mm.

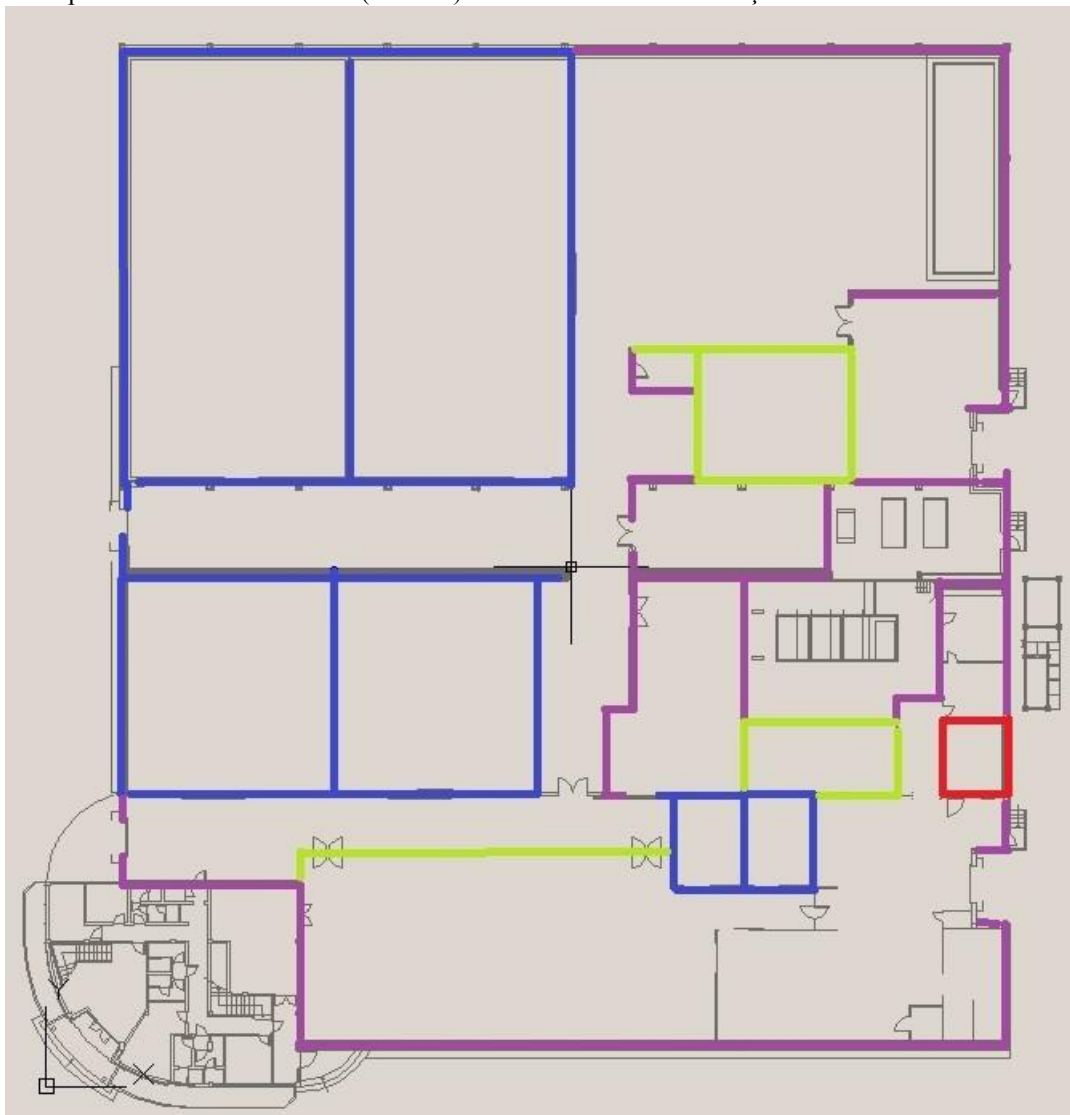


Figura 3.4 Disposição das Soluções Construtivas Exteriores

Isolamento 150mm (PUR)  
Isolamento 100mm (PUR)  
Isolamento 80mm (PUR)  
Isolamento 60mm (PUR)

### 3.3. Modelo tridimensional

Para construir o modelo do edifício foi utilizada a ferramenta de desenho *Sketchup 2013*. Foram criadas todas as zonas do edifício, foram definidos todos os contactos de paredes, as soluções construtivas, janelas e portas.

Para o modelo ficar definido no simulador *EnergyPlus* foi utilizado o *plugin OpenStudio* que nos permite exportar a geometria e soluções construtivas do modelo para o programa de simulação. É nesta conversão que ocorrem mais erros durante a montagem do modelo. Devido à existência de paredes não convexas, superfícies em contacto mal definidas, entre outros erros, o programa não consegue definir corretamente o edifício e impede que a simulação seja feita. Só depois de ultrapassados estes problemas é que será possível correr a simulação desejada.

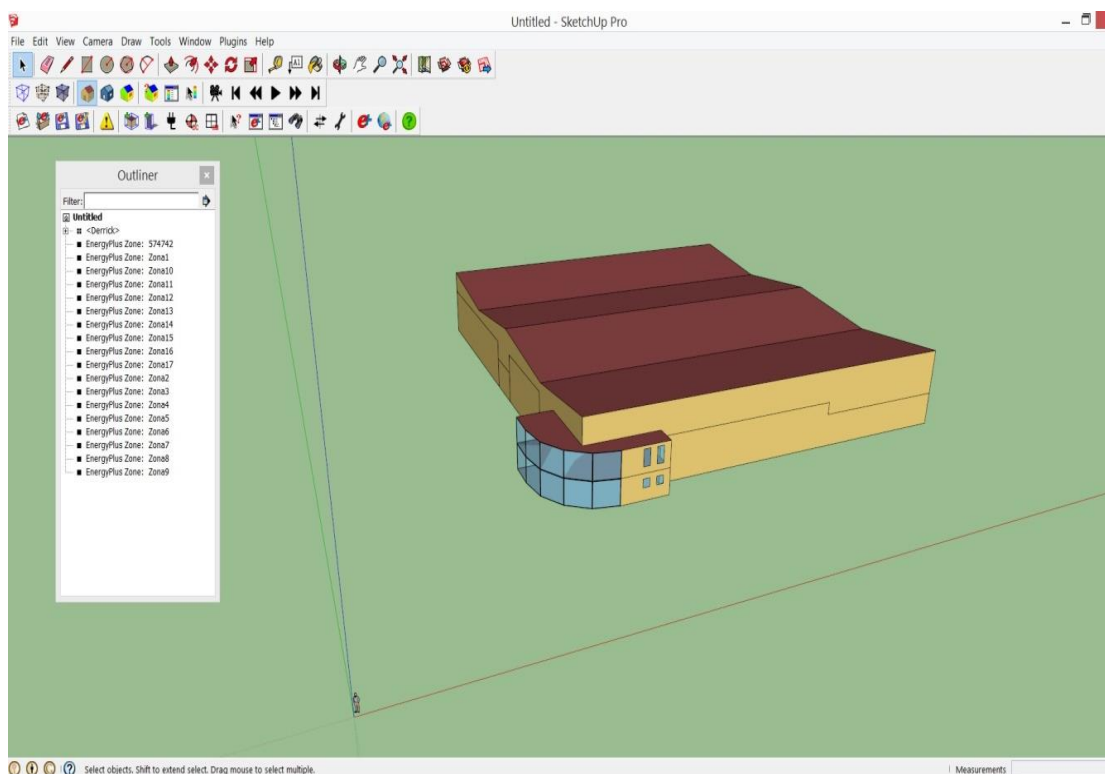


Figura 3.5 Modelo Tridimensional em Sketchup

### 3.4. Ganhos Internos

A principal função de um sistema de refrigeração consiste em extrair o calor de zonas que se querem a baixas temperaturas e libertá-lo no ambiente exterior. Como é sabido, existem várias fontes de ganhos térmicos indesejáveis, em que a iluminação, equipamentos, ocupação, portas abertas, paredes e carga térmica do pescado são as principais razões desses ganhos. Neste capítulo apresentam-se dados relativos à iluminação, ocupação e equipamentos elétricos existentes no edifício. Não tendo acesso à quantidade de produto (peixe) armazenado, serão adotados valores que se encontram apresentados no subcapítulo 4.1.6.

#### 3.4.1. Iluminação

Com o apoio das plantas do projeto de iluminação, foram retiradas informações da iluminação existentes em cada zona do edifício que se listam na tabela 3.2.

A iluminação nas câmaras de congelação e túnel de arrefecimento é do tipo AX (2x58W) e A6 (2x58W). Após o levantamento da iluminação de todo o edifício foram contabilizadas 127 lâmpadas do tipo A1, 27 do tipo A2, apenas uma do tipo A3, 28 do tipo AX e 8 do tipo A6.

Na Figura 3.6 apresentam-se os níveis de densidade de iluminação existentes em cada zona.

**Tabela 3.2 Dados de iluminação**

Zona	Iluminação					Potencia Elétrica [W]	Densidade de Iluminação [W/m <sup>2</sup> ]
	A1	A2	A3	AX	A6		
	2x58W	2x36W	2x18	2x58W	2x58W		
	116	72	36	116	116		
1	0	0	0	0	4	464	1.1
2	0	0	0	8	0	928	1.1
3	0	0	0	0	4	464	8.5
4	4	0	0	0	0	464	9.8
5	4	0	0	0	0	464	5.2
7	6	0	0	0	0	696	8.5
8	8	0	0	2	0	1160	9.8
9	6	0	0	1	0	812	6.9
10	33	27	0	0	0	5772	9.0
11	20	0	0	3	0	2668	5.6
12	40	0	0	10	0	5800	10.0
13	0	0	0	0	0	0	0.0
14	3	0	0	4	0	464	2.5
16	3	0	0	0	0	348	9.2



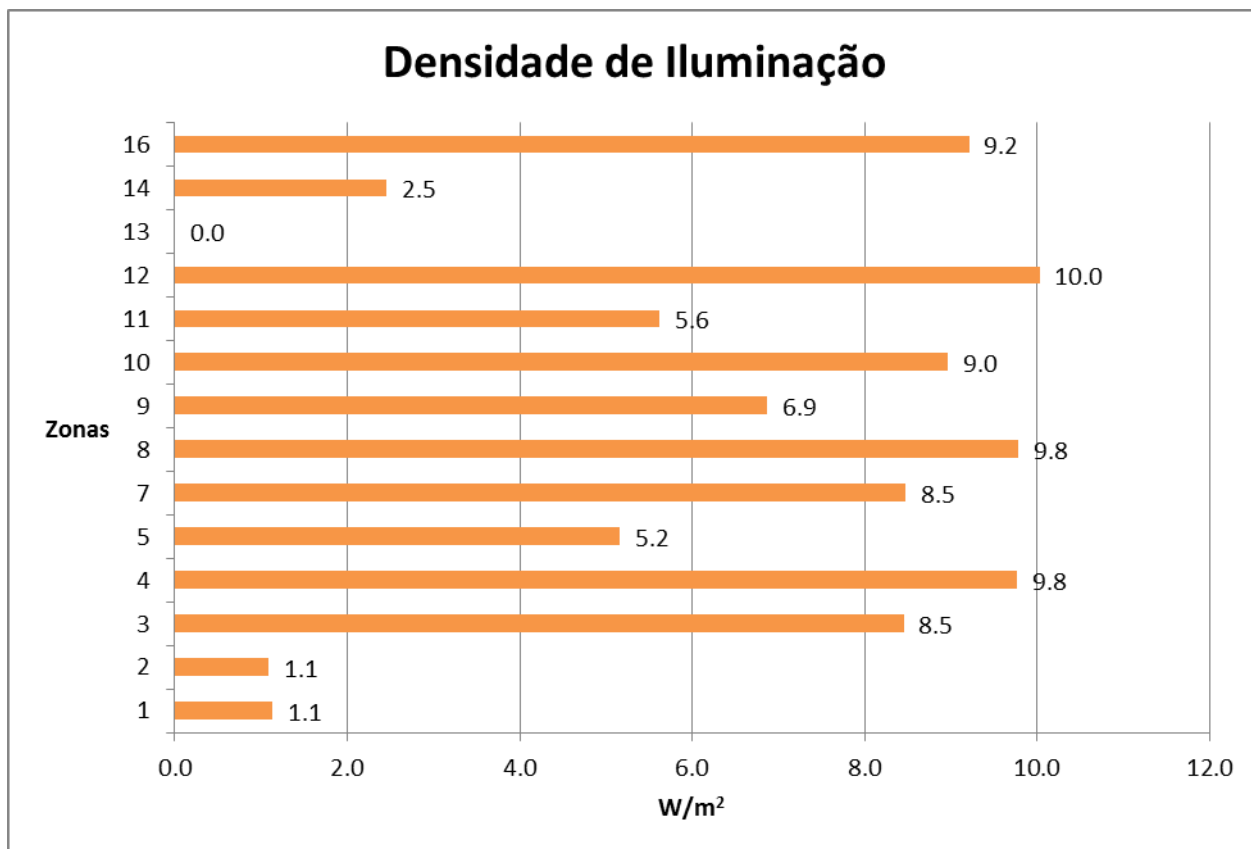


Figura 3.6 Densidade de Iluminação

### 3.5. Equipamento

Relativamente ao equipamento elétrico presente no edifício, não tendo dados concretos dos equipamentos existentes em cada espaço, foram feitas algumas considerações.

A zona de receção de pescado (zona 8) e as zonas de trabalho (zonas 10 e 12) são espaços onde existem mais equipamentos de trabalho a gerar ganhos térmicos como exemplo as empilhadoras em constante funcionamento, foram definidas as maiores densidades de equipamento elétrico para estes espaços. Numa sala de trabalho (zona 9) que apenas deverá ter pequenos equipamentos de trabalho como por exemplo computadores. Nas zonas das câmaras de congelação e refrigeração os únicos equipamentos a gerar ganhos térmicos são as empilhadoras mas que acabam por não estar com tanta frequência no interior destes espaços.

Assim, com estas considerações, foram adotados os valores que se encontram na Figura 3.7.

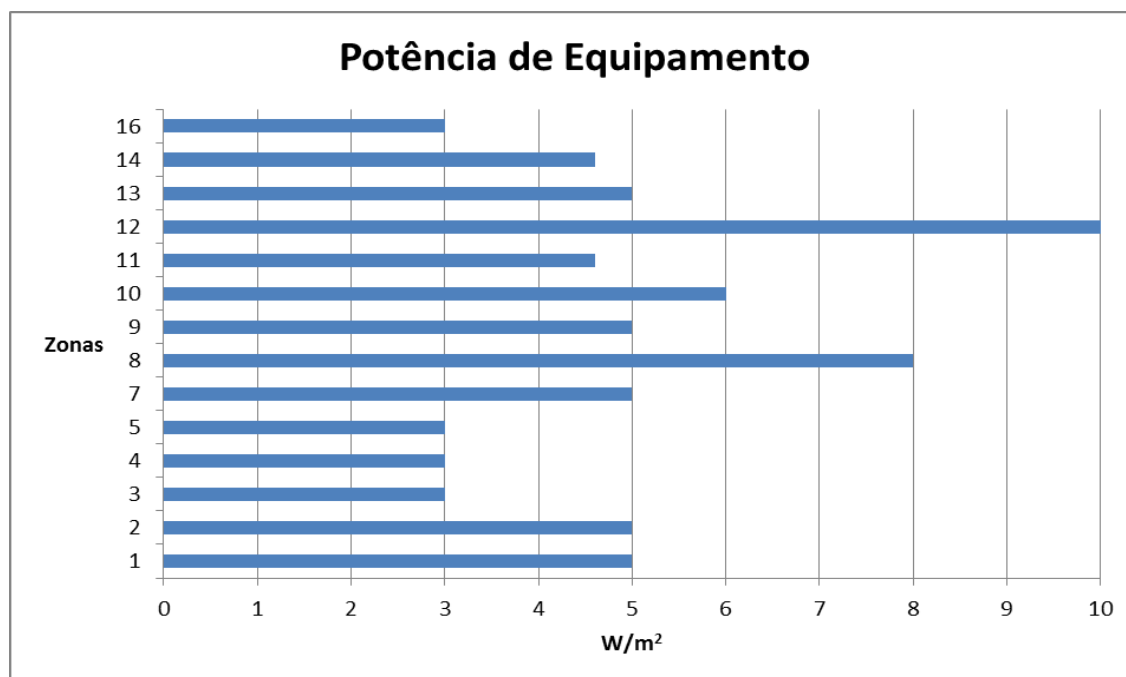


Figura 3.7 Potência de Equipamento Elétrico

### 3.6. Ocupação

Neste campo são contabilizados os ganhos térmicos por ocupação do espaço. Para cada zona foram criados perfis de ocupação que se encontram em anexo. As zonas de trabalho (zona 10 e 12), circulação (zona 11) e receção de pescado (zona 8) são as zonas com maior taxa de ocupação. Para estas zonas adotou-se o valor de 0,020 pessoas/m<sup>2</sup>. Para as restantes zonas são consideradas 0,011 pessoas/m<sup>2</sup>.

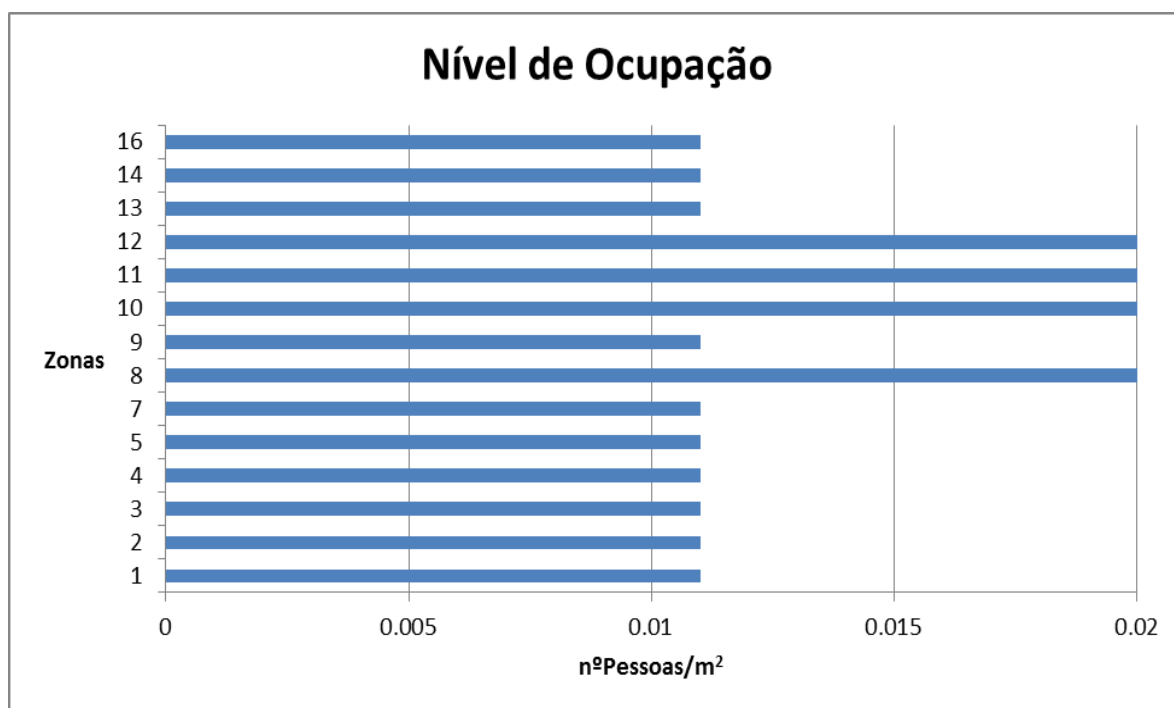


Figura 3.8 Níveis de ocupação

### 3.7. Sistema de Refrigeração Instalado

A instalação estudada está dividida em dois sistemas de refrigeração, que visam servir dois conjuntos de zonas de temperaturas diferentes. Uma zona de baixa temperatura (-25°C) e outra de média temperatura (entre -5°C a 10°C).

O ciclo de média temperatura é servido por um condensador “EVAPCO-LCSB-240”, por quatro compressores de parafuso (dois “BITZER-OSKA-8561-K” e dois “BITZER-OSKA-8591-K”) e é utilizado o fluido frigorígeno amoníaco (NH<sub>3</sub>). O ciclo de baixas temperaturas é servido por um condensador idêntico, também utiliza o mesmo fluido frigorígeno NH<sub>3</sub> e tem dois compressores de parafuso “BITZER-OSNA-8591-K” associados. As características dos condensadores e compressores apresentam-se no capítulo 4.1.9.2 e 4.1.9.3 respetivamente.

### 3.7.1. Evaporadores

Todos os evaporadores presentes na instalação são produtos da empresa *GEA Kuba*. Foram contabilizados os seguintes evaporadores:

**Tabela 3.3 Dados dos evaporadores**

Evaporador	SGK 56-N62	SGK 56-N63	SGK 56-N64	SGK 56-N65	SGK 80-N84
Quantidade	13	6	3	5	1
Capacidade [kW]	22	35	45	60	138.5
Fluxo de Ar [m <sup>3</sup> /s]	4.2	6.3	8.4	10.5	22
Potência do Motor [kW]	1626	2439	3252	4065	6520

\*por cada ventilador existente no evaporador

Nomenclatura:

Da denominação de cada evaporador é possível retirar vários dados sobre este. “K” significa que tem 10mm de espaçamento entre alhetas; “56” indica que cada ventilador do evaporador tem 560mm de diâmetro; “N” diz-nos que o fluido frigorígeno utilizado é NH<sub>3</sub>; o número “62” por exemplo, indica que tem 2 ventiladores cada um com 6 fiadas de tubos.

### 3.7.2. Condensadores

Os dois condensadores selecionados são exatamente o mesmo modelo “EVAPCO-LSCB-240” e têm as seguintes características:

Capacidade de rejeição de calor: 1033kW

Fluxo de Ar: 15m<sup>3</sup>/s

Potência do Motor: 15kW

Potência da bomba de água: 1,5kW

### 3.7.3. Compressores

“O compressor é o coração de qualquer sistema de refrigeração ou sistema de climatização”, em [www.Bitzer.de](http://www.Bitzer.de)

Os compressores selecionados são produtos do grupo Bitzer, uma das empresas líder deste tipo de equipamento a nível mundial. Foram selecionados três tipos de equipamento semelhantes, como já foi dito anteriormente: “BITZER-OSNA-8591-K” para o sistema de baixa temperatura; “BITZER-OSKA-8561-K” e “BITZER-OSKA-8591-K”

para o sistema de média temperatura. Do nome de cada compressor podemos retirar alguma informação sobre as características de cada equipamento. “OS” significa que se trata de compressores de parafuso (*Open Screw*); a letra “N” ou “K” representa a gama de temperatura em que o aparelho trabalha (“N” para baixas temperaturas e “K” para temperaturas médias); a letra “A” indica que trabalha com o fluido refrigerante NH<sub>3</sub> conhecido por amoníaco. O último “K” diz-nos que o compressor tem acoplamento de eixo, separável quando montado, permitindo trabalhos de manutenção no ventilador e no motor, sem os desmontar da armação de base.


## 4. MODELAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO

### 4.1. Software Utilizado

O *EnergyPlus* é um *software* de simulação através do qual se pode analisar o comportamento térmico e energético de uma variedade de tipos de edifícios, nomeadamente em edifícios de habitação, escritórios, refrigeração comercial e industrial, complexos desportivos como piscinas, entre muitos.

Este capítulo serve para explicar, de uma forma sucinta, o modo de funcionamento do programa, bem como alguns dos *inputs* necessários à realização das simulações energéticas. Para isso, os valores que se apresentam nos vários objetos, correspondem aos valores que serão utilizados na simulação mais básica (simulação que não contempla qualquer proposta de melhoria).

#### 4.1.1. Parâmetros Gerais



```
[0001] Version
[0001] SimulationControl
[0001] Building
[0001] Timestep
[0001] Site:Location
[0001] RunPeriod
[0002] RunPeriodControl:SpecialDays
[0001] RunPeriodControl:DaylightSavingTime
[0001] Site:GroundTemperature:BuildingSurface
[0007] Schedule:TypeLimits
[0073] Schedule:Compact
[0017] Material
[0003] Material:AirGap
[0001] WindowMaterial:Glazing
[0001] WindowMaterial:Gas
[0018] Construction
[0001] GlobalGeometryRules
[0018] Zone
[0003] ZoneList
[0288] BuildingSurface:Detailed
[0055] FenestrationSurface:Detailed
[0015] People
[0014] Lights
```

Figura 4.1 E+ Parâmetros Gerais

Apesar de, no decorrer deste trabalho, já ter sido disponibilizada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) uma nova versão do simulador (8.0.1.009), a versão utilizada é a 8.0.0.008, visto que o sistema já estava praticamente montado nesta versão quando a última versão foi disponibilizada.

O campo *Simulation Control* permite definir se a simulação é feita anualmente ou apenas num intervalo de tempo pré-definido. Para a realização deste trabalho foram feitas simulações anuais.

Em *Timestep* define-se o intervalo de tempo da simulação. Com o valor introduzido de 4, os *outputs* da simulação são apresentados de de 15 em 15 minutos.

Em *Site:Location* definem-se as coordenadas geográficas do local para o programa saber onde se encontra o edifício. Coimbra tem os seguintes valores: latitude 40.2°, longitude -8.42°, altitude 43m, e o fuso horário GMT 0.

É no campo *RunPeriod* que se definem as características de apresentação dos resultados. Aqui são definidas as datas de início e de fim da simulação que, neste caso, como a simulação é anual, marcou-se o início no dia 1 de janeiro e o final dia 31 de dezembro. É neste espaço que ainda se pode definir se se dá especial atenção aos dias como fins de semana ou feriados. Neste trabalho foi considerado que o sistema está todos os dias do ano com o mesmo plano de funcionamento.

#### **4.1.2. Perfis**

Os perfis vão definir o comportamento de determinadas variáveis. Com a utilização de perfis vamos conseguir dar a conhecer ao programa, os horários em função das cargas de utilização, como o intervalo de temperatura que uma câmara terá de funcionar, como o comportamento de um determinado equipamento. Quanto melhor conhecermos a utilização e o comportamento do edifício, dos seus ocupantes, equipamentos, melhor iremos definir os perfis. Com a atribuição de um perfil a um campo, por exemplo ocupação, vamos indicar ao programa qual o horário em que os espaços estão ocupados e com quantas pessoas, pois o seu numero varia ao longo do dia e do ano. A iluminação, ocupação, equipamentos, termostatos, evaporadores são campos em que é necessário definir perfis. É neste espaço que vão ser criados todos os perfis que vão ser necessários para a realização da simulação.

##### **4.1.2.1. Tipos e Limites de Perfis**

Assim existem vários tipos de perfis que se aplicam conforme a grandeza que estamos a definir ao programa. É neste campo onde se especifica o tipo de valores e limites em que as diversas variáveis e grandezas vão trabalhar. Foram criados sete tipos perfis que são os seguintes:

*Any Number*-

*Fraction* – valores percentuais entre 0 e 1;

*Temperature* – gama de temperaturas entre -60°C e 200°C;

*On/Off* – 0: OFF; 1: ON;

*Control Type* – entre 0 e 4 sendo: 0 – zona não controlada; 1 – aquecimento simples; 2 – arrefecimento simples; 3 – aquecimento/arrefecimento simples; 4 – controlo duplo de arrefecimento/aquecimento;

*Humidity* – valores de humidade relativa entre 10 e 90

*Number*

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name		Any Number	Fraction	Temperature	On/Off	Control Type	Humidity	Number
Lower Limit Value	varies		0	-60	0	0	10	
Upper Limit Value	varies		1	200	1	4	90	
Numeric Type			CONTINUOUS	CONTINUOUS	DISCRETE	DISCRETE	CONTINUOUS	
Unit Type								

Figura 4.2 E+ Limites e Tipo de Perfis

#### 4.1.2.2. Definição de Perfis

É neste campo que são criados todos os perfis necessários à simulação. Para cada perfil define-se o nome, o tipo de grandeza a que se refere e a evolução horária que toma. Para todos, foram criados perfis constantes, ou seja, não mudam os seus valores durante o ano todo.

Exploration of Object and Current Field

Object Description: Irregular object. Does not follow the usual definition for fields: Fields A3...  
Through, Date  
For Applicable days (ref. Schedule Week-Compact)  
Interpolate: Yes/No (ref. Schedule Day/Interval) – optional, if not used will be "No"  
Unit: <Time> (ref. Schedule Day/Interval)  
(numeric values)  
words "Through", "For", "Interpolate", "Unit" must be included.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8
Name		Always On	Always On	Always Off	Light_TH21	Occup_TH21	Equip_TH21	Light_TH22	Occup_TH22
Schedule Type Limits Name		On/Off	Fraction	Fraction	Fraction	Fraction	Fraction	Fraction	Fraction
Field 1	varies	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 08/31	Through: 08/31	Through: 08/31	Through: 08/31	Through: 08/31
Field 2	varies	For: Weekdays Sun	For: AllDays	For: AllDays	For: Weekdays Sun	For: Weekdays Sun	For: Weekdays Sun	For: Weekdays Sun	For: Weekdays Sun
Field 3	varies	Unit: 06.00	Unit: 24.00	Unit: 24.00	Unit: 08.00	Unit: 08.00	Unit: 08.00	Unit: 08.00	Unit: 08.00
Field 4	varies	0	1	0	0	0	0	0	0
Field 5	varies	Unit: 22.00			Unit: 09.00	Unit: 09.00	Unit: 09.00	Unit: 09.00	Unit: 09.00
Field 6	varies	1			0.5	0.1	0	0	0.1
Field 7	varies	Unit: 24.00			Unit: 13.00	Unit: 10.00	Unit: 10.00	Unit: 13.00	Unit: 10.00
Field 8	varies	0			1	0.9	1	0.9	0.9
Field 9	varies	For: Saturday Winter			Unit: 14.00	Unit: 13.00	Unit: 13.00	Unit: 14.00	Unit: 13.00
Field 10	varies	Unit: 06.00			0	1	1	0	1
Field 11	varies	0			Unit: 18.00	Unit: 14.00	Unit: 14.00	Unit: 18.00	Unit: 14.00
Field 12	varies	Unit: 18.00			1	0.7	1	0	0
Field 13	varies	1			Unit: 19.00	Unit: 15.00	Unit: 15.00	Unit: 19.00	Unit: 15.00
Field 14	varies	Unit: 24.00			0.5	0.9	0.9	0.5	0.9
Field 15	varies	0			Unit: 24.00	Unit: 18.00	Unit: 18.00	Unit: 24.00	Unit: 18.00
Field 16	varies	For: Sunday Holiday			0	1	1	0	1
Field 17	varies	Unit: 24.00			For: Saturday	Unit: 19.00	Unit: 19.00	For: Saturday	Unit: 19.00
Field 18	varies	0			Unit: 24.00	0.2	0.2	Unit: 24.00	0.2

Figura 4.3 E+ Perfis

De seguida são apresentados todos os perfis utilizados nas simulações. Em anexo encontra-se a evolução horária de alguns destes perfis.

#### Perfis gerais:

*Hours of Operation (On/Off)*

*Always On (Fraction)*



*Always Off (Fraction)*

*Activity Schedule (On/Off)*

**Perfis de iluminação, ocupação e equipamentos para as 16 zonas em questão:**

*Light\_THZ1 – Light\_THZ16 (Fraction)*

*Occup\_THZ1 – Occup\_THZ16 (Fraction)*

*Equip\_THZ1 – Equip\_THZ16 (Fraction)*

**Perfis de controlo do ar interior:**

*Cooling SetPoint (Control Type)*

*Temperature\_CC (Temperature)*

*Temperature\_CR (Temperature)*

*Temperature\_Silo (Temperature)*

*Temperature\_Outros (Temperature)*

*Seasonal Relative Humidity Schedule (Humidity)*

**Perfis de descongelação:**

*AirChillerDefrostSched1 (On/Off)*

*AirChillerDripDownSched1 (On/Off)*

**Perfis de abertura de portas e infiltração:**

*DoorSchedA (Any Number)*

*DoorSchedB (Any Number)*

*DoorSchedC (Any Number)*

*Infiltration Schedule (Any Number)*

### 4.1.3. Materiais e Construção



Figura 4.4 E+ Materiais e Construção

#### 4.1.3.1. Material

É neste espaço que são definidos os materiais usados para as soluções construtivas do edifício. Para ficarem caracterizados é necessário definir o nome, rugosidade, espessura, condutibilidade térmica, densidade e calor específico para cada um dos materiais.

#### Materiais utilizados:

Poliuretano (PUR)

Chapa Lacada

Chapa

Field	Units	Obj10	Obj11	Obj12	Obj13	Obj14	Obj15	Obj16	Obj17
Name		G05 25mm wood	PUR 60	PUR 80	PUR 100	PUR 120	PUR 150	Chapa Lacada	Chapa
Roughness		MediumSmooth	MediumRough	MediumRough	MediumRough	MediumRough	MediumRough	MediumSmooth	MediumSmooth
Thickness	m	0.0254	0.06	0.08	0.1	0.12	0.15	0.004	0.00063
Conductivity	W/m-K	0.15	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	50	50
Density	kg/m3	608	40	40	40	40	40	7800	7800
Specific Heat	J/kg-K	1630	1400	1400	1400	1400	1400	486	486
Thermal Absorptance			0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Solar Absorptance			0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Visible Absorptance			0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7

Figura 4.5 E+ Materiais

#### 4.1.3.2. Soluções Construtivas

Depois de definidos os materiais e as suas características, é neste espaço que se definem as soluções construtivas existentes no edifício. Para isso, são listados os materiais por camadas, do exterior para o interior.

**Tabela 4.1 Soluções Construtivas Exteriores**

EXTW150 (U=0.228W/m <sup>2</sup> K)		EXTW100 (U=0.330W/m <sup>2</sup> K)		EXTW60 (U=0.512W/m <sup>2</sup> K)	
Material	Espessura [m]	Material	Espessura [m]	Material	Espessura [m]
Chapa Lacada	4x10 <sup>-3</sup>	Chapa Lacada	4x10 <sup>-3</sup>	Chapa Lacada	4x10 <sup>-3</sup>
Caixa de Ar	3.5x10 <sup>-1</sup>	Caixa de Ar	3.5x10 <sup>-1</sup>	Caixa de Ar	3.5x10 <sup>-1</sup>
Chapa	6.3x10 <sup>-4</sup>	Chapa	6.3x10 <sup>-4</sup>	Chapa	6.3x10 <sup>-4</sup>
PUR	1.5x10 <sup>-1</sup>	PUR	1x10 <sup>-1</sup>	PUR	6x10 <sup>-2</sup>
Chapa	6.3x10 <sup>-4</sup>	Chapa	6.3x10 <sup>-4</sup>	Chapa	6.3x10 <sup>-4</sup>

**Tabela 4.2 Soluções Construtivas Interiores 1**

INTW150 (U=0.233W/m <sup>2</sup> K)		INTW100 (U=0.339W/m <sup>2</sup> K)	
Material	Espessura [m]	Material	Espessura [m]
Chapa	6.3x10 <sup>-4</sup>	Chapa	6.3x10 <sup>-4</sup>
PUR	1.5x10 <sup>-1</sup>	PUR	1x10 <sup>-1</sup>
Chapa	6.3x10 <sup>-4</sup>	Chapa	6.3x10 <sup>-4</sup>

**Tabela 4.3 Soluções Construtivas Interiores 2**

INTW80 (U=0.433W/m <sup>2</sup> K)		INTW60 (U=0.536W/m <sup>2</sup> K)	
Material	Espessura [m]	Material	Espessura [m]
Chapa	6.3x10 <sup>-4</sup>	Chapa	6.3x10 <sup>-4</sup>
PUR	8x10 <sup>-2</sup>	PUR	6x10 <sup>-2</sup>
Chapa	6.3x10 <sup>-4</sup>	Chapa	6.3x10 <sup>-4</sup>

#### 4.1.4. Edifício

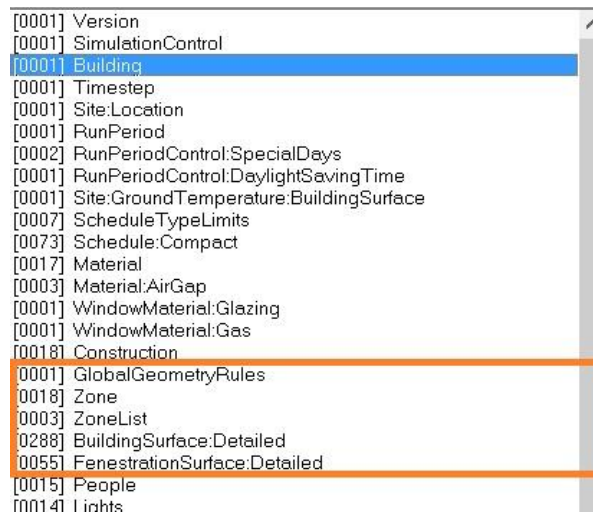


Figura 4.6 E+ Edifício

Neste espaço vão ser indicados os dados necessários para o programa conseguir identificar todos os componentes do edifício. São definidas todas as paredes, janelas, portas e zonas do edifício. Não são inseridas manualmente, mas sim com o apoio do *plugin OpenStudio*.

##### 4.1.4.1. Regras Geométricas Globais

Neste espaço o programa tem de saber qual o ponto de referência ou de partida para a introdução de uma dada superfície ficar definida corretamente. Escolheu-se então a opção *UpperLeftCorner*, girando no sentido anti-horário em coordenadas relativas.

Field	Units	Obj1
Starting Vertex Position		UpperLeftCorner
Vertex Entry Direction		Counterclockwise
Coordinate System		Relative
Daylighting Reference Point Coordinate System		
Rectangular Surface Coordinate System		

Figura 4.7 E+ Parâmetros Gerais 1

#### 4.1.4.2. Zonas

Zona 1 – Câmara de Congelação 1

Zona 2 – Câmara de Congelação 2

Zona 3 – Túneis de Arrefecimento

Zona 4 – Câmara de Refrigerados 1

Zona 5 – Câmara de Refrigerados 2

Zona 6 – Produtos de Limpeza

Zona 7 – Armazém de Embalagens

Zona 8 – Receção de Pescado

Zona 9 – Sala de Trabalho

Zona 10 – Zona de Trabalho 1

Zona 11 – Circulação

Zona 12 – Zona de Trabalho 2

Zona 13 – Silo de Gelo

Zona 14 – Sala de Máquinas

Zona 15 – Escritórios

Zona 16 – Oficina de Apoio

Zona 17 – Escritórios 2

#### 4.1.4.3. Divisão de Zonas por Temperatura

Uma vez que temos locais de temperaturas iguais é necessário agrupá-los por gama de temperatura. O programa, em alguns dos *inputs* mais à frente apresentados, necessita que tais grupos estejam definidos numa lista segundo as temperaturas desejadas. Por exemplo, para definir os termostatos as zonas serão divididas em 4 grupos distintos. Para as duas câmaras de congelação e túnel de arrefecimento é desejada a temperatura de -25°C, -5°C é a temperatura necessária para a produção de gelo (silo de gelo), as câmaras de refrigeração requerem uma temperatura de 0°C e todas as restantes zonas de trabalho encontram-se a 10°C.

Tabela 4.4 Lista de zonas de acordo com as temperaturas

Zona 1	
Zona 2	-25°C
Zona 3	
Zona 13	-5°C
Zona 4	
Zona 5	0°C
Zona 7	
Zona 8	
Zona 9	
Zona 10	10°C
Zona 11	
Zona 12	
Zona 16	

#### 4.1.4.4. Edifício Detalhado

É neste espaço que se encontra definido o edifício em coordenadas cartesianas, após a extrapolação do modelo a partir do *software* de desenho. Fica também caracterizado, para cada superfície, a zona à qual cada uma pertence, o tipo de construção, se está ou não exposto ao vento ou ao sol, e os contactos entre superfícies de diferentes zonas.

#### 4.1.4.5. Janelas

Da mesma maneira que ficam definidas as paredes do edifício, as janelas criadas no *Sketchup* também são importadas e ficam aqui caracterizadas relativamente ao tipo de janela e à que superfície pertence. As janelas existentes no edifício são todas iguais, tendo uma condutibilidade térmica ( $U$ ) de  $2,7\text{W/m}^2\text{°C}$ . Foram seleccionadas janelas já existentes na biblioteca do *software* de desenho, não tendo sido eu a chegar a este valor.

### 4.1.5. Ganhos Internos

[0018]	Zone
[0003]	ZoneList
[0288]	BuildingSurface:Detailed
[0055]	FenestrationSurface:Detailed
[0015]	People
[0014]	Lights
[0015]	ElectricEquipment
[0004]	ZoneInfiltration:DesignFlowRate
[0013]	ZoneRefrigerationDoorMixing
[0015]	ZoneControl:Humidistat
[0004]	ZoneControl:Thermostat

Figura 4.8 E+ Ganhos Internos

#### 4.1.5.1. Ocupação

Field	Units	Obj1
Name		Zona1_Ocupp
Zone or ZoneList Name		Zona1
Number of People Schedule Name		Occup_THZ1
Number of People Calculation Method		People/Area
Number of People		
People per Zone Floor Area	person/m2	0.10
Zone Floor Area per Person	m2/person	
Fraction Radiant		1
Sensible Heat Fraction		
Activity Level Schedule Name		Activity Schedule
Carbon Dioxide Generation Rate	m3/s-W	
Enable ASHRAE 55 Comfort Warnings		
Mean Radiant Temperature Calculation Type		ZoneAveraged
Surface Name/Angle Factor List Name		
Work Efficiency Schedule Name		Work Eff. Schedule
Clothing Insulation Schedule Name		Clothing Schedule
Air Velocity Schedule Name		Air Velocity Schedul
Thermal Comfort Model 1 Type		Fanger
Thermal Comfort Model 2 Type		
Thermal Comfort Model 3 Type		
Thermal Comfort Model 4 Type		
Thermal Comfort Model 5 Type		

Figura 4.9 E+ Ocupação

É neste campo que se definem os níveis de ocupação de cada zona. Para cada objeto é necessário definir um nome e a zona a que está associado. Também são atribuídos os perfis de ocupação, do nível de atividade metabólica, da velocidade do ar e da eficiência de trabalho. O nível de ocupação pode ser inserido de três formas diferentes: número total de pessoas na zona; ou relação entre pessoa/m<sup>2</sup>; ou m<sup>2</sup>/pessoa. Para todas as simulações foi adotada a relação pessoa/m<sup>2</sup>. O nível de atividade adotado foi de 150W por pessoa, o que é equivalente a trabalho moderado.

#### 4.1.5.2. Iluminação

Para cada zona é necessário definir um nome e a zona a que está associada. É possível definir a potência de iluminação por metro quadrado, por pessoa ou a total existente em *watts*. Neste trabalho, optou-se por usar, em cada zona, a potência de iluminação total. A iluminação existente é do tipo montagem à vista (*surface mount*).

*Fraction radiant* é a fração de calor emitido pela iluminação que entra na zona como uma onda de radiação. *Fraction visible* trata-se da fração de calor emitido pela iluminação que entra na zona como uma onda de radiação visível. Os valores que se apresentam nas seguintes figuras foram retirados do manual de ajuda do programa de simulação (*Input/Output Reference*).

Field Name	Luminaire Configuration, Fluorescent Lighting				
	Suspended	Surface mount	Recessed	Luminous and louvered ceiling	Return-air ducted
Return Fraction Air	0.0	0.0	0.0	0.0	0.54
Fraction Radiant	0.42	0.72	0.37	0.37	0.18
Fraction Visible	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
$f_{convected}$	0.40	0.10	0.45	0.45	0.10

Figura 4.10 Características dos Tipos de Iluminação (EnergyPlus, 2013)

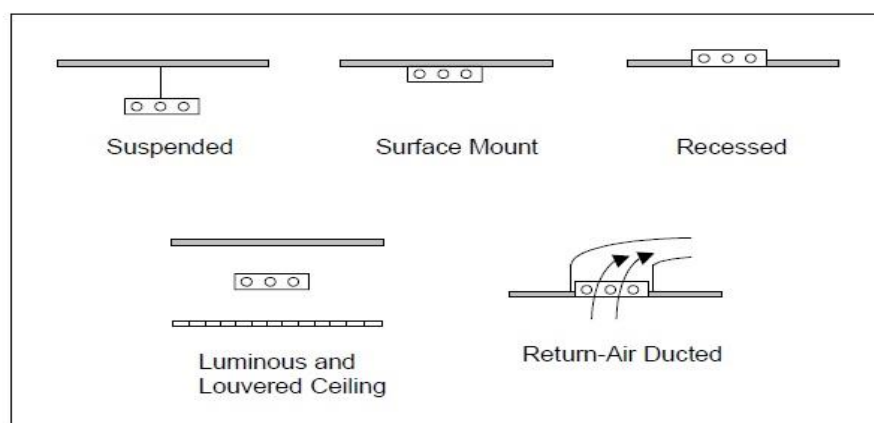


Figura 4.11 Tipos de Iluminação (EnergyPlus, 2013)

#### 4.1.5.3. Equipamentos Elétricos

Os equipamentos elétricos, excluindo a iluminação, caracterizam-se nesta altura. É necessário definir um nome e a zona a que estão associados. Neste caso utilizou-se a razão potência de equipamento por metro quadrado, como já foi referido anteriormente, e os valores atribuídos a cada zona encontram-se apresentados no subcapítulo 3.5.

#### 4.1.6. Carga Térmica do Pescado

É neste espaço onde se caracteriza a carga térmica do peixe. Para este trabalho considerou-se uma carga anualmente constante por não haver informação sobre entrada e saída de produto. O pescado entra nas instalações a uma temperatura de 0°C e é



armazenado temporariamente nas câmaras de refrigeração. Seguidamente, o produto passa pelo túnel de arrefecimento para congelar até à temperatura de armazenamento de  $-25^{\circ}\text{C}$  passando para as câmaras de congelamento. Considerou-se que o túnel tem capacidade para arrefecer  $400\text{kg/h}$  de produto, túnel esse que funciona 11 horas por dia.

Para este processo é necessário considerar 3 fases de libertação de calor.

Calor removido para arrefecer o produto desde a temperatura inicial até à sua temperatura de congelação, que é expresso pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_1 = \frac{\dot{m} \times c_{p1} \times (T_1 - T_c)}{3600} \quad (4.1)$$

Calor removido no processo de congelação do produto (mudança de estado), que é expresso pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_2 = \frac{\dot{m} \times h_c}{3600} \quad (4.2)$$

Calor removido para arrefecer o produto desde a temperatura de congelação até à temperatura de armazenamento, que é expresso pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_3 = \frac{\dot{m} \times c_{p2} \times (T_c - T_2)}{3600} \quad (4.3)$$

Com:

$$c_{p1} = 3,7 \text{ kJ/kgK}$$

$$c_{p2} = 2,14 \text{ kJ/kgK}$$

$$h_c = 271 \text{ kJ/kg}$$

$$T_1 = 0^{\circ}\text{C}$$

$$T_c = -2,2^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 = -25^{\circ}\text{C}$$

$$\dot{m} = 400\text{kg/h}$$

A carga total do produto  $Q$  é a soma das cargas  $Q_1$ ,  $Q_2$  e  $Q_3$ .

Com os valores adotados tem-se:

$$\dot{Q}_1 = \frac{400 \times 3,7 \times (0 - (-2,2))}{3600} = 0,904\text{kW}$$

$$\dot{Q}_2 = \frac{400 \times 271}{3600} = 30.11 kW$$

$$\dot{Q}_3 = \frac{400 \times 2.14 \times (-2.2 - (-25))}{3600} = 5.42 kW$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 = 36.44 kW$$

Como o túnel de arrefecimento tem o mesmo perfil de funcionamento que o horário de trabalho, definiu-se que este se encontra em funcionamento das 08h às 19h de segunda a sexta.

#### 4.1.7. Abertura de Portas

É uma das principais fontes de ganhos térmicos. Com o constante abrir e fechar de portas, há uma grande infiltração de ar para o interior das câmaras.

Para cada porta não foi definida nenhuma proteção. Existe possibilidade de escolher proteção com cortina de ar ou cortinas de lamelas. Foram criados três perfis diferentes de abertura de portas no intervalo das 8h às 18h:

*DoorSchedA* - 10% (nas 10h de funcionamento, as portas estão abertas 1h)

*DoorSchedB* - 20% (nas 10h de funcionamento, as portas estão abertas 2h)

*DoorSchedC* - 35% (nas 10h de funcionamento, as portas estão abertas 3h30)

Tabela 4.5 Características das Portas

Ligações		Área da porta [m <sup>2</sup> ]	Proteção	<i>DoorSched</i>
Zona 1	Zona 11	10	Nenhuma	A
Zona 2	Zona 11	10	Nenhuma	A
Zona 2	Zona 12	5	Nenhuma	A
Zona 3	Zona 10	5	Nenhuma	A
Zona 4	Zona 10	5	Nenhuma	A
Zona 5	Zona 8	5	Nenhuma	A
Zona 6	Zona 11	5	Nenhuma	B
Zona 7	Zona 11	3	Nenhuma	B
Zona 8	Zona 12	5	Nenhuma	C
Zona 9	Zona 11	10	Nenhuma	B
Zona 13	Zona 10	5	Nenhuma	B
Zona 14	Zona 16	5	Nenhuma	C
Zona 16	Zona 10	2	Nenhuma	C

Field	Units	Obj1	Obj2	Cbj3	Obj4	
Name		ZN01	ZN02	ZN02_3	ZN3	Z
Zone 1 Name		Zona1	Zona2	Zona2	Zona3	Z
Zone 2 Name		Zona11	Zona11	Zona12	Zona10	Z
Schedule Name		DoorSchedA	DoorSchedA	DoorSchedA	DoorSchedA	D
Door Height	m	2.5	2.5	2.5	2.5	2
Door Area	m2	10	10	5	5	5
Door Protection Type		AirCurtain	AirCurtain	AirCurtain	AirCurtain	A

Figura 4.12 E+ Portas

#### 4.1.8. Controlo do Ar Interior

Com o objetivo de manter as condições do ar desejadas no interior de cada espaço, na refrigeração industrial, o controlo do ar interior deverá ser permanente e é feito através de dispositivos de controlo como termostatos e humidostatos.

##### 4.1.8.1. Humidostatos

Foram criados humidostatos para todas as zonas controladas. As câmaras de congelação e túnel de arrefecimento têm um *setpoint* de humidade relativa fixado nos 80% e as restantes zonas 60%, (ASHRAE, 2014).

##### 4.1.8.2. Termostatos

Existem quatro opções de controlo do ar interior:

- 0 – *uncontrolled*
- 1 – *single heating setpoint*
- 2 – *single cooling setpoint*
- 3 – *single heating or cooling setpoint*
- 4 – *dual setpoint (heating and cooling)*

Para este caso foram criados termostatos do tipo arrefecimento, pois só teremos necessidade de arrefecer o ar controlado. O controlo da temperatura do ar interior é garantido por quatro termostatos, cada um com uma gama de temperatura adaptado à zona que vai controlar.

Object Description: Define the Thermostat settings for a zone or list of zones. If you use a ZoneList in the Zone or ZoneList name field then this definition applies to all the zones in the ZoneList.

Field Description:  
ID: A1  
Enter a alphanumeric value

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		ThermostatCC	ThermostatCR	ThermostatSilo	ThermostatOutros
Zone or ZoneList Name		ZoneCC	ZoneCR	Zone13	Zone Outros
Control Type Schedule Name		Cooling Setpoint Schedule	Cooling Setpoint Scl	Cooling Setpoint Scl	Cooling Setpoint Scl
Control 1 Object Type		ThermostatSetpoint:SingleCooling	ThermostatSetpoint:CR Setpoint	ThermostatSetpoint:Silo Setpoint	ThermostatSetpoint:Outros Setpoint
Control 1 Name		CC&Tunel Setpoint			
Control 2 Object Type					
Control 2 Name					
Control 3 Object Type					
Control 3 Name					
Control 4 Object Type					
Control 4 Name					

Figura 4.13 E+ Termostatos

#### 4.1.8.3. Setpoint dos Termostatos

É neste espaço onde se definem os *setpoints* de temperatura para cada grupo de zonas, ou seja, as temperaturas que são desejadas.

Tabela 4.5 – Setpoints de Temperatura

Termostato	Zonas	Setpoint [°C]
ThermostatCC	Câmaras de Congelação e Túnel	-25
ThermostatCR	Câmaras de Refrigeração	0
ThermostatSilo	Silo de Gelo	-5
ThermostatOutros	Restantes zonas	10

#### 4.1.9. Componentes do Sistema de Refrigeração

É neste espaço que é montado o sistema de refrigeração do edifício. Aqui vão ser indicados os espaços servidos pelo sistema e os equipamentos frigoríficos que os servem. Neste caso os dois condensadores, os seis compressores e os catorze evaporadores (um para cada zona controlada). Para fazer o *input* das características dos evaporadores no programa, nas zonas em que há mais que um evaporador define-se apenas um que englobe as características de todos os outros existentes no espaço.

##### 4.1.9.1. Zonas Refrigeradas

O edifício contém quatro zonas de temperaturas diferentes mas, devido às grandes diferenças de temperatura, é necessário agrupá-las em duas categorias: um grupo servido pelo sistema de média temperatura contendo os espaços entre -5°C a 10°C e outro grupo servido pelo sistema de baixa temperatura que controlam o ar interior das câmaras

de congelação e túnel de arrefecimento a  $-25^{\circ}\text{C}$ . Para cada um destes grupos foram atribuídas as zonas que cada um trata,

**MedTemp AirChillerList:** *AirChiller\_CR1, AirChiller\_CR2, AirChiller\_RP, AirChiller\_ST, AirChiller\_ZT, AirChiller\_AirChiller\_ZT2, AirChiller\_CIRC, AirChiller\_SG, , AirChiller\_AE, AirChiller\_OA.* (Grupo de media temperatura).

**LowTemp AirChillerList:** *AirChiller\_CCI, AirChiller\_CC2, AirChiller\_Tunel.* (Grupo de baixa temperatura).

#### 4.1.9.2. Condensador

Aqui, são inseridos os dados dos dois condensadores existentes no sistema. O condensador denominado no simulador como “EVAPCO” pertence ao sistema de média temperatura enquanto que o condensador “EVAPCO\_2” está associado ao sistema de baixa temperatura. Os modelos selecionados são exatamente o mesmo modelo “EVAPCO-LSCB-240” e foram definidos com as seguintes características:

Capacidade de rejeição de calor: 1033kW

Fluxo de Ar:  $15\text{m}^3/\text{s}$

Potência do Motor: 15kW

Potência da bomba de água: 1,5kW

#### 4.1.9.3. Compressores

Para a introdução de dados dos compressores, será necessário introduzir o nome das curvas características de capacidade e potência, que são definidas no subcapítulo 4.1.10. De seguida apresentam-se os nomes dados aos seis equipamentos utilizados no sistema de refrigeração:

*“LowTemp021Bitzer\_OSNA8591\_K”*

*“LowTemp022Bitzer\_OSNA8591\_K”*

*“MedTemp001BITZER\_OSKA8561\_K”*

*“MedTemp002BITZER\_OSKA8561\_K”*

*“MedTemp003BITZER\_OSKA8591\_K”*

*“MedTemp004BITZER\_OSKA8591\_K”*

#### 4.1.9.4. Lista de Compressores

Tendo dois sistemas de refrigeração a servir o edifício, será necessário indicar ao programa quais os compressores associados a cada sistema. É então, neste campo, que são criadas as duas listas de compressores:

A lista “*LowTempCompList*” composta pelos compressores associados ao sistema de baixa temperatura;

A lista “*MedTempCompList*” composta pelos compressores associados ao sistema de média temperatura.

#### 4.1.9.5. Definição do Sistema Frigorífico

Neste campo é necessário definir o sistema descrito no subcapítulo 3.8. Para o sistema de baixa temperatura, que serve as câmaras de congelação e o túnel de arrefecimento, é definida a lista de compressores criada para esse sistema, a lista de zonas que serve (*LowTempAirChillerList* criada em 4.9.1), o condensador “EVAPCO\_2” e o fluido frigorígeno utilizado (NH<sub>3</sub>). Para o sistema de média temperatura, que serve as restantes zonas do edifício, é necessário definir que é servido pelo condensador “EVAPCO”, pelo conjunto de compressores de média temperatura, o fluido frigorígeno NH<sub>3</sub>.

#### 4.1.9.6. Evaporadores

Neste campo vão ser criados todos os evaporadores existentes no edifício. Para cada evaporador é necessário definir vários parâmetros importantes que se apresentam na tabela 4.7. Capacidade total de arrefecimento do evaporador, potência do motor do ventilador, fluxo de ar e capacidade de descongelação são os fatores mais importantes a ter em conta ao inserir os dados destes equipamentos no simulador. De notar que, para zonas que sejam servidas por mais que um evaporador, define-se apenas um equipamento que englobe as características de todos os que na realidade existem nesse espaço. Por exemplo para a câmara de congelados 2 (zona 2) somou-se a capacidade de refrigeração (em kW) dos 2 evaporadores 56-N62 e dos 2 evaporadores 56-N63. O mesmo procedimento é feito para o fluxo de ar do aparelho.

Tabela 4.6 Características dos Evaporadores

Chiller	Tipo de evaporador	Capacidade de Refrigeração Total [kW]	Fluxo de Ar Total [m <sup>3</sup> /s]	Potência do Motor [kW]	Defrost [kW]
AirChiller_CC1	56-N62 (x4)	88	16.8	6.5	72.6
AirChiller_CC2	56-N62 (x2) 56-N63 (x2)	114	21.0	8.1	88.3
AirChiller_Túnel	80-N84 (x1)	138.5	22.0	6.5	96.8
AirChiller_CR1	56-N63 (x1)	35	6.3	2.4	26.0
AirChiller_CR2	56-N63 (x1)	35	6.3	2.4	26.0
AirChiller_RP	56-N65 (x1)	60	10.5	4.0	39.0
AirChiller_ST	56-N65 (x1)	60	10.5	4.0	39.0
AirChiller_ZT	56-N63 (x2) 56-N64 (x3)	205	37.8	14.6	148.5
AirChiller_ZT2	56-N65 (x3)	180	31.5	12.2	117.0
AirChiller_CIRC	56-N62 (x4)	88	16.8	6.5	72.6
AirChiller_SG	56-N62 (x1)	22	4.2	1.6	18.2
AirChiller_AE	56-N62 (x1)	22	4.2	1.6	18.2
AirChiller_OA	56-N62 (x1)	22	4.2	1.6	18.2

#### 4.1.9.7. Distribuição dos Evaporadores

Depois de definidos os evaporadores, estes vão ser associados às respetivas zonas que servem. Neste caso, para cada zona apenas se atribui um evaporador, pois foi apenas definido um evaporador por zona.

#### 4.1.10. Curvas Características dos Compressores

Não sendo possível caracterizar totalmente os compressores nos respetivos campos, anteriormente referidos, há necessidade de definir as suas curvas características. Tratando-se de compressores já utilizados em alguns dos ficheiros de exemplo disponíveis no simulador, estas curvas, já estando caracterizadas apenas foi necessário copiá-las para os ficheiros de simulação, ficando assim todos os compressores corretamente definidos.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		OSNA7461_K_NH3	OSNA7461_K_NH3	OSKA8591_K_NH3	OSKA8591_K_NH3
Coefficient1 Constant		231790.50411	47470.074172	475812.37254	53918.315894
Coefficient2 x		7667.5223873	1429.0971546	15836.010395	115.36082079
Coefficient3 x**2		91.975715198	21.542273593	248.09754731	15.324329008
Coefficient4 y		162.23208007	-21.549604804	5815.4019974	-188.19004997
Coefficient5 y**2		-2.2242729935	12.27921012	-142.27382029	52.031668763
Coefficient6 x*y		7.8316999359	-11.931212906	196.07540381	10.397602406
Coefficient7 x**3		0.40082827284	0.12778432496	1.8625932421	2.0331045919
Coefficient8 y**3		-0.10435357389	-1.63297207E-02	0.29311106887	-0.25310651862
Coefficient9 x**2*y		0.017877947146	-0.15608635028	0.70297720032	-0.26797031295
Coefficient10 x*y**2		-0.11501553068	0.19527295023	-2.7310763923	0.060439117696
Minimum Value of x	varies	-20	-20	-20	-20
Maximum Value of x	varies	12.8	12.8	12.8	12.8
Minimum Value of y	varies	10	10	10	10
Maximum Value of y	varies	53	53	53	53
Minimum Curve Output	varies				
Maximum Curve Output	varies				
Input Unit Type for X					

Figura 4.14 E+ Curvas Características dos Compressores



## 4.2. Simulações Dinâmicas

Este subcapítulo servirá para analisar os resultados das simulações energéticas feitas do edifício em estudo. Vão ser analisados:

- Consumo energético total do edifício sem propostas de melhoria;
- Condições do ar interior das câmaras de congelação e túnel de arrefecimento sem propostas de melhoria;
- Impacto das propostas de melhoria nos consumos energéticos e das condições do ar interior;
- Análise custo/benefício da implementação de novas soluções.

### 4.2.1. Simulação Base

Esta simulação é feita com as características do edifício atuais. Deste modo, foram introduzidos no programa todos os dados obtidos no levantamento do edifício, procedendo-se então à primeira simulação energética. No final da simulação e antes de recolher os resultados, o programa dá-nos sempre a informação se foram ou não encontrados erros no decorrer da mesma. Durante a montagem do modelo na versão base foram constantemente aparecendo erros devido à falta ou mesmo excesso de dados, referências de equipamentos trocados, valores que excederam o limite máximo, edifício mal definido (por exemplo paredes em contacto não terem a mesma solução construtiva), etc. Também muitas vezes há objetos que estão referenciados em diferentes locais do programa e que se não estão definidos com o mesmo nome, o programa não permite iniciar a simulação.

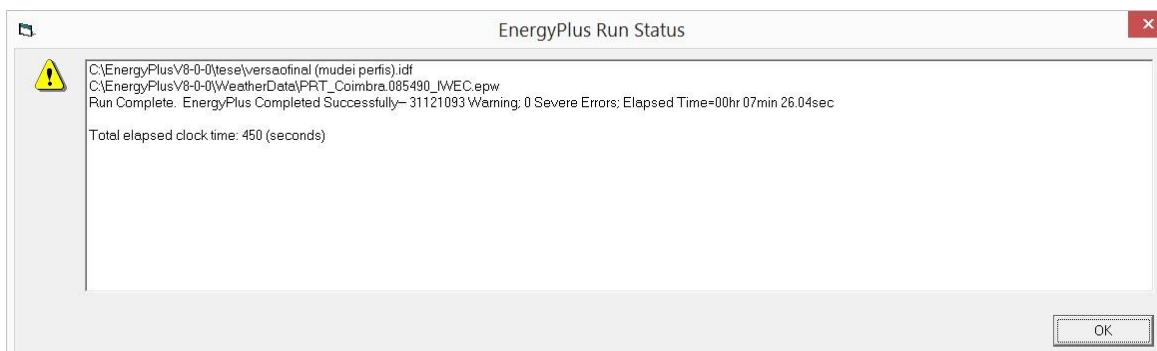


Figura 4.15 E+ Mensagem Final da Simulação

É um facto o verão ser a altura do ano em que há uma maior necessidade de utilização dos equipamentos de refrigeração. Tal necessidade faz com que haja um aumento significativo do consumo energético do edifício. Da análise da simulação é perceptível esta realidade: O mês de julho é o mês em que se verifica o valor máximo com um consumo de 104.608kWh; Também é de notar que o mês de fevereiro é o de menor consumo energético, com 78.280kWh de energia consumida, o que seria de esperar sendo o mês de maior frio. Na simulação real sem medidas de melhoria, o edifício apresenta um consumo energético anual de 1.110.828kWh.

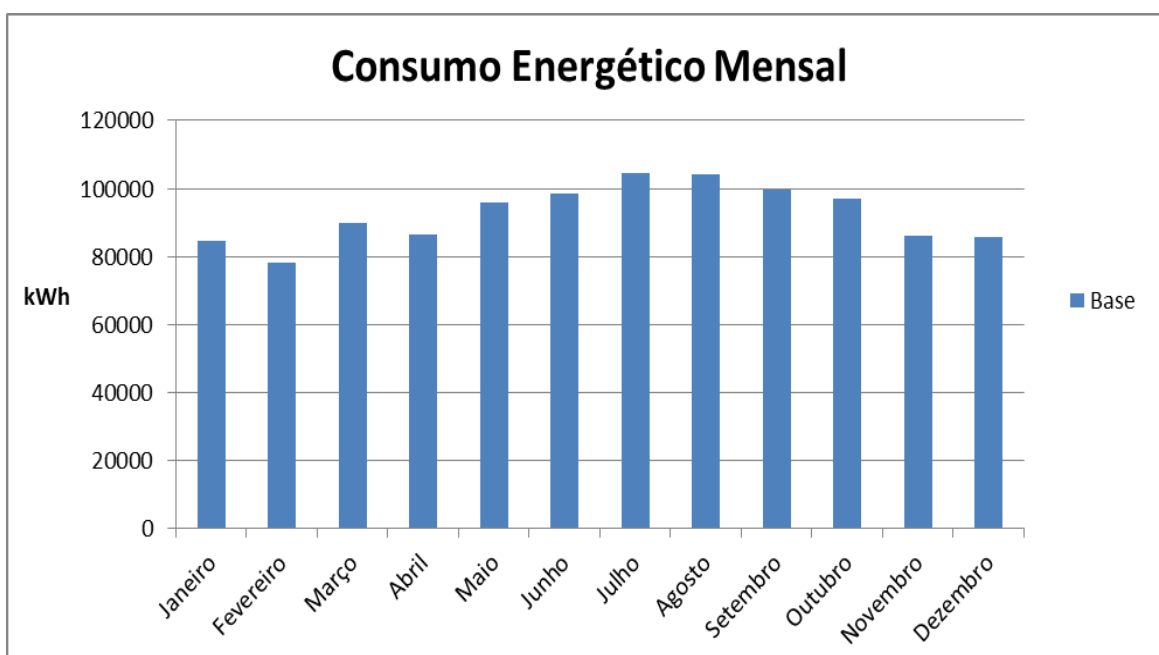


Figura 4.16 Consumo Energético Mensal (Simulação básica)

Tabela 4.7 Consumo Energético Mensal (Simulação básica)

Mês	Base kWh	Mês	Base kWh
Janeiro	84740	Julho	104608
Fevereiro	78280	Agosto	104134
Março	89875	Setembro	99839
Abril	86372	Outubro	96909
Maio	95731	Novembro	86093
Junho	98648	Dezembro	85599
Total			1110828

#### 4.2.2. Medida de melhoria 1 - Isolamento 200mm

Para esta simulação, a primeira medida de melhoria aplicada é apenas a substituição do isolamento das paredes das câmaras de congelação e do túnel de arrefecimento. Aumentou-se a espessura de isolamento de 150mm para 200mm e o valor do coeficiente de transmissão de calor da parede exterior passou de  $0,228\text{W/m}^2\text{K}$  para  $0,174\text{W/m}^2\text{K}$  e da parede interior de  $0,233\text{W/m}^2\text{K}$  para  $0,177\text{W/m}^2\text{K}$ .

Este aumento do isolamento feito apenas nas zonas de baixa temperatura provocou um abaixamento no consumo de energia que passou a ser de  $1.096.057\text{kWh/ano}$ . No mês de maior consumo energético (Julho) verifica-se uma redução de quase  $1.671\text{kWh}$ .

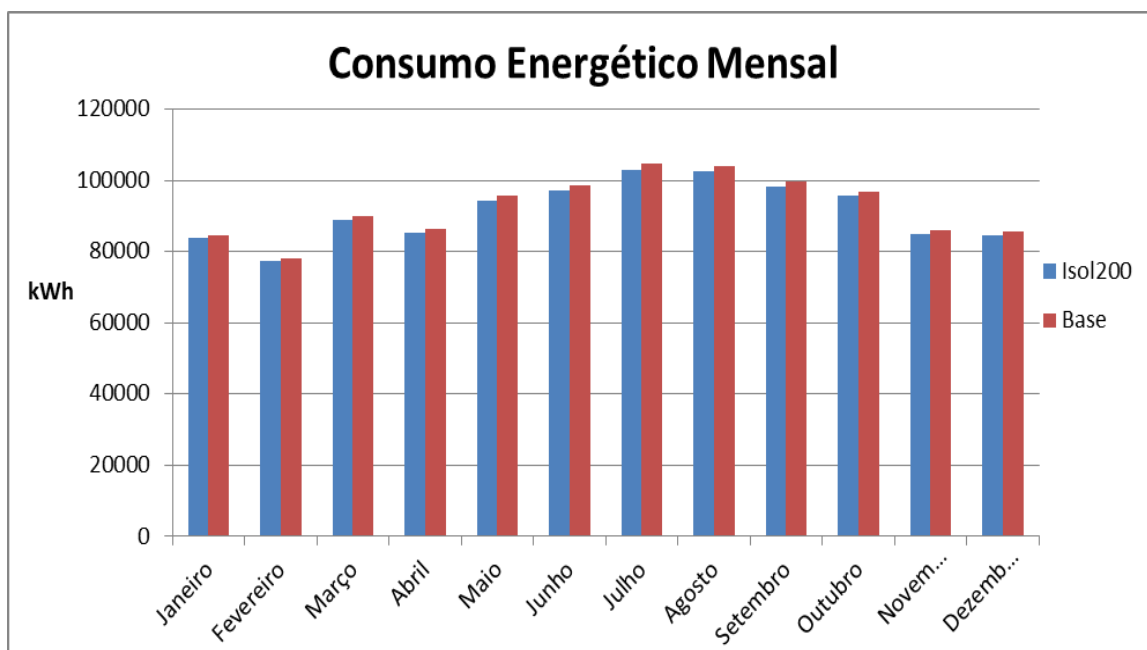


Figura 4.17 Consumo Energético Mensal (Isolamento)

Tabela 4.8 Percentagem de Redução no Consumo Energético Mensal (Isolamento)

Mês	Isol200 kWh	%	Mês	Isol200 kWh	%
Janeiro	83841	-1.07%	Julho	102937	-1.62%
Fevereiro	77374	-1.17%	Agosto	102557	-1.54%
Março	88784	-1.23%	Setembro	98346	-1.52%
Abril	85251	-1.32%	Outubro	95625	-1.34%
Maió	94441	-1.37%	Novembro	85101	-1.17%
Junho	97166	-1.53%	Dezembro	84633	-1.14%
Total				1096057	-1.35%

Esta pequena mudança apresenta melhorias no consumo energético anual de 14.771kWh , cerca de 1,35% a menos que na simulação base, ou seja uma diminuição de 2364€ na fatura de eletricidade.

Para analisar o retorno económico desta melhoria é necessário determinar os custos da solução. A envolvente das câmaras de congelação e túnel de arrefecimento têm uma área de 1.440m<sup>2</sup>. Para a instalação de 200mm de poliuretano nesta área, o custo seria de 57.600€ (40€/m<sup>2</sup> de 200mm de poliuretano já com o custo da instalação incluído). Deste modo conclui-se que o custo deste investimento versus benefício é muito grande. Segundo o manual de refrigeração (Itron, 2006) para sistemas de frio a operar com temperaturas de -25°C o isolamento em poliuretano recomendado é de 150mm, que vem ao encontro dos resultados desta simulação visto não haver benefício para o aumento deste isolamento.

#### **4.2.3. Medida de melhoria 2 - Proteções de Portas**

Sabe-se que o abrir e fechar de portas é responsável por grande parte dos ganhos térmicos indesejáveis. Existe no programa a possibilidade de colocar proteções de portas para dificultar a troca de ar entre zonas de diferentes temperaturas. Assim foram testados dois tipos de proteções de porta: cortinas de ar (Air Curtain) e cortinas de tiras de PVC (Strip Curtain). O programa apenas define o fator de proteção de porta com os valores de 0,5 e 0,9 respetivamente, o que vem ao encontro dos resultados obtidos nas seguintes simulações.

##### **4.2.3.1. Medida de melhoria 2.1 – Air Curtain**

A primeira medida de proteção testada foi uma cortina de ar que consiste num fluxo de ar vertical criado na porta que dificulta a troca de ar entre zonas.

As cortinas de ar foram introduzidas nas portas das câmaras e na porta do túnel de arrefecimento. A câmara de congelados 1 tem duas portas em contacto com a circulação, a câmara de congelados 2 tem também duas portas em contacto com a circulação e uma porta em contacto com a zona de trabalho (zona 12), já o túnel de arrefecimento tem apenas uma porta necessitando assim de apenas uma cortina.

Da análise aos consumos energéticos verifica-se que há uma melhoria de 1.279kWh no mês de Julho. Esta medida, anualmente apresenta uma redução de 23.670kWh no consumo energético anual, cerca de 2%, sendo assim poupados 3.788€.

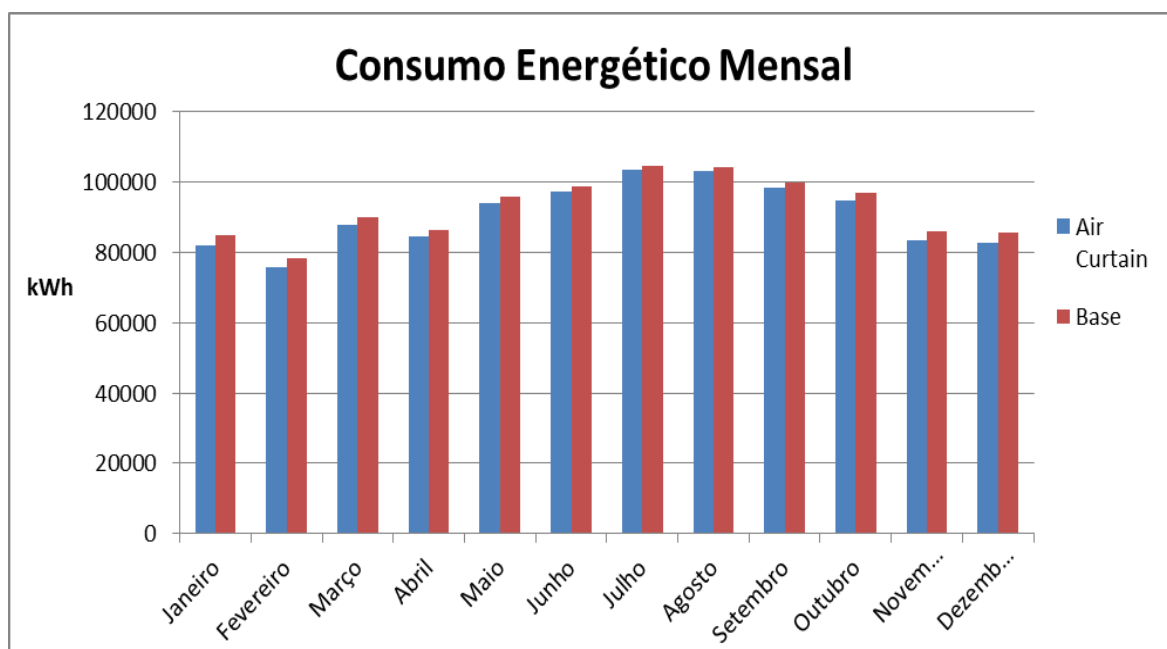


Figura 4.18 Consumo Energético Mensal (Air Curtain)

Tabela 4.9 Percentagem de Redução no Consumo Energético Mensal (Air Curtain)

Mês	Air Curtain kWh	%	Mês	Air Curtain kWh	%
Janeiro	81884	-3.49%	Julho	103329	-1.24%
Fevereiro	75865	-3.18%	Agosto	103164	-0.94%
Março	87735	-2.44%	Setembro	98423	-1.44%
Abril	84355	-2.39%	Outubro	94818	-2.21%
Maio	93877	-1.98%	Novembro	83523	-3.08%
Junho	97437	-1.24%	Dezembro	82747	-3.45%
Total				1087158	-2.18%

. Para o cálculo do custo da solução foi consultado o website [www.thermo-varme.no](http://www.thermo-varme.no) e selecionado o equipamento “VCP-03-200-SO”. Para a instalação das cortinas de ar nas seis portas, seriam necessários 10.800€ (1.800€ cada aparelho já contabilizando os custos de instalação). Com a poupança de 3.788€ anuais, o investimento feito teria retorno em 2,8 anos, podendo dizer que se trata de um investimento com um rápido retorno. Importante também é o facto de um equipamento deste tipo ter mais de 10 anos de vida. A seleção do equipamento foi feita tendo em conta a dimensão da porta (2m de comprimento e 2,5 de altura).

#### 4.2.3.2. Medida de melhoria 2.2 – *Strip Curtain*

Tal como a cortina de ar, esta proteção tem a função de evitar a troca de calor entre zonas. Esta proteção consiste em tiras de PVC verticais colocadas na porta criando assim uma barreira à circulação de ar.

Em termos de energia, esta medida apresenta uma redução de consumo pouco significativa de 44.161kWh ou 7.066€ (cerca de 4% em relação à simulação base).

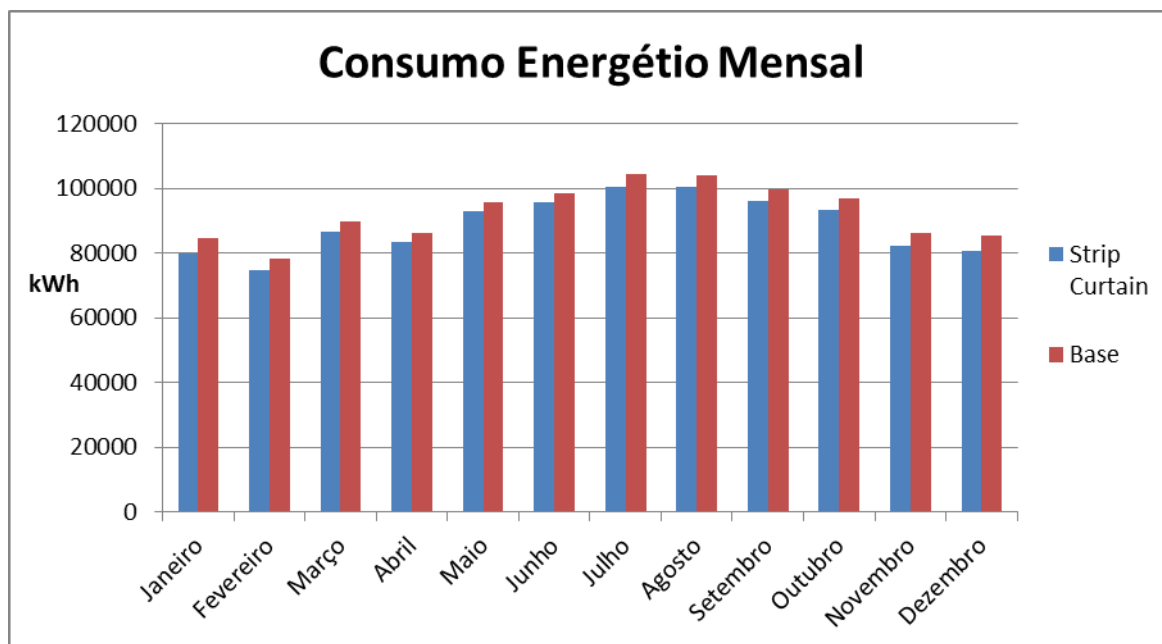


Figura 4.19 Consumo Energético Mensal (*Strip Curtain*)

Tabela 4.10 Percentagem de Redução no Consumo Energético Mensal (*Strip Curtain*)

Mês	Strip Curtain kWh	%	Mês	Strip Curtain kWh	%
Janeiro	79984	-5.95%	Julho	100526	-4.06%
Fevereiro	74623	-4.90%	Agosto	100611	-3.50%
Março	86729	-3.63%	Setembro	96261	-3.72%
Abril	83375	-3.59%	Outubro	93219	-3.96%
Maio	92831	-3.12%	Novembro	82087	-4.88%
Junho	95618	-3.17%	Dezembro	80803	-5.93%
Total				1066667	-4.14%

Para analisar o retorno económico desta melhoria é necessário consultar alguns fabricantes de cortinas de PVC. Verifica-se no website [www.pvc-strip-doors.co.uk](http://www.pvc-strip-doors.co.uk) que cada metro quadrado do material tem um custo de 40€. Tendo 75m<sup>2</sup> de porta, serão necessários 3.000€ para a instalação desta proteção em todas as portas do edifício. Com a poupança de 7.066€ anuais, teríamos um retorno no ano inicial do equipamento. Sendo

uma instalação com tiras de PVC, a substituição do equipamento poderá ser feita apenas nas tiras que estão em más condições o que facilita a manutenção e a torna pouco dispendiosa.

#### 4.2.4. Medida de melhoria 3 – Duplo Estágio de Compressão

Para sistemas de refrigeração industrial onde há necessidade de atingir temperaturas muito baixas, torna-se necessária a utilização de compressores com duplo estágio de compressão.

Para o ciclo de baixa temperatura, foi indicado ao simulador que este é servido por este tipo de sistema. No simulador foi necessário definir qual dos compressores trabalharia a alta pressão e a introdução de um arrefecedor de expansão intermédio.

Em relação ao consumo energético do edifício, verifica-se o maior decréscimo de todas as medidas de melhoria até já apresentadas. Verifica-se o maior decréscimo no consumo na altura do verão, uma vez que a utilização de um sistema de duplo estágio de compressão ser mais eficiente quando o diferencial de temperaturas interiores e exteriores é mais elevado.

Esta proposta provoca uma poupança de 13% no consumo energético. São 127.776kWh de energia poupados que representam 20.445€ a menos na fatura de eletricidade.

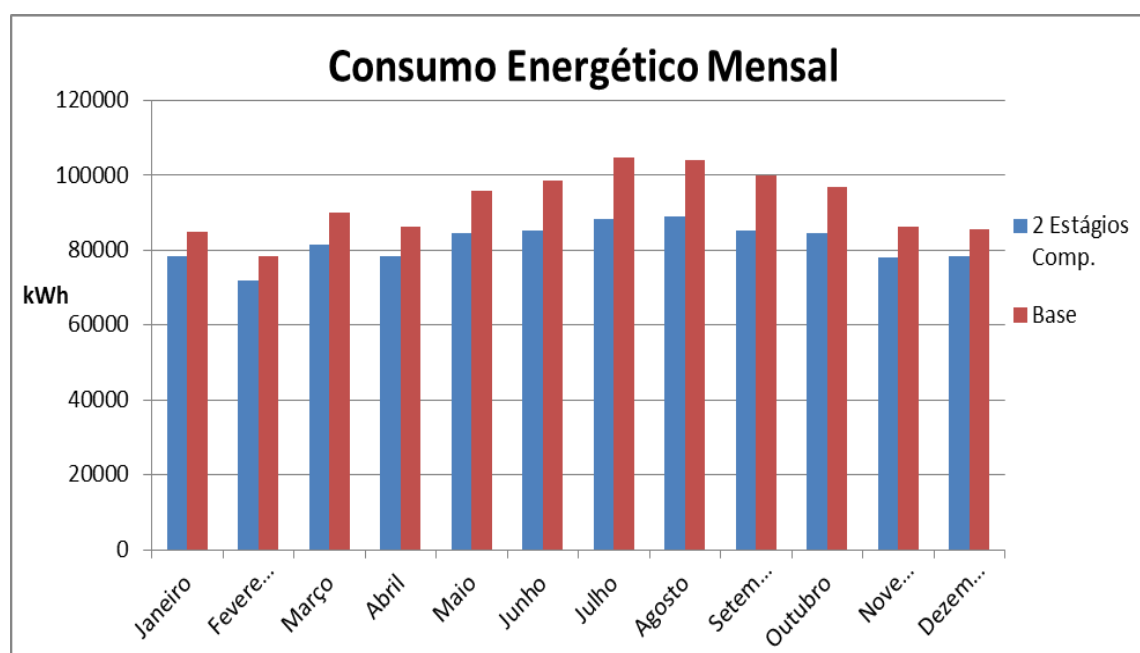


Figura 4.20 Consumo Energético Mensal (Two Stage Comp.)

**Tabela 4.11 Percentagem de Redução no Consumo Energético Mensal (Two Stage Comp.)**

Mês	2 Estágios Comp. kWh	%	Mês	2 Estágios Comp. kWh	%
Janeiro	78288	-8.24%	Julho	88413	-18.32%
Fevereiro	71761	-9.09%	Agosto	88934	-17.09%
Março	81503	-10.27%	Setembro	85111	-17.30%
Abril	78261	-10.36%	Outubro	84679	-14.44%
Maiο	84640	-13.10%	Novembro	78024	-10.34%
Junho	85036	-16.01%	Dezembro	78401	-9.18%
Total				983052	-13.00%

Uma alteração na instalação de compressores a trabalhar em dois escalões seria muito dispendiosa. Neste caso, trata-se de uma medida bastante importante para um sistema de refrigeração novo, não sendo tão benéfico para alteração de instalações já existentes.



#### 4.2.5. Medida de melhoria 4 – Air Curtain + TwoStageComp

Esta simulação engloba as medidas de melhoria 2.2 e 3. Tal como a proposta anterior, esta medida é também para casos em que a instalação do sistema frigorífico ainda não aconteceu.

As alterações feitas aos sistemas não provocam uma grande diferença no consumo energético em relação ao sistema de duplo estágio de compressão. Por ano são poupados 147.235kWh de energia que se traduzem financeiramente em 23.558€.

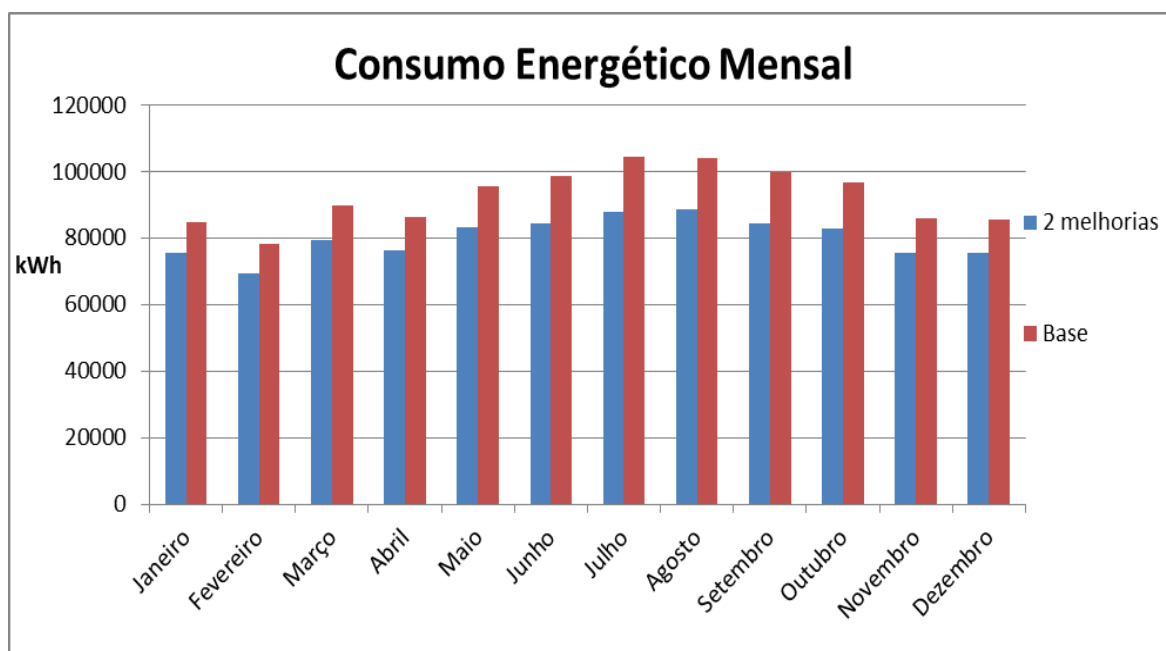


Figura 4.21 Consumo Energético Mensal (Conjunto de Melhorias)

Tabela 4.12 Percentagem de Redução no Consumo Energético Mensal (Conjunto de Melhorias)

Mês	2 Melhorias kWh	%	Mês	2 Melhorias kWh	%
Janeiro	75563	-12.15%	Julho	87845	-19.08%
Fevereiro	69470	-12.68%	Agosto	88553	-17.59%
Março	79529	-13.01%	Setembro	84349	-18.36%
Abril	76377	-13.09%	Outubro	83037	-16.71%
Maio	83152	-15.13%	Novembro	75676	-13.77%
Junho	84328	-16.98%	Dezembro	75714	-13.05%
Total				963593	-15.28%

#### 4.2.6. Análise de Temperatura

De todas as medidas analisadas e como se pode verificar nos gráficos abaixo, as variações de temperatura nas câmaras de congelação e túnel de arrefecimento são mínimas encontrando-se dentro dos valores do *setpoint* definido no simulador ( $-25^{\circ}\text{C}$ ).

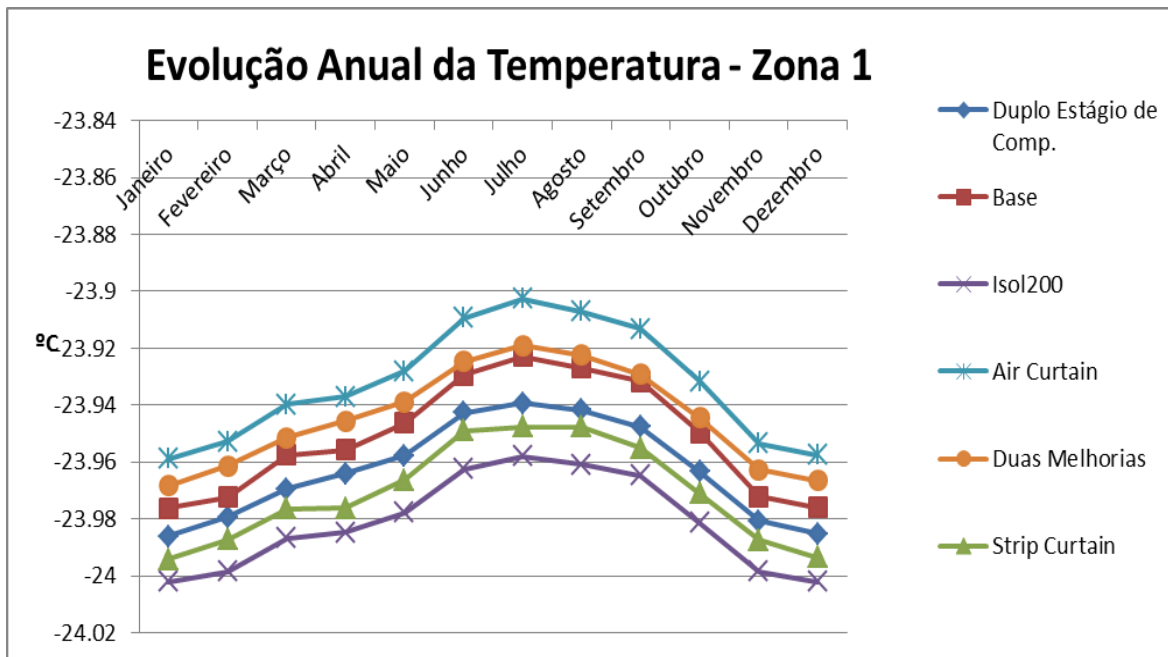


Figura 4.22 Evolução Anual da Temperatura – Zona 1

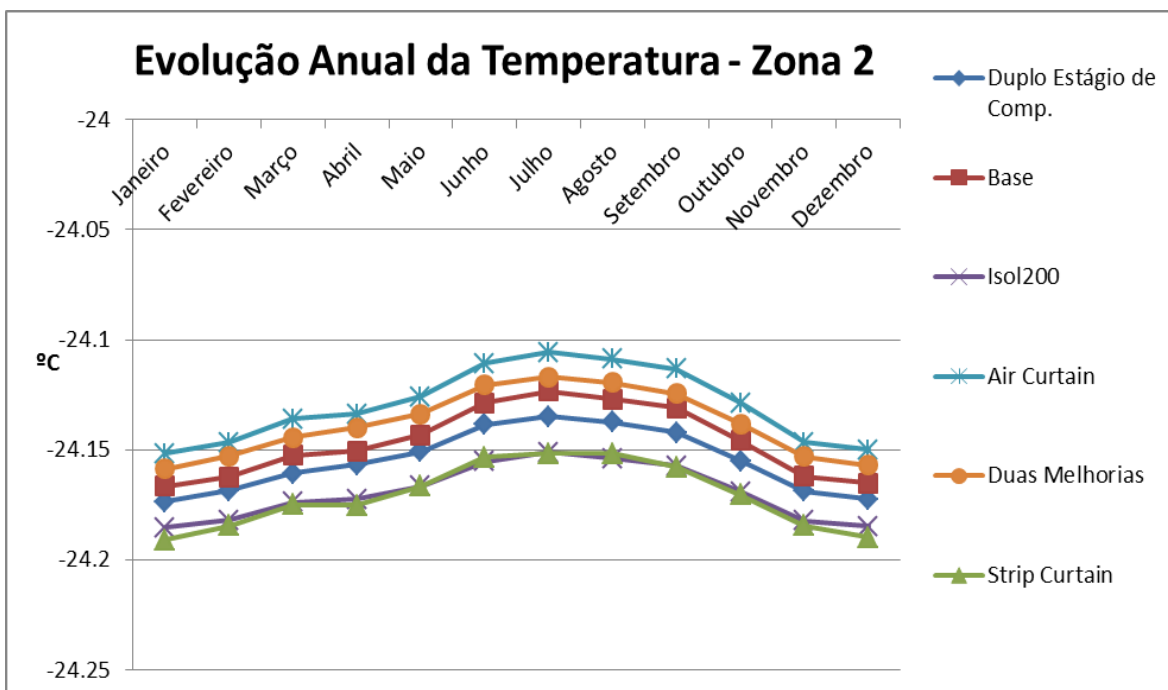


Figura 4.23 Evolução Anual da Temperatura – Zona 2

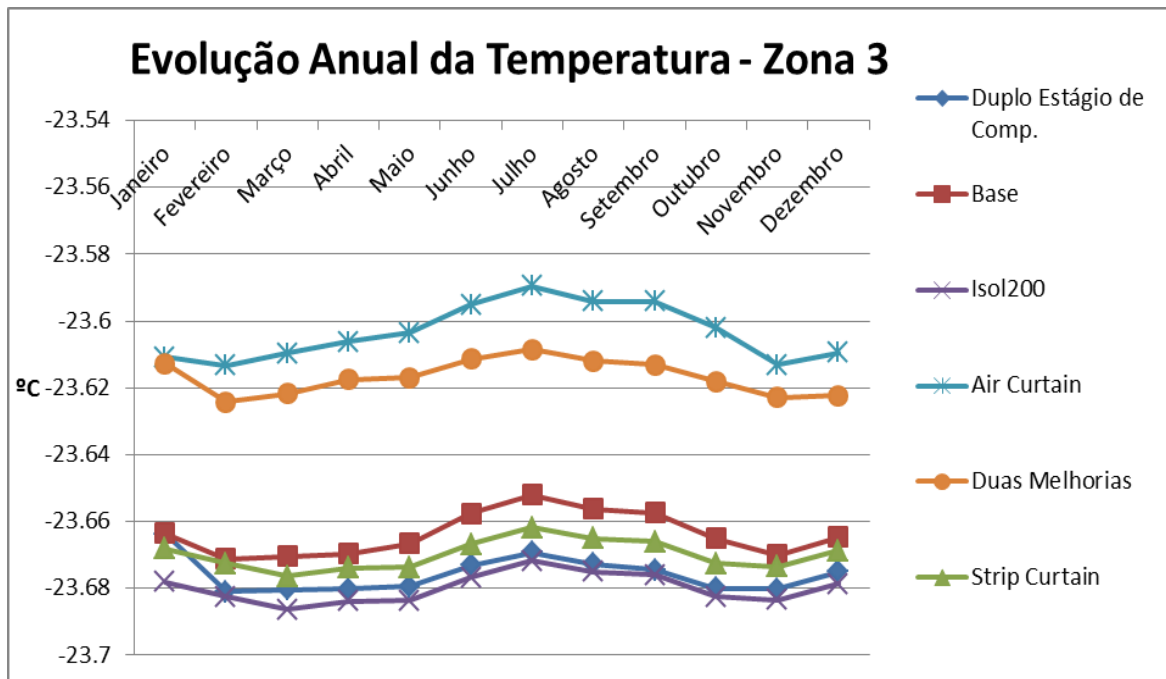


Figura 4.24 Evolução Anual da Temperatura – Zona 3

## 5. CONCLUSÕES

A presente dissertação assentou na construção de um modelo de edifício de tratamento e congelação de pescado dotado de um sistema de refrigeração industrial e sobre o qual se procedeu à análise de soluções de melhoria através de um *software* de simulação energética.

Através das simulações pode-se verificar que a proteção de portas com cortina de PVC é a solução mais adequada para instalações já existentes e que para uma instalação nova é bastante benéfico a utilização de sistemas com duplo estágio de compressão.

Dos resultados obtidos e que acima apresentei podem-se tirar conclusões que as modelações realizadas contribuem para um melhor desempenho energético do sistema de refrigeração em estudo. Verifica-se deste modo a grande contribuição que este tipo de ferramenta tem na racionalização de consumos energéticos.

A sua utilização aliada a uma monitorização dos consumos reais é um instrumento de grande rigor, que pode demonstrar a eficácia de uma solução antes de se proceder ao investimento.

A contribuição deste tipo de estudo é e vai ser uma ferramenta fundamental para atingir os objetivos do plano 20-20-20 proposto pela União Europeia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE (2014), “ASHRAE Handbook: Refrigeration”, SI Edition, ISBN 978-1-936504-72-5.

Dossat, R. J. (2004), “Principles of Refrigeration”, Prentice Hall, 5ªed., ISBN 0-13-027270-1.

Energy-Plus (2013), “Engineering Reference” US Department of Energy.

Energy-Plus (2013), “Input/Output Reference”, US Department of Energy.

Guia de seleção “Evapco LSCB/LRC/PMBC Evaporative Condenser, Bulletin 106-E Metric”, em <http://www.evapco.com>.

Guia de seleção “GEA KUBA Blue Line”, em <http://www.kueba.com>.

Hundy, J. F., Trott, A. R., Welch, T. C. (2008), “Refrigeration and Air-Conditioning”, Butterworth-Heinemann, 4ªed.. ISBN 9780750685191.

Itron (2006), “California Energy Efficiency Potential Study”, Volume 1, em <http://www.calmac.org>.

Manske, K. A. (1999), “Performance Optimization of Industrial Refrigeration Systems”. Master of Science Thesis, University of Wisconsin-Madison.

Manual de Aplicação Danfoss (2007), “Controles Automáticos para Sistemas de Refrigeração Industrial”, em <http://www.ra.danfoss.com>.

Stoecker, W. F., Jabardo, J. M. (2002), “Refrigeração Industrial”, Edgard Blucher, 2ª ed., ISBN 85-212-0305-5.

## CARATERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS

Basic technical parameters		Air only VCP-03-200-SO
Height	[mm]	2000
Width	[mm]	550
Depth	[mm]	540
Number of motors in the module	[pc]	3
Weight	[kg]	90,0
Voltage/frequency (Motor)	[V/Hz]	400/50
Voltage/frequency (Electric exchanger)	[V/Hz]	-
Motor input	[kW]	0,60
Motor current	[A]	1,44
Noise level (in distance of 3 m)	[dB(A)]	67
Air volume	[m <sup>3</sup> /h]	10200
Outlet air velocity	[m/s]	10,10
Electric heat exchanger current	[A]	-
Max. heat output	[kW]	-
Air temperature increase	[°C]	-
Max. water volume	[l/s]	-
Water pressure loss	[kPa]	-

Figure 0.1 Caraterísticas da cortina de ar (Thermal-Varme)




TABLE 3 Unit Heat Rejection Capacity									
LSCB - Centrifugal Fan Models									
Model No.	kW Base	Model No.	kW Base	Model No.	kW Base	Model No.	kW Base	Model No.	kW Base
LSCB-36	155	LSCB-210	904	LSCB-400	1722	LSCB-620	2669	LSCB-950	4090
41	177	225	969	410	1766	625	2691	960	4133
48	207	240	1033	430	1851	650	2798	980	4219
54	232	250	1076	431	1855	660	2841	1000	4305
65	280	280	1205	450	1937	690	2970	1020	4391
70	301	281	1206	460	1980	691	2972	1030	4434
75	323	295	1270	475	2045	720	3100	1060	4563
80	344	300	1292	480	2066	721	3102	1080	4649
90	387	310	1335	490	2109	755	3250	1100	4736
100	431	315	1356	500	2153	770	3315	1120	4822
110	474	330	1421	510	2196	800	3444	1180	5080
120	517	335	1442	515	2217	805	3466	1250	5381
135	581	345	1485	530	2282	820	3532	1310	5640
150	646	355	1528	540	2325	860	3702	1380	5941
155	667	360	1550	550	2368	861	3704	1440	6199
170	732	370	1593	560	2411	900	3875	1510	6501
185	796	385	1657	590	2540	920	3961	1610	6931
200	861	386	1662	591	2544				

Figure 0.2 Caraterísticas dos evaporadores

## PERFIS

