

Ferramenta computacional de dimensionamento e avaliação do desempenho térmico e eficiência energética de câmaras de frio

João Marques¹, Pedro D. Gaspar^{1*}, Pedro Dinho da Silva²

1: University of Beira Interior, Rua Marquês d'Ávila e Bolama, 6201-001, Covilhã, Portugal

2: C-MAST - Centre for Aerospace Science and Technologies, Covilhã, Portugal

e-mail: joaopatriciomarques@hotmail.com; dinis@ubi.pt; dinho@ubi.pt

Resumo

Os sistemas de frio industrial destinados à conservação de produtos alimentares adquiriram tal importância para a sociedade atual, que se torna imprevisível antever as consequências que a sua inexistência representariam no setor agroalimentar e, conseqüentemente, na nossa alimentação. No entanto, estes sistemas de conservação de alimentos, por refrigeração ou congelação, consideram consumos de energia significantes para as empresas. Com o intuito de promover uma melhoria do desempenho energético das indústrias agroalimentares, desenvolveu-se uma ferramenta computacional que permite uma análise das cargas térmicas e elétricas de câmaras de frio, com base nas diferentes características destas, tais como, superfícies, produtos, iluminação, pessoal e empilhadores que entram nas câmaras, processo de descongelação, entre outros. Os resultados obtidos da aplicação prática desta ferramenta comprovam a sua fiabilidade na análise dos principais fatores que afetam o consumo de energia, provando ser uma ferramenta útil no sector agroindustrial.

Palavras-chave: Ferramenta Computacional, Câmaras de Frio, Cargas Térmicas e Elétricas, Indústria Agroalimentar; Desempenho Energético.

1. INTRODUÇÃO

Devido ao aumento populacional e ao perigo da escassez de recursos, o arrefecimento desempenha um papel importante, uma vez que permite 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 [1]. A refrigeração por si só é um processo com a capacidade de preservar os produtos garantindo que estes mantenham as suas características químicas, físicas e nutricionais, mas que também é indispensável no processamento de alimentos perecíveis, nomeadamente carne, peixe e seus derivados. Os sistemas de refrigeração são utilizados para preservar as características físicas e químicas dos produtos, prolongando o seu período de vida. No entanto, o desperdício de recursos e o impacto que o seu excessivo consumo representa a nível económico, social e ambiental tem sido evidenciado em alguns estudos realizados, no sentido de encontrar medidas e estratégias que visem a utilização racional de energia [2].

A grande diversidade de funções dos sistemas de refrigeração usados nas indústrias agroalimentares, faz com que os respetivos consumos energéticos associados, estejam fortemente dependentes das suas características e condições de operação. Em princípio, se apenas se pretender manter a temperatura ambiente das câmaras de frio, o consumo será menor do que em casos mais específicos, onde se necessita proceder a uma diminuição rápida da temperatura ambiente ou variá-la ao longo do tempo, de acordo com as necessidades do processo produtivo [3-4]. Nos sistemas para manutenção da temperatura ambiente nas câmaras de frio é necessário retirar a quantidade de calor relativa às cargas térmicas geradas no seu interior, nomeadamente as relacionadas com a transmissão de calor nas paredes das câmaras, as infiltrações de ar, a iluminação, a movimentação de máquinas e pessoas e os produtos, propriamente ditos. Nos sistemas para arrefecimento rápido têm, ainda, que se considerar as cargas de arrefecimento dos produtos, de respiração (produtos hortofrutícolas), e latentes (na ocorrência de congelação) [4-5]. De um ponto de vista mais lato, as condições ambientais exteriores e a manutenção dos sistemas de refrigeração são componentes essenciais no consumo de energia, sendo-lhes, por isso, dedicada uma atenção particular no estudo realizado.

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 dióxido de carbono. *Foster et al* [6] desenvolveram uma ferramenta com o objetivo de analisar o impacto das cargas térmicas e elétricas no consumo energético, fornecendo indicações acerca da melhoria a eficiência dos equipamentos e/ou das câmaras de frio. O presente trabalho descreve uma ferramenta computacional que assenta nas características da ferramenta acima citada, mas para além de estender as suas capacidades, é dirigida à tipologia das câmaras de frio comumente encontradas no território português. Esta ferramenta possibilita, através da introdução das características das câmaras de frio e das condições da envolvente, uma análise das cargas térmicas e elétricas do sistema. A análise pode ser feita até seis câmaras de frio, sendo no final os resultados exibidos graficamente de maneira a facilitar a sua interpretação. Esta ferramenta possui uma opção que permite o uso de um ficheiro climático, uma vez que as cargas térmicas associadas à envolvente, à infiltração de ar e ao sistema de descongelamento são influenciadas por fatores que variam ao longo do ano, e assim permite realizar uma análise dinâmica da variação das cargas ao longo do ano. Em relação ao desenvolvimento desta ferramenta, foi utilizado o *software JAVA*, que através do *NetBeans* permite criar janelas de menus e janelas que ilustram graficamente os resultados, permitindo que qualquer utilizador visualize o impacto das cargas e possa verificar pontos sugestivos para redução das mesmas.

2. DESCRIÇÃO DA FERRAMENTA

O estado atual da ferramenta computacional permite ao utilizador inserir os dados relativos às características das estruturas das câmaras (paredes e porta) e dos equipamentos que nela operam (compressores, ventiladores, luzes, entre outros), com o intuito de analisar a cargas térmicas e elétricas geradas nas câmaras de frio. No cálculo das cargas térmicas em que os fatores externos (temperatura exterior, humidade exterior, radiação solar e velocidade do vento), é possível utilizar um ficheiro climático da região onde a edificação que contém as câmaras se encontra.



Figura 1. Página inicial da ferramenta computacional.

Para a utilização do ficheiro climático é necessário descarregar um ficheiro Excel, através de um link presente na ferramenta, e em seguida é necessário substituir os dados presentes nesse ficheiro pelos novos dados climáticos, sendo que este processo fornece as médias mensais das condições externas anteriormente referidas. Por fim, existe uma opção que permite carregar a folha de Excel que contém os dados do ficheiro climático (ver Figura 2). Os resultados referentes às cargas térmicas e elétricas podem ser visualizados tanto através de tabelas como através de gráficos. Em relação aos gráficos, os valores referentes às cargas térmicas da envolvente, da infiltração de ar e do processo de descongelamento são apresentados através de dois gráficos de barras que mostram a evolução destas cargas ao longo do ano. Ainda em relação às cargas térmicas, é exibido um gráfico circular onde é possível comparar todas as cargas térmicas das câmaras, sendo possível ver

tanto o valor destas como a percentagem do impacto que cada uma tem. No que diz respeito às cargas elétricas a maneira como são exibidas graficamente é idêntica a esta última referida.

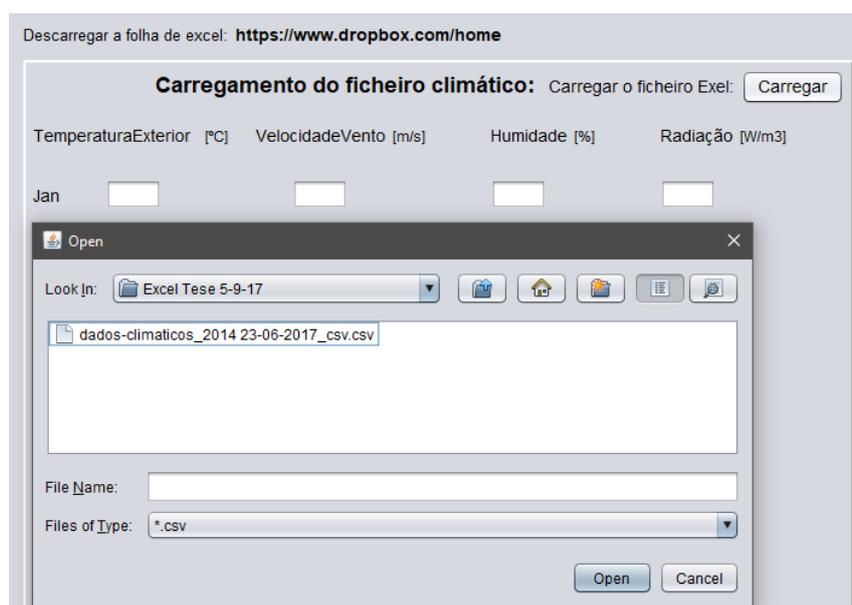


Figura 2. Utilização de um ficheiro climático da região onde a indústria se localiza.

Porta	
Altura	<input type="text"/> m
Comprimento	<input type="text"/> m
Tipo de porta	Escolha: <input type="text"/>
Temperatura no lado de fora da porta	<input type="text"/> °C
Humidade no lado de fora da porta	<input type="text"/> %
Numero de aberturas por dia	<input type="text"/>
Duração de cada abertura em segundos	<input type="text"/>
Volume de tráfego que passa quando esta está aberta	Escolha: <input type="text"/>
Proteção da porta	Escolha: <input type="text"/>
Condição do isolamento da porta	Escolha: <input type="text"/>

Refrigeração	
Temperatura Interna	<input type="text"/> °C
Qual o tipo de fluido refrigerante?	Escolha: <input type="text"/>
Temperatura à volta do condensador	<input type="text"/> °C
Número de compressão, estágios de expansão	Escolha: <input type="text"/>
Eficiência isentrópica do compressor	Escolha: <input type="text"/>

Empilhadores:	
Possuiu Empilhadores?	Escolha: <input type="text"/>
Número	<input type="text"/>
Tamanho/Fonte de energia	Escolha: <input type="text"/>
Tempo de operação	<input type="text"/> h/dia

Luzes:	
Tempo de funcionamento	<input type="text"/> h/dia
Iluminância	<input type="text"/> lm/m ²
Eficiência	<input type="text"/> lm/W

Figura 3. Exemplo da inserção de dados.

2.1. Cargas térmicas

É definida como carga térmica, a porção de calor latente e sensível que deve ser retirado de um ambiente, de modo a serem mantidas as condições de temperatura e humidade estabelecidas para o entreposto frigorífico [7]. Estas cargas são a causa do aumento da temperatura num espaço climatizado e a razão pela qual existem sistemas de refrigeração com capacidade para anular o calor resultante.

A primeira análise a ser feita no projeto de refrigeração é o cálculo das cargas térmicas. Através do cálculo das cargas térmicas pode-se efetuar uma previsão dos consumos de energia associados ao sistema projetado e deste modo proceder a uma análise económica. Em [8] são identificadas algumas das principais fontes responsáveis pelas variações das propriedades térmicas (devido à transferência de calor para espaços refrigerados), classificando as fontes de calor como: externas (paredes, chão, telhados, janelas, portas, partições, condições atmosféricas), internas (ocupantes, iluminação, equipamento, produtos.), e cargas geradas pelo próprio sistema (ventiladores). Na Tabela 1 encontram descritas estas componentes.

Tabela 1. Cargas térmicas das câmaras de frio.

Cargas térmicas externas	
Carga térmica por condução através das paredes, teto e chão (Q1).	
Carga térmica da infiltração de ar exterior (Q2).	
Cargas térmicas internas	
Carga térmica da iluminação da câmara (Q3).	
Carga térmica do pessoal (Q4).	
Carga térmica dos empilhadores (Q5).	
Carga térmica dos produtos (Q6).	
Cargas geradas pelo próprio sistema	
Carga térmica dos ventiladores (Q7).	
Carga térmica do sistema de descongelamento (Q8).	

Q1: Apenas a forma retangular é tida em conta no que diz respeito ao formato das câmaras de frio. Sendo a carga térmica da envolvente das câmaras de frio calculada através da Equação (1).

$$Q1 = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (1)$$

O coeficiente global de transferência de calor, U , é calculado através da Equação (2).

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} + \frac{e}{k} \quad (2)$$

em que, h_i é a coeficiente de transferência de calor convectivo na superfície interna, que tem um valor fixo de $h_i = 9,3 \text{ [W m}^{-2} \text{ K}^{-1}]$; h_o , é o coeficiente de transferência de calor convectivo na superfície externa, e a espessura do isolamento e k a condutividade térmica do isolamento térmico das paredes. ΔT corresponde à diferença entre a temperatura exterior e interior da câmara de frio. O coeficiente de transferência de calor convectivo no exterior da câmara pode ser calculado pela Equação (3), em função da velocidade do ar, v [9].

$$h_o = 5,62 + 3,9 \cdot v \quad (3)$$

Q2: A carga térmica por infiltração corresponde à potência térmica que resulta da troca de duas massas de ar entre ambientes em desequilíbrio térmico. No caso das câmaras de frio, a troca de ar dá-se entre o ar refrigerado e o ar da sua envolvente externa, pela abertura da porta. Outras causas como fendas, pequenos orifícios ou mesmo a porosidade das próprias superfícies que separam os dois ambientes, contribuem para o aumento deste tipo de carga, adicionando componentes latentes e sensíveis ao espaço refrigerado [8].

A Equação (4) é utilizada para o cálculo desta carga térmica:

$$Q2 = m_{po} \cdot [C_p \cdot (T_o - T_i) + (X_o - X_i) \cdot (l_{fu} + l_v)] \cdot t_{po} \cdot \frac{N_p}{(24 \cdot 3600)} \quad (4)$$

A massa que flui através de uma porta aberta, m_{po} foi calculada fazendo uso da correlação descrita pela Equação (5) desenvolvida por Gosney & Olama [10]. Em que C_p [$\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$] é o calor específico do ar, T_o e T_i [$^{\circ}\text{C}$] as temperaturas exterior e interior, respetivamente, X_o e X_i [$\text{kg}_{\text{vap}}/\text{kg}_{\text{mist}}$] a humidade absoluta, dentro e fora da câmara, l_{fu} o calor latente de vaporização [kJ kg^{-1}] e l_v [kJ kg^{-1}] o calor latente de congelamento, t_{po} [seg] a duração de cada abertura da porta e N_p o número de aberturas da porta por dia.

$$m_{po} = (1 - E) \cdot 0,221 \cdot A_p \cdot \rho_{in} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{out}}{\rho_{in}}\right)^{0,5} \cdot (g \cdot H)^{0,5} \cdot F \quad (5)$$

Em relação ao fator de densidade, F , este foi calculado recorrendo à Equação 6 [10]:

$$F = \left(\frac{2}{1 + (\rho_{in}/\rho_{out})^{0,333}}\right)^{1,5} \quad (6)$$

Em que E representa a eficácia do dispositivo de proteção da porta, A_p [m^2] a área da porta, g [$=9,81 \text{ m s}^{-2}$] a aceleração da gravidade e H [m] a altura a porta. Sobre as condições do isolamento, se este estiver em boas condições, o valor a ser utilizado no cálculo é $0,003 \text{ [m}^3 \text{ s}^{-1}]$. Caso o isolamento esteja em más condições, o valor a ser utilizado é $0,0006 \text{ [m}^3 \text{ s}^{-1}]$, estando estes valores presentes em [11].

Q3: Em relação à iluminação das câmaras de frio, é altamente improvável que uma indústria ou armazém de refrigeração ou congelação consiga obter iluminação apenas por via natural (por exemplo através de janelas) e, portanto, a iluminação terá que ser originária de fontes de luz artificial (lâmpadas). Assim sendo, este fator não pode ser menosprezado no cálculo das cargas térmicas, onde a sua potência total é gerada pela radiação emitida pelas luzes e por perdas por efeito de Joule que resultam do tempo de funcionamento destas. A Equação (7) é utilizada para calcular esta carga térmica.

$$Q3 = \frac{P_3 \cdot t_3}{24} \quad (7)$$

onde, P_3 representa a potência elétrica da luz [W] que resulta do fluxo luminoso distribuído uniformemente sobre o chão e as paredes que é dividido pela eficiência das lâmpadas e t_3 é o tempo de funcionamento das lâmpadas [h].

Q4: Os colaboradores e demais pessoas que entram na câmara de refrigeração ou congelação também fornecem uma carga térmica que deve ser retirada pelo sistema, calculada pela Equação (8):

$$Q4 = 272 - 6 \cdot T_i \quad (8)$$

Caso exista um grande volume de pessoas a entrar na câmara esta equação é multiplicada por 1,25 de maneira a compensar esse fator [12].

Q5: A utilização de empilhadores dentro de uma câmara de frio é outro fator a ter em conta para o cálculo das cargas térmicas. A ferramenta permite ainda selecionar o tamanho dos empilhadores (pequeno, médio ou grande) e a sua fonte de energia (elétrica ou a combustão interna), sendo a carga térmica provenientes destes obtida através da Equação (9):

$$Q5 = \frac{N_5 \cdot t_5 \cdot P_5}{24} \quad (9)$$

em que N_5 representa o número de empilhadores utilizados, t_5 o período de tempo [h] que estes operam dentro da câmara e P_5 a potência do empilhador [W].

Q6: Os produtos de origem animal ou vegetal encontram-se na maioria das vezes a uma temperatura superior à temperatura da câmara de frio. Assim, irão libertar uma determinada quantidade de calor até que a sua temperatura fique em equilíbrio com a temperatura da câmara.

Como se trata de câmaras de refrigerados, utiliza-se a Equação (10) para o cálculo da carga térmica gerada por este processo [8]:

$$Q6 = \frac{m_p \cdot c_p \cdot (T_p - T_i) + (M_{wp} \cdot l)}{24 \cdot 3600} + Q_r \quad (10)$$

onde, m_p [kg] é a massa de produto introduzido por dia, T_p [°C] a temperatura de entrada do produto e $(M_{wp} \cdot l)$ [kJ], o calor latente de congelamento.

O calor libertado pela respiração (somente para produtos hortofrutícolas), que é calculado pela Equação (11):

$$Qr = a \cdot e^{T_i \cdot b} \quad (11)$$

em que a e b são coeficientes de respiração indicados em [8].

Q7: Os motores elétricos, quer estejam dentro do recinto, ou em qualquer ponto do fluxo de ar ou mesmo nos ventiladores, adicionam carga térmica sensível ao sistema devido às perdas nos enrolamentos. Esta carga, tal como as restantes, precisa ser retirada pelo sistema de refrigeração. É preciso levar em conta se o motor está em funcionamento dentro ou fora da câmara. Para calcular a devida carga térmica utiliza-se a Equação (12):

$$Q7 = \frac{N_7 \cdot S}{\mu_7} \quad (12)$$

onde, N_7 representa o número de evaporadores, S a potência do motor e μ_7 o rendimento do motor. No entanto,

quando o motor se encontra fora a câmara de frio, μ_7 assume o valor 1.

Q8: As perdas de calor devido à descongelação dos evaporadores ocorrem porque é necessária uma certa quantidade de calor para derreter o gelo que se formou na superfície dos evaporadores, decorrente do aumento de humidade derivado da entrada de produtos e abertura de portas. Como tal, utiliza-se a Equação (13) para calcular esta carga térmica:

$$Q_8 = \left(\frac{1}{\mu_9} - 1 \right) \cdot \left(\frac{m \cdot (X_0 - X_i) \cdot l \cdot t \cdot N_9 + (M_{wp} \cdot l)}{24 \cdot 3600} \right) \quad (13)$$

Em que μ_9 é a eficiência do processo de descongelação, l é o calor latente de congelamento, t o tempo em que a porta está aberta [seg], N_9 é o número de aberturas da porta por dia e M_{wp} a quantidade de produto retirado de dentro da câmara por dia.

2.2. Cargas elétricas

Para além de analisar as cargas térmicas é também necessário estudar as cargas elétricas da câmara. Sendo que as componentes destas cargas são: E1: Pavimento; E2: Condensador(es); E3: Sistema de descongelação; E4: Compressor(es); E5: Evaporadores; E6: Iluminação; e E7: Outras cargas

E1: Na análise da carga elétrica relativa ao pavimento, o fator que tem influência é a sua potência de aquecimento, no caso de haver controlo da sua temperatura.

E2: O cálculo da carga elétrica dos condensadores é obtido de uma maneira análoga à utilizada para calcular a carga térmica dos ventiladores. A única diferença é que a localização dos motores dos ventiladores não afeta o valor atribuído ao rendimento do motor. Utiliza-se a Equação (14) para o respetivo cálculo.

$$E_2 = \frac{N_8 \cdot S}{\mu_8} \quad (14)$$

E3: Em relação ao processo de descongelação, apenas é tida em consideração a carga elétrica no caso deste processo ser elétrico. Caso seja feito por outro método, não existe carga elétrica relativa a esta componente. Para o cálculo é utilizada a Equação (15).

$$E_3 = \frac{m \cdot (X_0 - X_i) \cdot l \cdot t \cdot N_d + (M_{wp} \cdot l)}{(24 \cdot 3600) \cdot \mu_d} \quad (15)$$

E4: No que diz respeito à carga elétrica do compressor (sistema de refrigeração) foi calculada utilizando a Equação (16) [13]:

$$E_4 = \frac{Q_{total}}{COP} \quad (16)$$

O coeficiente de performance, COP é calculado através da Equação 17.

$$COP = \frac{(273 + T_e) \cdot (1 - \alpha \cdot x)^n \cdot \mu_{comp}}{(T_c - T_e)} \quad (17)$$

onde, T_e representa a temperatura de evaporação [°C], T_c a temperatura de condensação [°C], μ_{comp} a eficiência do compressor, α uma constante empírica para diferentes refrigerantes, x a vaporização fracionada, e n o coeficiente de estágio.

As restantes cargas elétricas relativas aos evaporadores, e iluminação são obtidas pelo cálculo das cargas térmicas que estes geram, sendo que as expressões para os respetivos cálculos são apresentadas na secção 2.1.

3. RESULTADOS

Com o intuito de proporcionar uma demonstração geral do funcionamento da ferramenta computacional e de quais as conclusões que se podem retirar com a leitura dos gráficos principais, são de seguida apresentados dois casos de estudo relativos a duas empresas piloto do sector agroalimentar. Uma empresa do sector das carnes (empresa A) e a outra do sector dos lacticínios (empresa B). A empresa A possuiu quatro câmaras de frio, sendo que 3 delas são de refrigeração e 1 é de congelação. A empresa B possuiu apenas 2 câmaras de frio, sendo ambas de refrigeração. Os dados das câmaras estão presentes nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Parâmetros operativos e dimensões das câmaras de frio das empresas A e B.

	Temp. int. [°C]	Temp. ext. [°C]	Humidade ext. [%]	Humidade ext. [%]	Dimensões (C×L×A) [m]
Empresa A					
Câmara de refrigeração (1)	1	9	54,8	52,5	10,0×6,0×3,2
Câmara de refrigeração (2)	3	12	56,0	52,5	4,0×4,0×3,2
Câmara de refrigeração (3)	3	12	56,0	52,5	4,0×4,0×3,2
Câmara de congelação	-12	12	40,0	52,5	8,0×6,0×3,2
Empresa B					
Câmara de refrigeração (1)	9	12	83,0	74,0	5,05×4,58×2,83
Câmara de refrigeração (2)	5	12	81,0	74,0	7,50×4,45×3,00

Tabela 3. Características das câmaras de frio das empresas A e B.

	Empresa A	Empresa B
Tipo de isolamento das paredes	Poliuretano	Poliuretano
Tipo de isolamento do chão	Concreto	Concreto
Espessura do isolamento das paredes	80 mm (refrigeração) 100 mm (congelação)	80 [mm]
Espessura do isolamento do chão	50 [mm]	50 [mm]
Número de pessoas que em média entra nas câmaras	1	2
Duração de cada abertura das portas	10 [s]	10 [s]
Dimensões das portas (L x A)	1,2 [m] x 2,2 [m]	1,2 [m] x 2,2 [m]
Fluido frigorígeno	R404a	R404a
Tipo de descongelação	Elétrica	Elétrica
Proteção das portas	Apenas na câmara de congelação com lamelas	Nenhuma
Temperatura do produto quando é colocado nas câmaras	5 [°C] (refrigeração) -12 [°C] (congelação)	9 [°C]
Iluminância	562 [lm m ⁻²]	562 [lm m ⁻²]
Eficácia das luzes	49 [lm W ⁻¹]	49 [lm W ⁻¹]
Potência de cada ventilador do evaporador	110 [W]	110 [W]
Eficiência do motor do evaporador	55 [%]	55 [%]
Potência de cada ventilador do evaporador	175 [W]	175 [W]
Eficiência do motor do evaporador	55 [%]	55 [%]
Número de compressão, estágios de expansão	1,1	1,1
Eficiência isentrópica do compressor	Médio (0,6)	Médio (0,6)

3.1. Empresa A

Depois de introduzidas as características da empresa A, obtiveram-se os valores referentes às cargas térmicas e elétricas, representados graficamente abaixo. É importante referir que os valores obtidos são relativos à soma das cargas das quatro câmaras. O primeiro gráfico apresentado é um gráfico de barras onde é possível visualizar a evolução da carga térmica da envolvente ao longo do ano, representada pela carga média de cada mês (Figura 4).

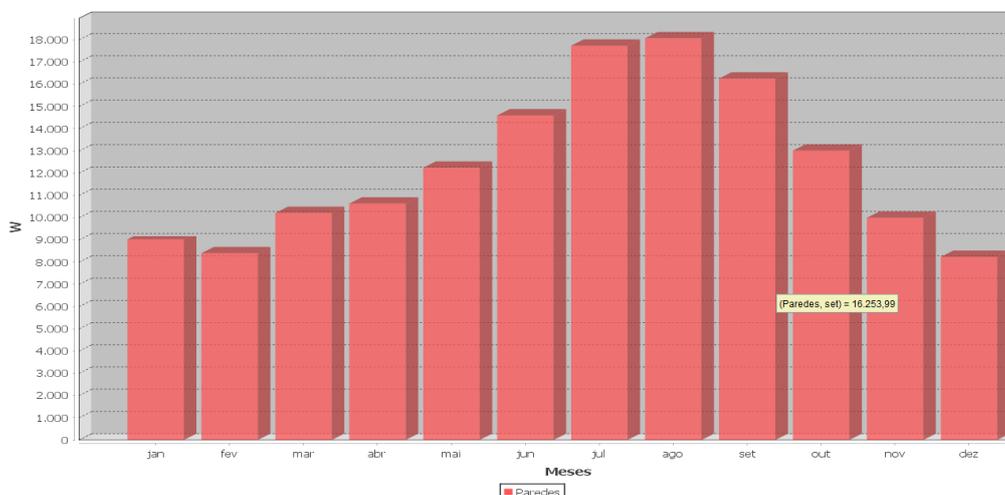


Figura 4. Evolução da carga térmica da envolvente das câmaras da empresa A ao longo do ano.

Ao analisar a representação gráfica referente à carga térmica da envolvente, é possível observar que se obtém o resultado esperado, ou seja, verifica-se uma maior carga térmica nos meses mais quentes do ano e uma diminuição desta conforme os meses vão apresentando uma temperatura do ar ambiente mais baixa. A Figura 5 compara as cargas térmicas do sistema. Neste caso os resultados obtidos também são os esperados, sendo que as perdas pela envolvente, por infiltração de ar e pelo descongelamento, estão representadas através da média anual. No que diz respeito ao impacto destas cargas, é a carga proveniente da envolvente que maior impacto tem no sistema, com um total de 89% de toda a carga gerada, seguindo-se da carga derivada do evaporador com um valor de 6% da carga total. As cargas de infiltração de ar e de descongelamento têm um impacto de 1% em ambos os casos. As cargas com menor impacto são as cargas provenientes da iluminação, dos produtos e do pessoal, todas com menos de 1% do impacto total nas cargas térmicas. Estes resultados tão díspares podem ocorrer, porque os valores apresentados são o resultado da soma das quatro câmaras, e como tal, as cargas com maior impacto vão ter um maior relevo nesta análise.

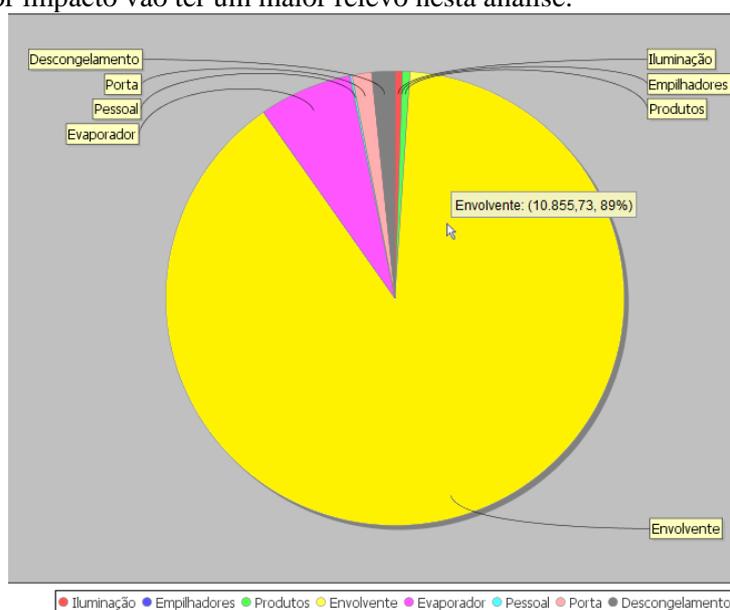


Figura 5. Comparação das cargas térmicas das câmaras da empresa A.

A Figura 6 compara as cargas elétricas do sistema. Os resultados obtidos foram os aguardados, e como aconteceu em relação às perdas pela envolvente, o compressor ocupa a fatia mais significativa das cargas elétricas, com um impacto de 63%, por estar representada a soma das cargas elétricas das quatro câmaras e por uma destas câmaras ser de congelação, o que vai aumentar bastante o valor geral relativo ao compressor.

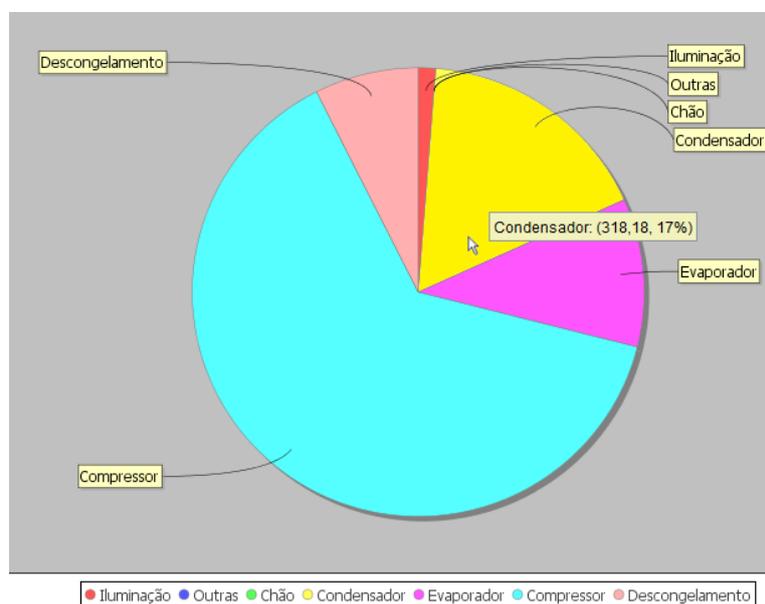


Figura 6. Comparação das cargas elétricas associadas às câmaras da empresa A.

No que diz respeito às outras cargas do sistema, as cargas provenientes do condensador (19%), evaporador (12%) e descongelamento (5%), são as restantes cargas com maior impacto no sistema. Por fim a carga da iluminação tem um impacto de apenas 1% no sistema.

3.2. Empresa B

Relativamente aos resultados relativos às cargas da empresa B, procedeu-se então à elaboração da representação gráfica destes, sendo obtidos três gráficos. Na Figura 7 encontra-se representada a evolução da carga térmica da envolvente ao longo do ano. A evolução desta carga ao longo do ano foi a esperada, uma vez que se verificou uma maior carga nos meses mais quentes, onde ocorre um aumento da carga de 10x dos meses mais quentes em comparação com os meses mais frios.

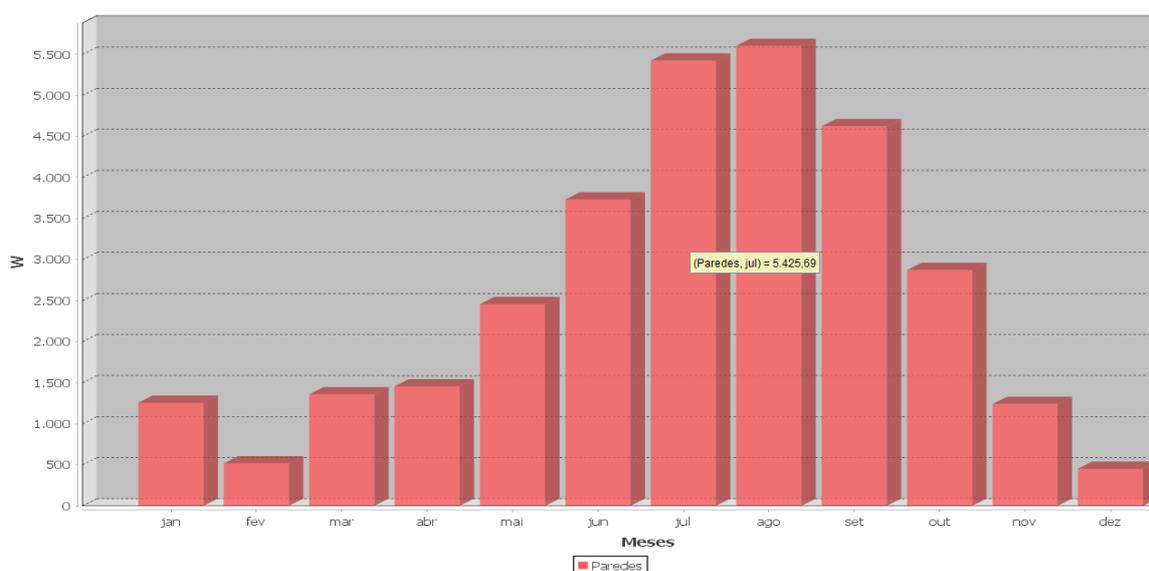


Figura 7. Evolução da carga térmica da envolvente das câmaras da empresa B ao longo do ano.

A Figura 8 ilustra todas as cargas térmicas das câmaras da empresa B. Verifica-se um maior valor da carga térmica referente à envolvente, comparativamente às outras cargas. Tal como no caso da empresa piloto A, estes valores correspondem a soma das duas câmaras da empresa, sobressaindo mais o valor referente à carga térmica da envolvente. Em relação às restantes cargas, a carga do evaporador é a segunda com maior influência no sistema (12%). As restantes cargas do sistema têm uma pequena influência em comparação com as duas acima mencionadas, variando entre 1% e 4%.

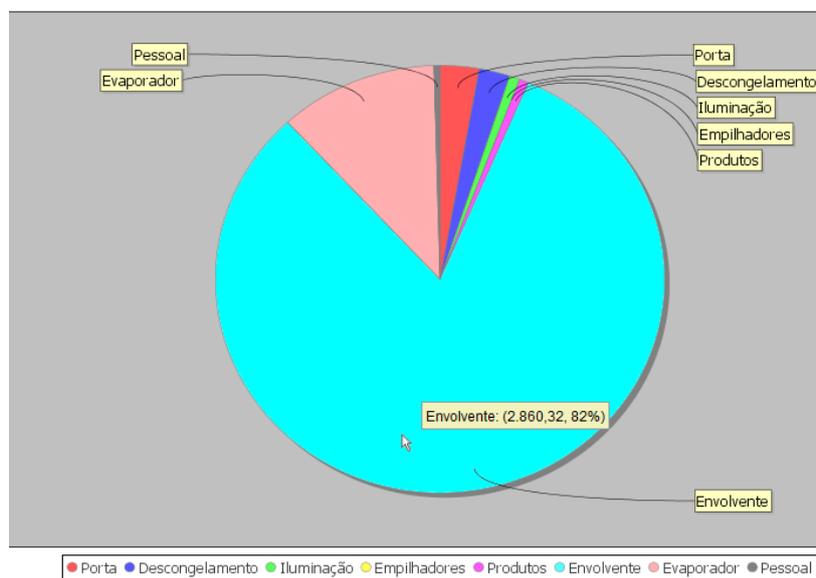


Figura 8. Comparação das cargas térmicas das câmaras da empresa B.

Por fim, a Figura 9 é relativa à previsão das cargas elétricas. Neste caso, o valor da carga elétrica do condensador encontra-se maioritariamente representado, muito por causa de apenas terem sido avaliadas apenas câmaras de refrigeração. No entanto, neste caso, ao contrário do caso da empresa piloto A, não existem parcelas muito mais destacadas porque apenas foram estudadas duas câmaras.

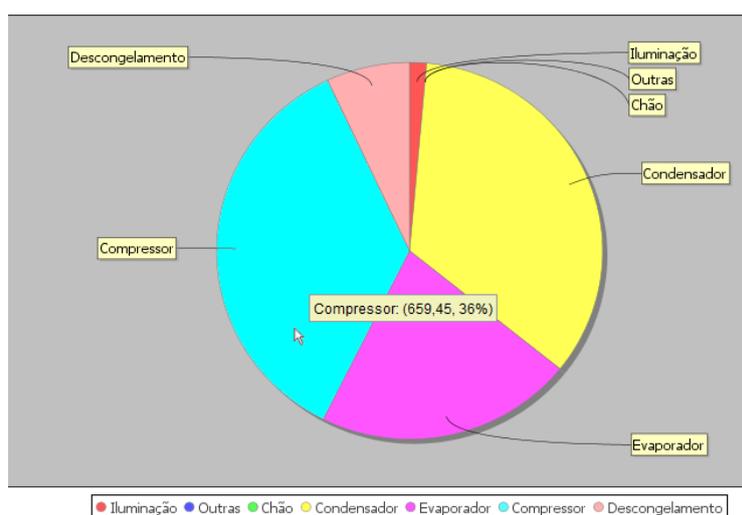


Figura 9. Comparação das cargas elétricas associadas às câmaras da empresa B.

4. CONCLUSÕES

Esta versão da ferramenta computacional denominada FORECAST (*Ferramenta cOmputacional de pREvisão das CargaS Térmicas em câmaras de frio*) é dirigida à análise das cargas térmicas e elétricas das câmaras de frio. Esta ferramenta possibilita, através da introdução das características das câmaras de frio e das condições

da envolvente, uma análise das cargas térmicas e elétricas do sistema. Esta ferramenta possui uma opção que permite o uso de um ficheiro climático, uma vez que as cargas térmicas associadas à envolvente, à infiltração de ar e ao sistema de descongelamento são influenciadas por fatores que variam ao longo do ano, e assim permite realizar uma análise dinâmica da variação anual das cargas. A fim de demonstrar a sua aplicabilidade, casos de estudos de empresas são apresentados. A partir da análise gráfica dos resultados referentes às cargas térmicas e elétricas, foi possível tirar algumas conclusões sobre os fatores que podem influenciar o aumento ou a diminuição destas. Assim sendo, devido à discrepância nos valores de algumas cargas, é possível concluir quais as condicionantes que detêm maior influência nas cargas estudadas. Dessas condicionantes destacam-se, como as mais significativas, as temperaturas interiores e exteriores, uma vez que influenciam o cálculo das cargas térmicas e elétricas das envolventes, da infiltração de ar, do processo de descongelamento e do compressor. A humidade exterior também tem alguma influência no cálculo das cargas relativas à infiltração de ar e no processo de descongelamento. O estado atual da ferramenta computacional permite que o utilizador insira os dados sobre as superfícies das câmaras de frio e dos diferentes fatores que proporcionam tanto cargas térmicas como elétricas. 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 no apoio à tomada de decisão na implementação de medidas de eficiência energética. 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, podendo ser implementadas as seguintes melhorias: Estender o dimensionamento da câmara aos dispositivos do sistema de refrigeração: compressor, condensador, evaporador; Incluir uma ferramenta de comparação com os dados do setor agroindustrial de modo a efetuar benchmarking; Estender a ferramenta a refrigerantes alternativos e novos refrigerantes em função da legislação de proibição de produção de gases refrigerantes com efeito de estufa (UE N.º 517/2014); Aumentar a base de dados de elementos construtivos e suas características térmicas; Aprimorar o design gráfico da ferramenta no sentido de a tornar mais expedita e de maior facilidade de utilização; Fazer uma modelação em regime transitório do processo de arrefecimento dos produtos, isto é, a evolução temporal da temperatura do produto (e carga térmica) desde a temperatura inicial de entrada na câmara até a temperatura final desejada. Estas melhorias ao programa irão dotá-lo de maior precisão, fornecendo resultados mais fidedignos e confiáveis aos utilizadores.

AGRADECIMENTOS

Este estudo encontra-se enquadrado nas atividades do projeto "+AGRO - Qualificação organizacional, energética e de segurança e saúde no trabalho da indústria agroalimentar". Ref. ID: 16159. O estudo foi financiado pelo Portugal 2020, COMPETE 2020 - Programa Operacional da Competitividade e Internacionalização (POCI) - Sistema de Apoio a Ações Coletivas (SIAC): 04/SIAC/2015, Ref.: 16159).

REFERÊNCIAS

- [1] Pachai, A.C., "From Cradle to table – cooling and freezing of food". ICCC 2013, Paris, France, 2013.
- [2] CCE (2006). Livro Verde - Estratégias para uma energia sustentável, competitiva e segura. Bruxelas.
- [3] Filho, L.C.N., 2008. Refrigeração e Alimentos. Faculdade de Engenharia dos Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campina, Brasil.
- [4] Langley, C., 2009. Refrigeración. Principios, Prácticas y Funcionamiento. Paraninfo, España.
- [5] Martín, P.A., 2005. Tecnología del Frío y Frigoconservación de Alimentos. AMV Ediciones, Madrid.
- [6] Foster, A.M., Reinholdt, L.O., Brown, T., Hammond, E.C., Evans, J.A. (2016). Reducing energy consumption in cold stores using a freely available mathematical model. *Sustain Cities Soc*, 21, 26-34.
- [7] Collin, Daniel, "Applications Frigorifiques", Tomo 1 e 2, Edition PYC, Paris, 1975.
- [8] ASHRAE. (2006b). ASHRAE refrigeration. Chapter 9—Thermal properties of food.
- [9] McAdams, W. H. (1954). Heat transmission (3rd ed.). New York, NY: McGraw Hill.
- [10] Gosney, W. B., & Olama, H. A. L. (1975). Heat and enthalpy gains through cold room doorways. *Proceedings Institute of Refrigeration*, 72, 31–41.
- [11] Cleland, D. J. (2011). The effect of water vapour on food refrigeration systems. *Proc. Inst. R.*, 12(5), 1–12.
- [12] ASHRAE. (2006a). ASHRAE refrigeration chapter 13-13. Refrigeration load.
- [13] Cleland, A. C. (1994). Polynomial curve-fits for refrigerant thermodynamic properties: extension to include R134a. *International Journal of Refrigeration*, 17(4), 245–249.