

TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE FRIO:

ESTUDO E ANÁLISE DE MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

1. Introdução

Ao longo dos últimos anos tem sido crescente a preocupação com os consumos energéticos, sendo necessário intervir de forma a reduzir os consumos e assim manter a sustentabilidade do planeta.

A indústria alimentar é dos setores mais importantes, sendo os sistemas de refrigeração os seus principais consumidores de energia elétrica (EE), ocupando assim a maior parte da fatia do consumo da instalação cerca de 75% [1]. Desta forma surge o presente artigo que pretende identificar oportunidades de eficiência energética na indústria alimentar, nomeadamente, no setor das carnes. Foram estudadas duas instalações e identificadas possíveis medidas de redução dos consumos de EE.

2. Sistemas de refrigeração

A refrigeração é o ato de arrefecer, trata-se da remoção de calor em que os seus princípios básicos assentam fundamentalmente nas leis da física e da termodinâmica.

Para a compreensão da refrigeração e dos seus ciclos começamos por analisar o ciclo de Carnot. Trata-se de um ciclo teórico ideal em que a máquina térmica é o mais eficiente possível entre dois níveis distintos de temperatura.

Os componentes são: o compressor, um motor e dois permutadores de calor.

Na prática este ciclo torna-se impossível de aplicar, pois é difícil efetuar a compressão até ao ponto de vapor saturado e a sua expansão. Assim, o ciclo mais amplamente utilizado nos sistemas de refrigeração é o de compressão a vapor como ilustra a Figura 1.

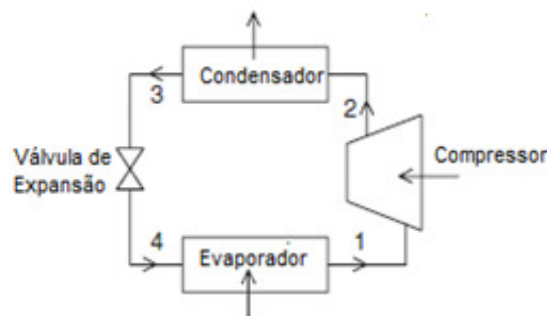


Figura 1. Diagrama do ciclo de compressão a vapor

Os processos deste ciclo são os seguintes [2]:

- (1-2): Compressão adiabática reversível. Um fluido a baixa pressão é comprimido o que leva ao aumento da sua pressão e temperatura;
- (2-3): Rejeição reversível de calor a pressão constante. Durante este processo é libertado calor;
- (3-4): Expansão irreversível a entalpia constante. O fluido refrigerante ao atravessar a válvula de expansão vê reduzida a sua pressão e temperatura;
- (4-1): Absorção reversível de calor a pressão constante. Com o fluido a baixa pressão e temperatura, o calor à sua volta é absorvido.

2.1. Componentes dos Sistemas de Refrigeração

São vários os componentes mecânicos necessários num sistema de refrigeração. Os principais são:

- Compressor;
- Condensador;
- Evaporador;
- Válvula de expansão.

Compressor:

No ciclo de refrigeração, o compressor tem duas funções principais: uma é promover a movimentação do fluido frigorífero no evaporador, de modo que a temperatura e pressão desejada possam ser mantidas. A segunda função é aumentar a pressão do fluido através da compressão o que leva ao aumento da temperatura. Devido a este aumento de pressão o fluido refrigerante sobreaquecido flui através do sistema.

Condensador:

A finalidade do condensador num ciclo de compressão de vapor é fazer a permutação de calor, entre o fluido frigorífero e o fluido absorvedor, em que normalmente é o ar ou água [3]. Os tipos de condensadores utilizados na refrigeração são de três tipos: arrefecido a ar, arrefecido a água ou evaporativo. No ar condicionado utiliza-se maioritariamente condensadores arrefecidos a ar enquanto que na refrigeração são os evaporativos os mais utilizados.

Evaporador:

O evaporador é um permutador de calor que promove a transferência de calor entre o fluido frigorífero e o meio que se pretende arrefecer. A função do evaporador é arrefecer o ar ou o líquido, que por sua vez arrefece a carga. Os tipos de evaporador são arrefecidos a ar ou a água. Um evaporador arrefecido a ar é constituído por serpentinas com alhetas, tendo instalado um ou mais ventiladores, no arrefecido a água as serpentinas encontram-se submersas em água.

Válvula de Expansão:

As válvulas de expansão surgem no circuito para reduzir a pressão do fluido frigorífero e controlar a quantidade de fluido que entra no evaporador. Classificam-se de acordo com o método de controlo, as principais são: válvulas termostáticas, válvulas eletrónicas e tubos capilares.

Outros Componentes:

Ao longo do circuito de refrigeração existem ainda outros componentes, destacando-se os sistemas de controlo, que

permitem controlar os vários componentes do circuito e promover a comunicação entre eles de forma a dar resposta às necessidades da instalação.

2.2. Consumos de Energia

Relativamente aos consumos energéticos na refrigeração, na indústria alimentar, estes ocupam mais de 50%, o que globalmente é cerca de 15% a 17% do total de energia elétrica produzida [4].

Para uma melhor noção de como se distribuem os consumos nas instalações de refrigeração, nomeadamente num armazém de refrigeração, segue-se a Figura 2 que mostra o consumo de energia elétrica correspondente aos vários componentes presentes nas instalações de frio [2]. É possível verificar a grande fatia da refrigeração, 54%, que aliada à descongelação atingirá os 75% [1].

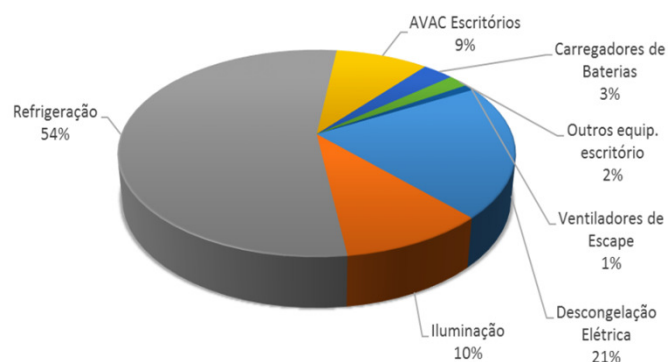


Figura 2. Distribuição dos consumos elétricos num armazém de refrigeração

2.3. Medidas de Eficiência Energética

Na área da refrigeração podem ser implementadas várias medidas ao nível da eficiência energética. Algumas destas medidas passam por: utilizar equipamentos mais eficientes, reparar os isolamentos das portas e fazer as devidas manutenções.

Com base numa pesquisa pelas várias oportunidades de eficiência energética com seus os respetivos valores percentuais da possível poupança energética, foram encontrados alguns documentos.

Para os variadores de velocidade estes valores foram obtidos a partir de: [4]; [5] e [6]. Os valores da iluminação foram através de [7] e as restantes oportunidades com base em [6]. Através dos estudos referidos e de forma a sintetizar os tipos de medidas de eficiência energética apresenta-se a Tabela 1.

Tabela 1. Oportunidade de Eficiência Energética nos Sistemas de Refrigeração

Oportunidade de Eficiência Energética	Poupança de Energia (%)
Variadores de Velocidade nos Motores e Ventiladores	15-40%; 34%; 7-17%
Controlo dos Ventiladores dos Condensadores	14 %
Controlo dos Ventiladores dos Evaporadores	16 %
Limpeza e Manutenção	20%
Isolamento	14 %
Proteções das portas	16 %
Iluminação LED	8%
Iluminação T5 de alta eficiência	5 %
Controlo da descongelação	30 %
Controlo de sobreaquecimento	5 %
Controlo de subarrefecimento	4%
Válvula de expansão	5%
Temperatura do produto	12%
Ajustes da temperatura da câmara	5%

3. Metodologia de auditoria aos sistemas de refrigeração

Para o desenvolvimento da metodologia de auditorias aos sistemas de refrigeração, partiu-se de métodos já existentes bem como da reflexão de ideias sobre como se prevê que as auditorias decorram e todos os passos necessários ao seu sucesso.

De uma forma geral são quatro as fases principais a ter em linha de conta.

A primeira, fase de planeamento, consiste em preparar todo o desenvolvimento das auditorias, inicia-se com a definição

do âmbito e objetivos das auditorias, serão escolhidas as instalações a serem estudadas. Concluída toda a fase de planeamento segue-se a fase crucial do trabalho, a fase campo, em que consiste fundamentalmente na deslocação à instalação e recolha de toda a informação. Com toda a informação obtida no trabalho de campo segue-se a fase de organização da informação, tratamento e o seu estudo. Por último com todos os dados obtidos e tratados é feita a sua análise e são retiradas as devidas conclusões de forma a dar resposta ao objetivo inicial da auditoria.

O diagrama da Figura 3 representa todas as fases necessárias e uma breve descrição do que compreende a cada fase.

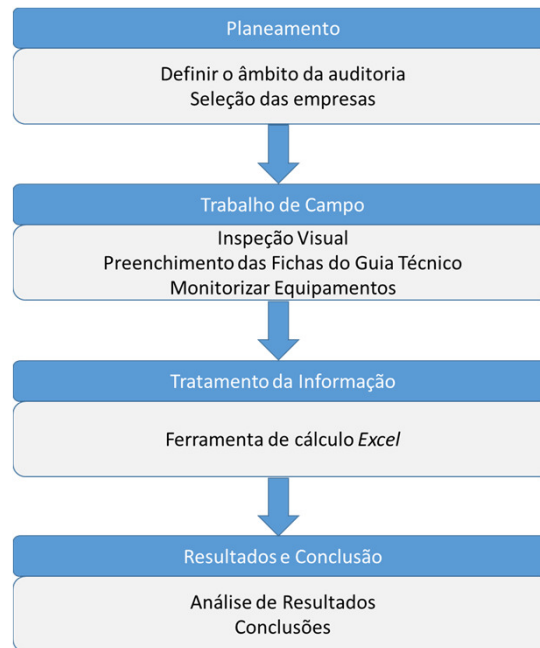


Figura 3. Diagrama da metodologia desenvolvida

Para este tipo de auditorias é indispensável a utilização de algum equipamento que facilitará e auxiliará nas tarefas no momento do trabalho de campo (segunda fase da metodologia). Idealmente o equipamento necessário será:

- Medidor de distâncias laser;
- Termómetro;
- Câmara termográfica;
- Luxímetro;
- Pinça amperimétrica;

- Voltímetro;
- Analisador/monitorizador de energia;
- Câmara fotográfica;
- Caudalímetro;
- Medidor de pressão e temperatura do circuito de refrigeração.

Da informação a recolher na fase de campo destaca-se a apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Informação a recolher nas instalações

Informação a recolher	Descrição
Dados genéricos sobre a empresa	Setor; Ano; Renovações; Atividades internas; Quantidade de produto (t); Faturas de Energia Elétrica.
Informação das câmaras frigoríficas	Dimensões (m ³); Equipamentos: Evaporador, Iluminação, Ventiladores; Tipo de câmara (refrigeração/congelamento).
Hábitos de utilização	Tempo de abertura das portas; Quantidade de produto nas câmaras; Temperatura do produto quando colocado.
Inspeção visual aos equipamentos	Isolamentos; Gelo; Sujidade.
Manutenções	Planos de manutenção; Técnicos responsáveis.
Monitorizar equipamentos	Condensador, Evaporador, Compressor, Sistema total de frio.

Para implementar a metodologia desenvolvida é assim necessário começar por identificar o âmbito e o objetivo das auditorias. Para o presente trabalho o âmbito foi identificar oportunidades de eficiência energética nos sistemas de refrigeração.

Começa-se por selecionar as empresas a serem alvo deste estudo, após esta seleção fez-se um primeiro contacto no sentido de explicar o objetivo deste estudo. De seguida segue-se a visita à instalação, aqui destaca-se a utilização de todo o material anteriormente referido bem como registar toda a informação. Por último com toda a informação faz-se uma análise técnica da instalação e são obtidas as melhorias de eficiência energética passíveis de implementar.

4. Casos de estudo

São apresentados dois casos de estudo de duas instalações do mesmo setor, em que são mostrados os principais resultados obtidos das auditorias e as respetivas propostas de melhoria.

4.1. Instalação (A)

Esta primeira instalação insere-se no setor de abate de gado, onde é feito o seu armazenamento e sua comercialização.

Ao nível de câmaras de refrigeração possui nove câmaras sendo uma delas de congelação. O ciclo termodinâmico é o de compressão a vapor. Sabe-se que ao longo dos anos a instalação sofreu várias melhorias e viu o seu número de câmaras aumentar. A data de construção das câmaras bem como do seu equipamento é do início dos anos 90. Mais tarde foram feitas melhorias, no ano 2000 e mais recentemente em 2005. Esta instalação tem a sua alimentação em baixa tensão especial (BTE). Os equipamentos de frio instalados datam sensivelmente do ano de 2000 e 2005.

4.1.1 Resultados

A área total a refrigerar é de cerca de 1600 m³. As temperaturas das câmaras de refrigeração são de 0 a 2 °C e a da congelação é da ordem dos -18 °C. A potência instalada referente aos compressores é de 46 kW, sendo que a potência total instalada acrescentando os compressores, os motores dos ventiladores e a iluminação perfaz um total de 53,8 kW.

Relativamente à fatura energética a instalação apresenta um custo total anual de EE de 34 441,18 € e um consumo anual de energia de 196 705 kWh (Figura 4).

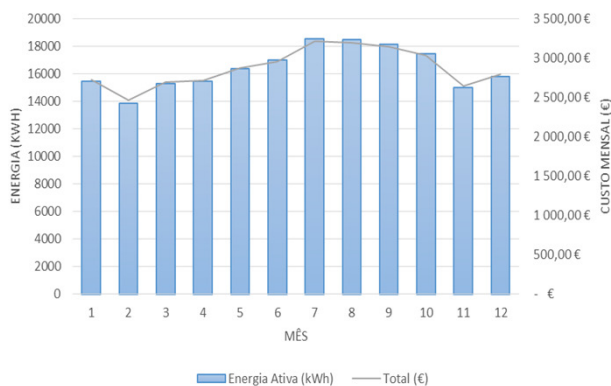


Figura 4. Evolução dos consumos e custo ao longo de um ano na instalação (A)

Do gráfico da figura 4 conclui-se que os meses de maior consumo são os meses de verão, já os de menor consumo são novembro e fevereiro, o mês de dezembro apresenta um valor relativamente elevado comparativamente a novembro, este facto deve-se à época festiva natalícia e de ano novo.

Além da energia ativa esta instalação apresenta valores significativos de energia reativa, o valor total anual de reativa foi de 31 359 kVarh e o respetivo custo de 714,66 €. Dada a quantidade de motores e de iluminação fluorescente é notório o valor elevado da energia reativa.

Após recolhida a informação durante a auditoria, fez-se o seu tratamento e obteve-se a Tabela 3, que apresenta os dados gerais da instalação. Partindo dos valores da Tabela 3 foram calculados os valores dos indicadores que se apresentam na Tabela 4.

Os indicadores da instalação tem utilidade quando comparados com outros valores de instalações semelhantes, assim é possível perceber onde se encontram os maiores desvios e desenvolver uma base de dados.

Tabela 3. Dados gerais da instalação

Descrição	Valor
Consumo Total Anual de EE	196 705 kWh
Quantidade de Produto Anual	3120 t
Volume Total das Câmaras	1 605,02 m ³
Potência Total dos Compressores	45,93 kW
Potência Instalada de Frio	53,76 kW
Custo Anual EE	34 441,18 €

Tabela 4. Indicadores da instalação

Indicador	Valor
Consumo Especifico de EE	63,05 kWh/t
Consumo de EE por Volume das Câmaras	122,56 kWh/m ³
Quantidade de Produto por Volume	1943,90 kg/m ³
Potência Instalada por volume	33,49 W/m ³
Potência dos compressores por volume	28,62 W/m ³
Custo de EE por Tonelada	11,04 €/t
Custo médio anual do kWh	0,1751 €/kWh

Da inspeção visual e com auxílio da câmara termográfica verificaram-se alguns pontos no interior das câmaras com possíveis perdas, nomeadamente nos isolamentos das portas e nos carris de entrada das carcaças para as câmaras. Relativamente à presença de gelo verificou-se um bloco de gelo assente no evaporador localizado na câmara de congelação. A iluminação no interior das câmaras é feita automaticamente e o tipo de lâmpadas utilizadas são fluorescentes do tipo T5 de 49W com balastros ferromagnéticos. No exterior, ao nível dos compressores estes apresentavam alguma ferrugem, os isolamentos encontravam-se degradados e reparou-se ainda numa fuga de óleo num dos compressores. Uma das unidades de refrigeração do exterior encontrava-se com a ventilação obstruída por parte de um muro, o que se encontrava assim a funcionar em esforço.

Relativamente aos hábitos de utilização, os funcionários da instalação não têm grandes cuidados com as portas de cais, mantendo as abertas por períodos prolongados em momentos sem necessidade. Os motores dos ventiladores não possuem qualquer tipo de controlo de velocidade, estando apenas ligado ou desligado. Um aspeto positivo foi a existência de cortinas de lamelas na câmara de congelação.

4.1.2 Soluções Sugeridas

Com base nos resultados e sua análise, reparou-se que a instalação pode ser alvo de várias melhorias. Das várias melhorias a fazer sugerem-se as seguintes:

- Isolamentos nas tubagens que ligam os compressores aos evaporadores;
- Manutenções;
- Variadores de velocidade;
- Substituição de balastros ferromagnéticos por eletrónicos;
- Corrigir o fator de potência;
- Melhorar os hábitos na gestão da abertura das portas de cais;
- Alterar a localização da unidade de refrigeração;
- Estudar a possibilidade de instalar uma central de frio;
- Estudar a possibilidade de substituição da iluminação fluorescente por LED.

Destas soluções, algumas apresentam custos relativamente baixos com melhorias significativas, tais como fazer uma revisão dos isolamentos e manutenções ao nível dos vários equipamentos, como compressores e evaporadores. Controlar melhor o tempo em que as portas de cais se encontram abertas também será uma medida interessante na medida em que diminui as variações de temperatura o que, reduzirá o número de arranques do sistema de refrigeração.

4.2. Instalação (B)

À semelhança da instalação (A) esta insere-se no mesmo setor, já ao nível das suas funções para além da comercialização e armazenamento, esta instalação efetua

abate de gado, tendo assim uma área dedicada ao matadouro. A alimentação é feita em Média Tensão (MT) havendo um transformador de 630 kVA. O sistema de refrigeração é centralizado, composto por dois compressores com controlo de carga. O ciclo termodinâmico é o de compressão a vapor, tendo como fluido refrigerante o amoníaco.

4.2.1 Resultados

A instalação possui 18 câmaras, sendo as mais pequenas com volume na ordem dos 37 m³ e as maiores de 250 m³, o somatório do volume de cada câmara perfaz um total de 2460 m³. Tratam-se todas de câmaras de refrigeração sendo o seu valor de temperatura interior compreendido entre 0 a 2 °C. Relativamente aos componentes consumidores de EE no interior das câmaras, os ventiladores dos evaporadores têm uma potência de 370 W e a iluminação é do tipo T5 de 49 W, utilizando balastros ferromagnéticos.

A potência instalada dos principais equipamentos da instalação de frio apresenta-se distribuída por componente e com a sua respetiva potência total como pode ser verificado na Tabela 5.

Tabela 5. Potência de frio instalada

Equipamento	Potência (kW)
Compressores	90
Ventiladores	15,17
Torre de refrigeração	8,25
Iluminação	3,97
Total	117,40

O consumo total de EE anual é de 747 081 kWh e o respetivo custo total de 85 355,11 €. Tal como na instalação (A) o perfil de consumo segue a mesma tendência, verificando-se os meses de maior consumo no verão e o de menor fevereiro e novembro, como ilustra a Figura 5.

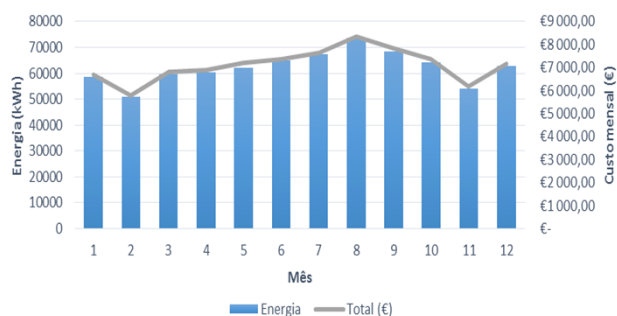


Figura 5. Evolução dos consumos e custo ao longo de um ano na instalação (B)

A relação entre o consumo de EE e quantidade de produto em toneladas que passa pelas instalações, representa-se no gráfico da Figura 6.

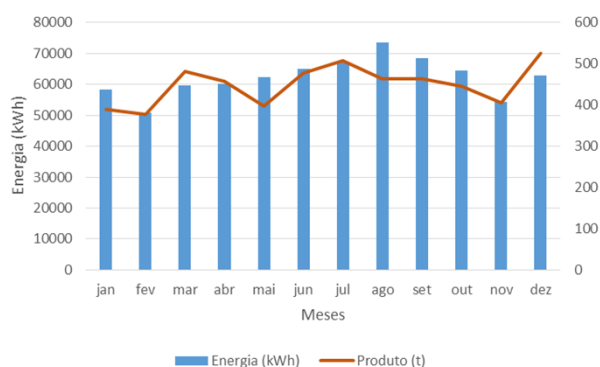


Figura 6. Relação entre o consumo de EE e quantidade de produto em toneladas

Daqui observa-se, de modo geral, uma evolução coincidente dos consumos com a quantidade de produto, com exceção do mês de agosto e dezembro em que esta tendência não se verifica, como são os meses de extremos ou seja o mais quente e mais frio conclui-se o que a temperatura exterior tem uma maior influência nos consumos do que a quantidade de produto, neste caso a carne e derivados, presentes no interior das câmaras.

Com os dados recolhidos é possível obter indicadores acerca das instalações. A Tabela 6 resume os valores totais para cálculo dos indicadores apresentados na Tabela 7.

Tabela 6. Dados gerais da instalação

Descrição	Valor
Consumo Total Anual de EE	747 081 kWh
Quantidade de Produto Anual	5394,80 t
Volume Total das Câmaras	2 460,33 m ³
Potência Total dos Compressores	90 kW
Potência Total de Frio	117,40 kW
Custo Anual EE	85 355,11 €

Tabela 7. Indicadores da instalação

Indicador	Valor
Consumo Especifico de EE	138,5 kWh/t
Consumo de EE por Volume das Câmaras	303,7 kWh/m ³
Quantidade de Produto por Volume	2193 kg/m ³
Potência Instalada por volume	47,7 W/m ³
Potência dos compressores por volume	36,6 W/m ³
Custo de EE por Tonelada	15,82 €
Custo médio anual do kWh	0,1143 €/kWh

Ao nível dos isolamentos, verificou-se a existência de gelo em torno das tubagens. A empresa apresenta preocupações e grandes exigências ao nível de uma boa gestão da abertura e fecho de portas, tanto das câmaras como as portas de cais.

Um problema verificado foi com a descongelação, que não está implementada de forma automática. As câmaras de refrigeração não possuíam isolamentos secundários.

4.2.2 Soluções Sugeridas

Apresentam-se as melhorias propostas para a instalação (B): Isolamentos;

- Manutenções;
- Variadores de velocidade;
- Substituição de balastros ferromagnéticos por eletrónicos;

- Estudar a possibilidade de substituição da iluminação fluorescente por LED;
- Automatizar a descongelação;
- Atualizar o sistema de gestão da refrigeração para um mais atual.

Como observado na instalação (A) aqui a questão dos isolamentos e manutenções também seria uma possível medida de melhoria. A instalação de variadores de velocidade também passa por ser uma medida interessante, no sentido que permitirá ajustar a velocidade dos ventiladores conforme as suas necessidades, ao invés de se encontrar ligado, à velocidade máxima, ou desligado.

5. Conclusões

Partindo do histórico dos consumos de EE ao longo de um ano e da quantidade de produto da instalação (B), verificaram-se que as condições ambientais, nomeadamente a temperatura externa, tem um maior impacto nos consumos do que a quantidade de produto que passa pelo interior das instalações. Dos indicadores para cada instalação são notórias as diferenças ao nível dos consumos específicos, verificando-se assim que a instalação (B) tem valores superiores ao da (A), pois deve-se o facto dos processos internos serem de certa forma distintos, pois a instalação (B) faz abate de gado. O custo médio do kWh é inferior na instalação (B) onde aqui entram valores de tarifário relativos à MT, já na instalação (A) o custo é superior pois é alimentada em BTE.

Das medidas sugeridas destaca-se uma melhoria na gestão comportamental, sendo esta uma medida de custo nulo ou reduzido que poderá ter grande influência nos consumos, pois a abertura e fecho de portas permite infiltrações de ar a temperaturas superiores que conduzem à necessidade de maior consumo de energia do sistema de refrigeração para manter a temperatura da câmara.

De uma forma geral e com base nestas duas instalações conclui-se que a área a refrigeração tem bastante margem de aumento de eficiência energética.

Para finalizar, este trabalho apresenta assim uma metodologia de auditorias orientada para os sistemas de refrigeração, o que poderá servir como base para eventuais trabalhos futuros.

Referências

- [1] Alexander, B. Lekov, Thompson Lisa, T. McKane Aimee, Alexandra Rockoff, and Piette Mary Ann. Opportunities for Energy Efficiency and Automated Demand Response in Industrial Refrigerated Warehouses in California, 2009.
- [2] Dinçer, I., and M. Kanoglu. 2010. Refrigeration Systems and Applications. Wiley, 2ª ed., 2010
- [3] Hundy, G. F. , A. R. Trott , and T.C. Welch. 2008. Refrigeration and Air Conditioning. BH, 4ª ed., 2010.
- [4] Mulobe, N. J., and Z. Huan. 2012. Energy efficient technologies and energy saving potential for cold rooms. Paper read at Industrial and Commercial Use of Energy Conference (ICUE), 2012 Proceedings of the 9th, 15-16 Aug. 2012.
- [5] Mulobe, N.J. Huan, Z. "Optimal Energy Saved Using Variable Air Ventilation for Cold Rooms." IEEE, 2014
- [6] Evans, J. A., E. C. Hammond, A. J. Gigiel, A. M. Fostera, L. Reinholdt, K. Fikiin, and C. Zilio. 2014. "Assessment of methods to reduce the energy consumption of food cold stores." Applied Thermal Engineering, vol. 62, pp. 697-705, 2014.
- [7] Trust, Carbon. Refrigeration Systems - Guide to key energy saving opportunities, 2011

Notas soltas:

Portaria n.º 252/2015, de 19 de agosto

Procede à alteração da Portaria n.º 949-A/2006, de 11 de setembro, que aprovou as Regras Técnicas das Instalações Elétricas de Baixa Tensão (RTIEBT), nos termos previstos no artigo 2.º do Decreto-Lei n.º 226/2005, de 28 de dezembro, por aditamento da secção 722 – Alimentação de veículos elétricos, à parte 7 das RTIEBT - Regras Técnicas das Instalações Elétricas de Baixa Tensão.