

AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE TRANSPORTE E EXPOSIÇÃO DE PRODUTOS ALIMENTARES PERECÍVEIS CONSERVADOS EM FRIO

P.D. Gaspar*, R.A. Pitarma**

* Universidade da Beira Interior
Departamento de Engenharia Electromecânica
Rua Fonte do Lameiro – Edifício 1 das Engenharias, 6201-001 Covilhã
e-mail : dinis@demnet.ubi.pt

** Instituto Politécnico da Guarda
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Departamento de Engenharia Mecânica
Avenida Dr. Francisco Sá Carneiro, n.º 50, 6300-559 Guarda
e-mail : rpitarma@ipg.pt

Palavras chave: Refrigeração, Veículos frigoríficos, Expositores frigoríficos, Modelação numérica (CFD), Estudo experimental

Resumo

O frio constitui o único meio de conservação de alimentos no seu estado natural. Porém, apenas se revela eficaz caso seja aplicado com continuidade, desde a produção dos produtos até ao seu consumo. Os equipamentos de transporte e exposição de produtos alimentares perecíveis conservados em frio são, regra geral, por questões técnicas e comerciais, os pontos mais deficientes da cadeia de frio.

Neste artigo caracterizam-se os diferentes equipamentos de transporte e exposição refrigerados. Analisam-se os factores que condicionam o seu desempenho térmico, energético e comercial. Com o recurso a estudos numéricos e experimentais desenvolvidos pelos autores deste estudo, apresentam-se as principais deficiências das instalações e apontam-se linhas de investigação em desenvolvimento.

1. INTRODUÇÃO

Desde tempos imemoráveis o Homem debateu-se com a problemática da conservação de géneros alimentares, pois o carácter sazonal e a distribuição irregular de géneros por regiões impuseram a procura de formas de conservação que permitissem o transporte e o armazenamento para posterior consumo. Os métodos tradicionais de preservação de alimentos (secagem, fumagem, salga e salmoura), embora adequados, apresentam diversas desvantagens, como sejam a alteração da aparência, do sabor inicial e a limitação do tempo de armazenamento.

Como a preservação de alimentos se resume à prevenção ou retardamento da deterioração, independentemente do processo de refrigeração utilizado, é necessário ter em consideração que existem diversos graus de qualidade dos produtos alimentares frescos em função da etapa de deterioração até se tornarem impróprios para consumo. Assim sendo, apenas o frio se apresenta como o único meio de conservação de alimentos no seu estado fresco original. Porém, apenas se revela como um método eficaz se for aplicado com continuidade, desde a produção dos produtos até ao consumo. A necessidade actual de grandes quantidades de produtos alimentares frescos ou congelados nas vastas áreas urbanas, revela o destaque atribuído à refrigeração, pois o objectivo da conservação de produtos alimentares consiste na manutenção dos alimentos num escalão de qualidade o mais elevado possível no que respeita à aparência, odor, sabor e conteúdo nutritivo, já que destes elementos depende o valor comercial, além do perfeito estado sanitário.

Os domínios de aplicação da refrigeração estendem-se a uma variedade de sectores, desde o doméstico, passando pelo industrial, comercial e de transportes. A refrigeração doméstica é um tanto restrita em questões de aplicação, sendo dominada pelos frigoríficos e as áreas frigoríficas domésticas afins. Devido ao elevado número de equipamentos em serviço, este sector representa uma parcela significativa da indústria de refrigeração, marcada pelas dificuldades de manutenção e projecto de pequenas unidades.

A refrigeração industrial é usualmente confundida com a refrigeração comercial, pois existe uma fronteira dúbia na definição em qual dos sectores deverá ser englobada determinada aplicação. Como regra geral, as aplicações industriais da refrigeração abrangem uma variedade mais vasta de situações do que as aplicações comerciais. As aplicações típicas são os grandes estabelecimentos de armazenamento de produtos alimentares frescos ou congelados, a indústria do ramo alimentar com necessidade essencial de refrigeração ou congelação dos produtos que processa e instalações industriais com necessidade de refrigeração dos diversos processos de fabricação, como sejam refinarias, indústria química, entre outras. O sector da refrigeração comercial consiste no projecto, instalação e manutenção de equipamentos de refrigeração presentes em estabelecimentos comerciais, bem como, na restauração, hotelaria e estabelecimentos de retalho, destinados à conservação em frio e exposição de todo o tipo de produtos alimentares.

As aplicações no sector dos transportes podem pertencer em parte à refrigeração comercial e por outro lado à refrigeração industrial. No entanto, devido ao crescimento do sector, ganhou dimensão suficiente para ser tratada como uma área independente. A refrigeração dos transportes refere-se aos equipamentos de refrigeração que equipam qualquer tipo de veículo terrestre, marítimo ou aéreo.

O condicionamento de ar numa determinada área, envolvendo o controlo não só da temperatura, mas também da humidade e da deslocação, filtração e limpeza do ar é outra das aplicações da refrigeração, podendo ser subdividida em dois sectores, um referente ao condicionamento de ar com o objectivo específico de privilegiar o conforto humano, e outra referente às aplicações industriais, em que o condicionamento de ar tem como objectivo a maximização do processo produtivo, através do controlo do conteúdo de humidade, governo da taxa de reacções químicas e bioquímicas, limitação das variações do tamanho de precisão de artigos manufacturados em função da expansão ou contracção térmica, e favorecer a limpeza e filtração de ar necessário às operações de fabricação de diversos produtos.

Face a estas considerações, as componentes dos transportes e comercial da refrigeração assumem um papel cada vez mais importante na vida quotidiana pela necessidade de conservação em frio dos produtos alimentares desde o momento que são deslocados da origem até aos locais de exposição destinados à venda aos consumidores. Assim sendo, tanto o transporte como a conservação de produtos alimentares sob temperatura controlada assumem uma grande relevância em termos de estudos de cariz científico e técnico, já que

inúmeros factores como sejam as condições ambientais, as condições de armazenamento, padrões de carga, e até mesmo a disposição dos equipamentos de refrigeração no interior do estabelecimento comercial, entre outros, influenciam directamente a temperatura dos produtos, a qual deverá permanecer o mais estável possível e próxima do valor de armazenamento considerado. Segundo a ETSU (2001) e de acordo com a CRMD (2001), as evoluções tecnológicas mais prometedoras dos sistema de refrigeração, ambicionam a exploração da superior eficiência energética dos refrigerantes hidrocarbonetos, o aumento da precisão da carga de refrigerante através de dispositivos de expansão por tubos capilares e o uso mais consciente dos controlos e dos pontos de funcionamento. Assim, seria desejável a utilização de um controlo do tipo termostático mais preciso ou de outra metodologia de controlo mais eficaz, que controle não só os diversos mecanismos do sistema de refrigeração, mas que também seja capaz de detectar quantitativamente a presença de produtos alimentares no interior do envelope de refrigeração e accionar o nível de refrigeração necessário. Relativamente ao desenvolvimento dos dispositivos que constituem os equipamentos de refrigeração, pretende-se a optimização do “*design*” dos equipamentos aliada a uma selecção adequada de componentes de qualidade superior, com principal incidência nos sensores de temperatura e nos ventilo-convectores, bem como a utilização de iluminação apropriada, com menor dissipação de calor para o espaço refrigerado e o aperfeiçoamento do isolamento e dos materiais vidrados. É também desejável a redução da necessidade energética dos mecanismos de anti-embaciamento das superfícies vidradas, através da melhoria do isolamento local ou controlo do aquecimento das superfícies em função da exigência e o melhoramento e evolução dos mecanismos de descongelação e dos métodos de controlo. Os itens evidenciados correspondem a situações de evolução tecnológica já disponíveis, no entanto, apresentam ainda custos elevados que se reflectem no encarecimento final do produto. Paralelamente, são levadas a cabo investigações em diversos campos com o objectivo de futuramente, possibilitarem a optimização da eficiência energética destes equipamentos, muito embora alguns dos estudos possam custos associados extremamente elevados para a capacidade tecnológica actual, como sejam novos materiais para isolamento com uma condutibilidade térmica muito reduzida; motores de velocidade variável para redução da energia consumida pelo sistema, em função da necessidade temporal de refrigeração; a utilização de armazenamento térmico nas instalações e a avaliação da distribuição das temperaturas e do fluxo de ar no interior do espaço refrigerado, especialmente em função da distribuição de obstáculos, das características das entradas/saídas mássicas através de simulação com base em Dinâmica de Fluidos Computacional. Esta técnica permite realizar a simulação numérica dos fenómenos físicos que se desenrolam no interior e nas vizinhanças do modelo de modo a examinar um rol completo de modificações a efectuar nas referidas instalações, com um custo mais reduzido e com um tempo de desenvolvimento inferior.

2. TRANSPORTE E EXPOSIÇÃO DE PRODUTOS

Na generalidade dos casos, os transportes e a comercialização quiçá representem os elos mais deficientes da rede de frio. Ambos sectores apresentam deficiências intrínsecas que motivam um crescente esforço de investigação de modo a dar resposta aos cada vez mais exigentes requisitos de qualidade de frio para a conservação de produtos perecíveis e de racionalização energética. Durante o transporte, a conservação dos produtos alimentares em frio é fortemente afectada pelas condições climáticas ambientais, podendo a distribuição espacial e a flutuação temporal da temperatura afectar a qualidade dos produtos. Relativamente ao sector comercial, Adams (1992) indica que o funcionamento dos sistemas de refrigeração corresponde aproximadamente a metade da electricidade utilizada num estabelecimento comercial. Os diversos tipos de balcões frigoríficos refrigerados

correspondem à maior fatia deste consumo. Além disso, devido a questões de marketing, diversos equipamentos expositores refrigerados não possuem qualquer barreira física entre o consumidor e o produto. A necessidade do consumidor poder ver e manusear sem constrangimentos o produto que se predispõe a adquirir, irá também fomentar a flutuação temporal e uma distribuição não uniforme da temperatura devido à interação e mistura do ar ambiente quente e húmido do estabelecimento comercial com o ar refrigerado no interior do equipamento. Esta situação resume-se a uma perda de capacidade que implica um aumento da carga térmica e conseqüentemente um aumento do consumo energético dos equipamentos.

2.1. Veículos de transporte sob temperatura controlada

Os veículos de transporte sob temperatura controlada, são denominados por veículos de transporte condicionado (cf. Portaria n.º 682/96, de 21 de Nov.) e podem ser distinguidos em isotérmicos, refrigerados, frigoríficos e caloríficos. A diferença entre veículos refrigerados e frigoríficos reside fundamentalmente na natureza do frio, sendo designado de veículo frigorífico aquele que faz uso de um equipamento mecânico ou de absorção para produção de frio. Segundo a ASHRAE (1994) os veículos de transporte sob temperatura dirigida encontram-se classificados em três grandes grupos de acordo com a sua operacionalidade: transporte de longa distância, transporte de curta ou média distância e veículos de distribuição de produtos alimentares (Figura 1). Outra sub-classificação pode ser realizada quanto à temperatura de serviço: baixas temperaturas ou produtos congelados, [-18 °C]; produtos frescos, [0 a -2 °C]; temperatura média ou produtos perecíveis, [0 a 5 °C] e ar-condicionado: [13 a 21 °C].



a) Veículos de distribuição.



b) Veículos de longo curso.

Figura 1 – Veículos frigoríficos.

Este sector encontra-se regulamentado na Europa e Estados Unidos pelo Acordo relativo a transportes internacionais de produtos alimentares perecíveis e aos equipamentos especializados a utilizar nestes transportes - certificação ATP (1970), celebrado em Genebra em 1970 e ratificado por Portugal em 1987. Para homologação do veículo/câmara, esta norma incide essencialmente na verificação do coeficiente global de transferência de calor da caixa isotérmica. Para todos aqueles que operam com temperaturas iguais ou inferiores a -10 °C, é imposto que a caixa isotérmica (reforçada) possua um coeficiente global de transferência de calor não superior a 0,4 W/m²K. Esta homologação apenas é válida para um período de 6 anos devido à deterioração do material isolante da caixa isotérmica (cf. Scrine (1986)) e conseqüentemente ao aumento do coeficiente global de transferência de calor.

As caixas isotérmicas procuram conjugar o baixo peso a uma adequada resistência térmica e mecânica. Assim sendo, os materiais de isolamento devem possuir uma condutibilidade térmica reduzida, fraca deterioração temporal e um custo moderado, tendo em consideração que as respectivas espessuras são fixas em função da temperatura de serviço.

No caso de veículos frigoríficos longos, diversas câmaras são caracterizadas por paredes laterais de baixa espessura (câmaras de paredes finas) com o objectivo de oferecer maior

capacidade de carga, que poderá chegar a um incremento de 20% relativamente aos veículos convencionais. Porém, segundo Bennahmias (1990) e Pitarma (1998) as câmaras de paredes finas apresentam distribuições de temperatura mais deficientes e maior susceptibilidade ao envelhecimento, fortemente condicionado pela humidade.

No que se refere aos tipos de sistemas de refrigeração mecânica usualmente utilizados em veículos de transporte de produtos alimentares sobre temperatura controlada, podem ser distinguidos em grupos frigoríficos de accionamento eléctrico, ou motor Diesel independente para os veículos de maiores dimensões. Os gases liquefeitos (N_2 e CO_2) são por vezes utilizados como fontes de frio independente ou, como fonte de frio auxiliar em instalações frigoríficas com sistemas de refrigeração mecânica, com a finalidade de restabelecer rapidamente as condições de frio na câmara após a abertura das portas.

A refrigeração da câmara poderá ser estática ou ventilada (Figura 2), isto é, a complexa movimentação de ar dentro do espaço condicionado é promovida apenas pela acção natural dos efeitos de impulsão de origem térmica (câmaras de convecção natural) ou pela utilização de ventilo-convectores para impulsionar a circulação de ar (câmaras de convecção forçada). As fontes de frio mais utilizadas nas câmaras com refrigeração estática são as placas eutéticas, que permitem a obtenção de temperaturas de funcionamento padronizadas entre $-50\text{ }^\circ\text{C}$ e $-3\text{ }^\circ\text{C}$. Nesta técnica, as placas instaladas nos pontos mais altos do compartimento da câmara (tecto ou paredes laterais) são repletas com o refrigerante secundário arrefecido por um permutador onde circula o refrigerante primário. No caso dos sistemas de expansão directa, esta serpentina constitui o evaporador do grupo frigorífico.



a) Refrigeração estática (convecção natural).

b) Refrigeração ventilada (convecção forçada).

Figura 2 – Representação esquemática de câmaras frigoríficas de veículos.

As câmaras com circulação forçada de ar refrigerado recorrem a sistemas de ventilação mecânica para promover a insuflação no compartimento após passagem do ar pelo evaporador do grupo frigorífico. A utilização desta técnica pressupõe a circulação de ar em circuito fechado, sendo frequentemente utilizadas condutas ou mangas para a distribuição de ar em veículos longos. Os caudais de circulação de ar para veículos longos com compartimentos convencionais situam-se próximo das 60 renovações/hora, enquanto para veículos longos com câmaras frigoríficas de paredes finas sugere-se 80 a 90 renovações horárias.

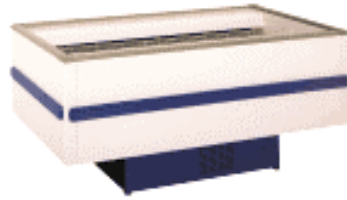
2.2. Equipamentos expositores refrigerados

Os móveis dividem-se em três tipos principais segundo as características decorrentes da necessidade específica de mercado que pretendem preencher, além do cumprimento dos diversos requisitos exigidos pela normalização para a comercialização de produtos alimentares conservados e expostos em frio: Expositores verticais – murais (Figura 3-a), cuja característica principal é apresentar uma ampla área de exposição de modo a expor os produtos de forma atractiva. Este tipo de equipamento está destinado a albergar vários géneros de produtos frescos, produtos congelados ou até mesmo possuem características multifuncionais; Expositores horizontais – ilhas (Figura 3-b) esteticamente indicados para aproveitar os espaços livres, destinados à exposição e conservação em frio de produtos frescos e produtos congelados e Vitrinas (Figura 3-c) indicadas para a exposição e conservação de produtos de pastelaria e bar, talho e charcutaria, peixaria, supermercados e

restauração. Este modelo é ideal para pequenas lojas especializadas pois permite um relacionamento óptimo entre a superfície ocupada e a área de exposição.



a) Mural.



b) Ilha.



c) Vitrina.

Figura 3 – Equipamentos expositores refrigerados (Cortesia: JORDÃO Cooling Systems®).

Qualquer um destes tipos de equipamento expositor pode ser classificado segundo diversas características de mercado. Poderão ser instalados em modo de “*self-service*” e além disso serem fechados ou abertos ao ar ambiente. Neste último caso dependem de cortinas de ar para impedir a entrada no seu interior, de ar ambiente a uma temperatura superior e com um conteúdo de humidade mais elevado, de modo a manterem a correcta temperatura dos produtos que armazenam. Na generalidade, os expositores abertos possuem entre uma a três cortinas de ar dependendo da temperatura de funcionamento e da área da superfície da abertura de exposição. A interacção entre o ar ambiente e o ar refrigerado da cortina aumenta o fluxo de calor ao longo da cortina de ar, que por sua vez irá incrementar a carga térmica da unidade. Assim, a redução da interacção térmica da cortina de ar com o ar ambiente aumentará a quantidade de ar refrigerado que é recirculado, reduzindo a carga de arrefecimento, bem como, diminuindo a frequência dos ciclos de descongelação, permitindo, por uma vertente, a manutenção de uma temperatura mais uniforme no interior do equipamento e, por outra, a redução do consumo energético. Para maximizar a mistura na fronteira interior e minimizar na fronteira exterior, a cortina de ar deverá possuir um gradiente de temperatura ascendente e um gradiente de velocidade descendente, do interior para o exterior, tal que o escoamento a elevada velocidade e baixa temperatura assegure a mistura na fronteira interior enquanto o escoamento a baixa velocidade e temperatura ambiente na fronteira exterior minimize a mistura do ar refrigerado com o ar ambiente do local. Além disso, a eficiência das cortinas de ar é afectada pela diferença de densidade entre o ar refrigerado e o ar ambiente, assim, quanto mais reduzida for a temperatura de funcionamento e maior for a abertura vertical do expositor, maior deverá ser a espessura e a velocidade da cortina de ar. Seja qual for o tipo de expositor, verifica-se que, independentemente do uso de cortinas de ar, a temperatura de funcionamento para a qual o equipamento está projectado é alcançada mais rapidamente se este contiver uma carga alimentar que reduza o volume vazio, pois noutro caso irá favorecer a interacção térmica com o ar ambiente do estabelecimento.

Por questões comerciais, os equipamentos expositores refrigerados verticais (murais) de temperaturas de funcionamento positivas, são por norma abertos ao ar ambiente, já que maioritariamente os produtos alimentares perecíveis colocados no seu interior são diários.

Os expositores horizontais, vulgarmente chamados “ilhas” regem-se pelos mesmos princípios dos gradientes de temperatura e velocidade que os expositores verticais e também possuem cortinas de ar, no entanto, desfrutam do princípio físico da gravidade que joga a favor da redução da carga total de arrefecimento. O ar refrigerado no interior do equipamento

é mais pesado que o ar ambiente exterior, pelo que a cortina de ar logra de uma interacção mais reduzida com o ar ambiente e assenta sobre os produtos alimentares e mantendo-os à devida temperatura de conservação. O efeito da gravidade permite o uso de velocidades mais reduzidas e a espessura da cortina de ar é inferior, o que na realidade se traduz numa redução do consumo energético do equipamento face aos expositores verticais.

As padarias e pastelarias são as áreas de mercado preenchidas fundamentalmente por vitrinas, o que faz com que este tipo de expositor geralmente seja fechado ao ar ambiente e apresente uma ampla área de visibilidade dos produtos que abriga. No caso de armazenar produtos frescos, é necessário atender às características da vitrina, em termos do funcionamento através de refrigeração estática ou ventilada. A vitrina com refrigeração estática apresenta a vantagem de não contribuir para ressequecer os alimentos frescos (caso premente da conservação e exposição de marisco fresco), visto não possuir convecção forçada do ar refrigerado. Este facto implica uma redução na área de exposição devido às grandes dimensões do evaporador. Como a recirculação do ar no interior da área de exposição é natural, não há necessidade de ventiladores e o evaporador poderá ser colocado em diversos locais, dependendo do tipo de produto. Por norma, devido às dimensões do evaporador, este é instalado por baixo do tabuleiro ou na zona posterior da vitrina ocupando área que de outra maneira seria de exposição. Como alternativa, poderá ser colocado no topo do expositor, se o equipamento funcionar com refrigeração estática por gravidade. A vitrina com refrigeração ventilada apresenta a desvantagem de secar os produtos frescos mais rapidamente e ter um consumo energético superior, no entanto apresenta uma resposta muito superior, e ao possuir o evaporador no fundo do equipamento, a área de exposição aumenta e possibilita diversas configurações de colocação de prateleiras que beneficiam a comercialização dos produtos alimentares.

3. CONTRIBUTOS PARA A I&D: APRESENTAÇÃO DE DOIS CASOS DE ESTUDO

É de salientar a escassez de estudos de carácter académico e científico na área da refrigeração de transporte e comercial, baseando-se o projecto sobretudo em conhecimentos empíricos. Os gabinetes de projecto, e os trabalhos de investigação e desenvolvimento não são incentivados à prossecução de estudos mais aprofundados, possivelmente por serem campos da refrigeração com reduzido índice de concorrência e porque o volume de vendas, tanto de equipamentos como de veículos são condicionadas pelo custo inicial e não pelo desempenho energético (custo de exploração). A falta de sensibilização dos comerciantes e industriais associada à falta de legislação e incentivo nesta matéria não permitem corrigir o problema.

As técnicas de modelação matemática para simulação do comportamento térmico e do escoamento do ar em espaços refrigerados têm sido alvo de alguma investigação, embora a diversidade de casos possíveis a torne numa área com necessidade de maiores estudos para a avaliação das condições de funcionamento. As dificuldades vão desde a ocupação do espaço por produtos alimentares, normalmente com formas irregulares ou armazenados em qualquer tipo de embalagem, bem como pela diversidade de cargas térmicas existentes nos espaços, sendo o caminho percorrido pelo ar nas secções em estudo extremamente complexo. Assim sendo, é necessário ter em consideração os constrangimentos a que está sujeita a simulação do processo, além do esforço computacional relativo à modelação do escoamento e do processo de transmissão de calor. No entanto, a modelação numérica de escoamentos e transmissão de calor tornou-se num método expedito de previsão, face aos elevados custos e tempo despendido associados aos trabalhos experimentais de desenvolvimento de equipamentos.

Embora haja alguns estudos académicos e de índole industrial, promovidos por centros de investigação a pedido de empresas, de seguida serão genericamente apresentados os trabalhos

experimentais e numéricos desenvolvidos pelos autores da comunicação nos campos da refrigeração dos transportes e comercial.

3.1. Câmaras frigoríficas de veículos

Pitarma (1998), realizou a modelação matemática de câmaras frigoríficas de veículos com o propósito de estudar as condições de frio nestas instalações. Foi efectuada a modelação tridimensional do escoamento turbulento, com transmissão de calor, em compartimentos frigoríficos com convecção natural e forçada. O modelo computacional recorreu ao método das diferenças finitas pela formulação de volumes de controlo, para a resolução numérica iterativa das equações de conservação de massa, de quantidade de movimento, de energia e de concentração de espécies. O efeito de turbulência foi modelado através do modelo de turbulência $k-\epsilon$ standard, afectado da impulsão para considerar as variações da massa específica em função da temperatura. As previsões numéricas obtidas pelo modelo computacional desenvolvido foram confrontadas com valores experimentais, não só com o intuito de validar o modelo, mas também para conhecer as potencialidades do método de simulação para posterior utilização fora das condições limites experimentais estudadas. O estudo experimental conduzido para a validação do modelo computacional, consistiu na construção de um modelo reduzido cuja caracterização construtiva e funcional foi baseada numa análise dimensional e de semelhança da câmara protótipo (Figura 4). O equipamento laboratorial auxiliar constou de uma unidade de condicionamento de ar, com o objectivo de condicionar o ar de insuflação a introduzir no compartimento. A simulação da carga térmica inerente aos produtos armazenados em compartimentos refrigerados, foi providenciada por uma fonte de calor uniformemente distribuída sobre uma superfície plana constituída por agrupamentos de resistências eléctricas. De modo a facilitar a medição das propriedades temperatura e velocidade em diversos pontos do domínio, foi utilizado um sistema de posicionamento de pontas de prova. A técnica utilizada pelo sistema de medição do campo de velocidade no compartimento experimental foi a anemometria de fio/filme quente a temperatura constante. Os sistemas de termometria e de anemometria permitiram a obtenção de valores das propriedades para confrontação com as previsões numéricas, no entanto, foram também utilizadas diversas técnicas complementares de análise que consistiram na visualização do escoamento, tanto em convecção natural como em convecção forçada. No caso de convecção natural, a descrição dos detalhes do escoamento foi conseguida através de visualização com fumo (Figura 5-a), enquanto no modelo experimental de convecção forçada, a observação dos pormenores do escoamento foi realizada a partir da inclinação de filamentos de fibra de nylon dispostos no compartimento (Figura 5-b).

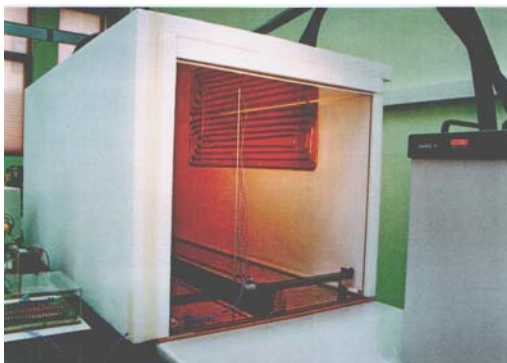
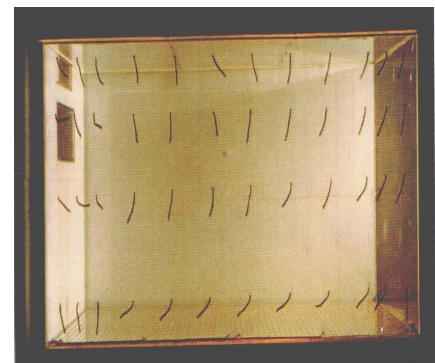


Figura 4 – Montagem experimental do modelo de convecção natural.



a) Injecção de fumo.



b) Fibras de nylon.

Figura 5 - Visualização do escoamento.

Foram modelados diversos casos práticos com relevância no domínio da refrigeração de câmaras para o transporte rodoviário de longa distância, relativos ao estudo da circulação de ar no interior da câmara em função das dimensões e localização de diversos tipos de sistemas de distribuição de ar, e ao uso de caixas isotérmicas com paredes laterais de baixa espessura e restantes paredes fortemente isoladas. Com estas simulações foi possível avaliar o desempenho de distintos sistemas de distribuição de ar e averiguar as condições de frio proporcionadas por uma câmara de paredes finas face a um compartimento convencional.

No sistema convencional de distribuição de ar em câmaras frigoríficas de veículos, as grelhas de insuflação e de extracção estão localizadas na parede anterior. A entrada de ar é efectuada através de uma pequena abertura junto ao tecto. Processa-se a uma velocidade elevada, tal que é formado um jacto parietal que promove a mistura do ar refrigerado insuflado no compartimento. A previsão da distribuição da temperatura (Figura 6) é globalmente adequada à excepção da zona localizada junto à parede anterior. Os resultados melhoram na razão directa do incremento do caudal de ar circulado, no entanto este sistema de circulação de ar está condicionado pelo forte efeito de desidratação que induz. Esta contra-indicação desvanece-se se forem utilizadas condutas de modo que o caudal de ar refrigerado seja insuflado a uma velocidade mais baixa através de duas (ou mais) aberturas localizadas no tecto, na parte posterior do compartimento. O sistema releva-se mais eficaz, já que garante níveis mais admissíveis da velocidade do ar na zona útil. Embora possa surgir algum efeito de “curto-circuito”, a distribuição da temperatura (Figura 7) apresenta-se genericamente uniforme, sem conseguir melhorar a distribuição da grandeza na zona crítica descrita anteriormente.

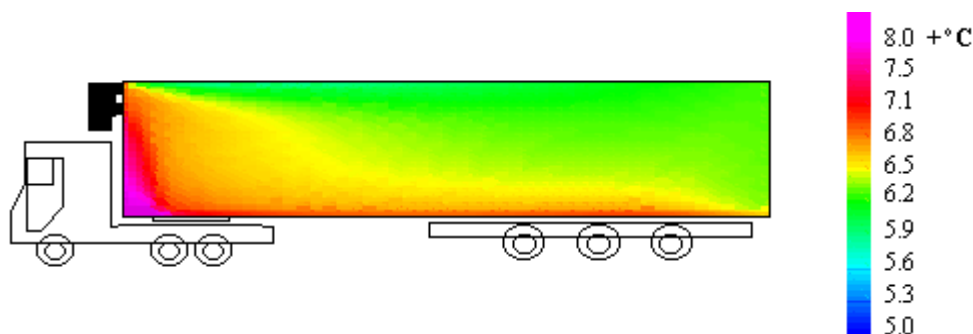


Figura 6 – Previsão do campo de temperatura (Sistema convencional).

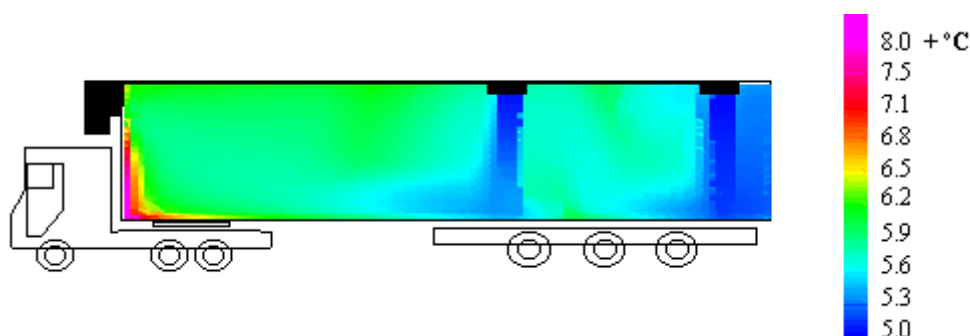


Figura 7 – Previsão do campo de temperatura (Sistema de conduta com duas aberturas de insuflação).

3.2. Equipamentos expositores refrigerados

O crescimento de consumo energético no sector comercial encontra-se directamente associado à expansão de equipamento electromecânicos de refrigeração, conforme descrito por Flannick *et al.* (1994). Dada a presente evolução tecnológica, esta componente é

susceptível de ser reduzida, pelo que é fundamental assegurar meios e instrumentos de cálculo para melhorar o desempenho energético do sector, bem como a sua incidência no campo ambiental. Tradicionalmente, o desenvolvimento de novos equipamentos expositores refrigerados era levado a cabo pela modificação dos modelos existentes, na tentativa de aperfeiçoamento em termos de desempenho, isto é, na redução do consumo energético e na uniformização da temperatura dos produtos no interior do espaço refrigerado. Trata-se de uma prática com as deficiências já evidenciadas e neste caso em particular, ocasionalmente o desenvolvimento dos equipamentos em termos de estética, não é acompanhado por uma evolução técnica dos elementos internos que fazem parte do mecanismo, o que resulta num retrocesso na racionalização energética que se pretende.

Gaspar (2001) desenvolveu um estudo cujo objectivo consistiu na simulação numérica dos fenómenos de transmissão de calor e massa em equipamentos expositores verticais abertos. A metodologia seguida consistiu inicialmente na realização de ensaios experimentais para uma análise qualitativa de todos os parâmetros. Foram utilizadas diversas técnicas experimentais (Figura 8) para ganhar uma sensibilidade face ao funcionamento real do equipamento e para introduzir no modelo computacional diversas características funcionais: Termometria por termopares; Anemometria de fio quente a temperatura constante; Gases traçadores; Termografia por infravermelhos e visualização do escoamento por injeção de fumo. Os ensaios experimentais foram realizados na secção de I&D de um fabricante deste tipo de equipamentos (*JORDÃO Cooling Systems*[®]) que colaborou neste estudo. O balcão frigorífico alvo de estudo foi o equipamento expositor refrigerado vertical aberto, que na versão de lacticínios, tem uma temperatura de funcionamento de 3 a 6 [°C].



a) Disposição dos dispositivos de sensorização.



b) Visualização do escoamento: injeção de fumo.

Figura 8 – Estudo experimental de equipamentos expositores refrigerados verticais (abertos ao ar ambiente).

De seguida, foi desenvolvido o modelo computacional com base na modelação física e matemática dos fenómenos físicos relevantes. Assumiu-se o escoamento bidimensional, turbulento, não isotérmico e o processo de transmissão de calor em regime estacionário, considerando-se o fluido como um gás ideal, incompressível e com diversas propriedades constantes. A representação física e matemática dos fenómenos físicos é expressa por um conjunto de equações gerais de governo. As equações gerais que regem o escoamento são a equação da conservação de massa, de quantidade de movimento e de energia. Ainda no âmbito do modelo físico e matemático é considerado o modelo matemático de turbulência $k-\epsilon$

standard. É de salientar que, em função do modelo de turbulência utilizado, foram utilizadas Leis de Parede para quantificar os efeitos viscosos e os elevados gradientes das variáveis na proximidade de paredes sólidas.

A Figura 9-a) é ilustrativa da previsão do campo de temperatura no interior do equipamento, evidenciando a eficácia da cortina de ar à entrada de ar ambiente para o interior do equipamento. Do mesmo modo, visualiza-se a interacção do ar refrigerado injectado pela grelha de insuflação com o ar ambiente e a posterior saída da mistura pela zona inferior da abertura ao ar ambiente. É perceptível a localização do ar refrigerado insuflado pela grelha de insuflação, bem como a sua entrada pela perfuração da parede frontal interior. É representada uma zona crítica na parte inferior de exposição do equipamento, onde a temperatura prevista encontra-se no limite superior da temperatura de funcionamento do equipamento.

Na Figura 9-b) é possível visualizar as diversas recirculações existentes nos espaços entre as prateleiras que auxiliam a conservação dos produtos em frio. São na globalidade evidenciadas as baixas velocidades nas zonas entre as prateleiras, em contraste com a velocidade máxima presente na zona de insuflação, destacando-se a previsão da entrada de ar ambiente para o interior do equipamento e a sua interacção com o ar refrigerado insuflado pela grelha. Também é observável a perda substancial de ar refrigerado para o ambiente. Neste caso, é evidente a perda de capacidade de bloqueio da cortina de ar devido à interacção com o ar ambiente, já que a velocidade é bastante inferior.

Posteriormente, foram efectuados novos ensaios experimentais para validar as previsões numéricas. Face aos resultados comparativos, foi atribuída uma precisão aceitável ao modelo computacional desenvolvido.

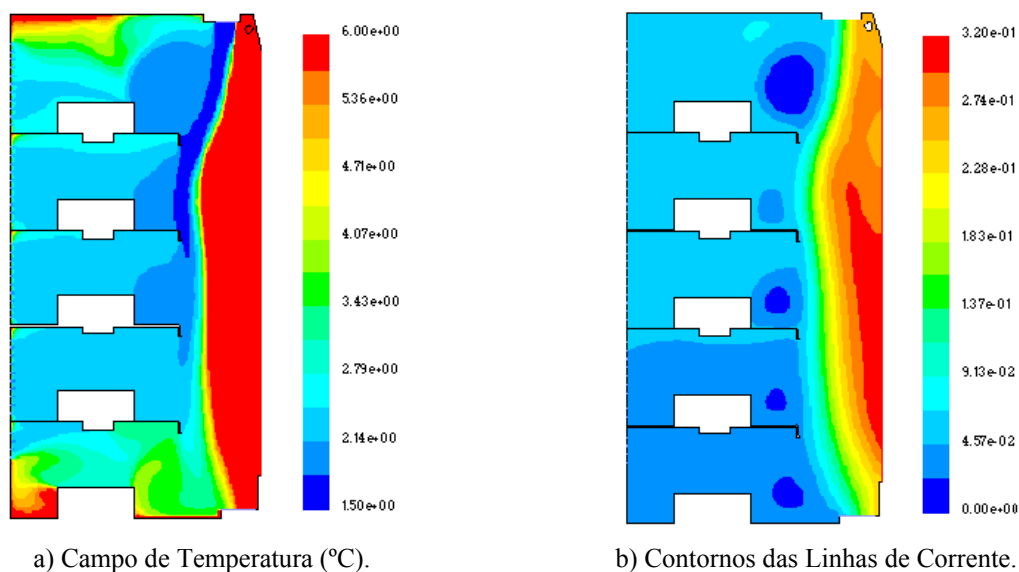


Figura 9 – Previsões numéricas da simulação do desempenho térmico de um mural aberto.

Através das previsões numéricas foi possível detectar deficiências de concepção dos equipamentos, nomeadamente, entre outras, uma distribuição de temperatura mais elevada na zona inferior do equipamento, bem como a inadequada interacção de ar refrigerado com ar ambiente do compartimento, que prejudicam a correcta conservação dos produtos alimentares. Assim sendo, com base nas simulações numéricas da distribuição do campo das grandezas relevantes no interior do equipamento, puderam ser sugeridas alterações de projecto aos equipamentos, de modo a uniformizar o campo de temperatura e melhorar a conformidade do escoamento.

4. CONCLUSÃO

Foram apresentados os vários sectores em que pode ser englobada uma qualquer aplicação de refrigeração. As categorias abordadas foram as do transporte e exposição de produtos alimentares perecíveis conservados em frio, por serem as áreas mais sensíveis da cadeia de frio. Na globalidade foram evidenciadas as dificuldades sentidas na área e expectativas relativamente aos aspectos construtivos, operativos e de evolução tecnológica. Relativamente a cada um dos sectores, foram descritas as características gerais que distinguem as várias sub-classificações, e indicadas sumariamente as aplicações finais, além das virtudes e deficiências inerentes.

No caso dos veículos de transporte sob temperatura controlada fez-se uma breve referência à regulamentação implantada (certificação ATP) e às imposições que acarreta para a homologação de veículos/câmaras. Relativamente aos equipamentos expositores de refrigeração comercial é referida a actual dualidade existente entre o marketing e o desempenho térmico e energético, revelando as consequências deste facto.

São resumidamente descritos os estudos experimentais e numéricos que os autores têm vindo a desenvolver naquelas temáticas. Para cada um dos casos são apresentadas e avaliadas as previsões numéricas e as diversas técnicas experimentais utilizadas. São também referidos os principais objectivos da utilização de cada um dos métodos, bem como os seus méritos e limitações. Com base na análise conjunta dos resultados numéricos e experimentais, são apresentadas diversas conclusões que permitiram um melhoramento das condições de transporte e exposição de produtos alimentares perecíveis conservados em frio.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, P., Merchandising vs. energy consumption in the supermarket. *Heating/Piping/Air Conditioning Journal*, April 1992.
- ASHRAE - ASHRAE Handbook: Refrigeration – Systems and Applications, (SI Edition). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1994.
- ATP – Agreement on the international carriage of perishable foodstuffs and on the special equipment to be used for such carriage (ATP). Geneva, 1970.
- Bennahmias, R., Transport de fruits et légumes frais à température dirigée. *Revue Internationale du Froid*, vol. 13, 1990.
- CRMD, Retail Store Fixture Design and Installation Guidelines. Commercial Refrigerator Manufacturers Division, Division of Air-Conditioning and Refrigeration Institute, 2001.
- CRMD, Standard CRS-S1-96: Retail Food Store Refrigerators – Health and Sanitation. Commercial Refrigerator Manufacturers Division, Division of Air-Conditioning and Refrigeration Institute, 2001.
- ETSU - Renewable and Energy Efficiency Organisation, Integral Refrigerated Retail Display Cabinets in the United Kingdom. Sector Review Paper on Projected Energy Consumption for the Department of the Environment, Transport and the Regions, 2001.
- Flannick, J. A., Stamm, R. H., Calle, M. M., Gomolla, J. C., An electric utility's adventures in commercial refrigeration. *Heating/Piping/Air Conditioning Journal*, October 1994.
- Gaspar, P. D., Estudo Numérico e Experimental do Desempenho Térmico de Equipamentos Expositores Refrigerados, Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Julho 2002.
- JORDÃO Cooling Systems[®], Manual do Instalador. 3ª Edição. JORDÃO Cooling Systems[®], 2000.
- Pitarma, R. A., Modelação matemática e experimental de câmaras frigoríficas de veículos. Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Abril 1998.
- Scrine, G. R., Refrigerated vehicles – what next. *International Journal of Refrigeration*, vol. 9, 1986.