

SIMULAÇÃO DE EQUIPAMENTO INDUSTRIAL DE REFRIGERAÇÃO: ESTUDO DE CASO

Pedro Dinis Gaspar* e R.A. Pitarma**

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

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

Palavras-chave: Refrigeração, códigos DFC, Malha computacional, Esquemas de discretização, Modelos de turbulência.

Resumo. *Neste artigo descrevem-se e comparam-se diversas metodologias para adaptação e aperfeiçoamento dos modelos físico-matemático e numérico a um caso prático de engenharia, de modo a atribuir maior realismo físico às previsões. O estudo incide sobre um expositor refrigerado aberto ao ar ambiente, com o intuito de avaliar as características térmicas na zona de exposição e conservação de produtos alimentares, sendo a precisão das previsões avaliada pela comparação sistemática de resultados numéricos com valores obtidos em estudo experimental complementar. Assim, a abordagem consistiu na avaliação da influência do código de Dinâmica de Fluidos Computacional (DFC) utilizado no desenvolvimento do modelo de simulação, das características da malha computacional, do esquema de discretização e do modelo de turbulência. Os diversos modelos de simulação testados foram desenvolvidos com o código de DFC – FLUENT[®], tendo-se mantido inalterável a configuração geométrica e funcional do equipamento, assim como as simplificações assumidas para o escoamento.*

1. INTRODUÇÃO

Os equipamentos industriais de refrigeração destinados à conservação e exposição em frio de produtos alimentares perecíveis e que dispõem de uma abertura frontal ao ar ambiente, apresentam problemas técnicos marcantes, e, por isso, exibem maior necessidade de estudo e investigação. No entanto, as tentativas de otimização do desempenho térmico destes equipamentos revestem-se de diversas dificuldades, devido à exigência de satisfazer em simultâneo, requisitos de ordem técnica, comercial e económica.

Por motivos comerciais a maioria dos estabelecimentos têm instalados este tipo de equipamentos de refrigeração abertos ao ar ambiente (ver Figura 1.), baseados em cortinas de ar para promoverem uma barreira térmica, mas não física, entre o consumidor e os produtos alimentares perecíveis. Mas, face à ineficácia da barreira térmica conseguida por este dispositivo, para além da qualidade de conservação dos produtos alimentares se degradar rapidamente, leva a que estes equipamentos apresentem custos energéticos relevantes.



(Cortesia *JORDÃO Cooling Systems*[®])

Figura 1. Equipamento de exposição e conservação em frio, vertical, aberto ao ar ambiente.

A crescente evolução dos níveis de exigência dos estabelecimentos comerciais e dos consumidores, levou à necessidade de desenvolvimento de métodos de análise, experimentais e numéricos, que permitissem minimizar o consumo energético dos equipamentos e melhorar o seu desempenho térmico. Usualmente o desenvolvimento de equipamentos de refrigeração é conduzido por via experimental com base na alteração física dos equipamentos existentes. Todavia, devido aos elevados custos económicos e humanos envolvidos neste tipo de abordagem, têm sido desenvolvidos modelos computacionais para a previsão e visualização dos fenómenos físicos, permitindo detectar e corrigir deficiências dos equipamentos com custos reduzidos. No campo da refrigeração foram desenvolvidos diversos estudos numéricos para analisar as características do fluxo de ar com transferência de calor, podendo citar-se entre outros, o estudo computacional sobre a transferência de calor em regime turbulento no interior de um equipamento de refrigeração fechado ao ar ambiente desenvolvido por [1]. Nesse estudo são analisadas várias configurações que permitiram a melhoria do desempenho do equipamento. Uma outra simulação numérica com o objectivo de avaliar o padrão tridimensional do escoamento de ar em espaços refrigerados foi proposta por [2]. Foram previstas e analisadas as distribuições da velocidade, da temperatura e da humidade.

O estudo realizado por [3] concentra-se no dispositivo de cortina de ar, com o objectivo de analisar a transferência de calor turbulenta e da quantidade de movimento na zona de interacção entre o jacto de ar formado pela cortina e o ar ambiente. Ainda sobre este mesmo dispositivo, em [4] encontra-se exposto um estudo numérico para avaliação do desempenho do bloqueio aerodinâmico proporcionado por este elemento. Noutra âmbito, a simulação numérica proposta por [5] pretende contribuir para a avaliação do comportamento do fluxo de ar isotérmico introduzido a altura variável em compartimentos ventilados. Considerando as vantagens apresentadas pela simulação numérica, a indústria afecta à produção destes equipamentos passou a fazer uso desta técnica para projecto. Neste contexto, pode ser citado o estudo desenvolvido por [6] para o departamento de I&D de um fabricante. Consistiu no desenvolvimento de modelo computacional de um equipamento de refrigeração, com a finalidade de indicar as alterações necessárias ao projecto dos equipamentos, que conduzissem à melhoria do desempenho térmico dos mesmos. Também englobado na estratégia de modernização de uma empresa do sector, foi desenvolvido por [7] um estudo numérico para o desenvolvimento uma nova linha de dispositivos de refrigeração domésticos. Os objectivos do projecto consistiram no desenvolvimento dos equipamentos em termos energéticos, através da redução da taxa máxima do fluxo de ar, mas conseguindo uma distribuição mais homogénea das grandezas físicas relevantes. A pedido de uma indústria, foi desenvolvido no Von Karman Institute, um modelo de DFC com o intuito de analisar a interacção térmica com o ar ambiente numa vitrina de produtos de gelataria, tal como pode ser encontrado em [8]. Ainda, por um outro fabricante de electrodomésticos, foi desenvolvido um modelo de DFC para simular e otimizar uma nova gama de frigoríficos, conforme apresentado em [9]. O objectivo consistiu na avaliação da circulação do ar dentro dos compartimentos do frigorífico e do congelador, de modo a manter uma distribuição da temperatura mais uniforme e impedir a formação de gelo na superfície do evaporador. Outros estudos visaram não só o desenvolvimento de modelos computacionais dos equipamentos, mas envolveram também os espaços físicos onde seriam instalados, de modo a avaliar a distribuição das grandezas físicas no próprio estabelecimento comercial. É o caso do estudo exposto em [10], que consistiu na utilização de um código comercial de DFC para desenvolver um modelo computacional de um armário refrigerado instalado na zona de produtos refrigerados de um estabelecimento comercial. Em [11] encontra-se detalhadamente exposto o modelo computacional destinado a avaliar o desempenho térmico de um equipamento de refrigeração vertical e aberto ao ar ambiente, que serviu de ponto de partida para este estudo. As simulações numéricas pretenderam avaliar a distribuição do campo de velocidades e de temperaturas no espaço de exposição e conservação dos produtos, de modo a identificar eventuais deficiências dos equipamentos. Para além da configuração original, foram considerados dois novos casos para estudar possíveis pontos de aperfeiçoamento do desempenho térmico do equipamento. Numericamente, estes casos apresentaram melhorias em termos de uniformização e conformidade das grandezas.

O presente trabalho tem por objectivo apresentar um estudo de optimização do modelo computacional utilizado. Assim, com base no modelo computacional original, foi aplicada uma metodologia para adaptação e aperfeiçoamento do modelo computacional que consistiu

na avaliação da influência de características do modelo matemático, descritivo dos fenómenos físicos, e do modelo numérico, que caracteriza o procedimento de resolução.

De modo a organizar a apresentação das várias vertentes do estudo, serão expostos sucessivamente os procedimentos que levaram à optimização do modelo computacional. Inicialmente será exposto o estudo experimental através da descrição dos ensaios, técnicas experimentais utilizadas e pormenores da instalação experimental. De seguida será exposto o modelo computacional de base, indicando os modelos matemático e numérico pelos quais a sua formulação se regeu. Posteriormente, e de acordo com o objectivo principal do trabalho, será apresentado o conjunto de procedimentos que compreendem a optimização do modelo computacional. Esta metodologia começa por analisar a influência do código de DFC utilizado. De seguida são efectuados e analisados testes de dependência do refinamento da malha computacional e do esquema de discretização dos termos convectivos nas equações de transporte. A metodologia termina com um teste de dependência do modelo de turbulência.

2. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Este estudo teve a colaboração de um fabricante nacional deste tipo de equipamentos (*JORDÃO Cooling Systems*[®]), pelo que todos os ensaios experimentais foram realizados num equipamento real de teste, na secção de I&D desta empresa. Inicialmente, os ensaios experimentais tiveram por objectivo proporcionar uma análise qualitativa do problema, tendo sido para tal considerado um equipamento de refrigeração vertical, aberto ao ar ambiente destinado a albergar produtos lácteos, possuindo uma temperatura de funcionamento positiva, na gama entre 3 e 6 [°C]. Foram efectuados diversos ensaios de modo a reduzir a incerteza dos resultados tendo sido considerado o valor médio das grandezas físicas em função da repetibilidade dos valores das medições. As diversas grandezas medidas e correspondente técnica experimental utilizada foram: velocidade do ar através de termo-anemometria de fio quente a temperatura constante, com precisão de 0,1 [m/s]; temperatura do ar e temperatura superficial através de termometria por termopares com pontas de prova tipo T (ver Figura 3.a). As curvas de calibração das pontas de prova apresentavam uma precisão de 1 [°C] e 0,4 [°C], respectivamente. Estes ensaios conduziram, ainda, à obtenção de diversos valores experimentais necessários à definição das condições de fronteira do modelo computacional. Consistiram na prescrição de grandezas físicas, como sejam, os valores médios das medições da velocidade e da temperatura do ar junto às grelhas de insuflação/aspiração e junto à perfuração da parede frontal interior. Este procedimento também foi seguido para a temperatura superficial das paredes interiores do equipamento, tal que os ganhos de calor por radiação térmica pudessem ser contabilizados, embora de modo simplificado, tal como indicado em [12]. Posteriormente ao desenvolvimento do modelo computacional, foram realizados ensaios experimentais adicionais para avaliar a sua precisão. As medições foram realizadas em diversos pontos do domínio físico coincidentes com os nós da malha computacional. Foram ainda utilizadas várias técnicas experimentais complementares para apurar o estudo: gases traçadores para investigar a taxa de renovação de ar; termografia por IV para medição e visualização da distribuição da temperatura superficial; e visualização do escoamento por injeção de fumo (Figura 3.b).



a) Disposição genérica dos elementos de sensorização. b) Visualização do escoamento por injeção de fumo.

Figura 3. Ensaios experimentais.

Após a confrontação de valores experimentais e numéricos, pôde ser atribuída uma capacidade satisfatória de simulação para aplicação em engenharia, já que a comparação entre os valores experimentais e numéricos da temperatura evidencia uma tendência qualitativa semelhante, com ligeiros desvios quantitativos. Os desvios não se encontram uniformemente distribuídos no domínio, pois as maiores discrepâncias localizam-se na região próxima da abertura frontal, sendo o erro praticamente desprezável na zona interior. É necessário salientar que os próprios ensaios experimentais não estão isentos de erros, podendo ser encontrado em [11] uma descrição mais detalhada da instalação experimental, técnicas experimentais utilizadas, pormenores dos ensaios efectuados e métodos e normas seguidas.

3. OPTIMIZAÇÃO E TESTE DO MODELO COMPUTACIONAL

3.1. Modelo computacional de base

O modelo computacional para a modelação matemática do escoamento com transferência de calor no interior do equipamento é descrito por um conjunto de equações diferenciais que exprimem a conservação de massa, de quantidade de movimento e de energia. Desprezando os efeitos de extremidade face ao comprimento do equipamento simulado, foi apenas considerado o caso bidimensional, assumindo-se o escoamento turbulento, não isotérmico e o processo de transmissão de calor em regime estacionário. O ar foi suposto gás ideal, incompressível mas dilatável e com diversas propriedades constantes. Para contabilizar as variações da massa específica, foi adicionado o termo representativo do efeito da força de impulsão à componente vertical das equações da conservação da quantidade de movimento. Foi ainda, utilizada a equação dos gases perfeitos para avaliar as variações desta grandeza com os gradientes térmicos do escoamento. A equação da energia é desenvolvida para a temperatura, considerando a inexistência de geração interna de energia e desprezando a dissipação viscosa devido às características do escoamento. Ainda no âmbito do modelo matemático é considerado o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão, conforme exposto em [13]. Trata-se de um modelo robusto, económico e com precisão aceitável, adequado à simulação

da turbulência numa gama alargada de escoamentos. No entanto, é restrito a regiões em que o escoamento é turbulento completamente desenvolvido, pelo que os efeitos da viscosidade sobre o escoamento nas proximidades das paredes sólidas, foram levados em consideração utilizando o método das funções logarítmicas de equilíbrio - Leis de Parede (conforme [14]).

Os modelos matemático e numérico, que traduzem a representação dos fenómenos físicos que se pretendem simular e correspondente procedimento de resolução, são implementados no código de DFC – *PHOENICS*[®]. O código resolveu as equações diferenciais discretizadas segundo o esquema de diferenciação híbrido, através do método das diferenças finitas – formulação de volumes de controlo, tal como exposto por [15]. O sistema de equações algébricas de diferenças finitas é resolvido através do algoritmo SIMPLEST, segundo um processo numérico iterativo para a malha ortogonal deslocada não uniforme, com 12.000 volumes de controlo (v.c.'s) do domínio computacional (Figura 2.a). As condições de fronteira impostas no modelo foram: (1) paredes isotérmicas com o valor da temperatura prescrito ao obtido experimentalmente; (2) nas entradas e saídas mássicas foram impostas a velocidade, temperatura, energia cinética e a sua taxa de dissipação; (3) para simular a abertura ao ar ambiente do compartimento, foi utilizada uma condição de fronteira de pressão fixa, em que a direcção do escoamento é determinada em cada volume de controlo da superfície em função da diferença de pressão. No caso em que o escoamento seja direccionado para o interior do equipamento, (4) foi prescrito o valor da temperatura ambiente ao medido experimentalmente; (5) para simular a dissipação de calor pela iluminação do equipamento foi utilizada uma condição de fronteira do tipo fluxo imposto uniformemente distribuído. Os pormenores relativos aos modelos matemático e numérico para este modelo computacional poderão ser encontrados em [16].

3.1.1 Aplicação e resultados

As simulações numéricas com o modelo computacional de base pretenderam avaliar a distribuição do campo de velocidades e de temperaturas no interior do equipamento, de modo a identificar eventuais deficiências dos equipamentos. Para além da configuração original, foram testadas duas novas configurações que se julgaram passíveis de aperfeiçoarem o desempenho térmico. Uma destas consistiu no aumento do diâmetro da perfuração da parede frontal interior, e conseqüentemente no aumento do caudal mássico de ar refrigerado introduzido através destes elementos. Mas, por conservação de massa, esta alteração diminuiu o caudal mássico destinado a formar a cortina de ar. O outro caso adicional consistiu nesta última configuração, mas com modificações na geometria das prateleiras. Sumariamente, as previsões indicaram que o primeiro caso de estudo apresentava uma melhor distribuição do escoamento e o segundo caso de estudo evidenciava um aumento significativo da circulação de ar refrigerado entre as prateleiras. Em ambos os casos é prevista uma uniformização e redução da temperatura média no espaço de exposição e conservação dos produtos, de aproximadamente 0,7 [°C] e de cerca de 0,8 [°C], respectivamente para o primeiro e segundo caso de estudo. De um modo geral, é prevista uma crescente uniformização do campo de temperaturas e uma maior conformidade do escoamento. Mais pormenores encontram-se expostos em [17].

No entanto, é inequívoco que a precisão das previsões numéricas é fortemente afectada, entre outros, por: características da malha computacional; esquemas de discretização; modelos matemáticos dos fenómenos físicos que são contemplados na simulação; e esquemas numéricos empregues no método de resolução. Assim, no presente trabalho são descritas e comparadas diversas metodologias para adaptação e aperfeiçoamento dos modelos físico-matemático e numérico a um caso prático de engenharia, de modo a atribuir maior realismo físico às previsões numéricas.

3.2. Estudo comparativo do desempenho de códigos de DFC

A possibilidade de empregar distintos códigos de DFC para a simulação dos fenómenos físicos relevantes, permitiu a avaliação e comparação do desempenho de dois modelos computacionais construídos com os códigos *PHOENICS*[®] e *FLUENT*[®], mediante a confrontação das previsões numéricas com os resultados experimentais. Assim, foi possível avaliar a robustez dos modelos computacionais desenvolvidos, bem como, analisar as vantagens e desvantagens intrínsecas de cada código, nomeadamente a facilidade de utilização, versatilidade, estrutura e metodologia de cálculo, além de evidenciar na globalidade as suas potencialidades e aplicabilidade. As diferenças entre as previsões numéricas obtidas por estes códigos poderão ser atribuídas às próprias especificações dos códigos, à definição do problema e aos modelos matemáticos e numéricos contemplados, independentemente das simplificações consideradas adequadas para a descrição dos fenómenos físicos. Uma diferença significativa entre os modelos computacionais encontra-se na malha computacional, já que com o código *PHOENICS*[®] foi gerada uma malha ortogonal não uniforme, enquanto que com o software *GAMBIT*[®], incluído no pacote do código *FLUENT*[®], foi gerada uma malha computacional não estruturada (ver Figura 2.b). O refinamento da malha, considerado em todo o domínio de cálculo, do modelo computacional gerado com o código *FLUENT*[®] foi muito superior ao do modelo computacional gerado com o código *PHOENICS*[®], tal que a malha computacional gerada possuísse volumes de controlo que se aproximassem o mais possível de elementos quadriláteros.

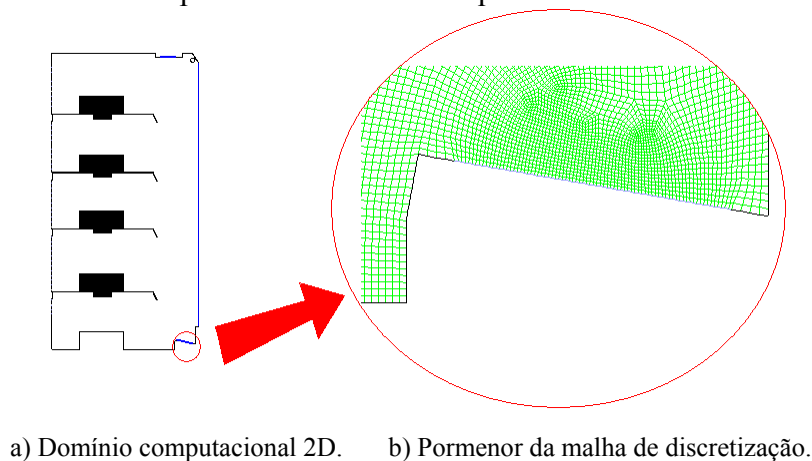


Figura 2. Características do modelo computacional.

O modelo computacional desenvolvido com o código *PHOENICS*[®] apresentou previsões numéricas (Figura 4.a) mais aproximadas aos resultados experimentais na zona interior do equipamento. À medida que nos aproximamos da condição de fronteira que simula a abertura ao ar ambiente, esta situação começa a reverter a favor do modelo computacional desenvolvido com o código *FLUENT*[®] (Figura 4.b). Os desvios não se encontram uniformemente distribuídos no domínio, pois as grandes discrepâncias tanto para um modelo como para outro, encontram-se na região próxima da abertura frontal, sendo o erro muito reduzido na zona interior. Detalhes adicionais serão encontrados em [18].

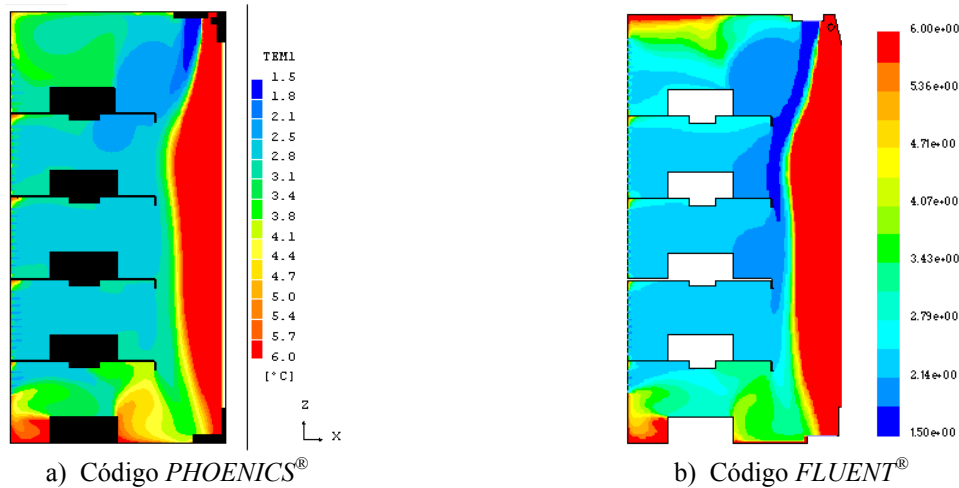


Figura 4. Previsão do campo de temperatura em função do código de DFC.

Conforme a Tabela 1., onde se encontram expostos os erros absolutos médios entre temperaturas experimental e numérica para os distintos códigos, e dada a gama de temperaturas considerada no estudo (1,5 [°C] → 25 [°C]), pode-se atribuir uma boa eficácia e uma adequada robustez aos modelos computacionais desenvolvidos, sendo o código *FLUENT*[®] mais eficaz que a versão do código *PHOENICS*[®] testada. Neste caso, a superior precisão do modelo computacional desenvolvido com o código *FLUENT*[®] deve-se à utilização de uma malha de discretização não ortogonal que consegue facilmente moldar-se aos pormenores da geometria. Assim, pelos variados aspectos apresentados em [18 – 20] relativos à comparação dos códigos de DFC em análise, foi preferido o código *FLUENT*[®] para a simulação do equipamento, pois para além de facilitar a definição das características geométricas, consente a geração de uma malha computacional mais precisa, permitindo o desenvolvimento de um modelo computacional mais robusto.

Código	Unidades	Erro Absoluto Médio
<i>FLUENT</i> [®]	°C	1,7
<i>PHOENICS</i> [®]	°C	2,0

Tabela 1. Erro absoluto médio das previsões da temperatura dos modelos de códigos de DFC.

3.3. Teste de dependência do refinamento da malha computacional

Após a escolha do código de DFC mais adequado para simular os fenómenos físicos em causa, foi desenvolvido um teste de dependência do refinamento da malha computacional. Quanto maior for o refinamento da malha considerado, mais precisos serão os resultados numéricos, além de aumentar o grau de convergência da solução. No entanto, à medida que a malha computacional é refinada, o esforço computacional é aumentado. Assim, não é apropriado continuar a diminuir a dimensão dos volumes de controlo a partir de determinado grau de refinamento, pois o aumento da precisão dos resultados numéricos é desprezável face ao esforço computacional exigido. Na Tabela 2. são apresentados os desvios absolutos médios entre temperaturas experimental e numérica, para vários casos de refinamento da malha.

N.º de volumes de controlo	Grau de refinamento	Unidades	Erro Absoluto Médio
14.911	-	°C	1,7
59.644	×4	°C	1,4
238.576	×16	°C	1,2
954.304	×64	°C	1,7

Tabela 2. Erro absoluto médio das previsões da temperatura dos modelos com distinto refinamento da malha.

Pela análise da Tabela 2. e da Figura 5., os resultados mais precisos, quando comparados com valores experimentais (que também não estão isentos de erros) são obtidos para uma malha computacional já muito refinada, constituída por 238.576 v.c.'s ($\Delta_{\max} = 3,5 \times 10^{-3}$), que exigiu um esforço computacional elevado. Assim, e tendo em consideração a gama de temperatura considerada, verifica-se que as diferenças entre os diferentes modelos não são apreciáveis, pelo que doravante foi utilizado o modelo com 59.114 v.c.'s, que não possuindo a precisão mais elevada, exige menores recursos computacionais.

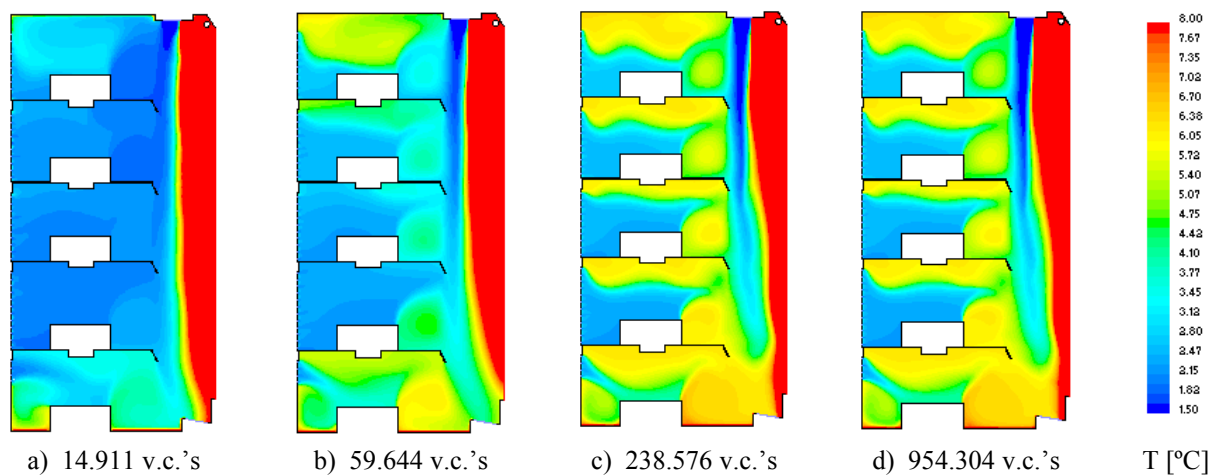


Figura 5. Previsão do campo de temperatura em função do refinamento da malha computacional.

3.4 Teste de dependência do esquema de discretização

A precisão dos resultados numéricos de qualquer aplicação de DFC é também função do método de discretização dos termos convectivos nas equações de volumes finitos. É uma área de investigação que tem evoluído apreciavelmente no que respeita ao desenvolvimento de esquemas de discretização apropriados a escoamentos com características específicas. Neste estudo foram comparadas as previsões do campo de temperaturas, obtidas fazendo uso, separadamente, de cada um dos quatro esquemas de discretização disponíveis no código *FLUENT*[®]: *Upwind* de 1ª Ordem, *Upwind* de 2ª Ordem, *Power Law* e *QUICK*, com o objectivo de avaliar a influência do esquema de discretização na precisão dos resultados numéricos. A descrição matemática, bem como uma comparação aprofundada dos mais variados esquemas de discretização pode ser encontrada em [21], e em particular, dos esquemas de discretização testados poderá ser encontrada em [22]. Os resultados relativos ao estudo da influência do esquema de discretização são apresentados na Tabela 3 e na Figura 6. Os resultados listados na Tabela 3 permitem verificar que os esquemas de discretização *Upwind* de 1ª ordem e *QUICK* conduzem a erros semelhantes da temperatura média do escoamento. Porém, como pode ser observado na Figura 6, as características do escoamento são distintas.

Esquema de discretização	Unidades	Erro Absoluto Médio
<i>Upwind</i> de 1ª Ordem	°C	1,6
<i>Upwind</i> de 2ª Ordem	°C	1,9
<i>Power Law</i>	°C	1,7
<i>QUICK</i>	°C	1,6

Tabela 3. Erro absoluto médio das previsões da temperatura com os esquemas de discretização testados.

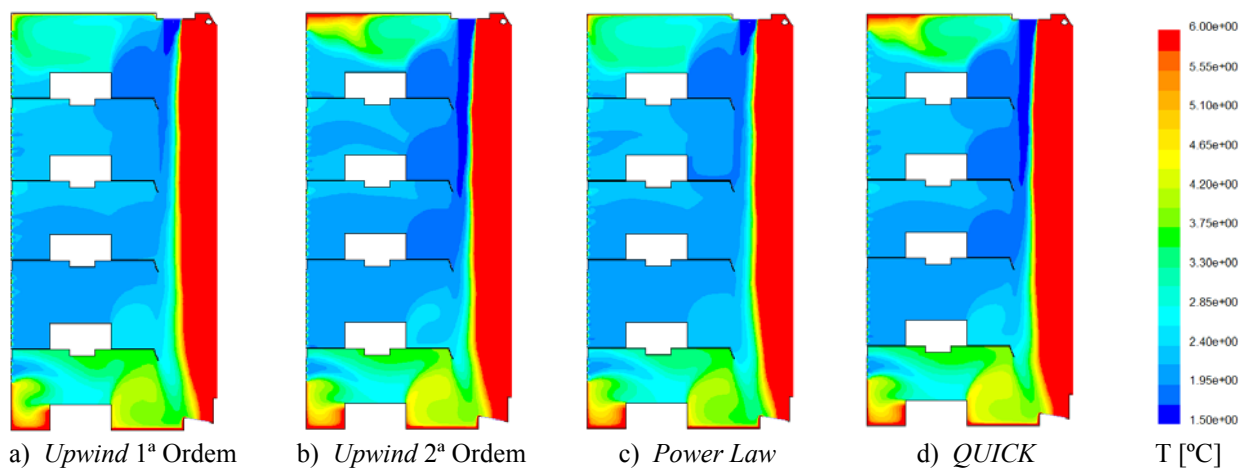


Figura 6. Previsão do campo de temperatura em função do esquema de discretização.

Com efeito, é conhecido que os resultados numéricos obtidos com o esquema de discretização *QUICK* reproduzem mais fielmente os pormenores de recirculação nos escoamentos, sem necessidade de refinar excessivamente a malha de discretização. Assim, apesar da sua maior complexidade quando comparado com os outros esquemas testados, e consequente aumento do tempo de cálculo, a precisão dos resultados numéricos pode justificar a preferência da sua utilização. No manual do código de DFC [23], bem como em literatura diversa, é sugerida a utilização de mais do que um método para discretizar os termos convectivos nas equações de transporte, de modo a afectar a solução com o menor erro de cada um dos esquemas. Assim, e após testes preliminares, optou-se por aplicar o esquema de discretização *Upwind* de 1ª Ordem para as quantidades turbulentas e o esquema *QUICK* para discretizar a quantidade de movimento e a energia.

3.5 Teste de dependência do modelo de turbulência

A crescente utilização da simulação numérica para a previsão de escoamentos nos mais diversos campos de engenharia, tem levado ao desenvolvimento de diversos modelos de turbulência com características próprias. De um modo geral, o grau de complexidade e consequente precisão de cada modelo de turbulência depende das simplificações e das suposições que acarreta. Os modelos de turbulência podem ser classificados como modelos baseados no conceito de “viscosidade turbulenta” ou modelos das tensões de Reynolds. Neste estudo são analisadas, e comparadas com resultados experimentais, as previsões do campo de temperaturas utilizando os seguinte modelos da turbulência: *Spalart-Allmaras*, *k-ε* padrão, *k-ε* RNG, *k-Ω*. Em [24] foram analisadas e comparadas mais pormenorizadamente as previsões numéricas obtidas utilizando os modelos da turbulência: *Spalart-Allmaras*, *k-ε* padrão, *k-ε* RNG, referindo-se sucintamente os méritos e limitações de cada modelo. Todos estes modelos de turbulência são baseados na hipótese de Boussinesq. A vantagem desta aproximação reside no reduzido esforço computacional associado ao cálculo da viscosidade turbulenta, μ_t . As previsões numéricas mais realistas e coerentes para todo o domínio de cálculo são obtidas tanto com o modelo *k-ε* padrão, como com o modelo *k-ε* RNG. Ainda que as previsões para o domínio de cálculo sejam distintas, pela análise da Tabela 4. e da Figura 7., verifica-se que estes modelos prevêem com precisão semelhante o transporte da temperatura no escoamento.

Modelo de turbulência	Unidades	Erro Absoluto Médio
<i>Spalart-Allmaras</i>	°C	1,6
<i>k-ε</i> padrão	°C	1,2
<i>k-ε</i> RNG	°C	1,2
<i>k-Ω</i>	°C	1,5

Tabela 4. Erro absoluto médio das previsões da temperatura com os modelos de turbulência testados.

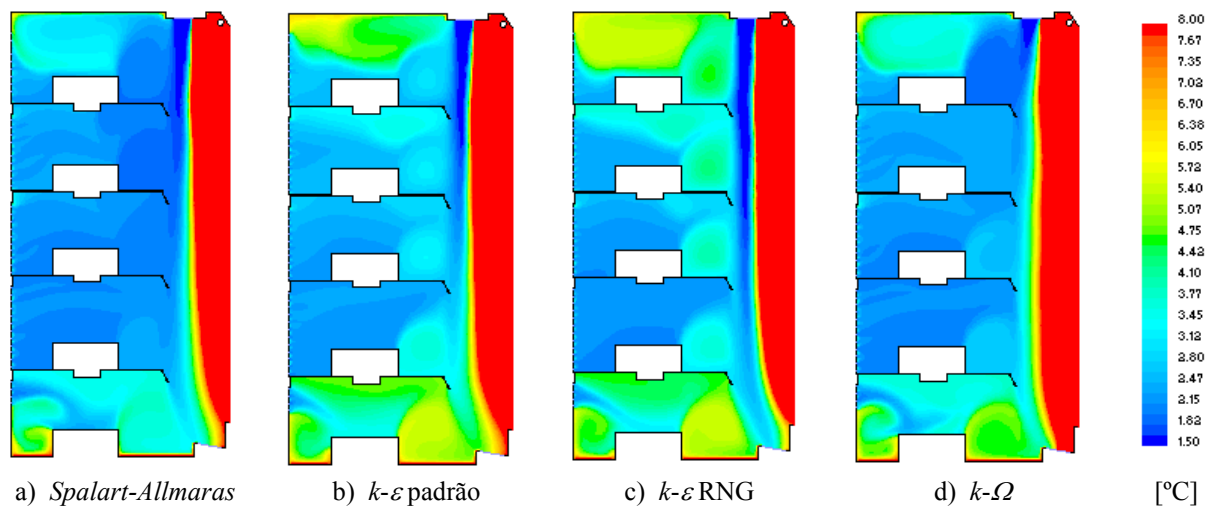


Figura 7. Previsão do campo de temperatura em função do modelo de turbulência.

A comparação entre resultados numéricos e valores experimentais, mostra que para este caso específico, tanto o modelo computacional que fez uso do modelo de turbulência *k-ε* padrão como o que utilizou o modelo *k-ε* RNG apresentam um erro absoluto médio igual e inferior ao obtido se fosse utilizado qualquer um dos restantes modelos. Em relação ao modelo *Spalart-Allmaras*, o erro pode ser atribuído à simplicidade do modelo e à não adequação do modelo a este tipo de escoamento. Conforme pode ser encontrado em literatura científica diversa, a aplicação do modelo *k-ε* RNG ainda gera alguma controvérsia devido à derivação do modelo. Assim, face aos resultados obtidos, às características e à eficácia comprovada em diversas aplicações de engenharia, dá-se preferência neste estudo à utilização do modelo *k-ε* padrão.

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Apresentou-se neste trabalho um estudo de optimização de um modelo computacional com o objectivo de simular os fenómenos associados à refrigeração de produtos alimentares perecíveis em equipamentos expositores refrigerados abertos. Indicou-se um modo possível de estabelecer uma complementaridade entre a análise experimental e a modelação numérica. As simulações numéricas evidenciaram uma grande dependência dos modelos matemáticos empregues, dos parâmetros geométricos, como a dimensão e forma da malha computacional, assim como do procedimento de cálculo numérico. O primeiro passo consistiu na avaliação e comparação do desempenho de dois modelos computacionais construídos com códigos de DFC distintos: *PHOENICS*[®] e *FLUENT*[®], sendo confrontadas previsões numéricas com resultados experimentais. Deste modo, avaliou-se a robustez dos modelos computacionais desenvolvidos, além de terem sido expostas as capacidades de cada código, nomeadamente a facilidade de utilização, versatilidade, estrutura e metodologia de cálculo. Em face da avaliação efectuada, e dadas as características de pré-processamento, do *solver* e do pós-processamento, deu-se vantagem ao código *FLUENT*[®]. Posteriormente, foi avaliada a

precisão das previsões numéricas em função do grau de refinamento da malha computacional. Este caso de estudo apresentou-se adequado para avaliar a influência do esquema de discretização utilizado na precisão da solução, pois coexistem os regimes de convecção natural e forçada. Deste modo, foram utilizados distintos esquemas de discretização, com diferentes ordens, na simulação do escoamento com o objectivo de analisar e comparar as previsões numéricas do campo da grandeza escalar relevante (temperatura) com os resultados experimentais. A comparação entre resultados numéricos e valores experimentais, mostra que para este caso específico, mesmo o esquema simples de discretização *Upwind* de 1ª Ordem apresenta boas capacidades na simulação do fenómeno. Por fim, efectuou-se um estudo do desempenho de vários modelos de turbulência. A comparação entre valores numéricos e experimentais indica que tanto o modelo computacional que fez uso do modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão, como o modelo que utilizou o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ RNG, apresenta boa aproximação aos resultados experimentais.

Muitas outras metodologias poderiam ser seguidas para melhorar a precisão da solução (entre outras: a influência da humidade específica na distribuições das grandezas físicas; a incorporação da transferência de calor por radiação; a influência da distância geométrica da condição de pressão fixa que simula a abertura ao ar ambiente; a prescrição segundo a cota de um valor de pressão experimentalmente obtido). Constata-se, assim, que as técnicas e parâmetros de optimização de modelos de DFC são vastos e que, todos eles, conduzem, de algum modo, a alterações na precisão da solução, podendo estes desvios ser desprezáveis ou não, dependendo do rigor que a aplicação solicitar.

REFERÊNCIAS

- [1] S.C. Hu, N.W. Fan e Y-Z R. Hu. Optimization of the display design using numerical models. *PHOENICS Journal of CFD & its applications*, vol. 7, n.º 1, 1994.
- [2] H.W. Wang e A.H. Visser. 3D flow patterns in refrigerated stores. *PHOENICS Journal of CFD & its applications*, vol. 4, n.º 2, 1991.
- [3] Pratik Bhattacharjee e Eric Loth. Simulation of air-curtain thermal entrainment. *Proceedings of ASME - Fluids Engineering Division Summer Meeting*, June 2001.
- [4] J.J. Costa e L.A. Oliveira. Vedação aerodinâmica por cortina de ar – Estudo numérico. *I Jornadas Técnicas de Primavera da EFRIARC*, 2001.
- [5] A. Lamers e R. Van de Velde. Air flow patterns in ventilated rooms. *PHOENICS Journal of CFD & its applications*, vol. 2, n.º 2, 1989.
- [6] Garry Palmer. Benefits of new refrigerated cabinet design by measurement of air temperatures and velocities on-site. *Oscar Faber Applied Research*, 2000.
- [7] Graham Sands e Weizhong Xiang. Frost-free chilling. *Fluent News*, Vol. 11, 2002.
- [8] FLUENT Newsletters. CFD helps decrease ambient air entrainment in ice cream freezer by 30%. *Journal Articles by Fluent Software Users*, 2001.
- [9] FLUENT Newsletters. Advanced design of domestic refrigerators using FLUENT, *Fluent News*, Vol. 8, Issue 2, Fall 1999.
- [10] A.M. Foster. Using CFD to Model Air Flow and Heat Transfer in and Around Refrigerated Display Cabinets. *CFX Today's Research for Tomorrow's Applications*,

- Reading, United Kingdom, March 2000.
- [11] Pedro Dinis Gaspar, *Estudo Numérico e Experimental do Desempenho Térmico de Equipamentos Expositores Refrigerados*, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Sistemas de Produção e Conservação de Energia, Departamento de Engenharia Electromecânica, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal (2002).
- [12] R. Faramarzi, Efficient display case refrigeration, *ASHRAE Journal*, vol. 41, n. °11 (1999).
- [13] B.E. Launder e D.B. Spalding, *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press, London, England (1972).
- [14] W. Rodi, *Turbulence models and their application in hydraulics - A state of the art review*, International Association for Hydraulics Research (1980).
- [15] S.V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation (1980).
- [16] Pedro Dinis Gaspar, A.B. Miranda e R.A. Pitarma, Numerical Study of Air Flow and Thermal Patterns in Refrigerated Display Cases, *V Congresso de Métodos Numéricos en Ingeniería*, Madrid, Espanha (2002).
- [17] Pedro Dinis Gaspar e R.A. Pitarma, Optimização Numérica de Expositores Refrigerados Abertos, *VI Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica*, Coimbra, Portugal (2003).
- [18] Pedro Dinis Gaspar, A.B. Miranda e R.A. Pitarma, Estudo Comparativo do Desempenho de Códigos de DFC na Modelação de Equipamentos de Refrigeração Abertos, *VII Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional*, Évora, Portugal (2003).
- [19] Pedro Dinis Gaspar, Rui Barroca e R.A. Pitarma, Performance Evaluation of CFD Codes in Building Energy and Environmental Analysis, *Building Simulation 2003*, Eindhoven, Holanda, (2003).
- [20] Pedro Dinis Gaspar e R.A. Pitarma, Evaluation of CFD codes by comparison of numerical predictions of an air-conditioned room case study, *8th International Conference on Advanced Computational Methods in Heat Transfer*, Lisboa, Portugal (2004).
- [21] Pedro J. Coelho. Aplicação de um Esquema de Discretização Genuinamente Multidimensional na Resolução de Equações de Transporte, *V Congresso de Métodos Numéricos en Ingeniería*, Madrid, Espanha, (2002).
- [22] Pedro Dinis Gaspar e R.A. Pitarma, Esquemas de Discretização em Escoamentos com Regime de Convecção Mista: Estudo de Caso, *3^{as} Jornadas Politécnicas de Engenharia Mecânica, Automóvel, Organização e Gestão Industrial, Energia e Ambiente*. ISEC – Instituto Politécnico de Coimbra, Coimbra, Portugal (2003).
- [23] FLUENT, *Fluent 6 – User’s guide Volume*, Fluent Incorporated, (2001).
- [24] Pedro Dinis Gaspar e R.A. Pitarma, Desempenho de Modelos de Turbulência em Regime Convectivo Misto – Aplicação a Caso de Estudo, *Engenharia ‘2003 – Inovação e Desenvolvimento*. Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal (2003).