

## MODELAÇÃO DE PROBLEMAS AVAC-R COM CÓDIGOS DE DFC

Pedro D. Gaspar

> Universidade da Beira Interior > Departamento de Engenharia Electromecânica > dinis@demnet.ubi.pt

Rui F. Barroca

> Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Inst. Polit. da Guarda > barroca@ipg.pt

Rui A. Pitarma

> Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Inst. Polit. da Guarda > rpitarma@ipg.pt

### RESUMO

A modelação computacional constitui hoje em dia uma poderosa ferramenta de cálculo para projecto, permitindo antecipar e/ou corrigir problemas no domínio da engenharia de climatização e da refrigeração.

Neste artigo descrevem-se e comparam-se, sucintamente, dois pacotes comerciais de Dinâmica de Fluidos Computacional (DFC), que os autores desta comunicação têm vindo a adaptar para descrever o escoamento tridimensional e turbulento do ar, a transferência de calor e a distribuição da concentração de espécies em espaços climatizados ou refrigerados. Estudos experimentais complementares têm permitido validar os modelos computacionais propostos, evidenciando as suas potencialidades para aplicações de engenharia.

Como exemplo, são apresentadas e discutidas previsões numéricas resultantes da aplicação dos modelos a casos de estudo concretos.

Palavras-chave: Modelação numérica; Validação experimental; Refrigeração; Climatização; Ventilação.

### 1. INTRODUÇÃO

A Dinâmica de Fluidos Computacional (DFC) permite estudar o escoamento de fluidos, com transmissão de calor e/ou massa, com concentração de diversas espécies, mudança de fase, reacções químicas, movimentos mecânicos, tensões, entre outros. Os modelos matemáticos representativos das leis da Física que governam estes fenómenos físicos são descritos por equações diferenciais às derivadas parciais, muitos dos quais sem resolução analítica. Os códigos de DFC usados neste trabalho para a apresentação das potencialidades da modelação numérica na área de AVAC&R foram o *PHOENICS* e o *FLUENT*, os quais permitem a discretização das equações constituintes do modelo matemático através do método das diferenças finitas - formulação dos volumes de controlo com resolução baseada num procedimento numérico iterativo.

As técnicas de modelação matemática para simulação do comportamento térmico e do escoamento do ar em compartimentos climatizados tem sido alvo de forte investigação, embora a variedade de casos possíveis a torne numa área com necessidade de inúmeros estudos para a avaliação das condições de climatização e ventilação. No entanto, a modelação matemática de espaços refrigerados ainda está numa fase inicial de desenvolvimento, em grande parte devido à ocupação por produtos alimentares, normalmente com formas irregulares ou armazenados em qualquer tipo de embalagem. No caso da simulação de compartimentos climatizados sucede a mesma dificuldade devido às cargas térmicas existentes nos espaços, à presença de obstáculos, e às diferentes entradas e saídas de ar, sendo o caminho percorrido pelo ar nas secções em estudo extremamente complexo. Nestes casos, não é apenas difícil simular o processo, mas também é necessário ter em consideração o esforço computacional relativo a modelação do escoamento e do processo de transmissão de calor. É importante referir que o aparecimento e aperfeiçoamento de diversos códigos comerciais de DFC, levaram à aplicação da modelação numérica aos mais diversos fenómenos físicos com consequente validação, tornando-se num método expedito de previsão, permitindo uma utilização cada vez mais acessível ao projectista, com modelos matemáticos optimizados para cada caso, já que a elaboração de um código isolado para a previsão de um determinado escoamento é complexa e demorada. Este facto aliado aos elevados custos e tempo despendido associados aos trabalhos experimentais de avaliação e desenvolvimento, justificam a utilização preferencial de códigos comerciais.

Como referência aos estudos que têm sido realizados para a avaliação de propriedades em compartimentos climatizados ou ventilados e no campo da refrigeração podem ser mencionados entre outros, Pitarma [1] que realizou a modelação matemática de câmaras frigoríficas de veículos com o propósito de estudar a inadequada distribuição de ar. Foi efectuada a modelação tridimensional do escoamento turbulento, com transmissão de calor, em compartimentos frigoríficos com convecção natural ou forçada. São modelados diversos casos práticos com relevância no domínio da refrigeração de câmaras para o transporte rodoviário de longa distância, relativos ao estudo do 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.

Também Costa *et al.* [2] realizaram um estudo numérico destinado a avaliar o desempenho da vedação aerodinâmica de um aparelho de cortina de ar, instalado entre dois compartimentos adjacentes a temperaturas distintas. O estudo permitiu avaliar as características do escoamento turbulento não isotérmico, bidimensional, e em particular determinar a influência da variação da velocidade de insuflação, de modo a quantificar a eficácia do desempenho de um aparelho de cortina de ar.

## 2. MODELO MATEMÁTICO

A representação física e matemática dos fenómenos físicos que exprimem o escoamento de fluidos com transmissão de calor incorporada são expressas por um conjunto de equações gerais de governo do escoamento. Considerando  $\phi$  como uma variável genérica representativa de uma quantidade escalar, tal como a concentração de espécies ( $C$ ) ou uma quantidade energética, como seja a entalpia ( $h$ ), de um modo genérico as equações de governo virão :

$$\sum \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho \sum_j \frac{\partial (U_i U_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + F_i + \rho \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ v_l \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \rho \sum_j \frac{\partial (U_j \phi)}{\partial x_j} = \rho \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_l}{Pr_l(\phi)} + \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi \quad (3)$$

A maioria dos casos de estudo na área da climatização/ventilação e refrigeração faz uso do modelo de turbulência  $k-\epsilon$ , dada a sua utilização no estudo da distribuição das propriedades relevantes (velocidade, temperatura, humidade relativa, concentração de contaminantes, ...). A popularidade do modelo, aliada ao conseqüente uso e validação trouxe à luz as suas vantagens bem como as suas deficiências, analisadas em pormenor por Launder *et al.* [3]. Trata-se de um modelo de turbulência bastante plausível na realização de previsões numéricas do escoamento de fluidos com transmissão de calor devido à capacidade de simulação de uma gama elevada de escoamentos com ajustamento mínimo dos coeficientes e pela sua relativa simplicidade de formulação. O modelo é constituído por duas equações diferenciais, correspondentes à energia cinética turbulenta e à sua taxa de dissipação :

$$\rho \frac{Dk}{Dt} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ U_i k - \frac{v_i}{Pr_t(k)} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] = \rho (P_k + \Gamma_b - \epsilon)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ U_i \epsilon - \frac{v_i}{Pr_t(\epsilon)} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] = \rho \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} P_k + C_{3\epsilon} \Gamma_b - C_{2\epsilon} \epsilon) \quad (4)$$

Apresentando resultados muito aceitáveis, é restrito a regiões em que o escoamento se encontra completamente desenvolvido, enquanto que o escoamento que é afectado pela viscosidade nas proximidades das paredes é ligado através do uso de funções logarítmicas de parede. A descrição completa e os pormenores relativos à implementação do modelo de turbulência e das leis de parede pode ser encontrada em Rodi [4].

### 3. MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico intrinsecamente implementado nos dois códigos utilizados, baseia-se na discretização das equações diferenciais por meio do método das diferenças finitas – formulação de volumes de controlo, dada por:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \rho U\phi - \Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x_k} \right) = S_\phi \quad (5)$$

Apesar de algumas diferenças relativas à implementação, a discretização dos termos convectivos nas equações de transporte relativas aos volumes de controlo para as variáveis dependentes é realizada pelos esquemas clássicos, bem como a resolução do conjunto de equações algébricas, faz uso dos algoritmos cuja descrição pormenorizada pode ser encontrada em Patankar [5]. Todas as particularidades relativas à descrição dos modelos matemáticos e à implementação dos modelos numéricos para cada um dos códigos pode ser encontrada em Phoenics [6] e em Fluent [7].

### 4. APLICAÇÃO PRÁTICA

Neste item serão expostos dois casos concretos de aplicação dos códigos de CFD mencionados. Referem-se as vantagens e desvantagens reconhecidas a cada um dos códigos, bem como os resultados obtidos e sua precisão.

#### 4.1. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EXPOSITORES REFRIGERADOS.

Este estudo, descrito pormenorizadamente em Gaspar [8], tem como objectivo a simulação numérica dos fenómenos de transmissão de calor e massa em equipamentos expositores verticais abertos. As previsões do escoamento bidimensional, turbulento, não isotérmico e do processo de transmissão de calor em regime estacionário, envolve o modelo matemático descrito anteriormente, bem como o modelo numérico implementado no código *PHOENICS*. O modelo computacional foi aplicado a um equipamento expositor refrigerado vertical aberto, constituído por uma malha ortogonal deslocada não uniforme com 50x240 volumes de controlo, com o intuito de avaliar a distribuição dos campos de velocidade e de temperatura no seu interior.

O estudo numérico do desempenho térmico visa tecer orientações sobre alterações de projecto a efectuar aos equipamentos, de modo a uniformizar os campos de temperatura e velocidade, bem como a optimizar a eficiência energética.

Foram efectuadas medições experimentais dos campos de temperatura e de velocidade do ar, com a finalidade de validar as previsões do modelo numérico. Os resultados obtidos podem, de um modo geral, ser considerados satisfatórios, sugerindo o prosseguimento deste tipo de trabalhos.

Os tipos de condições de fronteira impostos são de prática comum nas simulações numéricas, mas específicos a cada caso. Em particular, foram utilizadas as condições de fronteira existentes por defeito no código relativamente a: paredes; elementos de insuflação e de aspiração de ar refrigerado; superfície de exposição (Abertura ao ar ambiente do compartimento) e fontes de calor, conforme descrito em pormenor em Phoenics [6].

De seguida são exibidos os resultados mais significativos do estudo numérico, reflectidos nas previsões do padrão das linhas de corrente na *Figura 1*. e pelo padrão das isotérmicas na *Figura 2*.

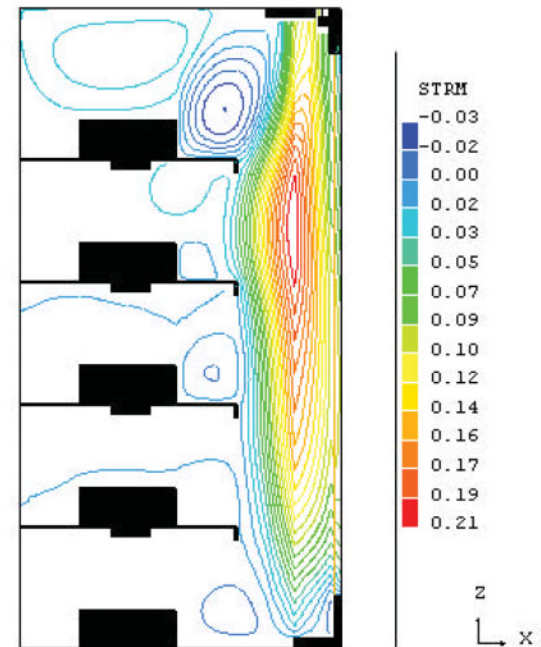


Figura 1. Linhas de corrente.

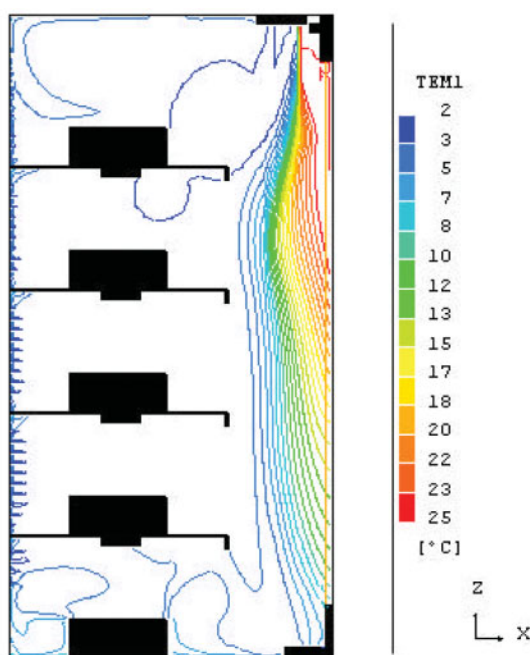


Figura 2. Isotérmicas, [°C].

A análise do campo de velocidade em zonas sensíveis do equipamento evidencia, na globalidade, 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.

Na *Figura 1*, é possível visualizar as diversas recirculações existentes nos espaços entre as prateleiras que auxiliam a conservação em frio dos produtos e na *Figura 2*, 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 pelos orifícios presentes na frente interior.

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.

#### 4.2. MODELAÇÃO DO ESCOAMENTO NUM COMPARTIMENTO CLIMATIZADO.

Neste estudo apresenta-se a simulação numérica capaz de modelar as características do ambiente interior em espaços climatizados, mediante a previsão dos campos de velocidade, de temperatura, da humidade relativa e de contaminantes no ar.

A simulação numérica foi realizada com o código de DFC FLUENT e a geometria/malha é proveniente do software GAMBIT.

O modelo computacional foi aplicado a um compartimento com uma unidade de climatização do tipo “Split mural” para aquecimento. A geometria em estudo simula em 2D as características do campo do escoamento turbulento do ar num compartimento com 5,5m de comprimento e 2,7m de altura, climatizado através de uma unidade mural localizada a 2,35m do chão. A unidade de climatização tem uma grelha de insuflação que faz um ângulo de 26° com a horizontal e uma zona de extracção vertical.

O modelo computacional foi aplicado à configuração descrita, discretizada através de uma malha não ortogonal com 1517 volumes de controlo.

A qualidade da solução de simulação depende do rigor com que são especificadas as diferentes propriedades físicas nas fronteiras, em particular no caso de estudo para funções de parede foram usadas por defeito as do FLUENT que são baseadas na proposta de Launder et al.[3], bem como as condições para a abertura de insuflação com entrada mássica a temperatura e velocidade prescrita e zona de extracção livre.

Uma simulação numérica bidimensional tem sempre como virtude permitir, através de cálculos bastante expeditos, uma percepção das principais características do escoamento e dos fenómenos convectivos em jogo, assim como avaliar as influências dos principais parâmetros variáveis. Nas figuras são apresentadas previsões numéricas do campo de velocidades para a configuração estudada.

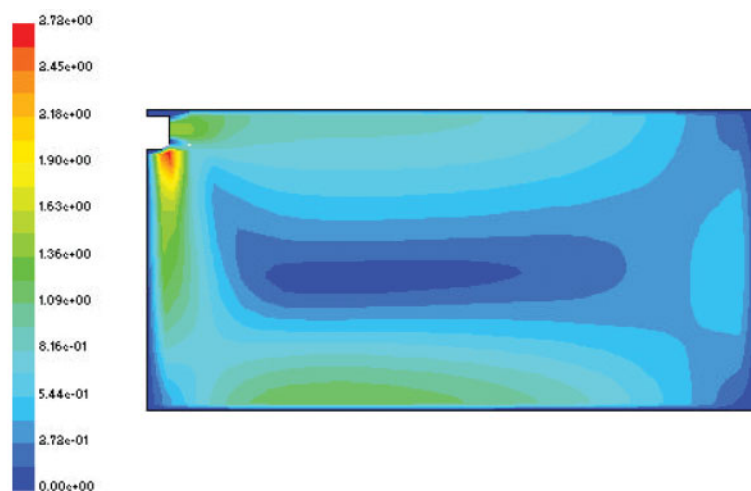


Figura 3. Campo de velocidades, [m/s].

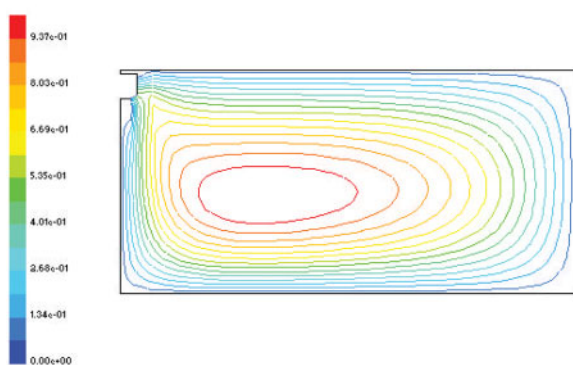


Figura 4. Linhas de corrente.

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram descritos sumariamente diversos estudos numéricos através de códigos de DFC. Os modelos expostos permitem obter e prever as características do ambiente interior em espaços climatizados/ventilados e o conhecimento da distribuição das propriedades relevantes em equipamentos de refrigeração. Neste sentido, é possível utilizar os códigos para estudos de optimização e correcção de deficiências.

Genericamente, verifica-se que os diversos códigos fazem uso das mesmas especificações relacionadas com os modelos matemático e numérico, embora cada um possua por defeito uma série de modelos físicos, técnicas matemáticas e distintos casos de validação. Relativamente aos pontos descritos, o PHOENICS prima pela diversidade de modelos fisico-matemáticos e casos de validação que possui.

Os códigos apresentam diferenças na estrutura e metodologia de cálculo, que os distinguem pela facilidade de utilização em função da versatilidade e simplicidade da interface utilizador-programa. Neste campo o FLUENT possui maiores potencialidades.

A aplicabilidade destes códigos é fundamentada pela complexa ferramenta científica que constituem, pela facilidade de utilização e de implementação da simulação dos mais diversos fenómenos físicos relevantes em engenharia, no entanto, para se poder imputar alguma autenticidade aos resultados, o utilizador deve possuir um conhecimento prévio dos fenómenos físicos que pretende simular e dos respectivos modelos matemático, de DFC e do modelo numérico subjacente ao código, bem como, possuir dados experimentais que transmitam confiança aos resultados numéricos obtidos.

## REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] Costa, J. J. e Oliveira, L. A., "Vedação aerodinâmica por cortina de ar – Estudo numérico", *I Jornadas Técnicas de Primavera da EFRIARC*, Março 2001.
- [3] Launder, B. E., Spalding, D. B., *The numerical computation of turbulent flows*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 3, 1974.
- [4] Wolfgang Rodi, *Turbulence models and their application in hydraulics – A state of the art review*, IAHR, 1980.
- [5] S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- [6] Phoenics - *related Lectures and Tutorials*, CHAM - Concentration, Heat and Momentum Ltd [citado em 25 de Setembro de 2001 – 18:27]. Disponível em URL: [http://www.cham.co.uk/phoenics/d\\_polis/d\\_lecs/leclist.htm](http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_lecs/leclist.htm)
- [7] Fluent 5 – *User's guide Volume 1-4*, Fluent Incorporated, July 1998.
- [8] Gaspar, Pedro Dinis, *Estudo Numérico e Experimental do Desempenho Térmico de Equipamentos Expositores Refrigerados*, Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2002. (Submetida)

## NUMENCLATURA

$C_{11}, C_d, C_{1e}, C_{2e}, C_{3e}$	Constantes do modelo de turbulência.
F	Força, [N].
k	Energia cinética turbulenta [ $m^2/s^2$ ].
p	Pressão, [Pa].
$P_k$	Taxa de produção de energia cinética turbulenta por tensões de corte, [ $m^2/s^3$ ].
Pr, Pr <sub>t</sub> , Pr <sub>i</sub>	Número de Prandtl/Schmidt turbulento / ... laminar.
S	Termo fonte.
t	Tempo, [s].
U	Velocidade média ou instantânea, [m/s].
x	Coordenadas cartesianas, [m].
<i>Índices Inferiores e Superiores</i>	
i, j, k	Componentes das direcções cartesianas segundo x,y e z.
l	Laminar.
t	Turbulento.
<i>Simbologia grega</i>	
$\rho$	Massa específica, [kg/m <sup>3</sup> ].
$\varepsilon$	Dissipação de energia cinética, [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ].
$\phi$	Variável genérica.
$\mu, \mu_t, \mu_l$	Viscosidade dinâmica / ... turbulenta / ... laminar, [N·s/m <sup>2</sup> ].
$\nu, \nu_t, \nu_l$	Viscosidade cinemática molecular / ... turbulenta / ... laminar, [m <sup>2</sup> /s].
$\Gamma_b$	Taxa de produção de energia cinética turbulenta por impulsão, [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ].
$\Gamma_\phi$	Coefficiente de difusão para a variável genérica $\phi$ .

UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROMECÂNICA  
RUA FONTE DO LAMEIRO – EDIFÍCIO 1 DAS ENGENHARIAS, 6201-001 COVILHÃ

ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA E GESTÃO, INST. POLIT. DA GUARDA  
AV.FRANCISCO SÁ CARNEIRO, N.º 50, 6300-559 GUARDA