

# **Análises para avaliação de conforto térmico em cabine de aeronave : simulação numérica**

**Dario Abilio Cruz**  
**dabiliocruz@yahoo.com.br**

**Resumo.** Condições adequadas de conforto térmico em cabines apresentam importante diferencial de competitividade na indústria automotiva e, em particular, na indústria aeronáutica. Adicionalmente, o desenvolvimento de ferramentas computacionais de análise permite redução de tempo e custos de projeto, com obtenção de novos produtos com preços mais competitivos. Neste trabalho são analisados os modelos de turbulência  $k-\epsilon$  padrão e realizável e alguns de seus respectivos tratamentos junto à parede, que estão implementados no software de CFD FLUENT Inc. São feitas simulações numéricas para comparar esses tratamentos junto à parede, dos campos de velocidade e temperatura no interior da cabine. Com as informações das discussões desses modelos de turbulência e das simulações pode-se entender melhor a aplicabilidade dessa simulação numérica para avaliação de conforto térmico na cabine de aeronave. A cabine simulada é simplificada. Foram obtidos alguns resultados significativos. Por meio destes, pode-se entender e comparar a aplicabilidade desses modelos de turbulência, o escoamento nesse modelo de cabine de aeronave e a distribuição de temperatura. E, de acordo, com as condições de contorno impostas, verificar que os resultados obtidos estão coerentes.

**Palavras chave:** 1. Dinâmica dos fluidos, 2. Métodos numéricos (Simulação), 3. Interior de aeronaves

## **1. Introdução**

### **1.1. Motivação**

Os seres humanos têm necessidades que, dispostas hierarquicamente, apresentam na sua base as necessidades fisiológicas. Quando essas necessidades começam a ser atendidas, o homem deixa de se preocupar com elas e passa a se preocupar com os níveis hierárquicos superiores, que se tornam importantes, e estes motivam e determinam o comportamento do indivíduo. Quando tais necessidades são, até certo ponto, atendidas, outras emergem, e assim por diante, até que o homem percorra toda a hierarquia de necessidades. No alto desta pirâmide está a auto-realização. Quando o indivíduo a atingir, significa que todas as necessidades inferiores já foram atendidas. Segundo a linha de pensamento de Maslow (1985), um homem auto-realizado está motivado para o trabalho e o executa com satisfação. Para atingir a satisfação a necessidade do conforto térmico deve estar satisfeita, dentre outras necessidades.

Visando atender a essa necessidade foram desenvolvidas técnicas para melhoria do conforto térmico humano, definido pela norma ASHRAE 55:2004 como sendo “um estado de espírito que reflete satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa”.

Nesse sentido, condições adequadas de conforto térmico em cabines apresentam importante diferencial de competitividade na indústria automotiva e, em particular, na indústria aeronáutica. Adicionalmente, o desenvolvimento de ferramentas computacionais de análise permite redução de tempo e custos de projeto, com obtenção de novos produtos com preços mais competitivos.

Em função da acirrada concorrência na indústria aeronáutica, existe pouca (quase nenhuma) informação na literatura aberta quanto a modelos de avaliação de condições de conforto térmico em cabines de aeronaves.

### **1.2. Objetivos do Trabalho**

Esse trabalho tem por objetivo analisar os modelos de turbulência  $k-\epsilon$  padrão e realizável, e alguns dos tratamentos junto à parede associados a esses modelos de turbulência e realizar simulações numéricas do escoamento do ar em cabine de aeronave, com insuflamento por seis entradas situadas na região superior, com retorno por uma grelha próximo aos pés dos passageiros da janela, e comparar a aplicabilidade desses modelos de turbulência para o ambiente em estudo. Na Fig. (1), têm-se as superfícies da geometria da cabine que será simulada, com as entradas e retorno do ar.

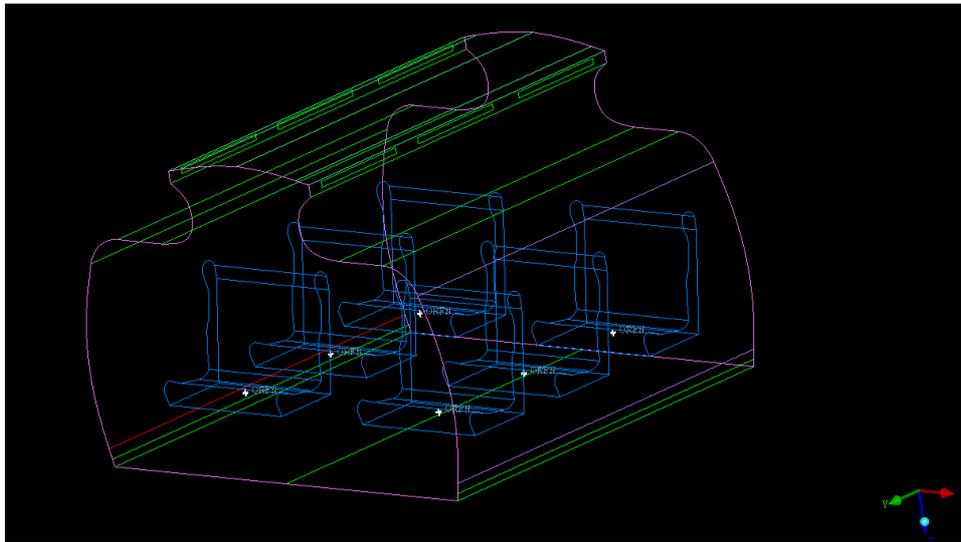


Figura 1. Superfícies da geometria utilizada na simulação

Tal geometria é composta dos elementos principais da cabine de aeronave do modelo correspondente, em que algumas superfícies e sua função são descritas na Tab. (1):

Tabela 1-Superfícies da geometria em estudo e suas funções

Cor da Superfície	Descrição da função
Verdes superiores	Entrada de ar
Verdes inferiores	Saída de ar
Azuis	Poltronas

### 1.3. Revisão Bibliográfica e de Material Técnico

Seo (2001) faz um estudo numérico dos efeitos de empuxo nos fluxos convectivos usando o modelo k-ε padrão e o modelo k-ε para número de Reynolds baixo, que não emprega funções de parede. É feito um estudo da disposição da malha e de independência de malha. Um ajuste para cada caso é realizado, de tal modo a não ter um ponto da malha na subcamada viscosa, onde o  $y^+$  é menor que 13 para o ar. Para o modelo k-ε padrão, se o primeiro ponto junto à parede está na subcamada viscosa, os cálculos numéricos tendem a sobreestimar os valores das quantidades na região da subcamada viscosa e subestimar na região logarítmica. Resultados sem e com efeitos do empuxo para os dois modelos são comparados com dados experimentais e dados da simulação numérica direta (DNS). O DNS é frequentemente usado para desenvolver novos modelos de turbulência por causa das informações detalhadas que fornece mesmo para fluxos muito próximos à parede.

Nilsson (2004) descreve a teoria de conforto térmico humano e avaliação utilizando manequins térmicos e numéricos, mostrando vantagens e desvantagens do método da temperatura equivalente com a utilização desses manequins. Apresenta métodos para estudos experimentais de assentos comuns e ventilados. Utilizando três manequins, dois reais e um virtual, Nilsson realiza o estudo de três casos: câmara climatizada, ambiente de escritório e cabine de um veículo, obtendo boa concordância entre os dados experimentais e numéricos. A simulação foi realizada com um modelo de turbulência de zero equação, não explicitado pelo autor.

Pustelnik (2005) realiza a simulação do escoamento do ar em ambiente com insuflamento pelo piso, do laboratório de conforto térmico da EPUSP, utilizando ferramentas CFD (FLUENT e ICEM CFD). As simulações são feitas com diferentes condições de insuflamento de ar pelo piso, e como parâmetro de comparação para validação utiliza-se dos dados experimentais dos campos de velocidade e temperatura obtidos por Leite (2003). Um dos objetivos do trabalho é a comparação do desempenho entre os diversos modelos de turbulência presentes no Fluent. Observou boas concordâncias quando os modelos k-ε padrão e dos tensores de Reynolds (RSM – Reynolds Stress Model) são utilizados; especialmente o último, que demanda um tempo de simulação quase três vezes superior aos demais para atingir a convergência.

Também utilizando técnicas de CFD, Tribess et al. (2005) realizaram a simulação numérica do resfriamento de componentes eletrônicos em um compartimento de aeronave, onde foram estudados os efeitos da geração de calor volumétrica e superficial pelos equipamentos. Foram geradas malhas tetraédricas e o software Fluent foi utilizado na resolução das equações. Concluiu-se que a geração superficial é a melhor alternativa quando somente o escoamento no interior do compartimento for de interesse.

Em função da acirrada concorrência na indústria aeronáutica, existe pouca (quase nenhuma) informação na literatura aberta quanto a modelos de avaliação de condições de conforto térmico em cabines de aeronaves. Mesmo com

relação ao escoamento e trocas de calor em cabines, os resultados publicados ainda são bastante restritos e se referem, basicamente, àqueles publicados no Roomvent 2004.

O artigo que melhor aborda a questão da simulação numérica (com avaliação experimental) em cabines de aeronaves é o de Pennecot et al. (2004), que apresentam resultados de estudo comparativo do escoamento em uma parte da fuselagem de um Airbus 380, utilizando simulação numérica e medidas de velocidade com técnica PIV (*particle image velocimetry*). Nas simulações foi utilizado o software comercial StarCD. Foram realizadas simulações com diferentes tipos de malhas e modelos de turbulência. Resultados numéricos foram comparados com resultados experimentais. As simulações de Pennecot et al. (2004) mostraram que, para uma descrição correta do escoamento na cabine, é de fundamental importância ter-se especial cuidado ao se considerar as condições de fluxo nos difusores de insuflamento do ar na cabine.

Recentemente, em abril de 2006, foi concluído projeto PICTA Embraer/Fapesp “Advanced applications of computational fluid dynamics to high performance aircraft (Processo 2000/13768-4)”, e em um dos sub-projetos da fase 2, “Thermal comfort”, foi desenvolvido modelo numérico para avaliação de condições de conforto térmico.

O modelo numérico desenvolvido é baseado nas trocas de calor entre manequins digitais e o ar da cabine (sem incluir o modelo termorregulador). Naquele estudo foi utilizada geometria de aeronave de domínio público. Inicialmente, foram realizados estudos do escoamento do ar considerando quatro manequins simples, não digitais (*sticks*). Foi realizado estudo de independência de malha e de sensibilidade considerando diferentes modelos de turbulência.

Um manequim foi construído no computador, considerando dimensões do manequim e do ambiente utilizado por Nilsson (2004) no processo de calibração para aplicação do conceito de temperatura equivalente. Foram geradas malhas e realizado estudo de independência de malha na comparação de resultados numéricos e experimentais de coeficientes de troca de calor.

#### 1.4. O Uso de CFD (“Computacional Fluid Dynamics”)

O grande avanço da capacidade de processamento e armazenamento de dados que os computadores obtiveram nas últimas décadas permitiu uma grande difusão das técnicas de CFD, tanto nas universidades como nas indústrias. Em ambos os casos o objetivo é a pesquisa e o desenvolvimento de produtos ou processos em que o escoamento de um ou mais fluidos está envolvido.

Segundo Versteeg e Malalasekera (1995), as principais vantagens da simulação numérica em relação à construção de protótipos são:

- Redução substancial de tempo e custo de novos projetos;
- Habilidade de estudar sistemas nos quais experimentos controlados são difíceis ou impossíveis de se realizar (por exemplo, sistemas de grande porte);
- Obter as condições de ótimo desempenho no projeto;
- Habilidade de estudar sistemas sob condições perigosas e além das condições limites de desempenho (por exemplo, acidentes e estudos de segurança);
- Nível de detalhes dos resultados praticamente ilimitado e;
- Como item de importância extremamente significativa, pode-se citar a inovação, ou seja, a geração de novas idéias que podem ser transpostas para outros desenvolvimentos.

Porém, mesmo com todas essas vantagens, a simulação utilizando CFD não substitui os dados experimentais, pois são com esses últimos que as simulações são validadas e somente a partir da validação que resultados de simulações de alterações em relação ao modelo original podem ser considerados consistentes.

Além disso, é necessária mão-de-obra especializada (engenheiros ou técnicos experientes) para operar os softwares de CFD. Isso porque geralmente esses softwares são de fácil domínio da interface gráfica, e de algoritmos bem robustos, o que pode levar o usuário despreparado a obter soluções falsas e que não seja capaz de identificar.

##### 1.4.1. Etapas de uma análise de CFD

Um estudo utilizando CFD consiste basicamente de quatro etapas detalhadas a seguir: construção da geometria, geração de malha, processamento e pós-processamento.

- Construção das geometrias: etapa extremamente trabalhosa, consiste em construir, em um software adequado, a geometria do domínio a ser simulado, no caso a cabine de aeronave e, posteriormente, o manequim numérico. Vale ressaltar que já nessa etapa são empregadas algumas hipóteses simplificadoras, pois nem todos os componentes do domínio são desenhados exatamente como são.

- Geração das malhas: uma das etapas mais importantes em uma análise CFD, a geração da malha consiste em discretizar a geometria construída na etapa anterior em vários elementos volumétricos para que a utilização do método dos volumes finitos pelo *solver* seja possível.

- Processamento: etapa principal, a análise propriamente dita, é a resolução das equações de conservação das quantidades físicas e energia por um software de CFD apropriado. É nessa etapa que são inseridas as condições de contorno no modelo e tem-se como resultado as variáveis desejadas.

- Pós-processamento: nessa etapa os resultados provenientes da etapa anterior são analisados. Nessa fase são identificados problemas relacionados a todas as etapas anteriores, como inconsistências na geometria, baixo nível de refinamento da malha em regiões de grandes gradientes, ou ainda erros na determinação das condições de contorno. Encontrados os problemas, volta-se ao passo referente, corrige-se e a análise é reiniciada.

## 2. Fundamentos Teóricos

### 2.1. CFD – Introdução

Nesse capítulo são apresentados alguns dos conceitos teóricos envolvidos no desenvolvimento do projeto e explicitadas algumas das equações que são resolvidas pelo solver Fluent. O programa utiliza o Método dos Volumes Finitos, que é um método de resolução de equações a derivadas parciais, baseado na resolução de balanços de massa, energia e quantidade de movimento a um determinado volume de meio contínuo. Este método evoluiu das diferenças finitas, outro método de resolução de equações diferenciais, e garante que, em cada volume discretizado, a propriedade em questão (por exemplo, a massa) obedece à lei da conservação.

### 2.2. Equações de Conservação

Para  $\rho$  e  $\mu$  constantes, as equações de Navier-Stokes podem ser expressa como seguem.

#### Equação da Continuidade

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

#### Equação da Quantidade de Movimento

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right\} + g_x \beta (T - T_0) \quad (2)$$

#### Equação de Energia

A partir da primeira lei da termodinâmica obtém-se a equação da conservação de energia que pode ser rearranjada

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\alpha + \alpha_t) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

Esta equação da energia é fortemente acoplada com a equação da quantidade de movimento, tanto que todos os cálculos numéricos para as equações que regem o problema podem ser executadas simultaneamente.

### 2.3. Tratamento junto à parede

Nas regiões do domínio onde há baixa turbulência, especialmente próximo às superfícies sólidas onde a relação de viscosidades (laminar e turbulenta)  $\frac{\mu}{\mu_t} \gg 1$  não é satisfeita e as equações dos modelos de turbulência não são resolvidas, são utilizadas equações algébricas para a determinação de  $\mu_t$ . Para a obtenção dessas equações é feita a hipótese de que a turbulência está em equilíbrio nessas regiões do escoamento. Como essas equações são válidas apenas para uma pequena região do escoamento é imposta uma restrição sobre a qualidade da malha utilizada, que deve ter os centróides dos elementos próximos à parede localizados em uma determinada faixa de distância ( $y^+$ ) para que os resultados sejam válidos.

$$y^+ = \frac{y \sqrt{\tau_0 / \rho}}{\nu} \quad (4)$$

Com  $y$  sendo uma distância a partir da parede,  $\rho$  representa a densidade,  $\nu$  a viscosidade cinemática e  $\tau_0$  a tensão de cisalhamento na parede.

A função de parede dada pela lei logarítmica que é válida para camada limite em equilíbrio e fluxos plenamente desenvolvidos, prevê limites superiores e inferiores aceitáveis sobre a distância entre o centróide e a parede do elemento para elementos adjacentes. Esta distância é normalmente verificada com o adimensional  $y^+$ .

Este adimensional é definido escolhendo-se dimensões características do escoamento e é utilizado na adimensionalização das equações do escoamento. As equações são adimensionalizadas para:

- 1° Permitir comparações entre os termos para saber quais são desprezíveis em relação aos outros;
- 2° Permitir visualizar quais números adimensionais são mandatórios no escoamento.

## 2.4. Modelagem da Turbulência junto à parede

Turbulência é o estado do fluido em movimento caracterizado por vorticidade tridimensional e aparentemente randômica. Quando a turbulência está presente costuma dominar todos os outros fenômenos e resulta num acréscimo, por exemplo, de dissipação de energia, transferência de calor e massa, e arrasto. Isso ocorre devido ao pequeno tamanho e a alta frequência das flutuações do campo de velocidades, principal característica do escoamento turbulento.

A grande maioria dos escoamentos presentes na natureza e aplicações industriais é em regime turbulento. E por mais que a tecnologia computacional tenha avançado nos últimos anos, ainda não é possível discretizar os domínios dos modelos práticos de tal forma que o menor elemento da malha seja menor ou igual ao menor vórtice que dissipa sua energia de forma térmica, sem causar movimento nas partículas fluidas ao seu redor (escala de Kolmogorov) e dessa forma utilizar a simulação numérica direta (DNS – Direct Numerical Simulation). Assim, são necessários modelos que tentem reproduzir a maneira randômica com a qual a turbulência influencia nas propriedades do fluido, os chamados modelos de turbulência. Contudo ainda não existe um modelo geral, que produza bons resultados para as infinitas formas de um escoamento turbulento. Nesse contexto uma escolha equivocada do modelo utilizado para determinada aplicação pode resultar desde dificuldade na convergência, tempo de processamento extremamente elevado, até resultados que não condizem com a realidade.

### 2.4.1. Modelo k-ε padrão

O k-ε padrão é um modelo semi-empírico baseado na modelagem das equações de transporte da energia cinética turbulenta (k) e na sua taxa de dissipação (ε). O modelo para a equação de energia cinética k é derivado da equação exata, enquanto a taxa de dissipação ε é obtida por raciocínio físico e tem pouca semelhança com a outra equação.

Na derivação do modelo k-ε foi assumido que o escoamento é completamente turbulento e os efeitos da viscosidade turbulenta são desprezíveis. Portanto, o modelo k-ε é válido apenas para escoamentos plenamente turbulentos.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon}{k} + S_\varepsilon \quad (6)$$

Nas equações acima,  $G_k$  representa a geração de energia cinética turbulenta devido à velocidade média no gradiente;  $G_b$  é a geração de energia cinética devido à flutuação;  $Y_M$  representa o termo da dissipação da dilatação em escoamentos compressíveis;  $C_{1\varepsilon}$  e  $C_{2\varepsilon}$  são constantes;  $\sigma_\varepsilon$  e  $\sigma_k$  são os números de Prandtl para as taxas de turbulência k-ε e  $S_k$  e  $S_\varepsilon$  são as fontes definidas pelo usuário.

A viscosidade turbulenta ( $\mu_t$ ) é calculada da seguinte forma:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

As constantes do modelo (valores padrão do FLUENT) foram obtidas experimentalmente para escoamentos turbulentos fundamentais e funcionam bem em escoamentos turbulentos forçados e livres.

$$(C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon) = (1.44, 1.92, 0.09, 1.0, 1.3)$$

### 2.4.2. Modelo k-ε realizável

O modelo k-ε realizável é um desenvolvimento relativamente recente e difere do modelo k-ε padrão em dois aspectos importantes: o k-ε realizável contém uma nova formulação para a viscosidade turbulenta e uma nova equação de transporte para a taxa de dissipação ε. Um benefício imediato do modelo k-ε realizável é que provavelmente forneça um desempenho superior para fluxos envolvendo rotação, camada limite sob forte gradiente adverso de pressão, separação e recirculação. As equações de k e ε para este modelo são

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (9)$$

A viscosidade turbulenta ( $\mu_t$ ) é calculada da seguinte forma:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{com} \quad C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad \text{e} \quad A_0 = 4.04, \quad A_S = \sqrt{6} \cos \Phi$$

$$(C_{1\varepsilon}, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon) = (1.44, 1.9, 1.0, 1.2)$$

### 2.4.3. Funções de parede

Funções de parede são uma coleção de fórmulas semi-empíricas que em efeito fazem a “ponte” ou “ligam” as soluções variáveis no elemento junto à parede e às condições desta. A função de parede foi originalmente um método de acordo com as condições de contorno para modelos com número de Reynolds alto. Esses modelos foram feitos assumindo que o valor de  $R_t$  (número de Reynolds turbulento) é tão alto que os parâmetros turbulentos  $C_1, C_2, C_\mu$  e  $C_3$  poderiam ser tratados como constantes. Esta característica não é válida na região perto das superfícies (contornos dos sólidos). Por isso, uma função de parede é necessária para conectar as condições de contorno com os parâmetros físicos do domínio onde a influência de  $R_t$  nos parâmetros turbulentos é desconsiderada. As funções de parede compreendem: - Leis de parede para a velocidade e temperatura (ou outros escalares), - Fórmulas para a turbulência junto à parede. Dependendo do modelo de turbulência escolhido, o FLUENT oferece três ou quatro opções de aproximações para a função de parede: - Funções de parede padrão, - Funções de parede para o não equilíbrio, - Tratamento de parede reforçado, - Uso de funções de parede definidas.

#### 2.4.3.1. Funções de parede padrão

É admitido que os fluxos da quantidade de movimento e calor na parede obedecem às funções de parede propostas por Launder e Spalding (1974)

$$\frac{U_p}{(\tau/\rho)_w} C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} = \frac{1}{\kappa} \ln \left[ E y_p \frac{(C_\mu^{1/2} k_p)^{1/2}}{\nu} \right] \quad (10)$$

$$\frac{(T_p - T_w) C_p \rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{q_w} = \text{Pr}_t \left\{ \frac{1}{\kappa} \ln \left[ E y_p \frac{(C_\mu^{1/2} k_p)^{1/2}}{\nu} \right] + P \right\}, \quad P = 9.24 \left[ (\text{Pr}/\text{Pr}_t)^{0.75} - 1 \right] \left[ 1 + 0.28 \exp(-0.007 \text{Pr}/\text{Pr}_t) \right] \quad (11)$$

O  $P$  no lado direito da Equação (14) tem sua origem em uma análise de dados experimentais conduzidos por Jayatillaka (1969).

$$\varepsilon_p = \left[ (C_\mu^{3/4} K_p^{3/2}) / \kappa y_p \right] \quad (12)$$

#### 2.4.3.2. Tratamento junto à parede reforçado (“Enhanced wall treatment”)

O reforço no tratamento junto à parede é um método de modelagem que combina o modelo das duas camadas com funções de reforço na parede (“enhanced wall functions”). Se a malha junto à parede é fina o suficiente de forma a ser capaz de resolver a subcamada laminar (tipicamente  $y^+ \approx 1$ ), então o “enhanced wall treatment” será idêntico ao modelo das duas camadas na região. No entanto, a restrição que a malha deve ser suficientemente fina junto à parede em toda a cabine impõe uma exigência computacional grande.

Idealmente, busca-se ter uma formulação que pode ser utilizada tanto com malhas grosseiras (usualmente chamada de malhas de função de parede) como com malhas finas (malhas para número de Reynolds baixo). Não deveria haver erros grosseiros para malhas intermediárias que são muito finas para o centróide do elemento próximo à parede na região de escoamento plenamente desenvolvido, mas também muito grosseira para resolver a subcamada laminar.

Para ter um método que pode estender sua aplicabilidade além da região junto a parede (por exemplo, subcamada laminar, região de transição e exterior a região plenamente desenvolvida) é necessário formular a lei de parede como uma única lei de parede para a região toda. FLUENT realiza esta lei de parede considerando a parte linear (laminar) e logarítmica (turbulenta) usando uma função sugerida por Kader, chega-se as equações abaixo

$$u^+ = e^\Gamma u_{lam}^+ + e^{\frac{1}{\Gamma}} u_{urb}^+ \quad (13)$$

$$\frac{du_{urb}^+}{dy^+} = \frac{1}{\kappa y^+} \left[ S'(1 - \beta u^+ - \gamma (u^+)^2) \right]^{1/2} \quad (14)$$

Em que  $S' = 1 + \alpha y^+$  para  $y^+ < y_s^+$  e  $S' = 1 + \alpha y_s^+$  para  $y^+ \geq y_s^+$

$$E \alpha = \frac{v_w}{\tau_w u^*} \frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{\rho^2 (u^*)^3} \frac{dp}{dx} \quad (15)$$

$$\beta = \frac{\sigma_t q_w u^*}{c_p \tau_w T_w} = \frac{\sigma_t q_w}{\rho c_p u^* T_w} \quad (16)$$

$$\gamma = \frac{\sigma_t (u^*)^2}{2c_p T_w} \quad (17)$$

$y_s^+$  é o local em que o declive da lei logarítmica permanece fixo. Por padrão  $y_s^+ = 60$ . O coeficiente  $\alpha$  na equação (53) representa a influência dos gradientes de pressão enquanto o coeficiente  $\beta$  e  $\gamma$  representa os efeitos térmicos. A equação (52) é uma equação diferencial ordinária e o FLUENT proporcionará uma adequada solução analítica. Se  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são nulos, uma solução analítica levaria à clássica lei de parede turbulenta logarítmica.

Note que a expressão acima apenas inclui efeitos de gradientes de pressão através de  $\alpha$ , enquanto os efeitos de propriedades variáveis devido à transferência de calor e compressibilidade na lei de parede laminar são omitidos.

$$u_{lam}^+ = y^+ \left( 1 + \frac{\alpha}{2} y^+ \right) \quad (18)$$

A função de parede térmica reforçada segue a mesma aproximação desenvolvida pelo perfil de  $u^+$ . A formulação térmica de parede unificada os perfis de acordo com o método de Kader:

$$T^+ = \frac{(T_w - T_p) \rho c_p u^*}{\dot{q}} = e^\Gamma T_{lam}^+ + e^{\frac{1}{\Gamma}} T_{turb}^+ \quad (19)$$

Em que a notação para  $T_p$  e  $\dot{q}$  é a mesma que para a função de parede térmica padrão. E o fator de unificação  $\Gamma$  é definido como  $\Gamma = -\frac{a(\text{Pr} y^+)^4}{1 + b \text{Pr}^3 y^+}$  (20)

$$T_{lam}^+ = \text{Pr} \left( u_{lam}^+ + \frac{\rho u^*}{2\dot{q}} u^2 \right)$$

$$T_{turb}^+ = \text{Pr}_t \left\{ u_{turb}^+ + P + \frac{\rho u^*}{2\dot{q}} \left[ u^2 - \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_t} - 1 \right) (u_c^+)^2 (u^*)^2 \right] \right\}$$

A quantidade  $u_c^+$  é o valor de  $u^+$  para o fictício “crossover” entre a região laminar e turbulenta.

## 2.5. Modelagem da densidade do ar

### 2.5.1. Hipótese de Boussinesq

Este modelo trata a densidade com um valor constante em todas as equações, exceto no termo de flutuação na equação de conservação da quantidade de movimento:

$$(\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0 \beta (T - T_0)g \quad (21)$$

onde  $\rho_0$  é a densidade (constante) do escoamento,  $T_0$  é a temperatura de operação e  $\beta$  é o coeficiente de expansão térmica. A equação (11) é obtida utilizando-se a aproximação de Boussinesq  $\rho = \rho_0(1 - \beta \Delta T)$  para eliminar  $\rho$  do termo de flutuação. Essa aproximação só é precisa quando as variações na densidade são pequenas; especificamente o modelo de Boussinesq é válido quando  $\beta(T - T_0) \ll 1$ .

## 3. Metodologia

### 3.1. Modelagem do Escoamento no Ambiente

A modelagem do escoamento no mock-up é realizada com o código comercial Fluent.

A descrição do escoamento do ar no ambiente da cabine é obtida com a solução simultânea das equações de conservação de quantidade de movimento, massa, energia e transporte de espécies. É utilizada a técnica numérica de volumes finitos, para os quais os balanços de quantidade de movimento, massa, energia e espécie são satisfeitos. A malha de volumes finitos é tal que acomoda a arquitetura da cabine.

Para descrição dos efeitos da turbulência é utilizado o modelo k- $\epsilon$  padrão ou realizável [Fluent] com leis de parede para os efeitos de camada limite. A literatura mostra que o modelo k- $\epsilon$  é capaz de reproduzir bem as velocidades médias neste tipo de escoamento.

As condições de contorno utilizadas são basicamente as mostradas na Tab. (2).

Tabela 2– Condições de contorno do escoamento do ar na cabine

Região\Variável	Velocidade (m/s)	Energia	Turbulência Intensidade/Escala
Entradas	0,9 a 1,3	Temperatura em torno de 21 °C	10% / 0,04m
Saídas	Escoamento desenvolvido	Escoamento desenvolvido	Escoamento desenvolvido
Paredes	Valor nulo	Temperaturas de 19 a 23°C	–
Poltrona	Valor nulo	Fluxo de calor nulo ou Temperatura de 36°C	–

#### 4. Análise e Resultados

Para a geometria da cabine de aeronave citada em 1.2 Objetivos do Trabalho (Fig. (1)) foi gerada uma malha de aproximadamente 848 mil elementos tetraédricos. E outra com refinamento melhor, especialmente nas poltronas sobre a qual foram geradas 4 camadas de prisma com crescimento exponencial de fator 1,13. Visto que essa região estava implicando um aumento considerável dos resíduos quando eram imposta condições de temperatura.

Tabela 3. Condições de contorno impostas à cabine

Nas Figs (2) e (3) observar-se o escoamento através do fluxo de velocidades na cabine, que foi simulada de acordo com as condições de contorno contidas na Tab. (3). Para o ar foi considerado o modelo de Boussinesq e o modelo de turbulência nessa figura é o k- $\epsilon$  realizável com o tratamento reforçado junto à parede (“enhanced wall treatment”).

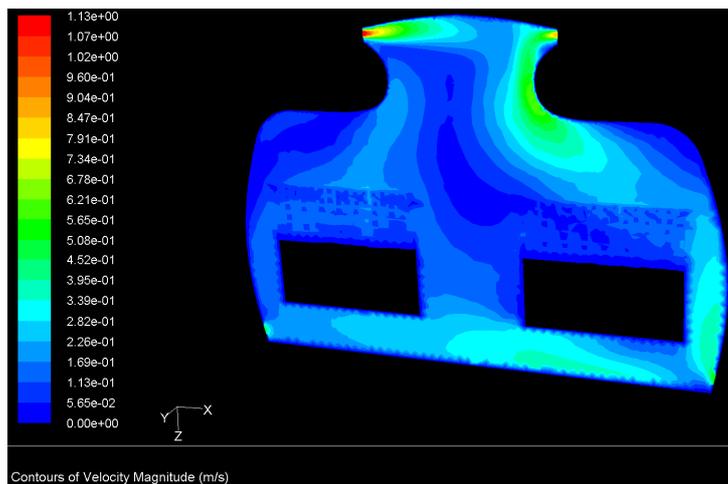


Figura 2. Escoamento na cabine representado pelo fluxo de velocidades para a malha de 848 mil elementos

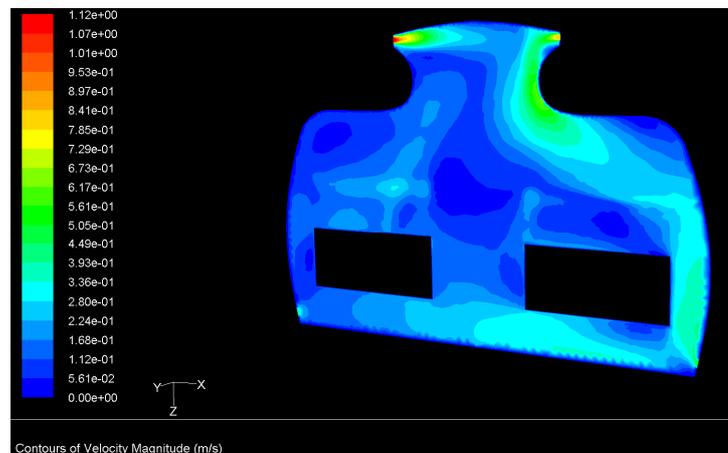


Figura 3. Escoamento na cabine representado pelo fluxo de velocidades para a malha de 1840 mil elementos

Observando o escoamento nesses planos que passam pela poltrona é nítido que a malha de 848 mil elementos não está resolvendo adequadamente os fluxos de velocidade

Nota-se que as entradas de ar estão com velocidade em torno de 1m/s, na saída de ar há velocidades menores e no contorno do banco velocidades de magnitude zero, como esperado.

A Fig. (3) mostra a distribuição de temperatura em um plano da cabine. Os perfis estão coerentes com as condições de contorno impostas e dentro do esperado. Pode-se notar que a velocidade de entrada no lado esquerdo é maior que a do lado direito, tornando-se maior no lado direito.

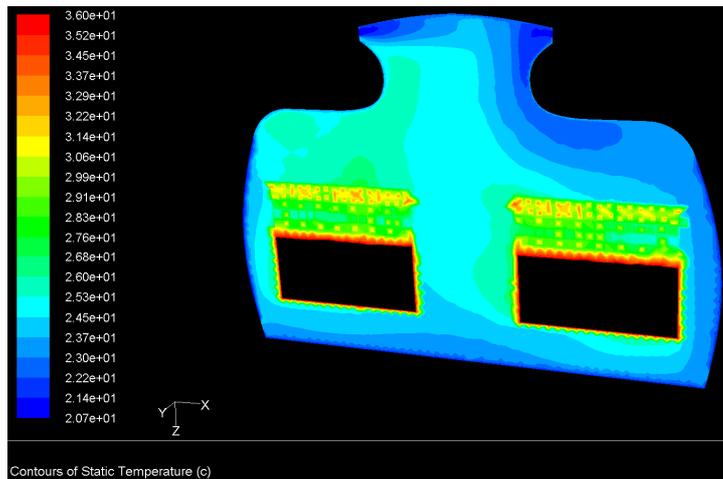


Figura 4. Distribuição de temperatura em um plano da cabine para a malha de 848 mil elementos

Observando a distribuição de temperatura, comprova-se que a malha de 848 mil elementos é muito grosseira para resolver as temperaturas da cabine.

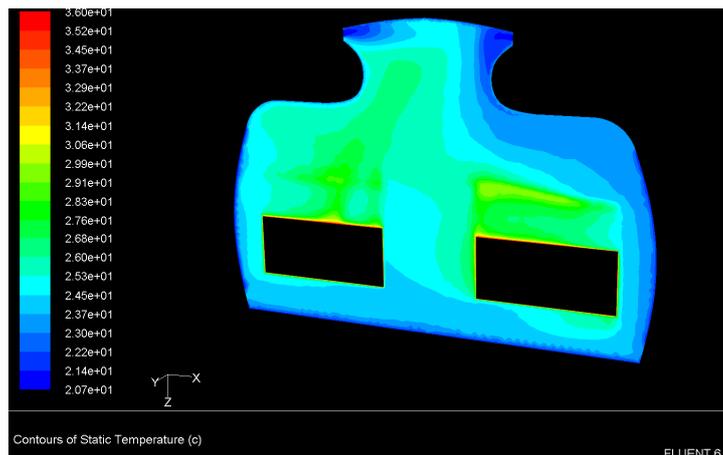


Figura 5. Distribuição de temperatura em um plano da cabine para a malha de 1840 mil elementos

Observando a distribuição de temperatura, comprova-se que a malha de 848 mil elementos é muito grosseira para resolver as temperaturas da cabine.

Por comparação das Figs (3) e (5) percebe-se que a temperatura é menor onde o fluxo de velocidade é maior e vice-versa.

#### 4. Conclusão

O melhor resultado do resíduo da continuidade é para o modelo k-ε realizável  $1,84 \times 10^{-5}$  com a condição de reforço no tratamento junto à parede (“enhanced wall treatment”). Está dentro do previsto, uma vez que é uma geometria grande e que ao mesmo tempo exige uma boa solução junto à parede. Pois o modelo citado com este tratamento junto à parede procura resolver estes casos. Mas vale lembrar que nesse caso ainda não havia sido imposta uma temperatura nas poltronas

Ao impor a temperatura nas poltronas o resíduo da continuidade aumentou para  $3,5 \times 10^{-3}$ .

A malha de 1840 mil elementos foi gerada com um maior refinamento em toda geometria, com relação à malha de 848 mil elementos, mas o foco foi nas poltronas, uma vez que ao alterar a condição das poltronas de fluxo de calor nulo para temperatura de 36°C os resíduos aumentaram consideravelmente.

O resíduo da continuidade ficou menor para o modelo k-ε realizável ( $3,08 \times 10^{-3}$ ) com a condição de reforço no tratamento junto à parede (“enhanced wall treatment”). Pode-se concluir que houve uma pequena melhora no resíduo da

continuidade com essa nova malha, no entanto essa melhora poderia não implicar na utilização da malha de 1840 mil elementos na simulação ao invés da malha de 848 mil elementos.

Observando o escoamento nos planos que passam pela poltrona é perceptível que a malha de 848 mil elementos não está resolvendo adequadamente os fluxos de velocidade.

De acordo com a distribuição de velocidade e temperatura, conclui-se que a malha de 848 mil elementos é muito grosseira e não resolve adequadamente o escoamento e a distribuição de temperatura.

## 6. Referências

- ASHRAE 55 (2004). **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**, (ANSI/ASHRAE 55), American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, New York.
- Fluent – **User’s Guide**; Lebanon. 2003.
- Gameiro da Silva, M. C. (2002). Measurements of Comfort in Vehicles. **Meas. Sci. Technol.** 13 (2002) R41 – R60 PII: S095-0233(02)27461-5.
- Gomes, A. B. **Avaliação experimental de condições de conforto térmico em automóveis de passeio utilizando manequim**. Trabalho de Conclusão de Curso. Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva, Esolca Politécnica da USP, São Paulo, 54p.
- Hosni, M. H., Guan, Y., Jones, B. W.; Giolda, T. P. (2003a). Investigation of Human Thermal Comfort Under Highly Transient Conditions for Automotive Applications – Part 1: Experimental Design and Human Subject Testing Implementation. **ASHRAE Transactions** KC-03-13-1
- Hosni, M.H., Guan, Y., Jones, B. W.; Giolda, T. P. (2003b). Investigation of Human Thermal Comfort Under Highly Transient Conditions for Automotive Applications – Part 2: Thermal Sensation Modeling. **ASHRAE Transactions** KC-03-13-1.
- Irgens, S.; Melikov. A. (2004) Assessment of the thermal environment in an aircraft cabin. **Proceedings of Roomvent 2004**. Coimbra. Portugal. 5-8 September 2004.
- ISO 7730. (1994). **Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions of thermal comfort**, International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO 7726. (1996). **Thermal environments – Instruments and methods for measuring physical quantities**, International Organization for Standardization, Geneva. ISO 14505-2. (2004). **Ergonomics of the thermal environment – Evaluation of thermal environment in vehicle – Part2: Determination of Equivalent Temperature**. International Organization for Standardization, Geneva.
- Nilsson, H.O. (2004). **Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Modes**. Stockholm. Tese (Doutorado) – Department of Technology and Built Environment – University of Gävle, Sweden. 202p.
- Pennecot, J.; Bosbach, J.; Wagner, C.; Rafael, M.; Lerche, T.; Repp, S. (2004) Mixed convection in Idealized Airplane-Cabins: A Comparison Between Numerical Simulations and Particle Image Velocimetry Measurements. **Proceedings of Roomvent 2004**. Coimbra. Portugal. 5-8 September.
- Pustelnik, M.; Tribess, A. (2002) Avaliação de ambientes com insuflamento de ar frio pelo piso utilizando simulação numérica. **Anais do MERCOFRIO 2002** – Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul. 2002.
- Pustelnik, M. (2005). **Avaliação numérica de ambientes com insuflamento de ar frio pelo piso**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 128 p.
- Tanabe, S. (2004) Prediction of indoor thermal comfort in vehicle by a numerical thermoregulation model and CFD. **Proceedings of Roomvent 2004**. Coimbra. Portugal. 5-8 September.
- Seo, Eung Ryeol (2001). **“A numerical study of buoyant turbulent flows using low-Reynolds number  $k-\epsilon$  model”**. Dissertação de Doutorado. “Graduate Faculty of Texas Tech University”. Texas, EUA, 148 p.

### Analysis for evaluation of thermal comfort in the aircraft cabin: numerical simulation

**Dario Abilio Cruz**

dabiliocruz@yahoo.com.br

#### Abstract.

Conditions suitable for thermal comfort in cabins have important gap of competitiveness in the automotive industry, and particularly in the aeronautics industry. Additionally, the development of computational tools for analysis allows reduction of time and cost of project, to obtain new products with more competitive prices. Thus, in this work, the standard  $k-\epsilon$  model is discussed, according to the literature is the most suitable for the simulation of environments such as aircraft cabin and through numerical simulations in FLUENT CFD software, Inc. are made some analyses to evaluate thermal comfort in the aircraft cabin. The simulated cabin is simplified. It was obtained some significant results. Through these, one can understand and compare the applicability of these models of turbulence, the flow of that type of aircraft cabin and distribution of temperature. And, according with the boundary conditions imposed check that the results are consistent.

**Keywords:** 1.Fluid Dynamics, 2.Numerical Methods (Simulation), 3. Interior of Aircraft Cabin