

ANÁLISE NUMÉRICA COMPUTACIONAL DO ESCOAMENTO E TROCAS DE CALOR EM UMA CABINE DE AERONAVE

Sinjin Denis Machado Yano

sinjin.yano@gmail.com.br

Resumo. O projeto consiste em estudar e analisar, através dos métodos numéricos da mecânica dos Fluidos Computacional, o comportamento do escoamento e trocas de calor que ocorrem em uma cabine de aeronave. Ao longo do projeto, serão feitos estudos sobre modelos de turbulência mais adequados, assim como os modelos de radiação a serem aplicados. Para tornar possível a análise, também será realizado um estudo sobre independência de malha para garantir a melhor relação entre convergência e custo computacional. Posteriormente, com os resultados obtidos, será feita uma comparação com os dados empíricos em um mockup térmico assim como o estudo da aplicação nas simulações de UDF's ("user defined functions"), que tem o objetivo de implementarem nas simulações correlações para levar em consideração dados empiricamente obtidos.

Palavras chave: Cabine de aeronave, Conforto térmico, CFD.

1. Introdução

A atual conjuntura da indústria aeronáutica, ainda que afetada pelo cenário da crise econômica mundial, encontra-se em um estado de equiparação em questões de técnicas de voo. Isso significa que, salvas as diferenças entre as filosofias de controle de voo existentes, por exemplo, entre Boeing e Airbus (no que se refere ao uso do "Fly By Wire"), a qualidade do cruzeiro das aeronaves e a sua respectiva segurança são equivalentes.

Observando o comportamento humano, percebe-se uma padronização entre suas escolhas, uma vez que dado um critério e/ou uma necessidade pessoal satisfeita, imediatamente da mesma forma suas necessidades secundárias passam a ter igual relevância dentre suas escolhas.

Posto isso, um estudo sobre conforto térmico em cabines de aeronaves passa a ser de extrema importância, já que a indústria aeronáutica busca satisfazer as necessidades de seus consumidores, proporcionando-lhes um ambiente mais agradável para seus traslados (de longa duração ou não), estabelecendo, dessa, forma um diferencial entre seus concorrentes.

Para que tal estudo seja feito, uma abordagem numérica computacional é proposta, com o objetivo de se reduzir custos com análises empíricas e a fim de se acelerar a obtenção de dados como o padrão de escoamento do ar e as trocas de calor envolvidas na cabine. Utiliza-se, para tanto, da Mecânica dos Fluidos Computacional ou, em última análise, o Método dos Volumes Finitos.

2. Objetivo

O objetivo do presente trabalho é o de apresentar o estudo realizado sobre as geometrias propostas para o estudo do escoamento e trocas de calor em uma cabine de aeronave.

Simplificações da geometria da cabine são propostas com o objetivo de acelerar a geração de malha, aumentar a qualidade de seus elementos e, posteriormente, reduzir o custo computacional das simulações e comparar os resultados com as diferentes geometrias (simplificadas e não simplificadas).

Uma apresentação sobre o modelo de turbulência utilizado (k- ϵ) será feita, uma vez que pelos estudos preliminares e pelas experiências anteriores, este (e suas variações) se apresenta inicialmente como o modelo de turbulência mais adequado a ser utilizado no momento. Além disso, são apresentados também os modelos junto à parede, utilizados e testados da mesma forma. Da mesma forma, o modelo de radiação mais adequado será introduzido, assim como as suas vantagens em relação aos outros.

3. Estudo e simplificação da Geometria

A geração de malha e as simulações previstas a serem realizadas serão feitas em etapas.

Primeiramente foram feitas simulações em uma geometria simplificada a partir da montagem completa dos componentes da cabine. Da mesma forma as simulações foram feitas com uma geometria mais complexa que se aproxima quase que completamente à geometria real. Após isso, manequins térmicos e numéricos foram posicionados com o objetivo de realizar simulações com efeitos de radiação.

Para a geração de malhas para análise em CFD (Computational Fluid Dynamics), algumas ressalvas devem ser feitas. Primeiramente, a geometria deve ser muito bem desenhada no ambiente CAD para que não exista defeitos que causem a inviabilidade de se gerar a malha, processo comumente chamado de "limpeza de geometria". Os parâmetros (ou tamanho da discretização) da malha devem ser ajustados de forma a representar bem a geometria proposta. E para a comparação entre simulações com geometrias diferentes, a fim de se observar os efeitos da simplificação, os mesmos parâmetros de geração de malha que, em última análise, controla também a qualidade dos resultados, devem ser os mesmos.

A Figura (1) mostra a geometria inicial completa, sem simplificações, e a geometria completa final com os manequins

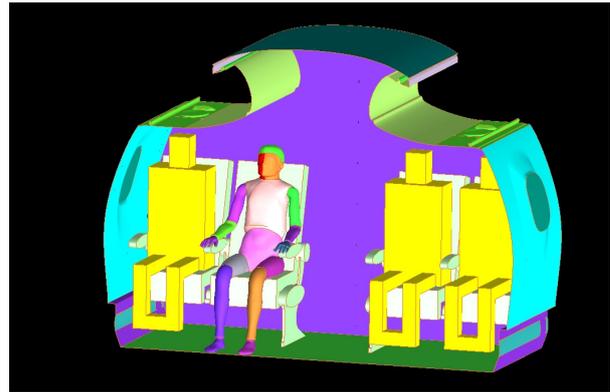
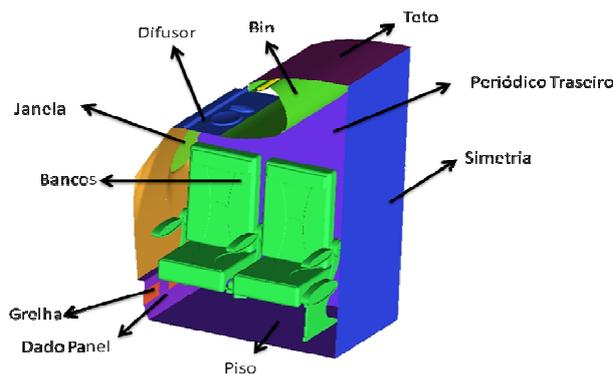


Figura 1- Geometria completa sem simplificação.

4. Geração de Malha

Uma vez que se têm duas geometrias, em certos aspectos semelhantes, a geração de malha para ambas deve ser semelhante também, ainda que sejam utilizadas para a simulação de fenômenos semelhantes. Deve-se garantir que, não só o tamanho dos elementos seja igual, mas também que a qualidade desses elementos seja parecida.

A metodologia da geração de malha utilizada foi a mesma, gerando primeiramente uma malha superficial e depois a volumétrica. Tal metodologia proporciona um melhor controle sobre a qualidade dos elementos superficiais que, por sua vez, facilitam e melhoram a qualidade da malha volumétrica.

Faz-se a ressalva que os parâmetros da geometria complexa diferem em números com relação aos parâmetros da geometria simples devido ao maior nível de detalhamento. O que significa que, para se obter a mesma qualidade, temos que reduzir o tamanho dos elementos.

5. Estudo Preliminar de CFD (modelo k-epsilon)

Os escoamentos encontrados na indústria são, em sua maioria, turbulentos. O modelo numérico deve ser capaz de capturar esse fenômeno para representar adequadamente a física do problema. Existem, atualmente, diversos modelos de turbulência para serem aplicados a problemas de CFD. Não existe um único modelo de turbulência universal, que possa ser empregado em todos os tipos de escoamentos e cada modelo possui a sua aplicabilidade. Dentre os diversos modelos existentes, podemos citar o Spalart-Allmaras (modelo a uma equação), o k-epsilon (modelo a duas equações mais aplicado na indústria), o k-omega (modelo a duas equações aplicado a escoamentos de baixo Número de Reynolds), RSM (do inglês, Reynolds-Stress Model, que resolve o tensor de Reynolds), LES (do inglês, Large-Eddy Simulation), entre outros.

O critério utilizado para caracterização de um escoamento turbulento é dado pelo número de Reynolds, definido por:

$$Re = \frac{\text{forças de inércia}}{\text{forças viscosas}} \quad (1)$$

Em sua forma mais geral, o número de Reynolds é definido por:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (2)$$

onde ρ é a massa específica, U é a velocidade, L é um comprimento característico e μ é a viscosidade dinâmica.

No presente trabalho, apresenta-se o modelo de turbulência k-epsilon, que é um modelo de duas equações que oferece uma boa relação entre o custo computacional da simulação e sua exatidão. Nesse modelo de duas equações, a escala de velocidades turbulentas é computada através da energia cinética turbulenta, assim como a escala turbulenta é estimada também pela sua energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação, que é obtida através da solução de sua equação de transporte.

As equações de transporte resolvidas pelo modelo k-epsilon são as seguintes:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon}{k} + S_\epsilon \quad (4)$$

Posteriormente, estão previstos estudos mais aprofundados sobre os modelos de turbulência, suas variações e os modelos de parede.

6. Modelos de radiação

Para o estudo da nova geometria, ou nova configuração, que se resume em levar em consideração a presença do corpo humano, devem ser contabilizados os efeitos de radiação que esses dever ter nas diversas partes da geometria e também os efeitos que tais outras partes fazem no corpo humano.

Obviamente, a modelagem do problema com o acréscimo dos efeitos de radiação não se tornam simples, pois envolvem a determinação de diversos outros parâmetros como a taxa de geração de calor do corpo humano, a temperatura das partes do corpo, assim como os valores de emissividade de cada elemento presente na análise.

Como mostrado posteriormente, algumas simplificações do problema foram impostas (como desconsiderar a troca de calor por condução no assento) para que, no início dos estudos com radiação, a modelagem do problema fosse mais simples. Dessa forma poderemos ter mais controle sobre a determinação dos parâmetros que regem a análise de CFD e, aos poucos, poderemos acrescentar e levar em consideração um número maior de efeitos de troca de calor relevantes, para podermos chegar a uma condição mais próxima da real situação.

O solver utilizado, atualmente, possui os seguintes modelos de radiação disponíveis, já citando as suas vantagens e desvantagens:

- DTRM (Discrete Transfer Radiation Model);

Sua principal vantagem está no fato de ser um modelo relativamente simples. Sua acurácia, no entanto, pode ser aumentado o número de raios.

Sua primeira desvantagem está no fato de ela considerar todas as superfícies difusas. Sua implementação assume que os todos os corpos são cinzentos.

Com relação ao solver, aumentar o número de raios implicará também em um acréscimo excessivo de custo computacional. Fora isso, O DTRM não está compatível ainda para processamento em paralelo.

Não é o caso da atual análise, mas vale ressaltar ainda que tal modelo não aceita malhas com interface não conforme e malhas móveis.

- P 1 Radiation Model;

Para o modelo P1 de radiação, a equação de transporte radiativo é uma equação de difusão, o que torna o modelo muito “barato” computacionalmente. É um modelo que leva em consideração o efeito de espalhamento e, portanto, funciona muito bem com análises que levam em consideração a combustão.

O principal problema desse modelo é que ele pode superestimar fluxos radiativos de pequenas fontes de calor, como é o caso da lâmpada.

- Rosseland radiation model;

A maior vantagem desse modelo sobre os previamente apresentados e a sua maior rapidez. No entanto ele não está disponível para modelos “pressure-based”, que é o caso da simulação da cabine, uma vez que não temos efeitos compressíveis.

- Surface-to-Surface (S2S) radiation model;

Comparado com o DTRM e o DO, o modelo S2S é muito mais rápido e é o mais adequado para problemas com trocas de calor em ambientes fechados sem um meio participante, que é o caso do problema com trocas de calor em uma cabine de aeronave.

Entretanto, o modelo S2S não aceita problemas com periodicidade que é o caso da cabine, pois ela possui uma condição de periodicidade nas superfícies frontal e lateral.

Pode-se concluir, portanto, através de uma breve comparação qualitativa e da viabilidade dos modelos de radiação presentes no solver, que o modelo DO (Discrete Ordinates) é o mais adequado para a simulação.

- Discrete Ordinates Radiation Model.

O modelo DO está apto a resolver problemas com todos os comprimentos de ondas e também problemas que vão desde radiação entre superfícies até problemas com combustão. Seu custo computacional é moderado.

O modelo DO aceita modelagens com o efeito de espalhamento, superfícies semi-transparentes e efeitos de particulado.

Pode-se concluir, portanto, através de uma breve comparação qualitativa e da viabilidade dos modelos de radiação presentes no solver, que o modelo DO (Discrete Ordinates) é o mais adequado para a simulação.

7.0 Modelo DO(Discrete Ordinates)

A equação de transporte radiativo geral é a seguinte:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (5)$$

Onde:

\vec{r} = vetor de posição

\vec{s} = vetor de direção

\vec{s}' = vetor de direção do espalhamento

s = comprimento

a = coeficiente de absorção

n = índice refrativo

σ_s = coeficiente de espalhamento

σ = constante de Stefan – Boltzmann

I = intensidade de radiação

T = temperatura local

ϕ = função de fase

Ω' = ângulo sólido

O modelo DO resolve a Equação de Transporte Radiativo para um número discreto de ângulos sólidos, cada um associado a um vetor de direção \vec{s} fixado no sistema de coordenadas cartesianas global (x, y, z). O usuário, então, tem a liberdade de escolher a densidade de ângulos sólidos a serem resolvidos.

Como o modelo DO considera a Equação de Transporte Radiativo como uma equação de campo na direção \vec{s} , ela pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\nabla(I(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (6)$$

A mesma equação para intensidade espectral pode ser definida da seguinte forma:

$$\nabla(I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (a + \sigma_s)I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = a_\lambda n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_{b\lambda}(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (7)$$

Onde λ é o comprimento de onda, a_λ o coeficiente de absorção espectral e $I_{b\lambda}$ a intensidade de um corpo negro dada pela função de Planck.

O coeficiente de espalhamento, a função de espalhamento e o índice de refração são dados como independentes do comprimento de onda.

A implementação do DO divide a radiação em um espectro de N bandas de comprimento de onda. Assim a equação de transporte radiativo é integrada em cada um dos intervalos do comprimento de onda para a quantidade $I_\lambda \Delta\lambda$. O comportamento dessa banda é dado como cinzento. A emissão do corpo negro na banda do comprimento de onda por unidade do ângulo sólido é dada por:

$$[F(0 \rightarrow n\lambda_2 T) - F(0 \rightarrow n\lambda_1 T)] n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad (8)$$

Onde F é a fração de energia radiante emitida no corpo negro dentro da faixa de comprimentos de onda definidos em uma temperatura T e um índice de refração n.

A intensidade total, portanto, para uma direção e sentido definidos é dada por:

$$I(\vec{r}, \vec{s}) = \sum_k I_{\lambda k}(\vec{r}, \vec{s}) \Delta\lambda_k \quad (9)$$

8. Condições de contorno

A Figura (2) a seguir resume as condições de contorno utilizadas para a realização das simulações sem os manequins. Vale ressaltar ainda que para essa parte inicial do projeto, os efeitos de troca de calor ainda não foram considerados, uma vez que os modelos que representam esse fenômeno ainda não foram estudados.

<p>Temperaturas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • linco, janela, teto e dado-portal: temperatura prescrita de 14°C; • piso: temperatura prescrita de 30°C; • difusor inferior: temperatura prescrita de 14°C; • difusor superior: temperatura prescrita de 37°C; • assento e bin: adiabáticos • insuflamento: temperatura prescrita de 37°C ; <p>Grelha: saída livre (outflow)</p> <p>Lâmpada: 40W (volumétrico) → 354W/m²</p> <p>Vazão: 0,04kg/s/m (dois lados) sendo 24% no insuflamento superior e 76% no insuflamento inferior.</p> <ul style="list-style-type: none"> • insuflamento superior: 3,864g/s; • insuflamento inferior: 12,236g/s; <p>Periodicidade nas superfícies frontal e traseira, e simetria na superfície lateral;</p> <p>Material: Aproximação Boussinesq.</p> <p>Sem radiação.</p>

Figura 2 – Condições de Contorno

Para as simulações com manequins, os efeitos de radiação foram considerados e as condições de contorno desses manequins foi de uma temperatura prescrita em sua superfície.

9. Análise dos resultados

Para todas as simulações apresentadas, como padrão do solver Fluent, as soluções foram consideradas convergidas quando os resíduos atingiram valores menores que 0,001.

9.1 Simulação da geometria simplificada sem manequins

O modelo da geometria simplificada apresentou um total de 800mil elementos volumétricos. Um estudo de independência de malha foi realizado com uma malha de, aproximadamente 1,7 milhões de elementos volumétricos.

Os resultados obtidos das simulações apresentaram instabilidade numérica somente em um dos casos: modelo de turbulência k-ε Standard e modelo de parede Standard. A simulação com modelo RNG e modelo de parede non-equilibrium apresentou a menor taxa de convergência dentre todas as outras simulações.

Na Figura (3) são mostradas as linhas de corrente obtidas em uma das 9 simulações realizadas com a malha de 800mil elementos volumétricos. Notou-se a diferença no padrão do escoamento, ainda que posteriores resultados indiquem que há forte semelhança entre as soluções.

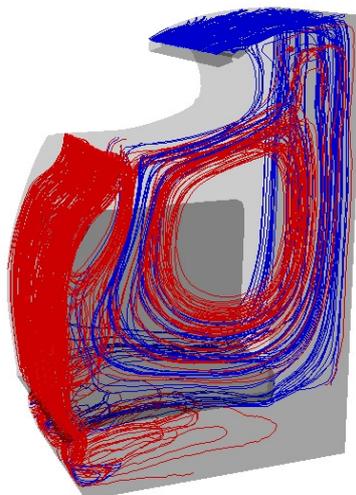


Figura 3 – Linhas de corrente para o modelo RNG com modelo de parede Enhanced

A Figura (4) mostra o plano transversal no qual foram obtidos os contornos de velocidade, os contornos de temperatura, os vetores de velocidade e os contornos de temperatura para o mesmo modelo de turbulência

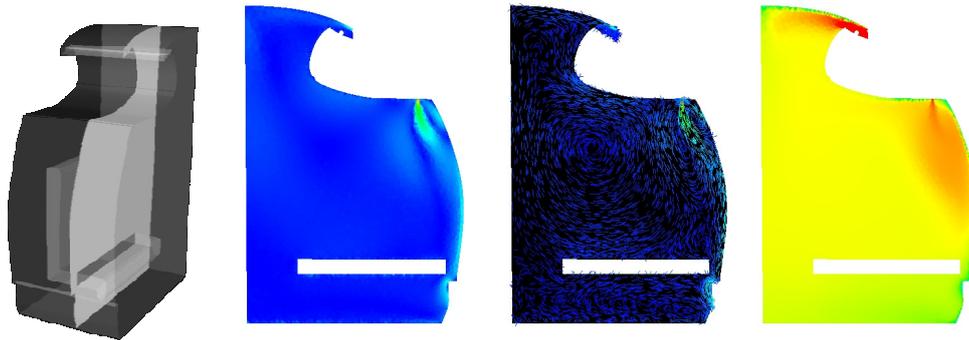


Figura 4 – Plano Transversal, contornos de velocidade e vetores de velocidade.

Seis pontos de monitoramento foram impostos para realizar a comparação quantitativa entre os modelos utilizados. São eles: cabeça (1,1m), abdômen (0,6m) e pés (0,1m) para dois passageiros sentados lado a lado.

As tabelas a seguir mostram as diferenças encontradas (máxima de 0,97°C para a temperatura e 0,075m/s para a velocidade). Com essas diferenças encontradas, pode-se concluir que a grandeza dessas diferenças pode ser considerada como irrelevante, dado o fato desses valores se encontrarem abaixo da precisão esperada para os dados experimentais.

	abdômen		cabeça		pés	
	dir.	esq.	dir.	esq.	dir.	esq.
k-e Standard Standard (°C)	31,12	31,09	32,28	31,25	29,79	30,36
k-e Standard non-equilibrium (°C)	30,54	30,49	32,29	30,62	29,31	30,34
k-e Standard enhanced (°C)	31,44	31,42	32,92	31,59	29,7	30,23
k-e realizável Standard (°C)	31,37	31,21	32,82	31,36	30	30,52
k-e realizável non-equilibrium (°C)	30,87	30,69	32,33	30,81	29,5	30,52
k-e realizável enhanced (°C)	31,42	31,36	32,73	31,53	29,81	30,35
k-e RNG Standard (°C)	31,17	31,19	32,67	31,29	29,64	30,1
k-e RNG non-equilibrium (°C)	30,73	30,69	32,44	30,8	29,26	30,46
k-e RNG enhanced (°C)	31,17	31,19	32,7	31,29	29,65	30,11
k-e realiz. enhanced (*) (°C)	30,92	30,93	32,81	31,05	29,42	30,0
variação máxima	0,9	0,93	0,64	0,97	0,74	0,52

Tabela 1 - Valores de temperatura nos Pontos de controle.

	abdômen		cabeça		pés	
	dir.	esq.	dir.	esq.	dir.	esq.
k-e Standard Standard (m/s)	0,037	0,045	0,085	0,041	0,016	0,018
k-e Standard non-equilibrium (m/s)	0,032	0,044	0,136	0,018	0,013	0,021
k-e Standard enhanced (m/s)	0,031	0,046	0,111	0,014	0,014	0,012
k-e realizável Standard (m/s)	0,034	0,043	0,124	0,011	0,019	0,007
k-e realizável non-equilibrium (m/s)	0,042	0,042	0,145	0,024	0,013	0,02
k-e realizável enhanced (m/s)	0,033	0,048	0,125	0,012	0,013	0,01
k-e RNG Standard (m/s)	0,033	0,063	0,135	0,022	0,012	0,014
k-e RNG non-equilibrium	0,056	0,07	0,117	0,054	0,015	0,038
k-e RNG enhanced (m/s)	0,033	0,062	0,137	0,022	0,012	0,014
k-e realiz. enhanced (*) (m/s)	0,037	0,061	0,16	0,018	0,008	0,01
variação máxima	0,025	0,028	0,075	0,043	0,011	0,031

Tabela 2 - Valores de velocidade nos Pontos de controle.

9.2. Estudo de independência de malha

Os valores das Tab.(1) e Tab. (2) indicando o modelo k-ε realiz. enhanced (*) são referentes a uma malha mais refinada da geometria simplificada (1,7 milhões de elementos). Isso significa que foram comparados os valores de uma malha mais grosseira e uma mais refinada com o objetivo de identificar a influência do número de elementos.

Obtidos os valores mostrados, vê-se que não há quase variação alguma, o que indica a adequação dos parâmetros de geração da malha mais grosseira. Dessa forma, posteriormente, para a geometria não-simplificada, serão utilizados os mesmos parâmetros, para que se reduza o tempo computacional e se garanta a boa convergência da simulação e confiabilidade nos resultados finais.

9.3. Simulação da Geometria Não-Simplificada sem manequins

9.3.1. Resultados das simulações da geometria não-simplificadas sem manequins

Para a Geometria não-simplificada, as mesmas simulações foram feitas utilizando o modelo k-ε e suas variações anteriormente citadas e explicadas. Da mesma forma, foram também variados os modelos de parede (Standard, Non-equilibrium e Enhanced). Os resultados das simulações, 9 em seu total, foram comparados para essa geometria não simplificada e também foi realizada a comparação com os resultados obtidos nas simulações com a geometria simplificada já apresentada.

Para a geometria não-simplificada, algumas ressalvas devem ser feitas com relação à simulação. Ressalvas que podem influenciar na comparação entre os resultados obtidos com a geometria simplificada e a não-simplificada. Essa possui um nível de detalhes muito maior, necessitando de uma discretização melhor junto às regiões de parede. Dessa forma, o número de elementos volumétricos utilizados em todas as simulações previamente citadas contém, aproximadamente, 3,3 milhões de elementos em sua malha computacional. Procurou-se manter a qualidade dos respectivos elementos equivalentes para que não houvesse mais uma variável a ser levada em consideração na obtenção da comparação entre as duas geometrias.

Ao contrário do encontrado na simulação da geometria simplificada, a utilização do modelo k-ε Standard com modelo de parede Standard não levou a uma instabilidade numérica. Entretanto, tal modelo ainda se mostrou pouco confiável dada a diferença entre o comportamento das duas simulações, que utilizaram a mesma metodologia na geração de malha e mesmas condições de contorno. Além disso, o número de iterações necessário para a sua convergência (237 iterações) é muito maior do que todas as outras 8 simulações analisadas (média de 70 iterações).

Como mostrado mais adiante, os resultados, ou a variação desses resultados, não justificam a utilização desse modelo de turbulência com modelo de parede Standard nas análises posteriores com novas geometrias e novas condições de contorno.

A Figura (5) mostra os contornos de velocidade, e os contornos de temperatura e as linhas de corrente da geometria não-simplificada com o modelo RNG enhanced.

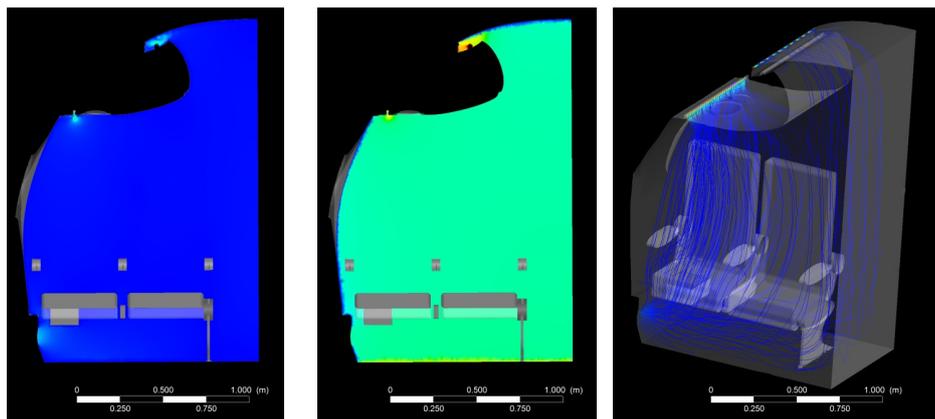


Figura 5 – Contornos de velocidade, contornos de temperatura e linhas de corrente para RNG enhanced.

9.3.2. Comparação das simulações entre as duas geometrias utilizadas sem manequins

Realizando uma análise profunda da configuração das simulações no que se refere aos valores dos coeficientes utilizados, assim como condições de contorno impostas nas paredes, entradas e saídas. Foi encontrada uma diferença nas condições de especificação na modelagem da turbulência nas condições de contorno da entrada. Há de se verificar se exatamente essa diferença é a responsável pela divergência entre os resultados das duas geometrias.

A diferença encontrada foi na utilização do método de k e ε (não-simplificada) e utilização de intensidade turbulenta e escala do comprimento de turbulência (10% e 0,005, respectivamente) na geometria simplificada. Dessa

forma, vê-se claramente que os resultados iriam ser muito diferentes, uma vez que o método aplicado à geometria simples melhor representa os fenômenos que ocorrem nas entradas do ar, até pela escala dos diâmetros dessas entradas.

9.3.3. Comparação das simulações da geometria não-simplificada

Da mesma forma, a comparação das 9 simulações (da geometria não-simplificada) entre si é feita através de gráficos que indicam a variação das propriedades nos pontos de controle para cada modelo de turbulência, suas variações e os modelos de parede utilizados. Dessa análise (Fig. (6) e fig. (7)), conclui-se que as diferenças encontradas são muito pequenas e também, assim como ocorreu na análise da geometria simplificada, a ordem de grandeza das diferenças encontradas é menor que a ordem de grandeza esperada para o erro nas medições dos testes empíricos, o que faz com que tal diferença seja irrelevante.

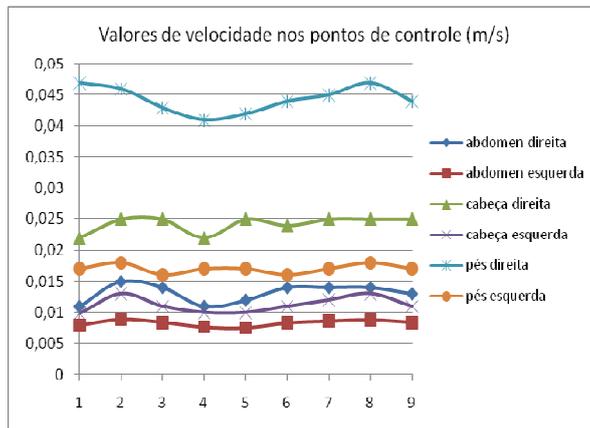


Figura 6 - Valores das diferenças de velocidade dos pontos de controle entre as simulações da geometria não-simplificada.

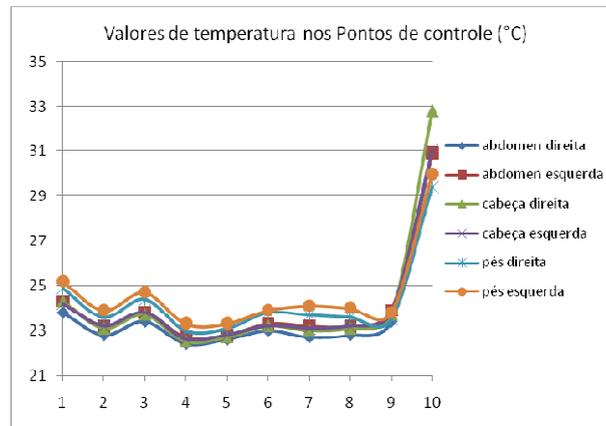


Figura 7 - Valores das diferenças de velocidade dos pontos de controle entre as simulações da geometria não-simplificada.

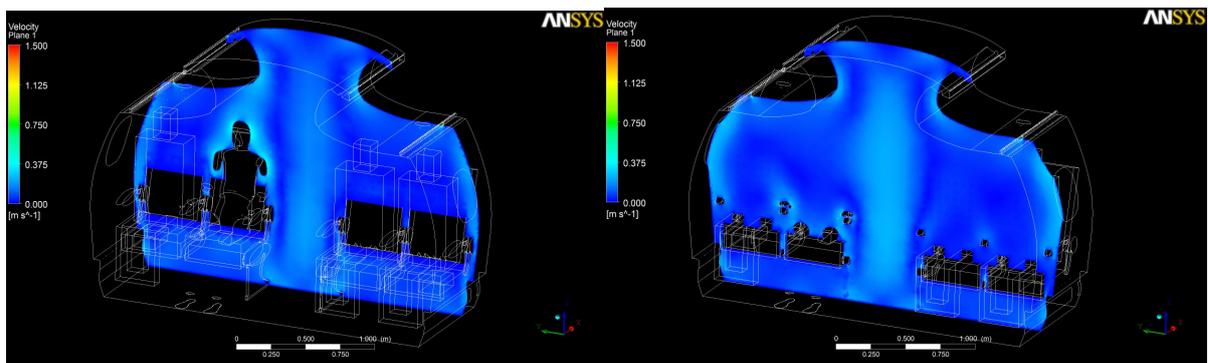


Figura 8 – Contornos de velocidade em um plano de corte

9.4 Simulações da configuração com manequins

Para a análise dos resultados obtidos na simulação da cabine com os manequins térmico e numérico, um plano de corte foi traçado para a visualização dos contornos de velocidade e temperatura, como mostra a figura (8). Da mesma forma as linhas de corrente foram plotadas a partir das entradas superiores e inferiores, como mostra a figura (9).

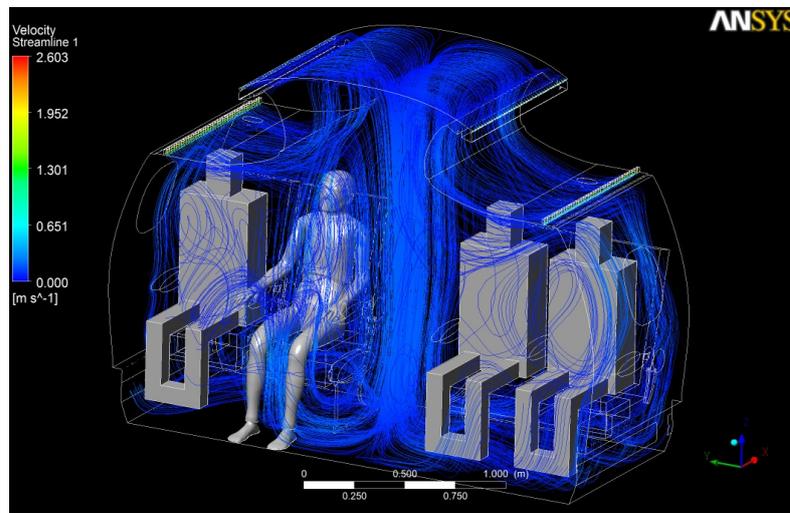


Figura 9 – Linhas de corrente

A figura (10) mostra vetores de velocidade em um plano de corte.

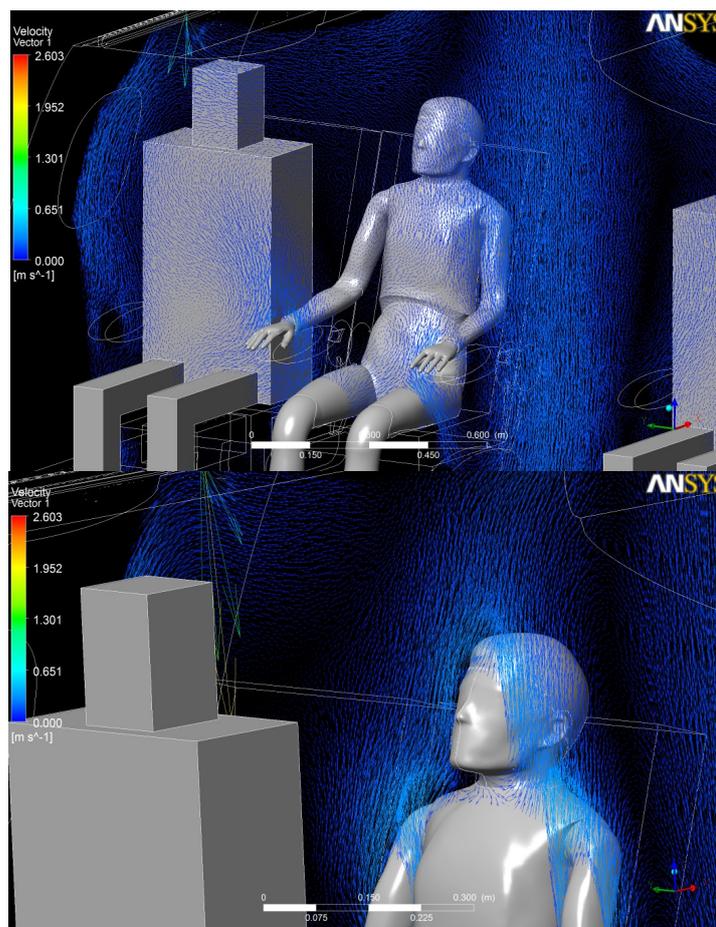


Figura 10 – Vetores de velocidade

10. Aplicação de User Defined Functions

As User defined Functions (UDF's) são funções do solver Fluent, compiladas em linguagem C, que possibilitam que o usuário implemente, modifique e customize parâmetros como condições de contorno, termos fonte, taxas de reação (superficial e volumétrica), inicialização da solução, ajuste de funções por iteração e também a modificação de coeficientes específicos dos modelos.

Com o objetivo de começar a testar a implementação das UDF's no presente problema (projeto), são colocadas duas rotinas que serão utilizadas para controlar o perfil de velocidades nas entradas de insulfamento, para impor um perfil de temperaturas na superfície do manequim térmico e a última que, a cada iteração, relaciona a temperatura de uma superfície à escolha do usuário com outra.

A rotina 1 mostra como podemos impor o perfil de temperaturas em função de uma variável, no caso posição x , para uma determinada superfície. Pode-se observar também que as funções matemáticas da biblioteca contida nos compiladores de linguagem C também podem ser usadas. Além disso, macros adicionais da própria biblioteca do solver Fluent também são utilizadas para acessar variáveis calculadas e elementos e nós da malha.

A rotina2 impõe um perfil de velocidades na superfície a ser escolhida no solver. Ou seja, a UDF entrará como sendo o valor da condição de contorno de entrada em determinada superfície. Dessa forma podemos impor um perfil conhecido e economizar em custo computacional, uma vez que não seria mais necessária a criação de uma extensão do domínio na entrada para que houvesse um desenvolvimento do escoamento e a definição de um perfil apropriado.

Vale enfatizar o caráter experimental da implementação dessas UDF's, já que elas ainda não satisfazem totalmente as necessidades do projeto. Serão elas apenas úteis para a identificação da sua real viabilidade, dado incompatibilidades de sistemas operacionais e compiladores de linguagem C adequados ao par solver-sistema.

11. Conclusões

A metodologia aplicada às simulações realizadas, em ambas as geometrias aplicadas, são adequadas à modelagem do problema da análise do escoamento e trocas de calor envolvidos dentro da cabine da aeronave.

Deve-se configurar os coeficientes presentes nos modelos do solver utilizado, para que não haja divergência entre os resultados de simulações de geometria diferentes. Da mesma forma, tais coeficientes afetam os resultados obtidos, fazendo com que seus respectivos valores não sejam condizentes com a realidade.

Os pontos de controle utilizados para as comparações e verificações das propriedades se mostraram muito eficientes e devem ser mantidos como parâmetros nas simulações que se seguem no projeto.

O estudo realizado sobre as funções pré-definidas do solver (UDF – User defined function) mostrou que a sua utilização é adequada para que se possa monitorar e calcular coeficientes de análise de conforto térmico. Ainda mais, existe a possibilidade de implementar as correlações necessárias para a modelagem das temperaturas nas superfícies do corpo humano. Entretanto, as simulações deverão, então, passar a serem transientes no tempo.

Para a utilização das referidas UDF's, o sistema operacional necessário deverá ser o Linux, uma vez que se torna inviável, ainda, compilar as funções na plataforma do Windows Vista 64-bit.

12. Referências

FLUENT, 1998, Fluent User's Guide, Version 6.0. Fluent Inc. Lebanon – NH, USA.

VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W. An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method. Malaysia: Longman, 1995.

CRUZ, D.A.; Análises para Avaliação de Conforto Térmico em Cabine de Aeronave: simulação numérica. Trabalho de Graduação, EPUSP, São Paulo, 2008.

NUMERICAL COMPUTATIONAL ANALYSIS OF A FLOW AND HEAT EXCHANGES IN A THERMAL MOCKUP

Sinjin Denis Machado Yano

Polytechnic School of the University of São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2231 - São Paulo - SP - Brasil

sinjin.yano@poli.usp.br

Abstract. The project will, through numerical methods of the Computational fluid Dynamics, study and analyze the behavior of the flow and heat exchanges in a thermal mockup. There will be also a brief discussion about turbulence models and its effectiveness in the current problem. Another study, in order to make the previous possible, Will be done about the independency of the grid to ensure the convergence of the simulations and to reduce computational costs. Then, with the results, a comparison Will also take place in order to validate it with experimental data.

Keywords. Thermal Mockup, CFD