SISTEMAS DE TRATAMENTO DE AR EM SALAS CIRÚRGICAS: ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DE PARTÍCULAS

Israel Belletti Mutt Urasaki

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo israel.urasaki@gmail.com

Silas Alves Guimarães Júnior

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo silasagjunior@uol.com.br

Resumo. O presente trabalho tem como objetivo a realização de simulações numéricas para avaliação do escoamento do ar e distribuição de partículas em salas cirúrgicas dotadas de sistema de condicionamento e tratamento de ar de fluxo turbulento. É apresentada a modelagem matemática com as equações necessárias para resolver problemas de escoamento em ambientes ventilados. Posteriormente, as etapas para a simulação numérica da sala cirúrgica do Hospital Universitário (HU/USP) e da sala do Laboratório de Cirurgia Experimental de Transplante de Fígado da Faculdade de Medicina (FM/USP) são detalhadas. Estas etapas são: construção das geometrias e geração de malhas nos programas ICEM e Gambit, definição das condições de contorno e da convergência de simulações no programa Fluent e estudo de independência das malhas construídas através da comparação dos resultados numéricos e experimentais obtidos. Por fim, são apresentados os resultados das simulações dos campos de velocidades, de temperaturas e de vetores velocidade, assim como o escoamento e distribuição de partículas nas salas estudadas.

Palavras chave: Ventilação, Simulação Numérica, Salas Cirúrgicas e Contaminação.

1. Introdução

Os fluidos em movimento estão presentes em toda a natureza e suas características têm sido objeto de estudo, desde os tempos mais remotos, por meio de análises teóricas – em geral, insuficientes – e de métodos experimentais.

O enorme desenvolvimento científico-tecnológico, aliado ao rápido desenvolvimento dos computadores, permite que problemas altamente complexos possam ser simulados computacionalmente. A Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD – Computational Fluid Dynamics) permite estudar o escoamento de fluidos e a transmissão de calor e/ou massa por meio de modelos matemáticos representativos das leis da física que governam estes fenômenos.

As técnicas de modelação numérica para simulação do comportamento do escoamento do ar em salas cirúrgicas têm sido alvo de algumas investigações (Memarzadeh e Manning, 2002; Kameel e Khalil, 2003), embora a variedade de casos possíveis a torne uma área com necessidade de uma profusão de estudos para a avaliação das condições de climatização e ventilação (Pereira, 2008).

A modelação matemática de salas cirúrgicas é bastante complexa e complicada devido à grande variedade de fatores que influenciam no escoamento e transmissão de calor e/ou massa. A principal utilidade da análise numérica é sem dúvida a economia de tempo, pois com os dados disponíveis é possível realizar mais testes, fazer quantas modificações for necessário e experimentar como o sistema a ser projetado se comportará. Isto é claro, sem falar de outras vantagens como a redução do custo final de novos projetos.

2. Etapas para simulação numérica

As simulações foram realizadas considerando duas salas cirúrgicas com diferentes sistemas de condicionamento e tratamento de ar de fluxo turbulento. O sistema de fluxo turbulento com insuflamento lateral, do Hospital Universitário e o sistema com dois difusores localizados no teto, tipo jato helicoidal, do Laboratório de Cirurgia Experimental de Transplante de Fígado (FM/USP) foram avaliados.

2.1. Construção das geometrias

Para a realização das simulações numéricas foi necessário, inicialmente, definir os ambientes a serem estudados. Para tal, foi imprescindível especificar as características geométricas das salas cirúrgicas, juntamente com os elementos importantes no processo de simulação (equipamentos, mobiliário, iluminação, entradas e saídas de ar, etc.).

2.1.1. Hospital Universitário

O sistema de insuflamento turbulento na sala cirúrgica é feito por um difusor de insuflamento lateral superior e o retorno é realizado por uma grelha posicionada na parte inferior da mesma parede. A mesa cirúrgica localiza-se no centro da sala, assim como o foco cirúrgico. A geometria e as características da sala cirúrgica foram desenhadas no programa ICEM e, para uma melhor visualização do objeto de estudo, na Fig. (1) são apresentadas vistas da geometria da sala cirúrgica.



Figura 1. Geometria da sala cirúrgica do Hospital Universitário.

2.1.2. Laboratório de Cirurgia Experimental

Na sala do Laboratório de Cirurgia Experimental de Transplante de Fígado da Faculdade de Medicina da USP o insuflamento é realizado por dois difusores de teto de jato helicoidal na área de cirurgia. O retorno do ar é feito por quatro grelhas também localizadas no teto. Foi possível desenhar a geometria da sala no programa Gambit. Para uma melhor visualização do objeto de estudo, também são apresentadas na Fig. (2) vistas da geometria da sala cirúrgica.



Figura 2. Geometria da sala do Laboratório de Cirurgia Experimental (FM/USP).

2.2. Geração de Malhas

2.2.1. Hospital Universitário

Foram geradas três malhas tetraédricas no programa ICEM, com variação no grau de refinamento, para utilização nas simulações. Para exemplificação da forma das malhas, é apresentada na Fig. (3) uma das malhas tetraédricas, com 303.000 elementos.



Figura 3. Malha de 303.000 elementos da sala cirúrgica do HU/USP.

2.2.2. Laboratório de Cirurgia Experimental

Paralelamente, no programa Gambit, gerou-se uma malha de 255.000 elementos tetraédricos e híbridos para a sala cirúrgica experimental, apresentada na Fig. (4).



Figura 4. Malha de 255.000 elementos do Laboratório de Cirurgia Experimental (FM/USP).

2.3. Condições de Contorno

Antes de entrar com as condições de contorno no programa Fluent (Fluent, 2003), é necessário definir o tipo de cada superfície da geometria nos programas de geração de malha, ICEM e Gambit. Os tipos de superfícies utilizadas foram: "Mass-flow-inlet" para o difusor, "pressure-outlet" para a grelha de retorno e "wall" para as demais superfícies.

A seguir foram definidos os parâmetros das condições de contorno das salas, considerando condições de regime permanente:

- 1. Condições adiabáticas nas paredes e nos demais objetos presentes nas salas;
- 2. Temperaturas superficiais, medidas experimentalmente, para as lâmpadas das salas e para os focos cirúrgicos;
- 3. Temperatura e vazão mássica do ar insuflado nas salas, medidos experimentalmente, para os difusores;
- 4. Temperatura do ar de exaustão, medida experimentalmente, para as grelhas de retorno.

Os valores numéricos das condições de contorno foram obtidos por meio de medições na sala cirúrgica do Hospital Universitário da USP e na sala cirúrgica do Laboratório de Cirurgia Experimental da FM/USP.

Para medir a vazão mássica nos difusores foi utilizado um balômetro com as seguintes características: faixas de leitura de vazão de 85 a 4078 m³/h, precisão de +/- 3% de fundo de escala e tempo de resposta de 2 a 43 segundos, conforme ajuste.

Para medir a temperatura do ar insuflado e do ar de exaustão foi utilizado um termômetro de resistência PT100, que se caracteriza por possuir elevada precisão, da ordem de $+/- 0,2^{\circ}$ C e para medir a temperatura superficial das lâmpadas da sala e do foco cirúrgico foi utilizado um termômetro infravermelho, que possui uma resolução de 0,2°C a 275°C, com precisão de $+/- 0,1^{\circ}$ C.

Para medir a velocidade do ar foram utilizados anemômetros omnidirecionais, escala de 0 a 1m/s, com incerteza de medição de (0,03 + 3%) m/s, onde V é a velocidade de fundo de escala do instrumento de medição.

2.3.1. Hospital Universitário

Na Tab. (1) é apresentado um quadro resumo dos principais valores utilizados nas condições de contorno da sala cirúrgica do Hospital Universitário.

Tabela 1. Condições de contorno da sala cirúrgica do HU.

| Superficie | Temperatura (°C) | Vazão mássica (kg/s) |
|-------------------|------------------|----------------------|
| Difusor | 17,6 | 0,787 |
| Grelha de retorno | 19,2 | - |
| Lâmpadas | 30,0 | - |
| Foco cirúrgico | 45,0 | - |

2.3.2. Laboratório de Cirurgia Experimental

Na Tab. (2) é apresentado um quadro resumo dos principais valores utilizados nas condições de contorno da sala do Laboratório de Cirurgia Experimental da FM/USP.

Tabela 2. Condições de contorno da sala do Laboratório de Cirurgia Experimental.

| Superficie | Temperatura (°C) | Vazão mássica (kg/s) |
|-------------------|------------------|----------------------|
| Difusor 1 | 13,0 | 0,0628 |
| Difusor 2 | 12,8 | 0,0687 |
| Grelha de retorno | 20,0 | - |
| Lâmpadas | 29,0 | - |
| Foco cirúrgico | 45,0 | - |

2.4. Simulações e Convergência

Uma vez definidas as geometrias, as condições de contorno e geradas as malhas, foram iniciadas as simulações no programa Fluent. As discretizações adotadas para as simulações iniciais foram: discretizaçõe padrão para a pressão e de primeira ordem para a densidade, para a energia cinética turbulenta, para a taxa de dissipação turbulenta e para a energia. O modelo de turbulência adotado nas simulações foi o k-e padrão, cuja qualidade está no fato de ele ser robusto, econômico e possuir relativa acurácia em várias aplicações da engenharia (Pustelnik, 2005). Para verificação da convergência da simulaçõe foram utilizados dois métodos, um para cada sala.

2.4.1. Hospital Universitário

O método utilizado como critério de convergência na simulação da sala cirúrgica do HU/USP foi o de monitorar os resíduos até alcançarem um valor menor que o absoluto estipulado. Foram estabelecidos valores absolutos residuais de 0,001 para a equação da continuidade, da velocidade em x, da velocidade em y, da velocidade em z, de k e de ε , assim como de 10⁻⁶ para a equação da energia.

2.4.2. Laboratório de Cirurgia Experimental

O método para verificar a convergência da simulação da sala do Laboratório de Cirurgia Experimental foi o de monitorar a estagnação dos resíduos com o passar das iterações, ou seja, a partir de um número de iterações não há mais variação dos valores dos resíduos. Para a simulação foram realizadas 5.000 iterações.

3. Análise de Resultados

Para a avaliação do escoamento e de distribuição de partículas nas salas cirúrgicas é de interesse, inicialmente, analisar os campos de velocidades e de temperaturas obtidos a partir das simulações realizadas. No estudo proposto, torna-se ainda mais importante a verificação dos campos de velocidades e temperaturas na região em que o paciente se encontra durante as intervenções cirúrgicas.

3.1. Independência de malhas e comparação com resultados experimentais

3.1.1. Hospital Universitário

Na seção 3.2 foram descritas as malhas geradas para a sala cirúrgica do HU/USP para posterior simulação. As três malhas tetraédricas foram obtidas utilizando-se diferentes graus de refinamento. Foi necessário, então, realizar um estudo que verificasse qual dessas malhas seria a mais adequada para a continuação do projeto. Essa análise foi feita a partir da comparação de resultados obtidos na simulação de cada uma das malhas em relação a resultados experimentais obtidos. Medições foram realizadas em condições de ambiente estável (regime permanente) na sala cirúrgica, sem pessoas presentes, utilizando os pedestais A, B, C e D que podem ser mais bem observados na Fig. (5).



Figura 5. Pontos de medição na sala do Hospital Universitário.

Cada um dos pedestais continha quatro termômetros de resistência PT100 (precisão de +/- 0,2°C) para medir a temperatura do ar, e quatro anemômetros omnidirecionais (faixa de medição de 0,05 a 5 m/s e precisão de 0,03 +/- 3% m/s) para medir a velocidade do ar, localizados nas alturas de 0,60, 1,20, 1,80 e 2,40 m do piso. Para esse estudo de independência de malhas foram utilizadas comparações entre os campos de temperatura. As comparações entre os campos de velocidades apresentaram menor confiabilidade devido aos baixos valores encontrados na sala cirúrgica e por se tratar de uma grandeza vetorial, característica incapaz de ser obtida com precisão pelos instrumentos utilizados.

Na Tab. (3) são apresentados os resultados do estudo comparativo realizado.

Tabela 3. Comparação dos valores experimentais e numéricos (HU/USP).

| Temperatura (°C) no pedestal A | | | Temperatura (°C) no pedestal B | | | | | | |
|--|------|------|--|------------|------|------|--------------------|------|------------|
| 0,6 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | Altura (m) | 0,6 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | Altura (m) |
| 18,4 | 18,4 | 18,4 | 18,3 | Malha A | 18,3 | 18,3 | 18,3 | 18,4 | Malha A |
| 18,4 | 18,4 | 18,4 | 18,4 | Malha B | 18,3 | 18,4 | 18,4 | 18,4 | Malha B |
| 18,4 | 18,4 | 18,4 | 18,4 | Malha C | 18,3 | 18,4 | 18,4 | 18,4 | Malha C |
| 18,5 | 18,8 | 19,2 | 19,4 | Medido | 18,7 | 19,4 | 19,5 | 19,8 | Medido |
| Diferença com os valores experimentais (%) | | | Diferença com os valores experimentais (%) | | | | | | |
| -0,5 | -2,1 | -4,2 | -5,7 | Malha A | -2,1 | -5,7 | -6,2 | -7,1 | Malha A |
| -0,5 | -2,1 | -4,2 | -5,2 | Malha B | -2,1 | -5,2 | -5,6 | -7,1 | Malha B |
| -0,5 | -2,1 | -4,2 | -5,2 | Malha C | -2,1 | -5,2 | -5,6 | -7,1 | Malha C |
| | | | | | | | | | |
| Temperatura (°C) no pedestal C | | | Temperatura (°C) no pedestal D | | | | (°C) no pedestal D | | |
| 0.6 | 10 | 1.0 | 2.4 | A 14 | 0.0 | 1.0 | 1.0 | 2.4 | A 14 |

| Temperatura (°C) no pedestal C | | | | | | Т | emper | ratura | (°C) no pedestal D |
|--|------|------|--|------------|------|------|-------|--------|--------------------|
| 0,6 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | Altura (m) | 0,6 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | Altura (m) |
| 18,4 | 18,4 | 18,4 | 18,4 | Malha A | 18,3 | 18,3 | 18,3 | 18,4 | Malha A |
| 18,4 | 18,4 | 18,4 | 18,4 | Malha B | 18,3 | 18,4 | 18,4 | 18,4 | Malha B |
| 18,4 | 18,4 | 18,4 | 18,4 | Malha C | 18,3 | 18,4 | 18,4 | 18,4 | Malha C |
| 19,4 | 18,9 | 19,0 | 18,9 | Medido | 18,0 | 18,3 | 18,7 | 18,5 | Medido |
| Diferença com os valores experimentais (%) | | | Diferença com os valores experimentais (%) | | | | | | |
| -5,2 | -2,6 | -3,2 | -2,6 | Malha A | 1,7 | 0,0 | -2,1 | -0,5 | Malha A |
| -5,2 | -2,6 | -3,2 | -2,6 | Malha B | 1,7 | 0,5 | -1,6 | -0,5 | Malha B |
| -5,2 | -2,6 | -3,2 | -2,6 | Malha C | 1,7 | 0,5 | -1,6 | -0,5 | Malha C |

Da análise da Tab. (3) pode-se observar que a malha A, com 303 mil elementos, apresenta erros percentuais maiores que as malhas B e C, com respectivamente 612 e 1015 mil elementos. Entretanto, quando se compara essas duas últimas malhas fica perceptível que o maior grau de refinamento da malha C não produz resultados mais precisos do que aqueles gerados pela malha B. Assim, como a diferença desses resultados é desprezível, optou-se pela malha B para dar continuidade ao trabalho, já que seu menor grau de refinamento permite que as simulações sejam feitas em um menor tempo de processamento pelos computadores utilizados. É importante ressaltar que as simulações realizadas com as três malhas apresentaram erros inferiores a 10% em relação aos resultados experimentais encontrados.

3.1.2. Laboratório de Cirurgia Experimental

Assim, como foi feito para a sala do Hospital Universitário, também foi necessário realizar um estudo que verificasse qual dessas malhas seria a mais adequada para a continuação do projeto no Laboratório de Cirurgia Experimental. Assim, a partir da comparação dos resultados de simulação obtidos também foi escolhida a malha que apresentou valores simulados de temperatura mais próximos aos valores experimentais levantados. Para isso, foram utilizados os valores de temperatura medidos experimentalmente nos pedestais A, B, C e D que podem ser mais bem observados na Fig. (6).



Figura 6. Pontos de medição no Laboratório de Cirurgia Experimental.

As medições também foram realizadas em condições de ambiente estável (regime permanente) na sala cirúrgica, sem pessoas presentes. Cada um dos pedestais também continha quatro sensores para medir a temperatura do ar e outros quatro anemômetros localizados nas alturas de 0,60, 1,20, 1,80 e 2,40 m do piso.

Na Tab. (4) são apresentados os resultados do estudo comparativo realizado.

Pela análise da Tab. (4) observa-se que os resultados numéricos se aproximaram dos resultados experimentais na medida em que as malhas utilizadas foram mais refinadas. Dessa forma, a malha F, com 970 mil elementos apresentou resultados mais precisos que a malha E, com 360 mil elementos que, por sua vez, obteve melhores resultados que a malha D, com 255 mil elementos. Dessa forma, optou-se pela malha F para dar continuidade ao trabalho. Vale ressaltar que em todas as simulações realizadas os erros encontrados foram inferiores a 15%.

| Temperatura (°C) no pedestal A | | | Temperatura (°C) no pedestal B | | | | | | | | |
|--|-------|-------|--------------------------------|------------|---------|---------|-------------------------|-------|------------|--|--|
| 0,6 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | Altura (m) | 0,6 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | Altura (m) | | |
| 19,1 | 19,2 | 19,2 | 19,4 | Malha D | 19,1 | 19,1 | 19,2 | 19,2 | Malha D | | |
| 19,2 | 19,2 | 19,2 | 19,5 | Malha E | 19,1 | 19,1 | 19,2 | 19,2 | Malha E | | |
| 19,2 | 19,3 | 19,3 | 19,7 | Malha F | 19,2 | 19,2 | 19,3 | 19,3 | Malha F | | |
| 22,2 | 22,3 | 22,4 | 22,7 | Medido | 22,0 | 22,3 | 21,9 | 22,2 | Medido | | |
| Diferença com os valores experimentais (%) | | | Ι | Diferen | iça con | n os va | lores experimentais (%) | | | | |
| -13,9 | -13,9 | -14,3 | 14,5 | Malha D | -13,2 | -14,3 | -12,3 | -13,5 | Malha D | | |
| -13,5 | -13,9 | -14,3 | -14,0 | Malha E | -13,2 | -14,3 | -12,3 | -13,5 | Malha E | | |
| -13,5 | -13,5 | -13,8 | -13,2 | Malha F | -12,7 | -13,9 | -11,8 | -13,1 | Malha F | | |

Tabela 4. Comparação dos valores experimentais e numéricos (FM/USP).

| Temperatura (°C) no pedestal C | | | Temperatura (°C) no pedestal D | | | | | | |
|--------------------------------|--|-------|--------------------------------|------------|--|-------|-------|-------|------------|
| 0,6 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | Altura (m) | 0,6 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | Altura (m) |
| 19,1 | 19,2 | 19,2 | 19,5 | Malha D | 19,2 | 19,2 | 19,2 | 19,3 | Malha D |
| 19,1 | 19,2 | 19,2 | 19,6 | Malha E | 19,2 | 19,2 | 19,2 | 19,3 | Malha E |
| 19,2 | 19,3 | 19,3 | 19,7 | Malha F | 19,3 | 19,3 | 19,3 | 19,4 | Malha F |
| 22,4 | 22,2 | 22,2 | 21,6 | Medido | 21,7 | 21,8 | 21,8 | 21,8 | Medido |
|] | Diferença com os valores experimentais (%) | | | | Diferença com os valores experimentais (%) | | | | |
| -14,7 | -13,5 | -13,5 | -9,7 | Malha D | -11,5 | -11,9 | -11,9 | -11,5 | Malha D |
| -14,7 | -13,5 | -13,5 | -9,2 | Malha E | -11,5 | -11,9 | -11,9 | -11,5 | Malha E |
| -14,3 | -13,1 | -13,1 | -8,8 | Malha F | -11,1 | -11,5 | -11,5 | -11,0 | Malha F |

3.2. Campo de Velocidades

3.2.1. Hospital Universitário

Para uma análise mais detalhada dos resultados na região de interesse para o estudo, aquela em que estará o paciente (campo cirúrgico), são apresentados resultados do campo de velocidades para dois planos que passam pela mesa cirúrgica. Os planos são aqueles definidos nas Fig. (7) e (8) com o respectivo campo de velocidades.



Figura 7. Plano A e campo de velocidade no plano A.

Ao analisar as Fig. (7) e (8), é possível verificar que a sala possui um campo de velocidades que se encontra em uma faixa de 0 a 0,75m/s. Valores maiores são encontrados em regiões próximas ao difusor e à grelha de retorno, uma vez que, nessas regiões, o insuflamento e retorno do ar ocorrem a velocidades maiores do que as encontradas no restante da sala. A ocorrência de regiões com maiores velocidades é nítida na Fig. (8), que apresenta o campo de velocidades no plano perpendicular à direção de insuflamento e retorno do ar.



Figura 8. Plano B e campo de velocidade no plano B.

3.2.2. Laboratório de Cirurgia Experimental

Para uma análise mais detalhada dos resultados na região de interesse para o estudo, aquela em que estará o paciente (campo cirúrgico), também são apresentados resultados do campo de velocidades para três planos que passam pela mesa cirúrgica. Os planos são aqueles definidos nas Fig. (9) e (10) com o respectivo campo de velocidades.



Figura 10. Plano E e campo de velocidade no plano E.

Ao analisar as Fig. (9) e (10), é possível observar que a sala possui um campo de velocidades que se encontra em uma faixa de 0 a 0,08m/s, com velocidades maiores nas regiões próximas aos difusores e às grelhas de retorno.

3.3. Campo de Temperaturas

3.3.1. Hospital Universitário

De forma similar ao realizado para os campos de velocidades, são apresentados resultados do campo de temperaturas para três planos que passam pela mesa cirúrgica. Os planos são aqueles definidos nas Fig. (7) e (8) e os resultados do campo de temperaturas são apresentados na Fig. (11).

A análise da Fig. (11) mostra a ocorrência de uma distribuição de temperaturas na sala praticamente uniforme. Em quase toda a região que abrange a área onde está o paciente, verifica-se uma temperatura em torno dos 18°C. Em regiões que se encontram mais próximas às luminárias e ao foco cirúrgico são constatadas temperaturas mais elevadas. Esse resultado é produto de uma maior troca de calor por convecção naquelas regiões, função da temperatura das luminárias e do foco cirúrgico (30 e 45°C, respectivamente).



Figura 11. Campo de temperaturas nos planos A e B.

3.3.2. Laboratório de Cirurgia Experimental

De forma similar ao realizado para o campo de velocidades, são apresentados resultados do campo de temperaturas para dois planos que passam pela mesa cirúrgica. Os planos são aqueles definidos nas Fig. (7) e (8) e os resultados do campo de temperaturas são apresentados na Fig. (12).



Figura 12. Campo de temperatura nos planos D e E.

Ao analisar a Fig. (12), constata-se uma homogeneidade do campo de temperaturas da sala em torno dos 13°C. Verifica-se também que a diferença entre as temperaturas nas regiões da sala é muito pequena, da ordem de 0,1°C. Nas regiões próximas às lâmpadas observam-se temperaturas mais elevadas. Esse resultado é produto de uma maior troca de calor por convecção naquelas regiões, função da temperatura das lâmpadas, 29°C.

3.4. Vetores Velocidade

3.4.1. Hospital Universitário

É ainda interessante, de forma a auxiliar no estudo do escoamento e distribuição de partículas, a análise dos vetores velocidade da sala cirúrgica do Hospital Universitário. Uma visão geral do caminho percorrido pelo ar na sala é apresentada na Fig. (13), que exibe os vetores velocidade, indicando o escoamento do ar.



Figura 13. Vetores velocidade na sala cirúrgica do HU/USP.

A Fig. (13) mostra a movimentação do ar na sala cirúrgica, desde sua entrada na sala, pelo difusor, até a sua saída na grelha de retorno. Nesses locais, como já tinha sido possível verificar na análise do campo de velocidades, a magnitude dos vetores velocidade é maior, enquanto no restante da sala os vetores possuem magnitude menor, com valores muito próximos entre si.

3.4.2 Laboratório de Cirurgia Experimental

Também é interessante para o estudo analisar o campo de vetores velocidade na sala do Laboratório de Cirurgia Experimental da FM/USP devido ao insuflamento de ar pelo teto. Uma visão geral do caminho percorrido pelo ar na sala é apresentada na Fig. (14), que exibe os vetores velocidade, indicando o escoamento do ar.



Figura 14. Vetores velocidade na sala do Laboratório de Cirurgia Experimental da FM/USP.

A Fig. (14) apresenta claramente a movimentação do ar na sala, desde sua entrada pelos difusores, a mudança de direção devido à geometria e a saída pelas grelhas de retorno. Nota-se as baixas magnitudes dos vetores velocidade, função das baixas vazões nos difusores.

3.5. Escoamento e distribuição de partículas

3.5.1. Hospital Universitário

A partir da simulação com partículas isotérmicas emitidas da superfície da mesa cirúrgica, foi possível obter o caminho percorrido por estas partículas no interior da sala estudada. Tal fato pode ser observado na Fig. (15).





Por meio da análise da Fig. (15) é possível verificar que, em aproximadamente 40 segundos, muitas partículas ainda se encontram em regiões próximas à mesa cirúrgica, fato que leva à conclusão de que o sistema de ventilação da sala não é eficiente para diminuir possibilidade de contaminação do paciente durante o procedimento cirúrgico. No entanto, algumas partículas acabam sendo dirigidas para a grelha de retorno, situação ideal para a circulação de ar em uma sala cirúrgica.

3.5.2. Laboratório de Cirurgia Experimental

Também foi possível obter, por meio da simulação com partículas isotérmicas emitidas da superfície da mesa cirúrgica, o caminho percorrido por estas partículas no interior da sala do Laboratório de Cirurgia Experimental da FMUSP. O resultado da simulação pode ser observado na Fig. (16).



Figura 16. Tempo de residência de partículas no Laboratório de Cirurgia Experimental da FM/USP.

A partir da análise da Fig. (16) é possível verificar que, em aproximadamente 50 segundos, muitas partículas ainda se encontram em regiões próximas ao campo cirúrgico. Dessa forma, poderia se concluir também que o sistema de ventilação da sala não é eficiente de forma a evitar possível contaminação do paciente durante o procedimento cirúrgico. Contudo, neste caso, os difusores afastam as partículas e não há concentração de partículas acima da mesa cirúrgica. Por fim, pode-se observar que a maioria das partículas são dirigidas para uma única grelha de retorno, resultado da dificuldade em simular o escoamento devido aos difusores de jato helicoidal.

4. Conclusão

Foram concluídas e apresentadas as atividades propostas para o projeto, desenvolvidas pelos alunos envolvidos e acompanhadas pelo seu orientador ao longo dos últimos 2 anos. A pesquisa bibliográfica realizada foi de vital importância para que houvesse a concepção adequada do tema envolvido no projeto, sua importância e suas aplicações. O estudo das ferramentas utilizadas para a realização das simulações numéricas foi concluído com sucesso e os resultados das simulações se mostraram, em sua grande maioria, consistentes.

Com os resultados obtidos pode-se verificar que, tanto na sala cirúrgica do Hospital Universitário quanto na sala de transplante de figado do Laboratório de Cirurgia Experimental da FMUSP, a distribuição de temperatura é praticamente homogênea e que pequenos gradientes foram causados pela dissipação de calor do foco cirúrgico.

Por outro lado, o sistema de ventilação da sala cirúrgica do Hospital Universitário apresenta áreas de estagnações e recirculações. Esses fenômenos podem dificultar a remoção de partículas geradas durante a cirurgia e causar desconforto térmico na equipe cirúrgica. Já o sistema de fluxo helicoidal da sala experimental da FM/USP apresenta maior potencial na remoção de partículas próximo à mesa cirúrgica.

Por fim, na comparação entre os resultados numéricos e experimentais obtidos, verificou-se uma boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos de velocidades e temperaturas do ar. Na comparação entre os campos de temperatura foi possível observar que os valores apresentavam erros sempre inferiores a 10% para a sala cirúrgica do Hospital Universitário da USP, e inferiores a 15% para o Laboratório de Cirurgia Experimental da FM/USP. No entanto, na comparação entre os campos de velocidade, observaram-se discrepâncias maiores entre os resultados numéricos e experimentais, provenientes da incerteza de medição com velocidades baixas e de simplificações adotadas nos modelos numéricos do escoamento dos difusores, principalmente, para o Laboratório de Cirurgia Experimental, o qual possui um complexo modelo de fluxo helicoidal.

5. Referências bibliográficas

Fluent. Fluent User's Guide, Fluent Inc. Lebanon, USA. 2003.

- Kameel, R., Khalil, E. Predictions of turbulence behavior using k-ε model in operating theatres. Mechanical Power Engineering Dpt. Cairo University. Egypt. 2003.
- Memarzadeh, F., Manning, A. Comparison of operating room ventilation systems in the protection of the surgical site. ASHRAE Trans. 2002.
- Pereira, F. L., Medição, predição e análise de partículas aéreas em salas cirúrgicas. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade São Paulo. São Paulo. 163p. 2008.
- Pustelnik, M., Avaliação numérica de ambientes com insuflamento de ar frio pelo piso. Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 109p. 2005.

AIR TREATMENT SYSTEMS IN SURGERY ROOMS: NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE AIRFLOW AND PARTICLES DISTRIBUTION

Israel Belletti Mutt Urasaki

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo israel.urasaki@gmail.com

Silas Alves Guimarães Júnior

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo silasagjunior@uol.com.br

Abstract. This study aims to analyze the airflow velocities and particles distribution in surgery rooms with turbulent airflow systems, by using numerical methods. A mathematical modeling was made, including the equations needed to solve problems of the airflow in ventilated environments. All other steps requested to support the simulation process at USP's Hospital and at the Medical School's Laboratory of Experimental Surgery at USP, are presented. These steps are: the construction of geometries and the generation of the meshes using ICEM and Gambit softwares, the application of the boundary conditions using Fluent software, and finally, the study of the independence of the meshes maded on a comparison between the simulation and the experimental results. In addition, the airflow velocities, the temperature field and the particles distribution obtained by the numerical methods above mentioned are presented.

Keywords. Ventilation, Numerical Simulation, Surgical Rooms and Contamination.