

Modelagem e Simulação CFD de Sistemas de Ventilação Personalizada de Teto Visando Otimização do Conforto Térmico (Método De Análise De Dados) - EVR2021-0010

Jayme L. Abreu^{1*}, Millena G. Sabino¹, Alexandre N. Silva¹, Álvaro M. B. Tibiriçá¹

Universidade Federal de Viçosa – Campus Viçosa, Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica, Laboratório de Modelagem, Otimização e Simulação
Viçosa, Minas Gerais, Brasil, 36570-900

* Jayme Lopes Abreu, jaymelabreu@gmail.com

Resumo

Sistemas de ventilação personalizada vêm sendo o foco de muitas pesquisas na área de ar-condicionado. A aplicação de tais métodos permite criar uma região em torno do usuário chamada de microclima, na qual o indivíduo pode controlar a temperatura e o fluxo de ar lançado sobre ele. Através de resultados de simulações utilizando a Dinâmica de Fluidos Computacional, foi realizada uma análise de dados utilizando o software R, que permitiu criar um modelo de regressão linear múltipla empregando o método de correlações entre as variáveis de entrada estudadas. Com isso, para cada ponto recolhido, utilizou-se o modelo de regressão para encontrar uma relação entre as variáveis de entrada com a temperatura e velocidade do ar naquele ponto. Em seguida, foi feita uma análise de sensibilidade para estudar a influência das variáveis entrada sobre aquele ponto. O estudo observou que o modelo de regressão para a temperatura descreveu adequadamente o fenômeno, enquanto que a velocidade foi bem descrita na região central do microclima. A análise de sensibilidade mostrou que a temperatura externa, a velocidade e a temperatura de insuflamento influenciam diretamente na temperatura dos pontos do microclima, enquanto apenas a velocidade de insuflamento possui relevância na velocidade dos pontos.

Palavras-chave: Sistema de ventilação personalizada, dispositivo de insuflamento de ar, análise de regressão, análise de sensibilidade.

Introdução

O projeto de sistemas de refrigeração e ar-condicionado tradicionais almejam criar um ambiente uniforme em toda sua zona de espaço definida. Entretanto, com o passar do tempo, dois problemas vêm sendo indicados: o ar fresco do ar-condicionado se misturar com os poluentes da região interna do ambiente e o conforto térmico individual não ser alcançado, já que cada ocupante possui suas preferências de configuração de temperatura (Gao; Niu, 2004). Além disso, o alto custo energético desses sistemas também foi apontado como aspecto negativo de sua utilização.

Sendo assim, um novo campo de pesquisa começou a crescer especialmente na última década, se baseando em Sistemas de Ventilação Personalizada de Teto (SVPT). Veselý e Zeiler (2014) definem um sistema de ventilação personalizada como um sistema que almeja condicionar apenas uma pequena região ao redor do usuário. Neste trabalho, chamaremos essa região, correspondente a área de alcance do jato de ar lançado pelo dispositivo de insuflamento de ar (DIA), de microclima.

Segundo Gao e Niu (2004), o usuário do SPVT possui o controle da temperatura e do fluxo de ar que incide sobre ele, dessa forma, é possível configurar o sistema para adequar ao melhor e mais agradável ambiente, otimizando o conforto térmico. Além disso, cada ocupante terá sua região de ar fresco recebido, dificultando riscos de contaminação de doenças respiratórias, comuns em ambientes fechados e coletivos (Habchi et al., 2016).

O estudo do emprego de métodos de SVPT pode ser feito experimentalmente ou através de ferramentas virtuais de Dinâmica de Fluidos Computacionais (CFD). Essa última, além de ser precisa, se mostrou também ser mais rápida e menos dispendiosa. Sendo, então, o foco dos principais estudos sobre sistemas de ventilação personalizada. Silva (2017) utilizou dessa ferramenta para modelar três diferentes tipos de dispositivos de insuflamento de ar e simular zonas com diferentes configurações, gerando 210 microclimas. Para cada microclima, Silva (2017) coletou a temperatura e a velocidade do ar em 200 pontos de coordenadas distintas.

Neste trabalho, fez-se o uso deste conjunto de dados obtidos para aprimorar o foco da escolha das variáveis de entrada nas simulações CFD realizadas pelo Núcleo de Engenharia de Modelagem, Otimização e Simulação da Universidade Federal de Viçosa (NEMOS-UFV). Posto isso, o objetivo desta pesquisa é apontar a influência da temperatura e velocidade de insuflamento do ar, temperatura externa ao microclima e ângulo das pás do difusor nas variáveis de saída – temperatura e velocidade em cada ponto coletado das simulações.

Metodologia

Este trabalho foi baseado em resultados obtidos em simulações CFD feitas anteriormente no Núcleo de Engenharia de Modelagem, Otimização e Simulação (NEMOS – UFRV) por Silva (2017). Em sua abordagem, utilizando o *software SolidWorks*, foram construídos três modelos geométricos que representassem o microclima do ambiente de trabalho e eles se diferenciavam apenas pelo

ângulo das pás de seus dispositivos de insuflamento de ar. A figura 1 obtida através do *software SolidWorks* apresenta o domínio da modelagem do ar. Os números 1 e 2 representam as duas regiões que foram divididas para a construção da malha, já as letras representam as diferentes condições de contorno impostas, sendo 'a' onde o ar entra, 'b' condição de simetria e 'c' região de aberta (*opening*). Já a figura 2, obtida pelo *Software Ansys CFX* representa os pontos de coleta da região do microclima modelada. A vista frontal (figura 2-a) exibe a distribuição de 40 pontos em um dos cinco planos radiais, já a vista superior apresenta os cinco planos radiais de coleta dos pontos.

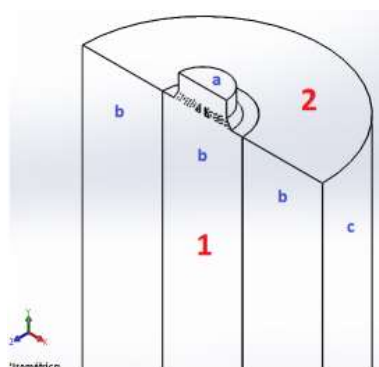


Figura 1: Geometria do microclima criado no software SolidWorks. Fonte: Silva (2017).

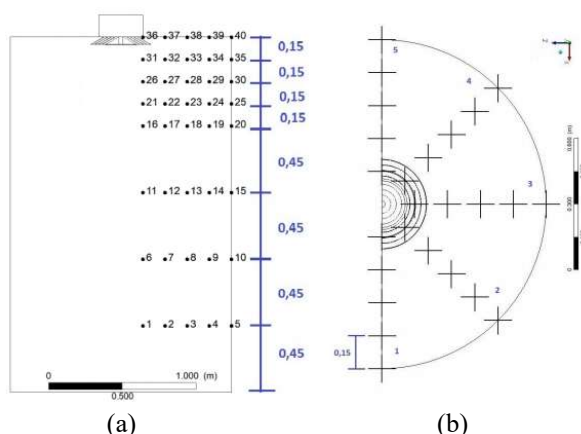


Figura 2: Distribuição dos pontos no microclima. (a) Vista frontal. (b) Vista superior. Fonte: Silva (2017).

Para cada geometria com diferentes ângulos (*Theta*) das pás do DIA, variou-se parâmetros do ar insuflado, como a velocidade de entrada e a temperatura de entrada, V_0 e T_0 , respectivamente, e também a temperatura externa ao ambiente, T_e . A tabela 1, apresenta as escolhas de cada uma das variáveis do projeto. Para cada uma das 210 combinações de variáveis de entrada, obteve-se uma simulação, através do *Ansys CFX* e cada simulação foram coletados os valores de velocidade e a temperatura de 200 pontos simetricamente espalhados pela geometria.

Foi feita uma análise de regressão linear dos dados obtidos da simulação das três diferentes geometrias do dispositivo insuflador de ar. Essa análise foi realizada em linguagem R e buscou uma relação da velocidade (V) e da temperatura (T) no formato das Equações 1 e 2.

Foi utilizado o *software R* para realizar a análise de regressão linear dos valores de velocidade e temperatura.

Após obter a primeira regressão para cada ponto, o programa nos forneceu os coeficientes parciais de regressão β e α , descritos nas equações 1 e 2, respectivamente, correspondentes a cada conjunto de variável. Junto a eles, foi gerado também o p -valor de cada um dos coeficientes. Foi adotado o nível de significância de 0,1. Logo, os coeficientes da regressão que possuíam p -valor maiores que 0,1 foram descartados e, então, uma nova regressão era feita apenas com os coeficientes significativos. O processo se repetiu até que não se houvesse mais coeficientes não-significativos, como mostrado no esquema da figura 3.

Tabela 1: Alterações das variáveis de entrada escolhidas nas simulações e as possíveis combinações de coordenada dos pontos.

Fonte: Autor.

Variáveis de Entrada				Coordenada do Ponto		
Theta (°)	T_e (°C)	T_0 (°C)	V_0 (°C)	Ângulo (°)	Altura (m)	Raio (m)
30	25	8	0,1415	0	0,45	0,15
45	30	12	0,7074	45	0,90	0,30
60		16	1,4147	90	1,35	0,45
		20	2,1221	135	1,80	0,60
		24	2,8294	180	1,95	0,75
			3,5368		2,10	
			4,2441		2,25	
					2,40	

$$V = \beta_0 + \beta_1\theta + \beta_2T_e + \beta_3T_0 + \beta_4V_0 + \beta_5\theta^2 + \beta_6V_0^2 + \beta_7T_0^2 + \beta_8\theta T_e + \beta_9\theta T_0 + \beta_{10}\theta V_0 + \beta_{11}T_e T_0 + \beta_{12}T_e V_0 + \beta_{13}T_0 V_0 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$T = \alpha_0 + \alpha_1\theta + \alpha_2T_e + \alpha_3T_0 + \alpha_4V_0 + \alpha_5\theta^2 + \alpha_6V_0^2 + \alpha_7T_0^2 + \alpha_8\theta T_e + \alpha_9\theta T_0 + \alpha_{10}\theta V_0 + \alpha_{11}T_e T_0 + \alpha_{12}T_e V_0 + \alpha_{13}T_0 V_0 \quad (\text{Eq. 2})$$



Figura 3: Esquema representativo de como foram feitas as iterações das regressões lineares em cada ponto para obtenção de modelos estimadores de velocidade e temperatura. Fonte: Autor.

A análise de regressão também nos forneceu o coeficiente de determinação da função, chamado de R^2 . Esse valor, que variava entre 0 e 1, representa o percentual de representatividade da função encontrada através dos valores dos coeficientes da regressão. Foi adotado valor de referência de 0,7 como mínimo para os coeficientes de determinação do modelo, a fim de estabelecer um nível mínimo de precisão. Isso significa dizer que a equação encontrada representa cerca de 70% da variação do fenômeno.

Dessa forma, a partir dos valores de coeficientes que possuíam R^2 maiores que 0,7; pôde-se realizar, então, uma

análise de sensibilidade dos valores obtidos. A análise de sensibilidade serviu para determinar o efeito da variação de um parâmetro de entrada, sobre um parâmetro de saída. Ela foi calculada da seguinte forma para cada ponto: a partir das equações (1) e (2), extraiu-se a derivada parcial em função do parâmetro de entrada estudado. Então, foram selecionados 5 valores para as variáveis de entrada, nos quais estes estavam entre as faixas de valores testados nas simulações originais. Assim, foi calculado o valor da variação (derivada parcial) para cada combinação de valores testados e coeficientes para cada ponto.

Utilizou-se os seguintes valores de θ , V_0 , T_0 e T_e presentes na tabela 2, a seguir, enquanto os valores dos coeficientes β e α são aqueles encontrados através da Análise de Regressão.

Tabela 2: Valores de ângulo das pás do DIA, velocidade de insuflamento do ar, temperatura de insuflamento do ar e temperatura externa utilizados na análise de sensibilidade. (Fonte: Autor)

Variações dos parâmetros de entrada para a Análise de Sensibilidade					
Theta (°)	30	37.5	45	52.5	60
Vo (m/s)	0.15	1.17	2.19	3.22	4.24
To (°C)	8	12	16	20	24
Te (°C)	25	26.25	27.5	28.75	30

Resultados

A análise de regressão linear múltipla, desenvolvida no *software R*, gerou valores para os coeficientes β e α das equações 1 e 2 e o respectivo valor de R^2 em cada um dos pontos. Posteriormente, utilizando o *software MatLab*, foi possível obter a representação visual e quantitativa dos valores de velocidade e temperatura dos pontos em destaque nas figuras 4 e 5. A cor de cada ponto representa o valor de R^2 referente àquela localidade, descrito na tabela 3.

Tabela 3: Cores referentes ao valor de R^2 dos pontos das figuras 4 e 5.

Cor	Valor de R^2
Azul escuro	$R^2 \geq 0,9$
Azul Ciano	$0,9 > R^2 \geq 0,7$
Verde	$0,7 > R^2 \geq 0,5$
Magenta	$0,5 > R^2 \geq 0,3$
Vermelho	$R^2 < 0,3$

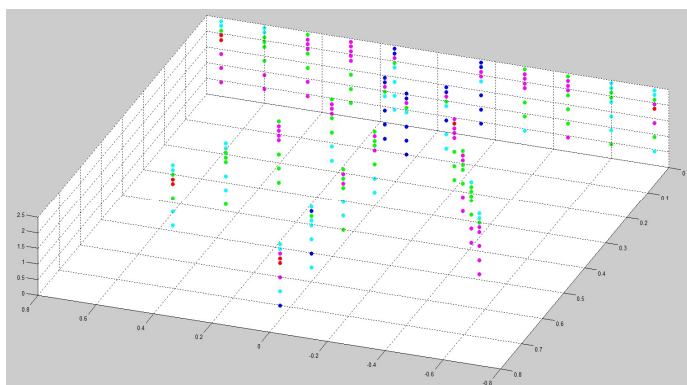


Figura 4: Representação do valor de R^2 para as regressões lineares feitas para a velocidade em cada ponto. As cores indicam o intervalo de R^2 . (Fonte: Autor)

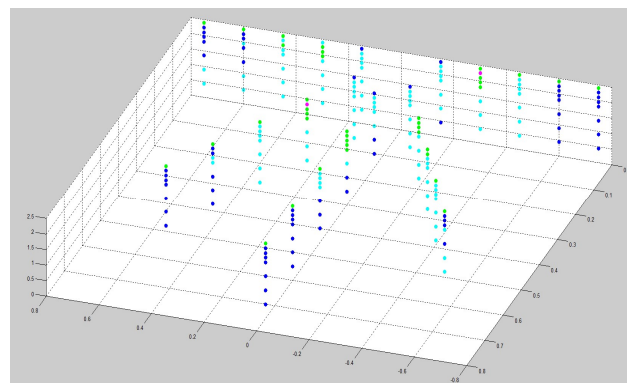


Figura 5: Representação do valor de R^2 para as regressões lineares feitas para a temperatura em cada ponto. As cores indicam o intervalo de R^2 . (Fonte: Autor)

Pode-se observar que, para a velocidade, a equação 1 utilizada representou satisfatoriamente o fenômeno em regiões próximas ao usuário – região central do microclima na qual a distância do centro equivale a 0,15 m – onde 75% dos pontos possuem um valor de R^2 superior a 0,7. No entanto, em regiões superiores e periféricas, é correto dizer que a velocidade não se comporta de maneira linear na maioria das simulações realizadas. Em contrapartida, a temperatura foi muito bem explicada pela equação 2, visto que 82% dos pontos possuem um valor de R^2 superiores a 0,7.

Posteriormente, realizada a análise de sensibilidade, encontrou-se valores referentes a variação de velocidade (figura 6) e temperatura (figura 7) em cada ponto do microclima ao se variar uma unidade da variável de entrada. Por questões de similaridade e simetria, fez-se uma média dos valores encontrados para os pontos de mesma altura e distância do raio dos cinco planos radiais representados na figura 2.

Observa-se por meio da análise de sensibilidade de Velocidade que a variação da velocidade de insuflamento (V_0) tem influência relevante na velocidade dos pontos centrais do microclima em questão, atingindo média de variação de velocidade de 0,29 m/s para cada 1 m/s variado em V_0 . Em contrapartida, as variáveis θ , T_e e T_0 não exercem variações relevantes da velocidade do microclima.

A análise de sensibilidade de temperatura em pontos do microclima demonstra que variações de 1°C na temperatura externa (T_e) exercem variações consideráveis nos pontos de microclima, com exceção dos pontos de maior altura, atingindo a média de 0,96 °C de variação. Já as variações na temperatura de insuflamento (T_0) exercem influência média de 0,54 °C em pontos centrais do microclima, enquanto nos demais não apresenta variação relevante. Tratando-se da velocidade de insuflamento (V_0), a variação de 1 m/s é capaz de provocar, em média, variações de temperatura na região central do raio do microclima de -1,12 °C. Por fim, observa-

se que variações em θ não causam impactos numéricos significativos na temperatura dos pontos do microclima.

Análise de Sensibilidade - Velocidade

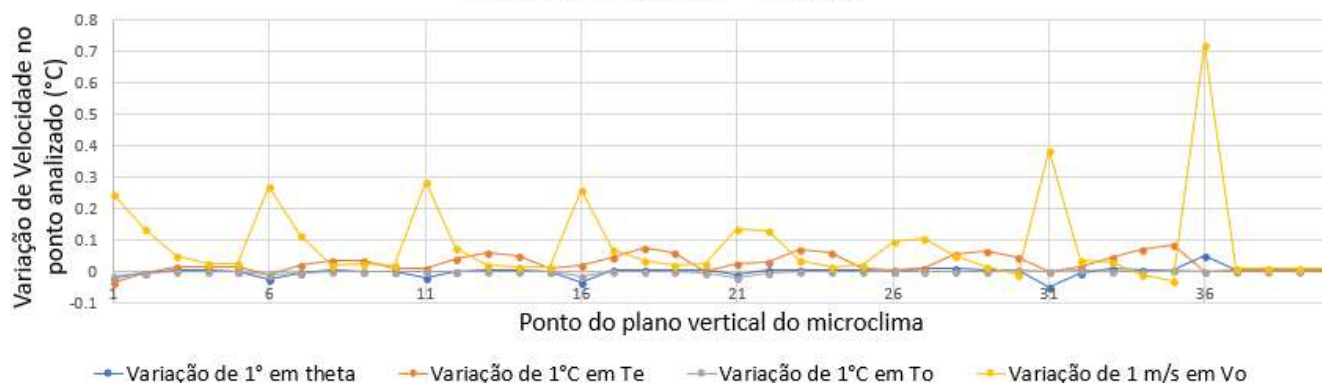


Figura 6: Análise de sensibilidade da Velocidade em pontos do microclima em relação as variáveis θ , T_e , T_o e V_o . (Fonte: Autor)

Análise de Sensibilidade - Temperatura

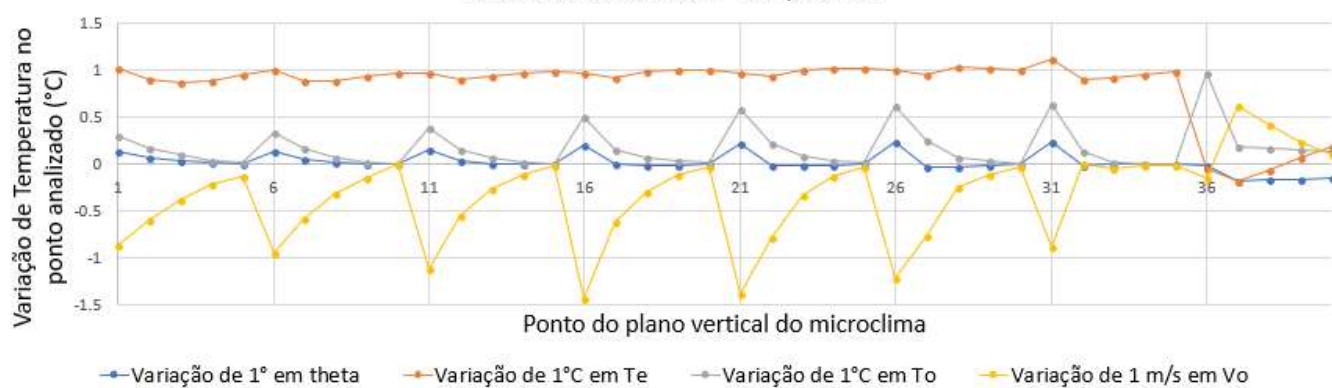


Figura 7: Análise de sensibilidade da Temperatura em pontos do microclima em relação as variáveis θ , T_e , T_o e V_o . (Fonte: Autor)

Conclusões

O presente estudo mostrou-se produtivo devido ao tratamento estatístico e análise de grande volume de dados gerados em trabalho anterior. Utilizando-se das análises de regressão foi possível descrever numericamente as Temperaturas e Velocidades na região do microclima. Já por meio da análise de sensibilidade, foi possível identificar forte influência da temperatura externa na temperatura dos pontos do microclima, tanto em regiões centrais, quanto periféricas. Além disto, conclui-se que o ângulo das pás do Dispositivo de Insuflamento de Ar mostrou baixa influência na temperatura e velocidade dos pontos no microclima. Expostos estes pontos, é pertinente que para trabalhos futuros, os esforços estejam focados em investigar o impacto causado por variações de temperatura e velocidade de insuflamento, assim como de temperatura externa.

Agradecimentos

Agradecimentos a CNPq/PIBIC.

Referências

Gao, N., & Niu, J. (2004). CFD study on micro-environment around human body and personalized ventilation. Elsevier, Building and Environment. Hong Kong, China, 795-805.

Vesely, M., Zeiler, W., (2014) Personalized conditioning and its impact on thermal comfort and energy performance – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Eindhoven, Netherlands, 401-408.

Habchi, C., Ghali, K., Ghaddar, N., Chakroun, W., Alotaibi, S., (2016). Ceiling personalized ventilation combined with desk fans for reduced direct and indirect cross-contamination and efficient use of office space. Energy Conversion and Management. Beirute, Líbano, 159-173.

Silva, A., (2017). Sistemas de Ventilação Personalizada: Delimitação e Análise de Simulações CFD para avaliação de desempenho. Viçosa, Minas Gerais.

Aviso de responsabilidade

Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído neste documento.