



XVI CONBRAVA - CONGRESSO BRASILEIRO DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO, AQUECIMENTO E TRATAMENTO DO AR
São Paulo Expo - 10 a 13 de setembro de 2019

ESTUDO NUMÉRICO DA INFLUÊNCIA DA TAXA DE VENTILAÇÃO NA CAPACIDADE DE CONTENÇÃO DE CONTAMINANTES, PARA LABORATÓRIOS COM NÍVEL DE BIOSSEGURANÇA.

Bruno Perazzo Pedrosa Barbosa; Nisio de Carvalho Lobo Brum;

RESUMO

Os prédios de laboratórios consomem de 4 a 6 vezes mais energia do que as aplicações convencionais, e cerca de 50% deste consumo se deve ao seu sistema de ventilação. Estudos anteriores demonstraram que a estratégia de aumentar as taxas de ventilação, no modo de ventilação por mistura, tem eficácia limitada no controle de contaminação aérea e que os padrões de escoamento de ar são mais importantes do que uma taxa de ventilação global para esse fim. O objetivo primário deste trabalho foi a realização de testes paramétricos relacionando a capacidade de contenção de contaminantes à variação da taxa de ventilação, para laboratórios com nível de biossegurança. Cenários com diferentes taxas de ventilação foram modelados e a única fonte de contaminantes foi localizada no interior da cabine de segurança biológica (CSB). Foi adotada a modelagem numérica, utilizando-se a técnica de fluidodinâmica computacional (CFD), e um estudo experimental desta classe de problemas foi utilizado para validação do código. Os resultados demonstraram que a contenção, para esta classe de problemas, é sensível à intensidade turbulenta do escoamento na sala, e que a estratégia de se aumentar a taxa de ventilação, no modo de ventilação por mistura, pode reduzir esta capacidade de contenção.

Palavras-chave: Laboratório. Biossegurança. Contenção. Ventilação. CFD.

ABSTRACT

Laboratory settings consume from 4 to 6 times more energy than conventional applications, and near 50% of this consumption is related to its ventilation system. Previous studies have shown that the strategy of increasing ventilation rates, in mixing ventilation mode, has limited effectiveness on contamination control and that the local airflow patterns are more important than a global ventilation rate for that purpose. The primary objective of this study was to provide parametric tests relating the capability of contaminant contention to variations on ventilation rates, for biosafety level laboratories. Scenarios with different ventilation rates were modeled, and the only contaminant source was located inside the biological safety cabinet (BSC). The analysis were conducted using numerical simulations, with the computational fluid dynamics (CFD) technique, and an experimental study, related to this class of problems, was used for code validation. Results demonstrated that containment, for this class of problems, is affected by indoor flow turbulence intensity and that the strategy of increasing room ventilation rate may reduce this containment capability.

Keywords: Laboratory. Biosafety. Contention. Ventilation. CFD.

1 INTRODUÇÃO

Laboratórios com nível de biossegurança são ambientes com a finalidade de manipulação controlada e contida de agentes infecciosos. O grau de contenção exigido se traduz nos níveis de biossegurança (NB), aumentando de NB-1 a NB-4, função de risco e complexidade. Apesar de todo avanço tecnológico e da aplicação de programas de controle de infecção, estudos

epidemiológicos recentes demonstram que um número considerável de infecções oriundas da atividade laboratorial (IAF) ainda é reportado entre os trabalhadores destes ambientes (CAMPBELL, 2015, SEWELL, 2006, KUPSKAY, 2002). Uma das rotas é a inalação de aerossol formado a partir de procedimentos realizados em amostras contendo os agentes patogênicos (SEWELL, 2006, WHO, 2004). A complexidade deste controle aumenta em função de que há casos de infecção oportunista por aerossol (SEWELL, 2006, ROY e MILTON, 2004). As principais barreiras de prevenção da geração de bioaerossol em laboratórios são a conduta laboratorial (procedimentos) e o uso de CSBs (cabines de segurança biológica) (WHO, 2004), que constituem as barreiras primárias de contenção. O sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) faz parte das barreiras secundárias, e regula diversos mecanismos, como a diluição dos contaminantes em suspensão (LI *et al.*, 2015), a filtragem do ar (NAZAROFF, 2004), o regime de escoamento do ar na sala e a taxa de deposição de partículas nas superfícies (ZHAO *et al.*, 2007), e a pressurização relativa entre ambientes (LI *et al.*, 2015). Este sistema também controla a temperatura e a umidade dos laboratórios, fundamental para a manutenção do conforto térmico dos ocupantes (DI BERARDINIS *et al.*, 2013). Um parâmetro chave é o dimensionamento das vazões de ventilação. Aproximadamente 50% do consumo energético destas edificações está associado ao sistema de ventilação, incluindo pré-tratamento e movimentação do ar (BELL, 2008). Este tipo de edificação consome de 4 a 6 vezes mais energia do que edificações comerciais de mesma área (BELL, 2008). Estes dados reforçam que o racional dimensionamento das vazões de ventilação é um parâmetro crítico para o consumo energético de edificações laboratoriais. Estudos anteriores demonstraram que a estratégia de aumentar as taxas de ventilação, no modo de ventilação por mistura, tem eficácia limitada no controle de contaminação aérea (CHEN *et al.*, 2014; FAULKNER *et al.*, 2013; PANTELIC e THAM, 2012, MEMARZADEH e XU, 2012; MEMARZADEH, 2009) e que os padrões de escoamento de ar são mais importantes do que uma taxa de ventilação global para esse fim (PANTELIC e THAM, 2013; BOLASHIKOV *et al.*, 2013; GROSSKOPF e HERSTEIN, 2012; MEMARZADEH e XU, 2012; MEMARZADEH, 2009). LI *et al.* (2015) consideram que significantes questões ainda perduram sobre os requisitos da ventilação de ambientes internos com objetivo de controle de infecção aerotransportável. A ASHRAE (2017) estabelece elevada prioridade na pesquisa da interconexão entre os sistemas de ventilação e a dispersão de bioaerossol infeccioso em laboratórios com biossegurança. Alinhado à prioridade de pesquisa estipulada pela ASHRAE, o objetivo primário deste trabalho envolve a realização de testes paramétricos relacionando a capacidade de contenção de contaminantes à variação da taxa de ventilação, para laboratórios com nível de biossegurança. Cenários com diferentes taxas de ventilação foram modelados e a única fonte de contaminantes foi localizada no interior da CSB.

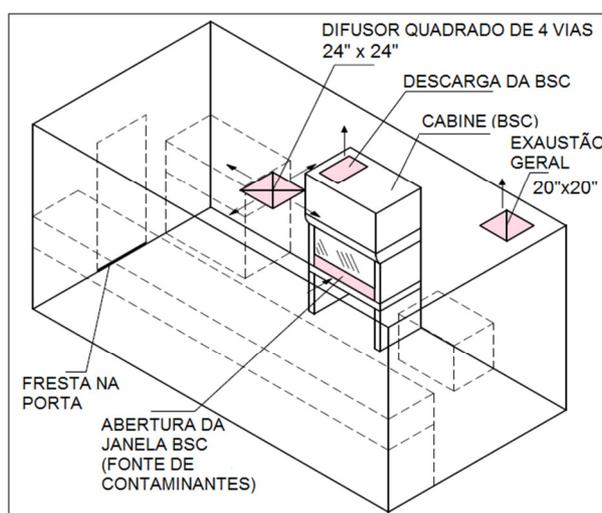
2 METODOLOGIA

Um laboratório foi modelado de modo a representar as características gerais de um laboratório com nível de biossegurança. Foi adotada a premissa de que procedimentos com potencial geração de aerossol são conduzidos no interior de uma CSB, como recomendado pelos protocolos administrativos para os laboratórios NB-2 e NB-3 (WHO, 2004; CDC e NIH, 2007). Os laboratórios NB-4 foram excluídos deste estudo, considerando-se que são extremamente restritos e específicos, com poucas unidades operacionais instaladas nos EUA (DI BERARDINIS *et al.*, 2013). Como a geração dos contaminantes está restrita ao interior das CSBs, a sua capacidade de contenção está relacionada com a minimização da aerodispersão destes contaminantes para o laboratório. O principal objetivo deste trabalho foi de avaliar a sensibilidade desta capacidade de contenção da CSB a diferentes padrões de escoamento do ar, resultantes de variações nas taxas de ventilação impostas. A simulação numérica, através da fluidodinâmica computacional (CFD, *computational fluid dynamics*) foi utilizada para quantificar o desempenho de contenção de cada cenário.

2.1 Especificação do Laboratório Modelado

A configuração do laboratório modelado é mostrada na Figura 1, e apresenta um arranjo similar ao laboratório de menor escala utilizado por MEMARZADEH (1996) em suas simulações, dimensões de 6,6m x 3,4m x 3,1m.

Figura 1 – Configuração geral do laboratório modelado



Fonte: Os autores.

O laboratório é equipado com uma CSB, com largura nominal de 1,2m, e bancadas de trabalho destinadas aos demais equipamentos laboratoriais. O laboratório foi modelado sem a presença de um cientista defronte à CSB. Esta decisão foi baseada nas conclusões dos testes similares conduzidos por MEMARZADEH (1996) para o caso das capelas de exaustão química. Foi considerado o modo de ventilação por mistura (MV), dado que esta é uma das estratégias mais comumente aplicadas em ambientes com programas

de controle de infecção (ASHRAE, 2013), e presente como solução na maioria dos laboratórios (MEMARZADEH, 2009). As características foram dimensionadas para acomodar uma vazão máxima de insuflação compatível com uma taxa de 17 ACH (renovações por hora), dado que a ordem de grandeza da taxa de renovação em laboratórios é 10^1 (DELUGA, 1997). O sistema AVAC opera em regime de 100% de ar exterior, em função dos requisitos do NIH (2016).

2.2 Modelagem da Cabine de Segurança Biológica (CSB)

A CSB foi modelada em função de uma cabine real certificada, com condições operacionais conforme Tabela 1. A validação envolveu a simulação numérica do campo de velocidades da CSB.

Tabela 1 – Dados gerais e condições operacionais da CSB

Dados operacionais	valor
Tipo (std. NSF-49)	Classe II-A2
Dimensão nominal (m)	1,20
Vazão de downflow ($L \cdot s^{-1}$)	278
Velocidade média de downflow ($m \cdot s^{-1}$)	0,37
Vazão de descarga/Inflow ($L \cdot s^{-1}$)	117
Velocidade média de inflow ($m \cdot s^{-1}$)	0,55
Velocidade média de descarga ($m \cdot s^{-1}$)	0,63
Vazão total de exaustão ($L \cdot s^{-1}$)	395
Velocidade média nas frestas de exaustão ($m \cdot s^{-1}$)	7,10

Fonte: os autores.

2.3 Testes paramétricos

Os testes foram conduzidos de modo a avaliar a sensibilidade de desempenho de contenção a diferentes valores da taxa de renovação de ar do laboratório. O mesmo laboratório foi testado com diferentes valores de taxa de renovação de ar, relativas a 17 ACH (Caso A), 15 ACH (Caso B) e 9 ACH (Caso C). O caso intermediário, B (15 ACH), com parâmetros sensivelmente diferentes do caso A (17 ACH), foi selecionado para avaliar a proporcionalidade de variações do teste, e produzir um parâmetro de análise da qualidade da simulação numérica. Estas simulações foram realizadas no modo isotérmico, a uma temperatura constante de $22 \square C$, e características gerais conforme a Tabela 2:

Tabela 2 – Condições operacionais do laboratório em cada caso testado

Dados gerais	Caso A	Caso B	Caso C
ACH (Air changes per hour)	17	15	9
Vazão de ar de insuflação (L/s)	323	285	172
Vazão de infiltração pela porta (L/s)	47	47	47
Vazão de exaustão geral (L/s)	370	332	219

Fonte: os autores.

2.4 Modelagem do contaminante

Este trabalho focou no transporte de agentes infecciosos associados ao núcleo residual de gotículas (*droplet nuclei*), aerossolizadas a partir de amostras de laboratório. Procedimentos e operações laboratoriais são fontes comprovadas de aerossóis respiráveis (CDC e NIH, 2007), ordem de diâmetro de 1 µm (ASHRAE, 2013), sendo a provável fonte de muitas IAFs (CDC e NIH, 2007). O estudo experimental sobre estas partículas de KENNY e SABEL (1968), citado pelo CDC e NIH (2007), demonstrou que os diâmetros das partículas geradas estavam nas ordens de 1 µm e 10 µm. Um estudo semelhante foi realizado por BENNETT e PARKS (2006), demonstrando que diversos acidentes podem gerar partículas da ordem de 1 µm. Com base nisso, as premissas de modelagem deste trabalho envolvem partículas monodispersas com um diâmetro aerodinâmico de 1 µm, geradas no interior da CSB, como contaminante de interesse. Este diâmetro está compreendido na faixa associada ao modo de acumulação e à transmissão de doenças infecciosas respiratórias (ASHRAE, 2017; MEMARZADEH, 2013), também sendo consistente com o tamanho dos agentes patogênicos que estão implicados nas IAFs mais reportadas (SEWELL, 2006). Para esta classe de partículas, a ação gravitacional e deposição podem ser desprezados (WANG *et al.*, 2012). Os resultados experimentais de YIN *et al.* (2009) mostraram pouca diferença na eficácia da ventilação, quando o contaminante foi modelado como gás marcador (SF₆) e partículas de 1 a 3 µm. OLANDER *et al.* (2001) e WANG *et al.* (2012) mencionam que o modelo Euleriano é adequado para modelar partículas no modo de acumulação, no qual a ação gravitacional e a deposição de partículas podem ser desprezados. Assim, para avaliação do desempenho de contenção, o contaminante foi modelado como um gás marcador (SF₆, hexafluoreto de enxofre). Nos cenários testados, uma fonte de contaminante foi gerada no interior da CSB, dimensionada para garantir uma fração mássica de 1% de SF₆.

2.5 Fatores de contenção

A capacidade de contenção da CSB foi quantificada principalmente por meio do fator de vazamento da cabine (SLF, *sash leakage factor*), adotando metodologia semelhante à de MEMARZADEH (1996). Este fator é calculado pela razão entre a vazão de vazamento da cabine e a taxa de geração de contaminantes. A integração da equação de conservação de espécies em um volume de controle limitado pelas paredes, teto e piso, entradas e saídas de ar do laboratório e da CSB, produz, em conjunto com as condições de contorno, a seguinte equação:

$$\int_{GE} (\rho \tilde{u} \chi_c) \cdot \tilde{n} dS + \int_{SASH} (\rho \tilde{u} \chi_c) \cdot \tilde{n} dS = \int_{SASH} (\Gamma_c \nabla \chi_c) \cdot \tilde{n} dS \quad (1)$$

Onde \tilde{u} é velocidade, χ_c a fração mássica de SF₆, ρ massa específica, Γ_c é a difusividade equivalente de massa de contaminante (molecular +

turbulenta), SASH é a superfície de controle da abertura da janela da CSB e GE a superfície de controle da exaustão geral do laboratório. A integral do lado direito da equação produz a vazão mássica de vazamento de contaminante pela janela, $\dot{D}_{C,SASH}$, o parâmetro de interesse. Também foi avaliado o fator de proteção (PF, *protection factor*) que é usualmente adotado para analisar a eficácia de equipamentos de exaustão local (OLANDER *et al.*, 2001), sendo a razão entre a concentração de contaminante na exaustão do equipamento e na zona de respiração do operador. A zona de respiração do operador foi avaliada em um ponto localizado a uma distância de 0,15m da janela, e a uma altura de 1,20m do piso.

2.6 Modelagem matemática e numérica (CFD)

Neste estudo foi adotada a modelagem por meio das equações de Navier Stokes por média de Reynolds (RANS, *Reynolds Averaged Navier Stokes*) com um modelo de turbulência, dada a complexidade da descrição completa de um escoamento turbulento. Foi adotado o modelo RNG k- ϵ de YAKHOT e ORSZAG (1986), dado que este se provou consistente na simulação de problemas similares (ZHANG *et al.*, 2007; KAMEEL e KHALIL, 2003; ROUAUD e HAVET, 2002). As simulações numéricas foram conduzidas usando-se o código ANSYS FLUENT, versão 14.5, cujas principais características encontram-se na Tabela 3:

Tabela 3 – Características principais da modelagem matemática e numérica

descrição		característica
Método		Volumes finitos
Regime de escoamento		Permanente, incompressível
Acoplamento Pressão - velocidade		SIMPLE
Modelagem do transporte de contaminante		Modelo de mistura homogênea
Esquema de interpolação do Termo convectivo		Upwind 2ª ordem
Critério de convergência (erro residual máximo)	continuidade	10^{-4}
	quantidade de movimento	10^{-4}
	Variáveis turbulentas	10^{-4}
	energia	10^{-6}
	contaminante	10^{-6}
Critério de convergência (imbalace)		0,01%

Fonte: os autores.

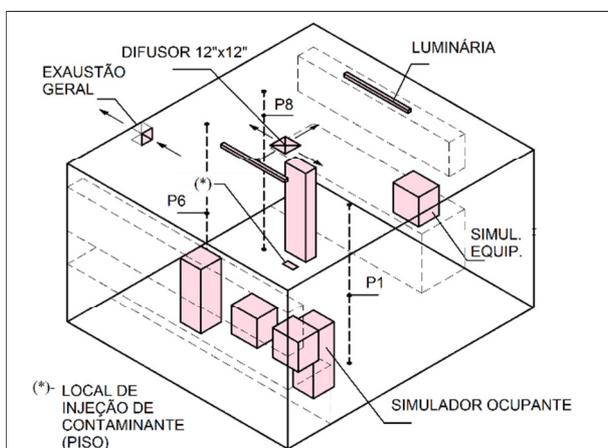
Para seleção da malha, foi realizado o teste de independência de malha, conforme a metodologia proposta por ROACHE (1994) e CELIK *et al.* (2008). Para o cálculo do vazamento através da abertura da janela da CSB, uma aproximação numérica das integrais foi conduzida, e a equação 1 se torna:

$$\dot{D}_{c,SASH} = \sum_{i=1}^n \rho u_i \chi_i A_i)_{GE} + \sum_{i=1}^n \rho u_i \chi_i A_i)_{SASH} \quad (2)$$

2.7 Validação do código CFD

Os estudos experimentais desenvolvidos por JIN *et al.* (2012), produziram dados úteis à validação de simulações de CFD voltadas ao transporte de contaminantes em aplicações laboratoriais. As medições foram conduzidas em uma câmara de testes, construída em escala real, de modo a representar a configuração típica de laboratórios de pesquisa, tal como ilustrado na Figura 2. O contaminante foi modelado por SF6 (hexafluoreto de enxofre).

Figura 2 – Configuração geral do caso 2 do benchmark de laboratório



Fonte: Os autores, Adaptado de JIN *et al.* (2012).

Para validação, o caso 2 foi modelado e as previsões numéricas da concentração do gás marcador e da eficácia da ventilação em pontos selecionados (P1, P6 e P8) foram comparadas com seus valores reais, medidos por JIN *et al.* (2012). Para avaliar a capacidade do código na previsão dos campos, a metodologia proposta por WANG e CHEN (2009) foi adotada.

3 RESULTADOS

3.1 Validações

Os resultados das validações encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados das validações

Resultado	Benchmark JIN <i>et al.</i> (2012)		Medições CSB
	\bar{c}_p SF6 (ppm)	$\bar{\xi}_p$	velocidade ($m \cdot s^{-1}$)
RMS dif.	17,2 %	19,2 %	15,7 %
Grau geral*	3,3	3,3	3,6

\bar{c}_p = concentração; $\bar{\xi}_p$ = eficácia de ventilação média; RMS dif=valor quadrático médio da diferença entre dados experimentais e resultados da simulação numérica; *de acordo com WANG e CHEN (2009): 3 = aceitável; 4 = bom;

Fonte: os autores.

3.2 Testes paramétricos

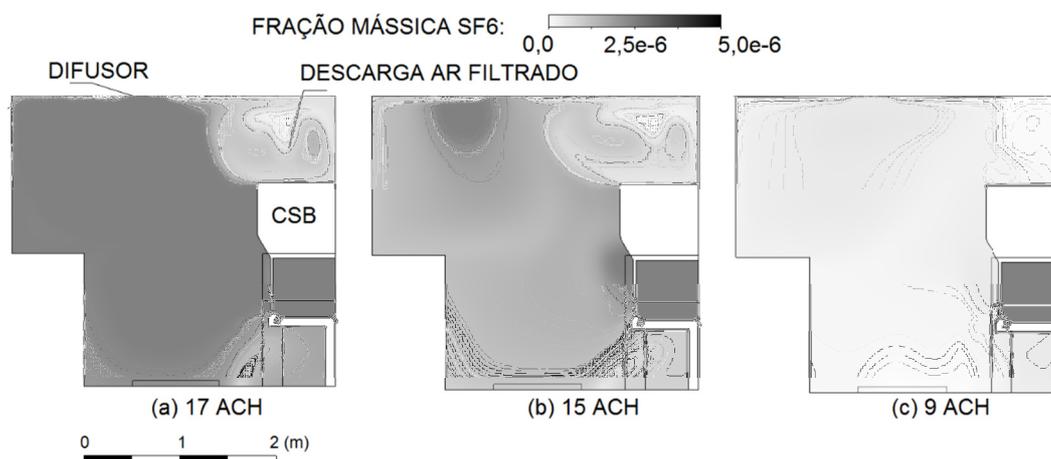
Os resultados dos testes paramétricos encontram-se na Tabela 5 e Figura 3.

Tabela 5 – Resultados dos testes paramétricos relativos à variação da taxa de ventilação e capacidade de contenção de contaminantes

Variáveis testadas	Parâmetro	Caso A	Caso B	Caso C	Diferença relativa A → B	Diferença relativa A → C
Independentes	Vazão de ar ($L \cdot s^{-1}$)	323	285	172	-11,8%	-46,7%
	[ACH]	[17]	[15]	[9]		
Dependentes	SLF	$4,04 \times 10^{-3}$	$3,56 \times 10^{-3}$	$2,82 \times 10^{-3}$	-11,9%	-30,2%
	PF	1268	1677	9421	32,3%	643,0%

SLF: fator de vazamento previsto pela simulação; PF: fator de proteção previsto pela simulação.

Figura 3 – Contaminação resultante de diferentes taxas de ventilação no plano transversal médio do laboratório ($x=3,3m$). (a) 17 ACH; (b) 15 ACH; (c) 9 ACH



Fonte: Os autores.

4 ANÁLISES

As simulações associadas envolvem complexidade inerente ao escoamento tridimensional em um domínio com geometria assimétrica e não trivial. A validação através do *benchmark* sobre laboratório de JIN *et al.* (2012), com complexidade similar, demonstrou que podem ser obtidos resultados aceitáveis sobre a aerodispersão de um contaminante em laboratórios através da modelagem com a técnica CFD. Os resultados dos testes

paramétricos demonstram que a capacidade da CSB na contenção dos contaminantes aerodispersóides gerados em seu interior apresenta uma correlação com a intensidade de turbulência do ar do laboratório aonde a mesma se encontra. Casos com maior valor médio da energia cinética turbulenta (TKE) também apresentaram um maior fator de vazamento de cabine (SLF, *sash leakage factor*). Conclusões similares sobre o papel da turbulência da sala na capacidade de contenção foram verificadas por MEMARZADEH (1996), em seu trabalho sobre a contenção de capelas de exaustão química. A ordem de grandeza da TKE prevista neste trabalho pertence à mesma ordem da TKE medida pela ASHRAE (2009) em seu benchmark de ventilação mecânica de ambientes, o que agrega credibilidade aos resultados. A análise qualitativa da Figura 3, e quantitativa dos resultados da Tabela 5, permitem verificar que a redução da taxa de ventilação produziu uma considerável redução do nível de contaminação da sala. A menor intensidade de turbulência associada produziu um menor vazamento de contaminantes no cenário com menor taxa de ventilação, se traduzindo em um menor nível de contaminação da mesma. Estes resultados demonstram que o uso de maiores taxas de ventilação não estará necessariamente associado a um aumento da segurança ocupacional, porque a maior intensidade de turbulência associada pode reduzir a capacidade de contenção da CSB.

5 CONCLUSÕES

A capacidade de contenção da CSB apresenta uma correlação com a intensidade de turbulência do laboratório aonde a mesma se encontra. O aumento da intensidade de turbulência produz a redução desta capacidade de contenção. O uso de maiores taxas de ventilação, em um laboratório com ventilação por mistura, não estará necessariamente relacionado a um aumento da segurança ocupacional, porque a maior intensidade de turbulência associada pode reduzir a capacidade da CSB na contenção dos contaminantes aerodispersóides gerados em seu interior. O uso de taxas de ventilação excessivas também produz um considerável impacto no consumo energético da edificação.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING ENGINEERS, HVAC Design Manual for Hospitals and Clinics, 2 ed., Atlanta, 2013.

_____. ASHRAE Position Document on Airborne Infectious Diseases, Atlanta, 2017. Disponível em: <https://www.ashrae.org/File%20Library/About/Position%20Documents/Airborne-Infectious-Diseases.pdf>.

BELL, G. C. Optimizing laboratory ventilation rates. Laboratories for The 21st Century Best Practice Guide.2008. Disponível em: http://www.labs21century.gov/toolkit/bp_guide.html

BENNETT, A., PARKS, S. Microbial Aerosol Generation During Laboratory Accidents and Subsequent Risk Assessment. *Journal of Applied Microbiology*, v. 100, p. 658-663, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2005.02798.x>

BOLASHIKOV, Z. D., MELIKOV, A. K., KIERAT, W., POPIOLEK, Z., BRAND, M. Exposure of health care workers and occupants to coughed airborne pathogens in a double-bed hospital patient room with overhead mixing ventilation. *HVAC&R Research*, v.18 n.4, p. 602-615, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10789669.2012.682692>

CAMPBELL, M. J. Characterizing Accidents, Exposures, and Laboratory-acquired Infections Reported to the National Institutes of Health's Office of Biotechnology Activities (NIH/OBA) Division Under the NIH Guidelines for Work with Recombinant DNA Materials from 1976-2010. *Applied Biosafety*, v. 20, n.1, p. 12-26, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/153567601502000103>.

CELIK, I. B., GHIA, U., ROACHE, P. J., FREITAS, C. J., COLEMAN, H. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. *ASME Journal of Fluids Engineering*, v.130, n.7, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.2910291>

CENTERS FOR DISEASE CONTROL-CDC, NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH- NIH, *Biosafety in Microbiological and Biomedical Laboratories*, 5 ed. Washington, 2007, United States Government Printing Office.

CHEN, C., ZHU, J., QU, Z., LIN, C. H., JIANG, J., CHEN, Q. Systematic study of person-to-person contaminant transport in mechanically ventilated spaces (RP-1458), *HVAC&R Research* v.20, p. 80-91, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10789669.2013.834778> .

DELUGA, G. F., *Designing Laboratory Ventilation*. In: Richmond, J., Y., (Ed.), *Designing Modern Microbiological / Biomedical Labs*, chapter 8, Washington, American Public Health Association, 1997.

DI BERARDINIS, L. J., BAUM, J. S., FIRST, M. W., GATWOOD, G. T., SETH, A. K. *Guidelines for Laboratory Design: Health, Safety, and Environmental Considerations*, 4. Ed. New Jersey, John Wiley & Sons Inc, 2013.

FAULKNER W. B., MEMARZADEH F., RISKOWSKI, G., HAMILTON K., CHANG, C. J., CHANG, J. R. Particulate concentrations within a reduced-scale room operated at various air exchanges rates. *Building and Environment*, v. 65, p. 71-80, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.023>

GROSSKOPF, K. R., HERSTEIN, K. R. The aerodynamic behavior of respiratory aerosols within a general patient room. *HVAC&R Research*, v.18, n.4, p. 709-722, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10789669.2011.587586>

JIN, M., MEMARZADEH, F., LEE, K., CHEN, Q. Experimental Study of Ventilation Performance in Laboratories with Chemical Spill. *Building and Environment*, v.57, p. 327-335, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.04.022>

CONBRAVA 2019 – São Paulo Expo, 10 a 13 de Setembro de 2019 - São Paulo, Brasil

KAMEEL, R., KHALIL, E. The Prediction of Airflow Regimes in Surgical Operation Theatres: A Comparison of Different Turbulence Models. AIAA-2003-859, Reston, The American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.2514/6.2003-859>

KENNY, M. T., SABEL, F. L. Particle Size Distribution of *Serratia Marcescens* Aerosol Created During Common Laboratory Procedures and Simulated Laboratory Accidents. Applied Microbiology, v.16, p. 1146-1150, 1968.

KUPSKAY, B. Risk assessment for enteric pathogens in the biosafety level 2 laboratory. Applied Biosafety, v.7, n.3, p. 120-132, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/153567600200700303>.

LI, Y., TANG, J., NOAKES, C., HODGSON, M. J. Engineering control of respiratory infection and low-energy design of healthcare facilities. Science and Technology for the Built Environment, v.21, n.1, p. 25-34, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10789669.2014.965557>.

MEMARZADEH, F., Methodology for Optimization of Laboratory Hood Containment, Bethesda, ORF Publication, 1996. Disponível em: <https://www.orf.od.nih.gov/PoliciesAndGuidelines/Bioenvironmental/Pages/toc.aspx>

MEMARZADEH, F. Effect of reducing ventilation rate on indoor air quality and energy cost in laboratories. J. Chem. Health Saf. v.16, n.5, p. 20-26, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jchas.2009.03.014>.

MEMARZADEH, F., XU, W. Role of air changes per hour (ACH) in possible transmission of airborne infections. Building Simulation v.5, p. 15-28, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12273-011-0053-4>

MEMARZADEH, F. Literature Review: Room Ventilation and Airborne Disease Transmission, American Society for Healthcare Engineering & Facility Guideline Institute, Chicago, 2013.

NAZAROFF, W.W. Indoor Particle Dynamics. Indoor Air, v.14, n.7, p. 175-183, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00286.x>.

NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH- NIH, NIH Design Requirements Manual, Bethesda, Division of Technical Resources, 2016. Disponível em: <https://www.orf.od.nih.gov/PoliciesAndGuidelines/BiomedicalandAnimalResearchFacilitiesDesignPoliciesandGuidelines/Pages/DesignRequirementsManual2016.aspx>.

NSF-National Sanitation Foundation / ANSI-American National Standards Institute, Biosafety Cabinetry: Design, Construction, Performance, and Field Certification. Standard 49, 2009.

OLANDER, L., WELLING, I., FLETCHER, B., Local Ventilation: Evaluation of Local Ventilation Systems. In: Goodfellow, H., Tähti, E., (Ed.), Industrial Ventilation Design Guidebook, chapter 14, San Diego, Academic Press, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-289676-7.x5000-0>

PANTELIC, J., THAM, K. W. Assessment of the mixing air delivery system ability to protect occupants from the airborne infectious disease transmission using Wells-Riley approach. HVAC&R Research v.18 n. 4, p. 562-574, 2012.

PANTELIC, J., THAM, K. W. Adequacy of air change rate as the sole indicator of an air distribution system's effectiveness to mitigate airborne infectious disease transmission caused by a cough release in the room with overhead mixing ventilation: a case study. HVAC&R Research, v.19, n.8, p. 947-961, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10789669.2013.842447>

ROACHE, P.J. Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies. ASME Journal of Fluids Engineering, v.116, n. 3, p. 405-413, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.2910291>

ROUAUD, O., HAVET, M. Computation of the Airflow in a Pilot Scale Clean Room Using k- ϵ Turbulence Models. International Journal of Refrigeration, v. 25, n. 3, p. 351-361, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0140-7007\(01\)00014-7](https://doi.org/10.1016/s0140-7007(01)00014-7)

ROY, C. J., MILTON, D. K. Airborne Transmission of Communicable Infection – The Elusive Pathway, New England Journal of Medicine, v. 350, n.17, p. 1710-1712, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1056/NEJMp048051>.

SEWELL, D. L. Laboratory acquired infections: are microbiologists at risk? Clinical Microbiology Newsletter, v. 28, n.1, p. 1-6, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clinmicnews.2005.12.004>.

WANG, M., CHEN, Q. Assessment of Various Turbulence Models for Transitional Flows in an Enclosed Environment (RP-1271). HVAC&R Research, v.15, n.6, p. 1099-1119, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10789669.2009.10390881>

WANG, M., LIN, C.H., CHEN, Q. Advanced Turbulence Models for Predicting Particle Transport in Enclosed Environments. Building & Environment, v. 47, p. 40-49, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.018>

WORLD HEALTH ORGANIZATION-WHO, Laboratory biosafety manual, 3. ed. Geneva, 2004. ISBN 92 4 154650 6.

YAKHOT, V., ORSZAG, S. A. Renormalization Group Analysis of Turbulence. Journal of Scientific Computing, v. 1, p. 3-51, 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/bf01061452>

YIN, Y., XU, W., GUPTA, J. K., GUILTY, A., MARMION, P., MANNING, A., GULICK, B., ZHANG, X., CHEN, Q. Experimental Study on Displacement and Mixing Ventilation Systems for a Patient Ward. HVAC&R Research, v.15, n.6, p. 1175-1191, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10789669.2009.10390885>

ZHANG, Z., ZHANG, W., ZHAI, Z. J., CHEN, Q. Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environments by CFD: Part 2 – Comparison with Experimental Data from Literature. HVAC&R Research, v.13, n.6, p. 871-886, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10789669.2007.10391460>

CONBRAVA 2019 – São Paulo Expo, 10 a 13 de Setembro de 2019 - São Paulo, Brasil

ZHAO, B., WU, J. Particle Deposition in Indoor Environments: Analysis of Influencing Factors. *Journal of Hazardous Materials*, v.147, p. 439-448, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.032> .