

AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO EM UMA SALA DE JOGOS ATRAVÉS DA DINÂMICA DOS
FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Tanit Daniel Jodar Vecina – jodar.vecina@ufrgs.br

Leonardo Brito Kothe – leonardo.kothe@ufrgs.br

Rafael Koelling Radtke – rafael.radtke@ufrgs.br

José Leandro Rosales Luz – jluz@mecanica.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica

A1 – Aplicações para Conforto

Resumo. *O presente artigo apresenta uma avaliação do conforto térmico em uma sala de jogos através da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). O projeto de sistema de ar condicionado para uma sala de jogos foi realizado seguindo a normativa ABNT NBR16401-1:2008. As simulações numéricas são realizadas com o software ANSYS Fluent utilizando o Método dos Volumes Finitos. As soluções numéricas são resolvidas através da equação da energia, equação da continuidade, das equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS) e pelo modelo de turbulência $k-\omega$ SST. Resultados demonstram o comportamento do escoamento de ar, assim como as velocidades, temperaturas e umidade. Com os resultados obtidos através da simulação numérica é avaliado o conforto térmico segundo a normativa ASHRAE Standard 55-2017, demonstrando que mesmo com um dimensionamento correto segundo a NBR 16401, existem regiões que não cumprem os requisitos de conforto térmico para pessoas.*

Palavras-chave: HVAC, CFD, NBR 16401, Conforto térmico.

1. INTRODUÇÃO

Na atualidade, os sistemas de HVAC das instalações têm um peso muito grande no consumo de energia (segundo o Green Building Council Brasil, 2007, entre 40% e 60% do consumo de energia em uma edificação está relacionado ao sistema de climatização). Assim, existe a necessidade de realizar projetos e sistemas que visem à redução do consumo elétrico e, portanto, da eficiência energética, como visam as orientações para obter-se a certificação LEED, mas não em detrimento das condições de conforto térmico.

O conforto térmico é o estado mental que expressa satisfação das pessoas com o ambiente térmico circunjacente. Segundo a normativa NBR16401-2, os parâmetros ambientais que afetam o conforto térmico são: a temperatura operativa, a velocidade do ar, a umidade relativa do ar o tipo de roupas usado pelas pessoas e o nível de atividade física das pessoas. Para prover tais condições de temperatura, velocidade e umidade existem as instalações de ar condicionado, que no Brasil seguem a Norma Brasileira 16401 para projeto das instalações, conforto térmico e qualidade do ar.

Em vista da importância da sensação térmica de conforto para realizar quaisquer atividades físicas dentro de um recinto fechado, este artigo tem como objetivo principal avaliar o conforto térmico provido por um projeto de instalação de ar condicionado através da Dinâmica dos Fluidos Computacional, que resolve com precisão as equações que governam todos os processos físico-químicos envolvidos.

Awbi, 1989, foi um dos primeiros autores a realizar estudos de CFD aplicados à ventilação. Nos anos 90 também surgiram vários estudos para validar esta metodologia, Baker e Kelso (1990), Said *et al.* (1995), e também para avaliar a qualidade do ar, Roy e Baker (1994). Também existem estudos mais recentes que avaliam as condições térmicas em ambientes mais críticos, como hospitais, Balaras *et al.* (2007), abatedouros frigoríficos, cozinhas industriais e outras edificações, Wang e Zhai (2016). Em paralelo ao avanço das tecnologias também foram avançando as pesquisas no ramo de HVAC, Abanto *et al.* (2004), bem como os métodos de solução, a adição de condições de contorno mais próximas a realidade, a complexidade das geometrias a serem estudadas e o nível de detalhamento da visualização dos resultados das simulações, como trata de mostrar este artigo.

2. PROJETO DE AR-CONDICIONADO

O projeto de ar-condicionado da instalação consta de um sistema com capacidade nominal total de 70 TR, sendo utilizados 2 condicionadores de ar tipo *multisplit* com vazão de 10.800 m³/h, cada, e 2 condicionadores de ar tipo *multisplit* com vazão de 11.600 m³/h, cada, com condensadora de descarga horizontal. O número total de usuários que podem ocupar a sala em questão é de 623 pessoas sentadas. O sistema de insuflamento de ar está composto por difusores retangulares série ADQ da TROX e as características são especificadas na Tabela 1.

Tabela 1. Sistema de insuflamento de ar.

| Região | Nº Difusores (área unitária [m ²]) | Vazão unitária [m ³ /h] |
|---------------------------------|--|------------------------------------|
| Térreo (região central) | 16 (0,36 m ²) | 1.100 |
| Térreo (região lateral direita) | 8 (0,15 m ²) | 1.400 |
| Térreo (região inferior) | 8 (0,15 m ²) | 1.400 |
| Mezanino | 8 (0,15 m ²) | 600 |

O sistema de exaustão conta com 6 grelhas de 1,0 x 0,5 m na região do andar térreo e 2 grelhas das mesmas dimensões para o mezanino e vazão total de 44.800 m³/h.

A seguir são apresentadas as plantas do andar térreo, Figura 1 e as plantas do mezanino, Figura 2. As imagens também mostram as tubulações e o sistema de ar-condicionado. As dimensões principais do andar térreo são 28,7 x 28,9 x 7,6 m e as dimensões do mezanino são 7,1 x 19,8 x 3,9 m.

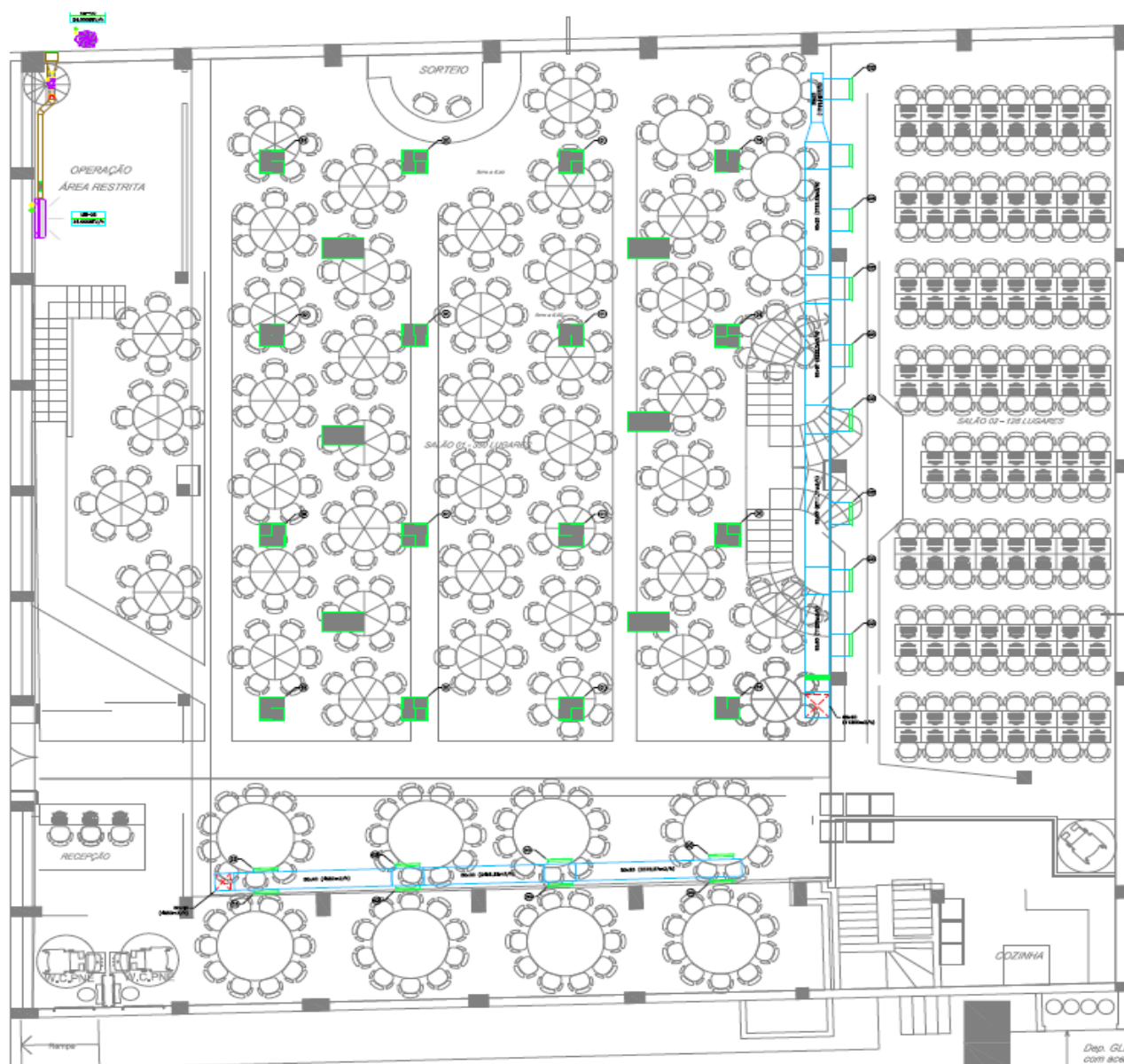


Figura 1. Planta baixa da sala de jogos com o sistema de ar-condicionado desenhado.

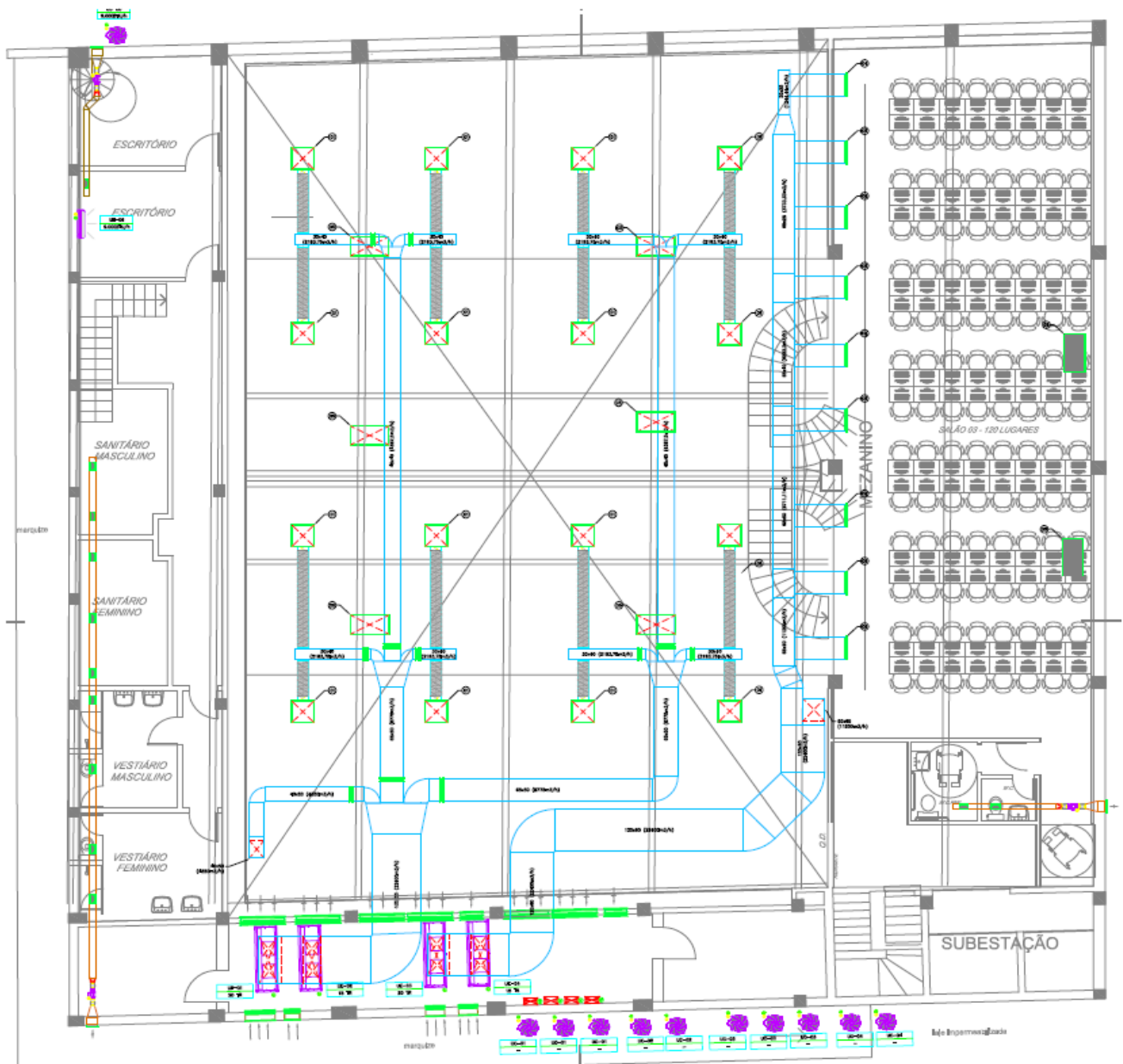


Figura 2. Planta mezanino da sala de jogos com o sistema de ar-condicionado desenhado.

2.1 Estimativa da carga térmica

Para o cálculo da carga térmica das pessoas foi considerado que uma pessoa adulta de 70 kg produz aproximadamente 150 W de potência térmica. Sendo que a área total é de 970 m² e o espaço é ocupado por 623 pessoas, temos uma produção de aproximadamente 96 W/m². As cargas térmicas das paredes, teto e equipamentos foram estimadas em 40 W/m².

3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

3.1 Metodologia numérica

Para a solução numérica dos ventiladores centrífugos é utilizado o *software* comercial *Fluent/Ansys* que trabalha com o método de Volumes Finitos. Este método utiliza a forma integral das equações de conservação como ponto de partida (Ferziger *et al.*, 2002). Seu princípio de funcionamento se dá pela subdivisão do domínio da solução em um número finito de volumes de controle adjacentes, onde para cada volume de controle são aplicadas as equações de conservação. Assim, obtém-se uma equação algébrica para cada volume de controle que é resolvida de forma iterativa para cada volume (Patankar, 1980; Maliska, 2004). As equações de conservação de massa e quantidade de movimento

linear são resolvidas por meio das equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS), como pode ser visto em (Wilcox, 1998).

De modo a resolver problemas de fechamento decorrentes da utilização da metodologia RANS, modelos de turbulência foram criados e estudados, sendo largamente empregados os modelos baseados na aproximação de Boussinesq, que introduziu o conceito de viscosidade turbulenta (μ_t), propondo relacionar a turbulência com o escoamento médio para fechar o sistema de equações (Wilcox, 1998). Para o presente trabalho, optou-se pela utilização do modelo de turbulência $k-\omega$ SST, modelo que é uma mistura entre os modelos $k-\epsilon$ e $k-\omega$. Segundo Menter *et al.*, 2003, a formulação é baseada em funções de misturas, a qual garante uma seleção adequada dos modelos $k-\epsilon$ e $k-\omega$ de acordo com a região de trabalho, sem a iteração do usuário.

3.2 Modelagem em 3D

O primeiro passo para a realização de uma simulação computacional é a criação do modelo computacional, ou seja, a geometria em 3D do domínio a ser estudado. No presente estudo foi modelado computacionalmente através do *SolidWorks* todo o interior da sala. As dimensões foram extraídas das plantas apresentadas anteriormente.

3.3 Criação e análise de qualidade da malha

A malha criada é dividida em dois domínios, sendo um criado para todo o volume interior do recinto em que será avaliado o conforto térmico e outro para o sistema de dutos, grelhas e difusores. Através da condição de interface as malhas são unidas para a realização das simulações. Detalhes da malha criada no interior do recinto podem ser vistos na Figura 3a e Figura 3b, que mostra o sistema de insuflamento e exaustão de ar e um plano de corte.

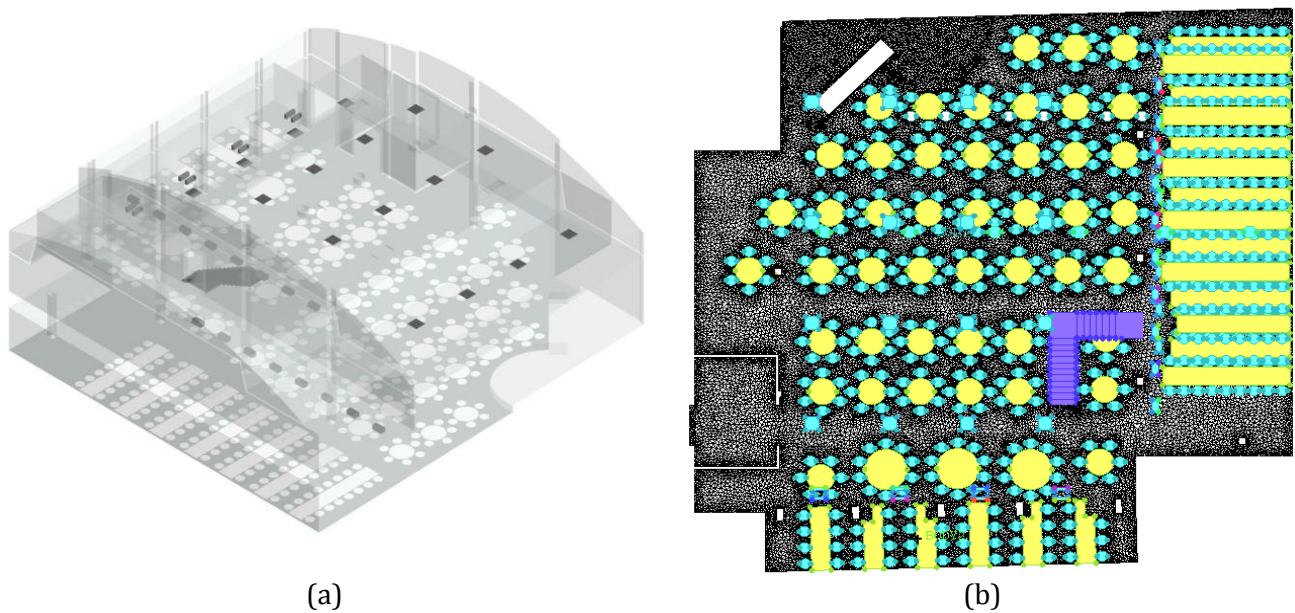


Figura 3. (a) Domínio 3D e (b) Detalhe da malha em uma vista superior.

Para a análise de qualidade de malha, são comparadas três malhas de diferentes tamanhos, onde são mantidos fixos o número de volumes no sistema de ventilação e exaustão e alterados os elementos no interior do volume da sala. Com isso, são feitas simulações em regime permanente para comparar parâmetros como a média de velocidade do escoamento em um ponto central da sala, onde a intensidade de turbulência é menor a 20%. Os resultados obtidos estão representados na Tab. 1.

Tabela 2. Análise da qualidade dos resultados para seleção da malha.

| Malha | Nº Elementos | v [m/s] | Δv [%] |
|-------|--------------|---------|----------------|
| M1 | 7.881.258 | 0,67 | - |
| M2 | 11.586.712 | 0,55 | 22% |
| M3 | 14.718.377 | 0,52 | 5% |

Nas três malhas analisadas os resultados de velocidade apenas diferem 0,15 m/s entre a malha mais refinada e a mais grosseira. A diferença percentual entre M1 e M2 é de 22%, portanto, descartou-se o uso da M1. Entre a malha M2 e M3 o resultado de velocidade apresenta uma diferença percentual de 5%, assim, qualquer das duas malhas garante a precisão nos resultados. Finalmente decidiu-se utilizar a M3 devido ao custo computacional ser semelhante a M2 e a resolução dos resultados ser superior.

3.4 Condições de contorno

As condições de contorno utilizadas são de vazão e temperatura prescritas na entrada dos dutos de insuflamento e pressão atmosférica nas grelhas de saída. Nas paredes são consideradas condições de não deslizamento, de modo a captar os efeitos viscosos do ar. As simulações são realizadas em regime permanente. A Tabela 3 apresenta um resumo das condições de contorno em cada região do domínio.

Tabela 3. Condições de contorno da simulação numérica.

| Região | Condição térmica |
|------------------|---------------------|
| Piso | 40 W/m ² |
| Paredes laterais | 40 W/m ² |
| Teto | 40 W/m ² |
| Pessoas | 92 W/m ² |
| Difusores | 12 °C |
| Grelhas | Exaustão livre |

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados numéricos

A simulação numérica é realizada para uma edificação submetida a diferentes tipos de cargas térmicas e com uma série de equipamentos de HVAC. Serão apresentados os comportamentos de temperatura e velocidade do ar para diferentes planos. A Figura 4 mostra o campo de velocidades em dois planos distintos.

Um plano a 1 m de altura é escolhido para uma análise do comportamento de temperatura e velocidade do escoamento. Na Figura 5 é possível visualizar uma variação de temperatura entre 10 e 30°C. É possível ver a influência da condição térmica das pessoas no ambiente, sendo que a variação de temperatura se encontra de modo geral entre 20 e 30°C.

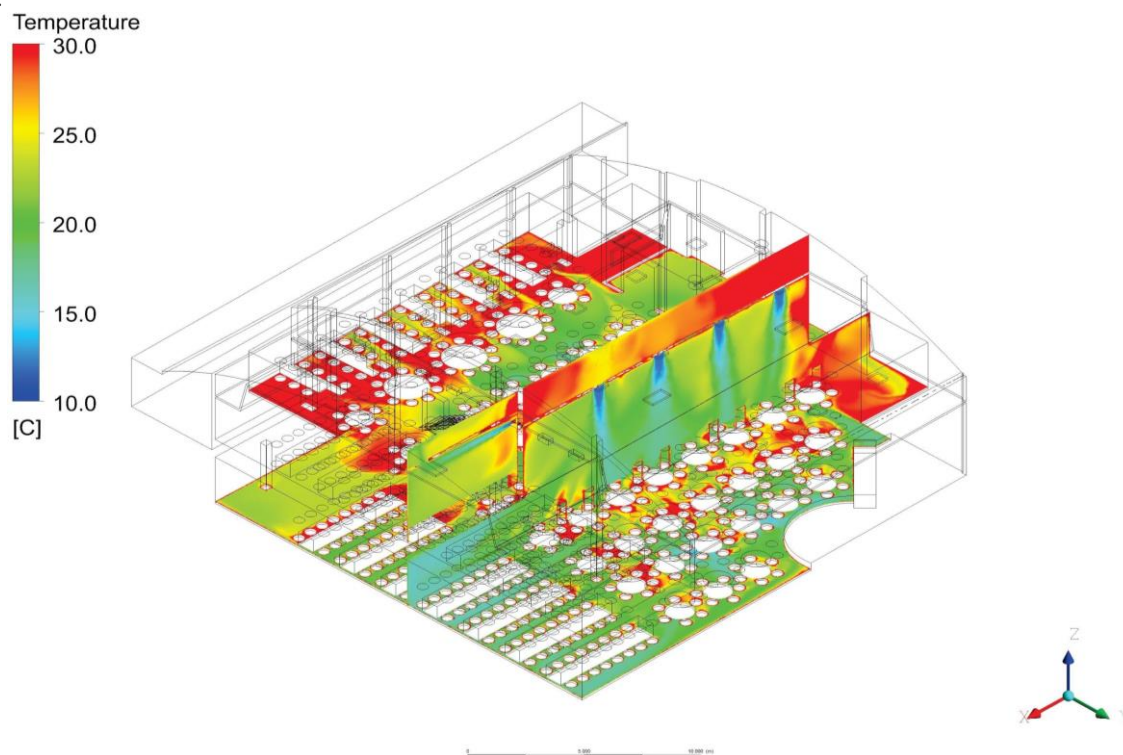


Figura 4. Campo de temperaturas no plano horizontal a 1,0 m do piso e no plano vertical no centro da sala.

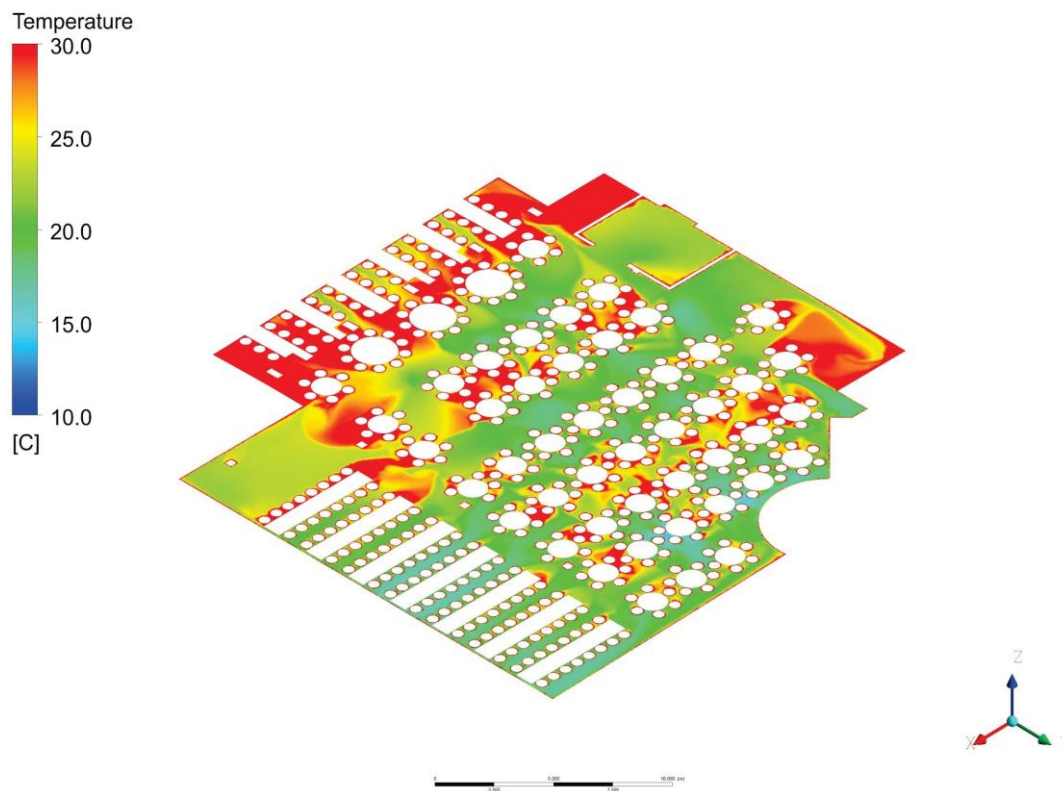


Figura 5. Campo de temperaturas em um plano horizontal a 1,0 m do piso.

Na Figura 6 é possível visualizar as linhas de corrente das temperaturas a partir da boca de insuflamento dos aparelhos HVAC. É possível observar a crescente variação de temperatura conforme a interação com o ambiente.

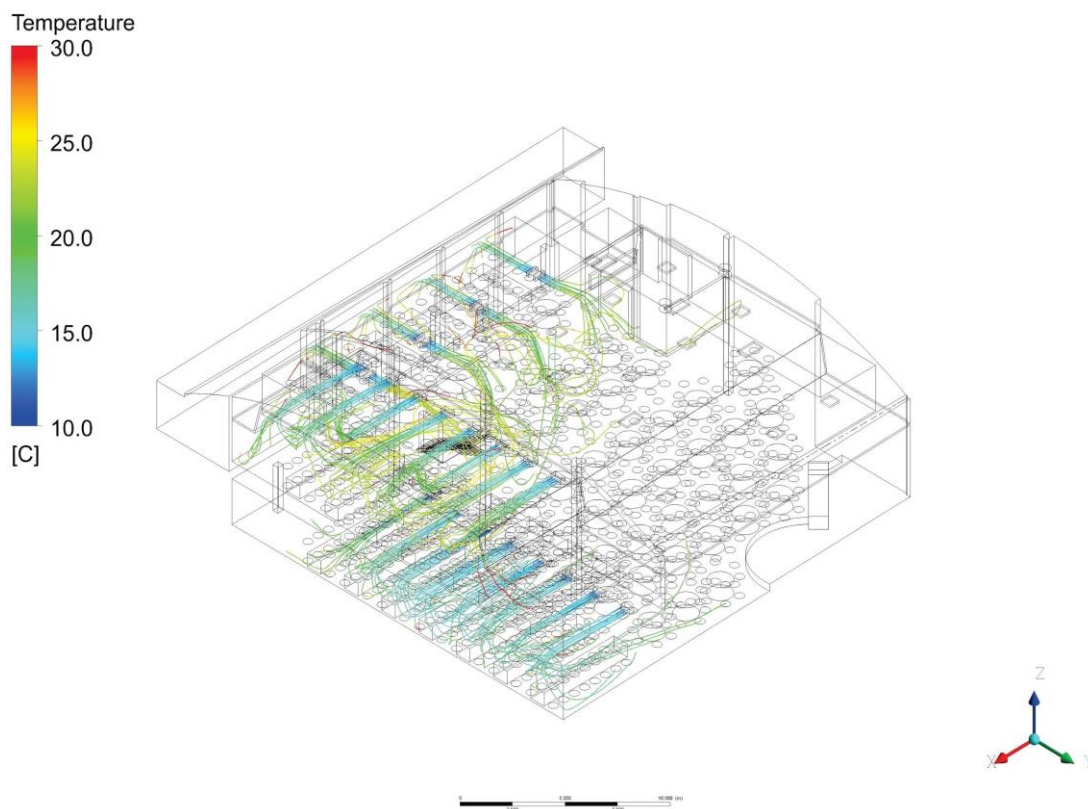


Figura 6. Linhas de corrente de temperaturas saindo dos aparelhos HVAC.

Na Figura 7 é possível visualizar um plano de corte horizontal a 1 m do chão, onde ocorre uma variação de velocidades na faixa de 0 e 1 m/s. É possível verificar uma região com velocidades superiores às demais (em torno de 1 m/s) entre as mesas retangulares, onde há uniformidade na temperatura (em uma média de 18°C – Figura 5).

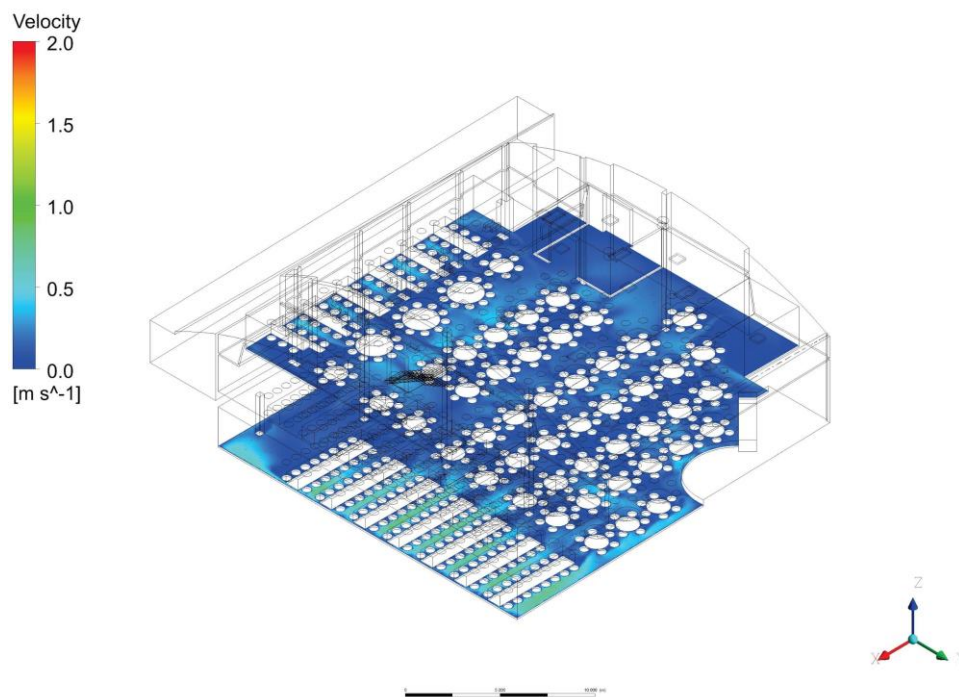


Figura 7. Campo de velocidades em um plano horizontal a 1,0 m do chão.

Na Figura 8 é possível visualizar um plano de corte vertical na região central do ambiente estudado onde ocorre uma variação de velocidades na faixa de 0 a 2 m/s. Uma maior velocidade é vista na região de exaustão.

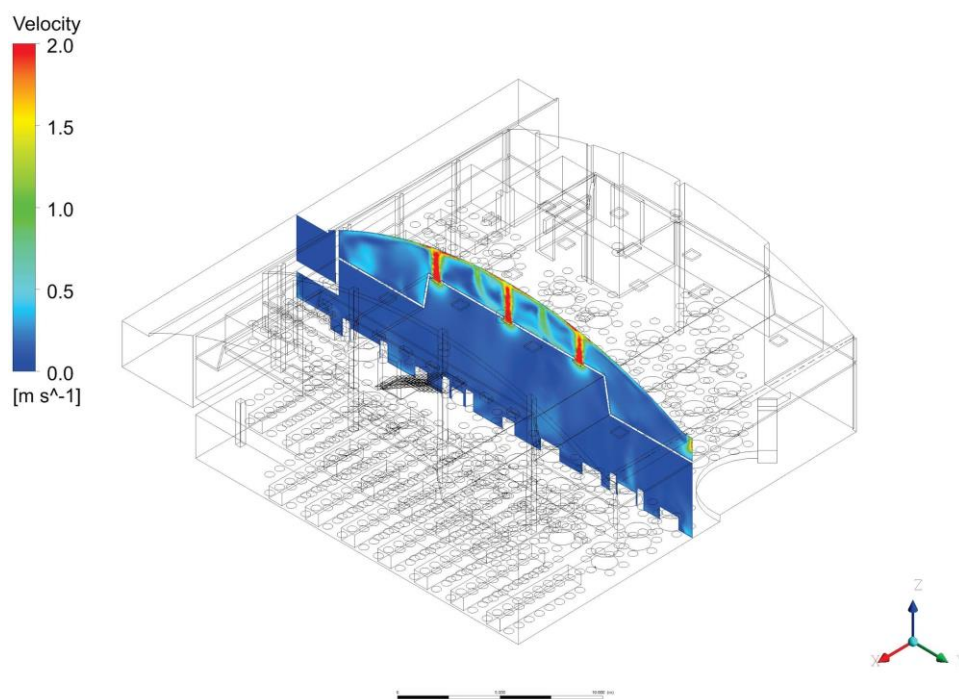


Figura 8. Campo de velocidades em um plano vertical no interior da sala.

A Figura 9 mostra as linhas de corrente de velocidades, a partir dos equipamentos de HVAC. É possível notar o decréscimo de velocidades ao longo do trajeto.

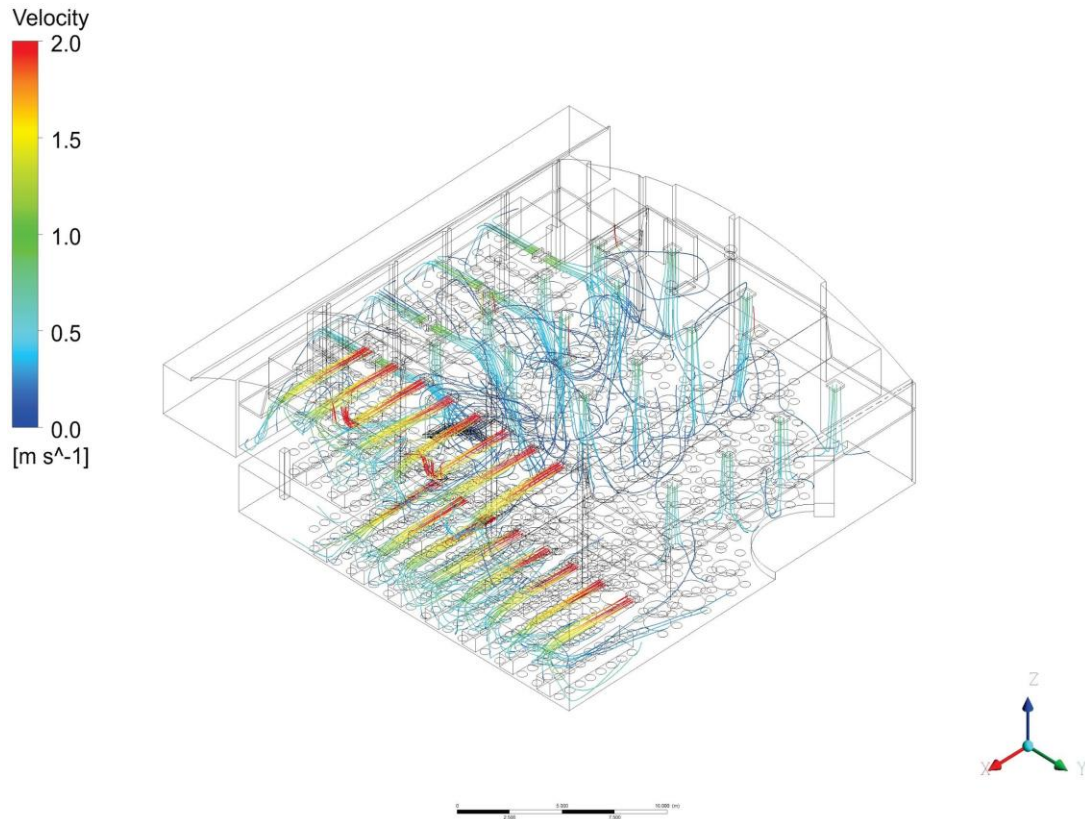


Figura 9. Linhas de corrente de velocidades saindo dos aparelhos HVAC.

Os resultados médios obtidos através das simulações computacionais foram aplicados ao software de análise de conforto térmico da universidade de Berkeley que utiliza os parâmetros de temperatura operativa, velocidade do ar, umidade, taxa metabólica e vestimenta utilizada para avaliar o cumprimento na normativa ASHRAE 55-2017, como mostra a Figura 10.

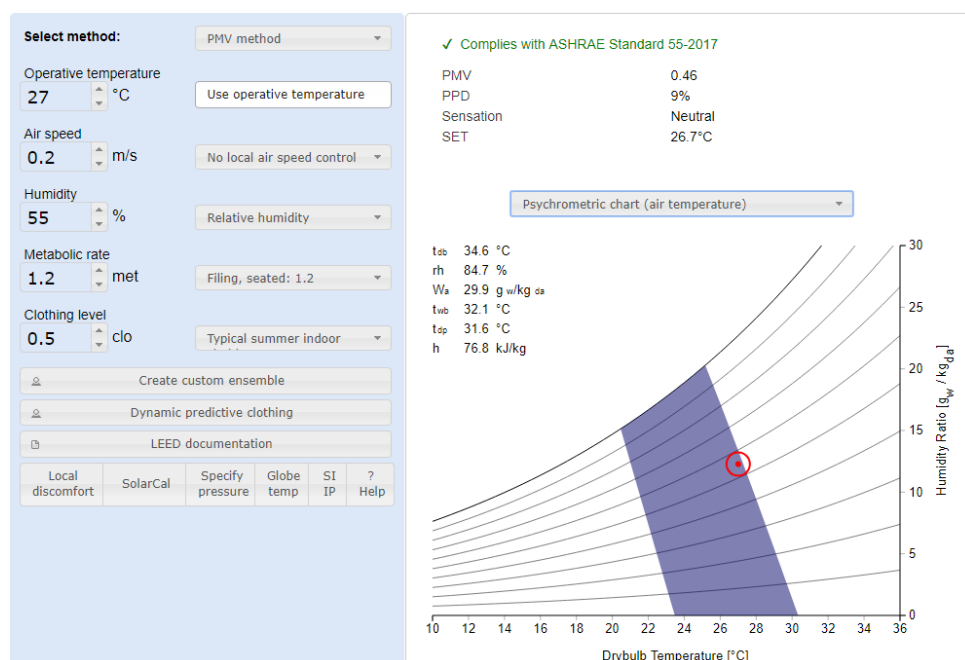


Figura 10. Gráfico com os resultados de conforto térmico.

Os resultados médios, na altura de 1m, de velocidade do ar e temperatura são utilizados para avaliar se os quesitos de conforto térmico são cumpridos. O resultado aponta uma condição de conforto térmico neutra. Devem-se analisar cuidadosamente esses resultados, uma vez que nas imagens anteriores podem-se visualizar regiões com temperaturas próximas a 30°C e velocidades do ar nulas. Assim, o conforto térmico não deve ser avaliado utilizando-se apenas uma média da velocidade e da temperatura, mas deve ser verificado para diversas regiões dentro do mesmo recinto. Considerando-se o comportamento não homogêneo das temperaturas e velocidades do ar para esse caso, conforme demonstraram os resultados das simulações, pode-se concluir que não existe conforto térmico.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma análise numérica sobre o comportamento e a influência no funcionamento de aparelhos HVAC em um ambiente com lotação máxima. Com isso, é possível visualizar e buscar soluções para melhorias nas instalações, tudo isso com o auxílio de uma ferramenta de CFD.

As simulações apresentaram resultados referentes à distribuição velocidades e temperaturas dentro do ambiente, sendo possível visualizar uma distribuição não uniforme de temperaturas no ambiente, com zonas de temperaturas mais elevadas (30°C) e zonas de baixas temperaturas (18°C). Os campos de velocidades demonstraram que existem regiões com velocidades próximas de 0 m/s o que ocasiona uma distribuição do ar pobre com baixa remoção de ar poluído. As imagens dos resultados mostram que apenas existem regiões com velocidades corretas para o conforto térmico (1 m/s).

Com o dimensionamento do sistema de HVAC seguindo as normativas vigentes, o conforto térmico é atingido apenas quando se considera as médias de velocidades e temperaturas. Porém, as simulações computacionais demonstram que a distribuição dos equipamentos de ar condicionado, grelhas e difusores afetam a distribuição de velocidades e temperaturas no recinto e, portanto, o conforto térmico.

Tais problemas podem ser analisados com precisão através de CFD e podem ser mitigados com uma nova distribuição ou substituição de alguns equipamentos. Também se demonstra que o conforto térmico não deve ser avaliado como um todo, senão, como microrregiões dentro de um grande recinto, para garantir que todo lugar a ser ocupado pelo usuário possuirá condições térmicas satisfatórias para o desenvolvimento das atividades pertinentes.

6 REFERÊNCIAS

- Abanto, J., Barrero, D., Reggio, M., Ozella, B. **Airflow modelling in a computer room. Building and Environment.** v. 39, p. 1393-1402, 2004.
- ASHRAE. 2010. **Thermal environmental conditions for human occupancy.** ANSI/ASHRAE *Standard* 55-2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários Parte 1: Projetos das instalações.** Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- AWBI, H. B. **Application of Computational Fluid Dynamics in Room Ventilation.** Building and Environment. v. 24, p. 73-84, 1989.
- Baker, A., Kelso, M. . **On validation of computational fluid dynamics procedures for room air motion prediction.** ASHRAE Transactions, 96 (1) (1990), pp. 760-774
- Balaras, C., Dascalaki, E., Gaglia, A.. **HVAC and indoor thermal conditions in hospital operating rooms.** Energy and Buildings. v. 39, p. 454-470, 2007.
- Ferziger, J.H., and M. Peric. **Computational Methods for Fluid Dynamics.** Springer, 3ª edition, 2002.
- Fox, R.W., P.J. Pritchard, and A.T. McDonald. **Introdução à Mecânica dos Fluidos.** LTC, 7ª Edição, 2010.
- Maliska, C. R.. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional.** LTC, 2ª Edição, 2004, Rio de Janeiro.
- Menter, F.R., M. Kuntz, and R. Langtry. **Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model,** Turbulence Heat and Mass Transfer, vol. 4, 2003.
- Patankar, S. V.. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flows.** McGraw-Hill, New York, 1980, USA.
- Roy, R.K.S., Baker, A.. **An efficient cfd algorithm for the prediction of contaminant dispersion in room air motion.** ASHRAE Transactions, 100 (2) (1994), pp. 980-987
- Said, N., Zhang, S., Christianson, S.C.Y.P. . **Computational fluid dynamics for hvac: successes and failures.** ASHRAE Transactions, 101 (1) (1995), pp. 1065-1077.
- Wang, H., Zhai, Z.. **Advances in building simulation and computational techniques: A review between 1987 and 2014.** Energy and Buildings. v. 128, p. 319-335, 2016.
- White, F. M.. **Fluid Mechanics.** Ed. McGraw-Hill, 4ª Edition, 1998.
- Wilcox, D. C. **Turbulence Modeling for CFD.** DCW Industries, Inc. 1998.

Abstract. *This paper presents an assessment of the thermal comfort in a gaming room through the use of Computational Fluid Dynamics (CFD). The air conditioning system for the room was designed according to the ABNT NBR 16401-1:2008 technical standard. The FVM-based ANSYS Fluent commercial code was used to run the numerical simulations, solving the RANS equations coupled to the SST k- ω turbulence model and the energy equation. Results for the air flow behaviour, as well as velocities, temperatures and humidity were collected, which were used to evaluate the thermal comfort in the room based on the ASHRAE Standard 55-2017. It is shown that, even though a correct dimensioning following the NBR 16401 standard was done, there are regions in the room that do not meet thermal comfort requirements for persons.*

Key words: *HVAC, CFD, NBR 16401, Thermal Comfort.*