

## **UTILIZAÇÃO DE CFD NA ANÁLISE DE EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL AO CALOR EM USINA TÉRMICA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Jorge E. Corrêa<sup>1</sup>, [jecorrea@ufpa.br](mailto:jecorrea@ufpa.br)  
Clóvis R. Maliska<sup>2</sup>, [maliska@sinmec.ufsc.br](mailto:maliska@sinmec.ufsc.br)

<sup>1</sup>Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Mecânica, LABCLIMA, CEP: 66.075-110.

<sup>2</sup>Universidade Federal da Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, SINMEC, CEP: 88.040-900.

**Resumo:** Neste artigo, analisa-se as condições de exposição ocupacional ao calor dos trabalhadores durante os serviços de manutenção no interior de um galpão onde estão instalados grupos geradores de uma usina termelétrica de geração de energia. Com os resultados das medições do IBUTG (Índice de Bulbo Úmido de Termômetro do Globo) estima-se o tempo de permanência no local de trabalho de acordo com a NR-15 [1] para identificar condições que ultrapassem o valor máximo permitido a fim de obter um diagnóstico do ambiente térmico. Análises preliminares indicam que com descanso em ambiente sem climatização o tempo de trabalho será de 19 minutos e o de descanso 41 minutos com metabolismo ponderado de 138 kcal/h (90 W/m<sup>2</sup>) e com descanso em ambiente climatizado o tempo de trabalho será de 42 minutos e o de descanso 18 minutos com metabolismo ponderado de 184 kcal/h (120 W/m<sup>2</sup>). Portanto, na situação em que o trabalhador descansa em ambiente climatizado o tempo de trabalho é 120 % maior. Utiliza-se o programa computacional Workbench ANSYS Versão 11.0 na construção dos modelos geométricos simplificados do galpão com seus equipamentos, geração de malhas e realização das simulações dos campos de velocidade relativa e temperatura do ar. Esses resultados permitem verificar se as modificações propostas para elevação do tempo de trabalho manterá as condições ambientais dentro dos limites preconizados nas normas que tratam da adequação do ambiente térmico à preservação da saúde dos trabalhadores.

**Palavras-chave:** CFD, Exposição Ocupacional ao Calor, Climatização.

### **1. INTRODUÇÃO**

Esta análise enfoca as condições de exposição ao calor de trabalhadores em serviços de manutenção no interior de um galpão onde estão instalados 04 (quatro) grupos geradores, fabricados pela WARTSILA (Finlandesa), modelo 18V46 (18 cilindros em V com turbocompressores), que produzem individualmente até 15 MW em 519 r.p.m. A Figura 1 mostra sua geometria simplificada com os grupos geradores. O galpão possui dimensões de 42 × 40 × 16 m de altura (na cumeeira). No plano médio ao longo de toda extensão do galpão, na direção transversal aos motores, existe um lanternim de duas águas onde por duas aberturas é realizada a descarga da ventilação. Na fachada Norte, existe duas portas de serviço que permanecem fechadas enquanto os grupos geradores estão em operação; o mesmo ocorre com a porta interna na fachada Oeste que permite o acesso dos trabalhadores à área de descanso. A ventilação, provida por oito ventiladores na fachada Norte e quinze ventiladores na fachada Sul, é direcionada aos corredores de serviço entre os grupos geradores, pois são locais que os trabalhadores ocupam com maior frequência durante os períodos de manutenção. Os geradores são ventilados por ar captado dentro do próprio galpão e sua descarga vertical é direcionada para o lanternim. Um centro de controle comanda as partidas e paradas das unidades geradoras e sincroniza a geração de energia elétrica com as cargas solicitadas pelos consumidores da rede pública.

### **2. AVALIAÇÃO DE EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL AO CALOR**

A avaliação da exposição ocupacional ao calor é regulamentada em [1] com procedimento técnico exposto em [2]. Em ambientes internos o IBUTG (Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo) usado para avaliar a exposição ocupacional ao calor é calculado pela seguinte relação:

$$IBUTG = 0,7T_{bn} + 0,3T_g \quad (1)$$

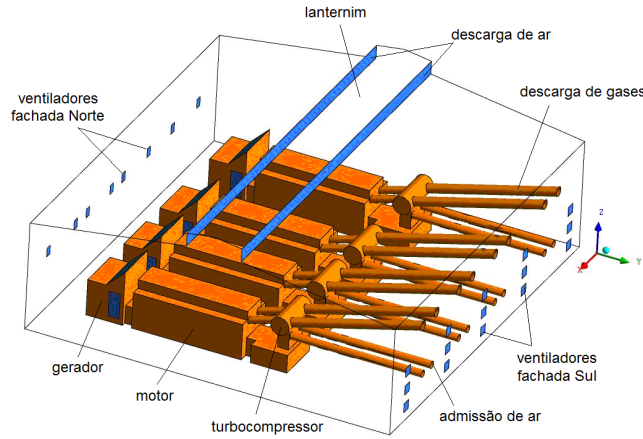


Figura 1. Geometria do galpão com os grupos geradores.

onde:  $T_{bn}$  = Temperatura de bulbo úmido natural do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_g$  = Temperatura de globo negro ( $^{\circ}\text{C}$ ).

As temperaturas de bulbo úmido natural e de globo negro dependem da temperatura, velocidade relativa e umidade relativa do ar e da temperatura radiante média. A temperatura radiante média  $T_{rm}$  é obtida por:

$$T_{rm} = \left[ (T_g + 273)^4 + 2,5 \times 10^8 \times V_{ar}^{0,6} (T_g - T_{ar}) \right]^{0,25} - 273 \quad (2)$$

onde:  $T_{ar}$  = Temperatura de bulbo seco do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );  $V_{ar}$  = Velocidade relativa do ar (m/s).

A energia produzida pelo metabolismo é liberada na forma de calor por convecção e radiação sob influência desses fatores ambientais. Outros dois fatores também interferem nessa liberação e devem ter sua influência avaliada: vestimenta e atividade exercida. A Tabela 1 apresenta as taxas metabólicas do trabalhador em função de sua atividade.

Segundo a legislação vigente os limites de tolerância para exposição ao calor em regime de trabalho intermitente são analisados segundo dois critérios distintos: (a) o trabalhador descansa no próprio local de trabalho; (b) o trabalhador descansa em outro local de trabalho. Entende-se por outro local de trabalho um ambiente com temperatura amena, climatizado ou não, onde o trabalhador somente descansa ou exerce atividade leve. No primeiro caso, os limites de tolerância ao calor que envolve a relação entre os intervalos de trabalho intermitente e o tipo de atividade são mostrados na Tabela 2. No segundo caso, os máximos permitidos são mostrados na Tabela 3 em função da taxa metabólica média do trabalhador. Os valores médios são ponderados para uma hora (60 minutos) de trabalho. Se neste intervalo de tempo o trabalhador está exposto a várias condições térmicas, sob diferentes taxas metabólicas, todas devem ser incluídas nos cálculos. A taxa metabólica média, é dada por:

$$\bar{M} = \frac{M_t t_t + M_d t_d}{60} \quad (3)$$

onde:  $M_t, M_d$  são as taxas metabólicas no local de trabalho e no local de descanso (kcal/h ou  $\text{W}/\text{m}^2$ ) e  $t_t, t_d$  são os tempos de permanência no local de trabalho e no local de descanso (minutos). Para calcular o valor médio do índice usa-se a expressão:

$$\overline{IBUTG} = \frac{IBUTG_t t_t + IBUTG_d t_d}{60} \quad (4)$$

onde:  $IBUTG_t, IBUTG_d$  correspondem aos valores no local de trabalho e no local de descanso.

### 3. MEDIÇÕES EFETUADAS PARA AVALIAÇÃO DE EXPOSIÇÃO AO CALOR

As características dos instrumentos de medição estão de acordo com exigências apresentadas em [3]. Um termômetro de globo digital foi usado para medir a temperatura de bulbo seco do ar, temperatura de bulbo úmido natural do ar e temperatura de globo negro. Um software interno do próprio instrumento calcula o  $IBUTG$ . Para a

velocidade relativa do ar foi usado um anemômetro de fio-quente e as medições foram realizadas em três direções concorrentes para se obter um valor médio em cada ponto de medição.

**Tabela 1. Taxas metabólicas × Atividade, adaptado de [1].**

ATIVIDADE	METABOLISMO	
	kcal/h	W/m <sup>2</sup>
Em repouso, sentado.	100	65
Trabalho leve: Sentado, movimentos moderados de braços e tronco (datilografar). Sentado, movimentos moderados de braços e pernas (dirigir). Em pé, máquina ou bancada, movimentando os braços.	125 150 150	82 98 98
Trabalho moderado: Sentado, movimentos vigorosos com braços e pernas. Em pé, máquina ou bancada, com alguma movimentação Em movimentação, levantar ou empurrar	180 220 300	117 143 196
Trabalho pesado: Levantar, empurrar ou arrastar peso de forma intermitente. Fatigante.	440 550	286 358

**Tabela 2.  $\overline{IBUTG}$  × Trabalho Intermitente × Atividade, adaptado de [1].**

Trabalho intermitente com descanso no próprio local (em cada 60 minutos)	ATIVIDADE		
	LEVE	MODERADA	PESADA
Trabalho contínuo	Até 30,0	Até 26,7	Até 25,0
Trabalho: 45 minutos Descanso: 15 minutos	30,1 a 30,6	26,8 a 28,0	25,1 a 25,9
Trabalho: 30 minutos Descanso: 30 minutos	30,7 a 31,4	28,1 a 29,4	26,0 a 27,9
Trabalho: 15 minutos Descanso: 45 minutos	31,5 a 32,2	29,5 a 31,1	28,0 a 30,0
Trabalho não permitido sem medidas adequadas de controle.	Acima de 32,2	Acima de 31,1	Acima de 30,0

**Tabela 3. Taxas metabólicas médias ×  $\overline{IBUTG}_{MAX}$ , adaptado de [1].**

$\bar{M}$		$\overline{IBUTG}_{MAX}$
kcal/h	W/m <sup>2</sup>	
175	82	30,5
200	130	30,0
250	163	28,5
300	195	27,5
350	228	26,5
400	260	26,0
450	293	25,5
500	325	25,0

A Figura 2 mostra o esboço em planta baixa do galpão e dos locais de medição, que foram selecionados de modo que combinados com certa altura em relação ao piso fornecem os pontos de medição numa topologia representativa do ambiente térmico em torno dos grupos geradores. O grupo próximo à parede leste entrou em operação e sua ventilação foi acionada. As medições foram realizadas nas alturas de 1,60 m e 2,60 m em relação ao piso, em dia de céu claro com bastante insolação e temperatura média do ar externo em 32°C. Os resultados estão na Tabela 4 onde também são apresentadas as médias e desvios padrão de cada parâmetro medido.

**Tabela 4. Medições de temperatura de globo negro, temperatura de bulbo seco do ar, temperatura de bulbo úmido natural e velocidade relativa do ar.**

Valores	Um Grupo Gerador em Operação.				
	$T_g$ (°C)	$T_{ar}$ (°C)	$T_{bn}$ (°C)	$IBUTG$	$V_{ar}$ (m/s)
Máximo	42,0	41,0	29,2	33,4	6,2
Mínimo	36,5	34,1	26,8	30,1	0,6
Média	39,1	37,4	28,1	31,7	2,9
Desvio Padrão	1,9	2,4	0,7	1,1	1,8

#### 4. AVALIAÇÃO PRELIMINAR DE EXPOSIÇÃO AO CALOR

De acordo com a Tabela 1, o trabalho de manutenção dos motores dentro do galpão será enquadrado como trabalho moderado, em pé em máquina ou bancada, com alguma movimentação, que corresponde a uma taxa metabólica de 220 kcal/h (143 W/m<sup>2</sup>). Da Tabela 4, o  $IBUTG = 31,7$  será adotado como representativo das medições. Na Tabela 2, com descanso no próprio local de trabalho, verifica-se que em atividade moderada esse valor ultrapassa 31,1. Portanto, mesmo o trabalho intermitente não é permitido sem medidas adequadas de controle do ambiente térmico. Duas alternativas serão pesquisadas: primeira, descanso em ambiente sem climatização com  $IBUTG_d \cong 28$ ;

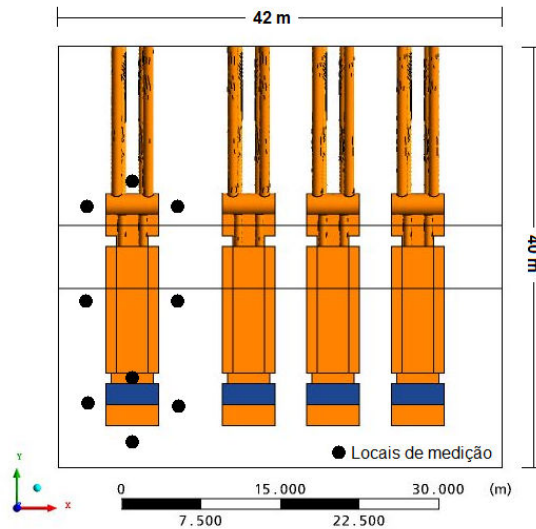


Figura 2. Arranjo dos grupos geradores no interior do galpão.

segunda, descanso em ambiente climatizado com  $IBUTG_d \cong 23$ . Esses valores foram obtidos por medições em locais com essas características térmicas. Substituindo esses valores na Equação (4) juntamente com o valor obtido no interior do galpão, teremos:

$$\overline{IBUTG} = \frac{31,7t_i + 28t_d}{60} \quad (\text{sem climatização}) \quad (5)$$

$$\overline{IBUTG} = \frac{31,7t_i + 23t_d}{60} \quad (\text{com climatização}) \quad (6)$$

Na Tabela 3, com taxa metabólica de 220 kcal/h (143 W/m<sup>2</sup>) o  $\overline{IBUTG}_{MAX}$  será de 29,4. Com descanso em ambiente sem climatização o tempo de trabalho será de 19 minutos e o de descanso 41 minutos com metabolismo ponderado de 138 kcal/h (90 W/m<sup>2</sup>). Com descanso em ambiente climatizado o tempo de trabalho será de 42 minutos e o de descanso 18 minutos com metabolismo ponderado de 184 kcal/h (120 W/m<sup>2</sup>). Portanto, na situação em que o trabalhador descansa em ambiente climatizado o tempo de trabalho é 120 % maior. Nas duas situações admitiu-se que no local de descanso a taxa metabólica é de 100 kcal/h (65 W/m<sup>2</sup>).

Se por alguma razão o tempo de trabalho no interior do galpão necessitasse ser ampliado, algumas modificações para melhorar suas condições térmicas devem ser analisadas. Nesse caso, a utilização de programas em CFD (*Computational Fluid Dynamics*) é uma ferramenta promissora nessas análises, pois as simulações numéricas podem tratá-las em tempo hábil e custo relativamente baixo. Assim, o programa computacional *Workbench ANSYS Version 11.0* será utilizado com essa finalidade, pois o mesmo apresenta as potencialidades requeridas para tratar esse tipo de problema.

## 5. MODELOS COMPUTACIONAIS

Das modificações aventadas, a mais promissora e factível envolve o resfriamento de uma parcela do ar de ventilação. Obviamente, as possibilidades de resfriamento são muitas, pois existem 23 ventiladores que insuflam o ar no interior do galpão. Assim, por ser mais conveniente resfriar o ar que será insuflado por ventiladores posicionados na mesma fachada, nossa análise restringe-se aos seguintes casos:

Modelo	Características
1	Sem resfriamento (ar externo é captado, filtrado e insuflado sem nenhum resfriamento).
2	Resfriamento nos ventiladores da fachada Norte (ar externo é captado, filtrado, resfriado até 26°C e insuflado).
3	Resfriamento nos ventiladores da fachada Sul (ar externo é captado, filtrado, somente o ar da fileira média de ventiladores é resfriado até 26°C e insuflado).

Para a geometria desenvolvida a malha numérica não-estruturada será construída; a seguir, as condições de contorno para cada modificação serão definidas em função de características operacionais dos grupos geradores e do

sistema de ventilação; depois, as soluções numéricas dos campos de temperatura e velocidade relativa do ar serão obtidas; e finalmente, esses resultados serão analisados para estabelecer como uma determinada modificação influenciará na avaliação da exposição ocupacional ao calor.

Para construir os modelos computacionais e realizar as simulações necessita-se de informações sobre a geometria do galpão e das características operacionais dos equipamentos. A geometria do galpão, suas dimensões e os posicionamentos dos equipamentos em seu interior são obtidos nas plantas de engenharia civil ou medidas no local. Para identificar e quantificar as fontes de calor dentro do galpão efetuou-se medições da temperatura das superfícies em vários pontos do bloco do motor, do cabeçote, do turbocompressor e do gerador utilizando um termômetro de radiação com mira laser e emissividade ajustável. O ajuste da emissividade foi feito em função do tipo e cor da superfície de acordo com recomendações disponíveis em [3] e no catálogo do fabricante do instrumento. Todas essas informações servem para estabelecer as condições de contorno para solução das equações numéricas de obtenção dos campos de velocidade e temperatura em seu interior.

Os motores queimam óleo diesel e transformam essa energia potencial química em trabalho mecânico de eixo com liberação de calor. Na combustão a temperatura no interior do cilindro pode alcançar 1.000°C. Parte desse calor é transportada para fora do galpão pelo sistema de arrefecimento com circulação de água e o restante eleva a temperatura do bloco do motor. Com o motor em operação, medições em 81 pontos sobre as superfícies do bloco e do cabeçote forneceram uma temperatura média igual a 90°C.

Os gases de combustão passam pelos turbocompressores vindos dos motores por duas tubulações metálicas de 500 mm de diâmetro termicamente isoladas com mantas de amianto. Como o material isolante encontra-se bastante deteriorado e em alguns pontos as tubulações estavam completamente expostas, as medições nessas superfícies resultaram numa temperatura média de 480°C. Depois de passar nos turbocompressores os gases de combustão são descarregados nos recuperadores de calor por duas tubulações termicamente isoladas, e medições nessas superfícies forneceram uma temperatura média de 80°C. A admissão de ar para os motores é feita por duas tubulações sem isolamento térmico e medições indicaram que as temperaturas nessas superfícies estão próximas da temperatura do ar externo, 32°C.

Os geradores convertem energia mecânica em energia elétrica com liberação de calor decorrente das perdas eletromagnéticas. Sua ventilação é feita pelo escoamento forçado de ar entre o rotor e o estator. Nesse caso, a captação e a descarga do ar ocorrem dentro do próprio galpão. Medições da velocidade e temperatura do ar na descarga de gerador forneceram médias de 1 m/s e 60°C. Parte desse calor acumula-se na carcaça externa de proteção do gerador e elevam sua temperatura. Medições em 40 pontos do invólucro externo do gerador forneceram uma temperatura média de 40°C.

A temperatura dos gases de combustão que entram na turbina é de 480°C e a do ar de admissão que entra no compressor é 32°C. Como suas vazões são praticamente iguais admite-se que a temperatura na superfície do turbocompressor é uma média entre esses valores, 256°C.

Com relação ao sistema de ventilação têm-se oito ventiladores axiais com vazão individual de 25 m<sup>3</sup>/s, instalados a uma altura de 6 m do piso na parede da fachada Norte, que aspiram ar externo e o insuflam no interior galpão. Na parede da fachada Sul, quinze ventiladores com vazão individual de 10 m<sup>3</sup>/s, instalados em três fileiras de cinco ventiladores, com alturas em 1m, 3m e 5m, também compõem o sistema de ventilação. As dimensões das aberturas do lanternim, por onde ocorre descarga do ar de ventilação, foram medidas.

A diferença entre a temperatura do ar exterior e a do interior do galpão, e a incidência de radiação solar na superfície das paredes externas e cobertura também proporcionam ganhos de calor que poderiam alterar as condições de temperatura no seu interior. Porém, sua estrutura é construída de um material que proporciona isolamento termo-acústico a fim de reduzir às transmissões sonoras e a transferência de calor através das paredes e cobertura do galpão. Além disso, a cor branca das paredes externas aumenta a reflexão de radiação solar e reduz a temperatura da superfície externa das paredes, reduzindo a valores desprezíveis os ganhos de calor. Por isso, o piso, as paredes e a cobertura podem ser tratadas como superfícies adiabáticas.

## 6. ANÁLISE DE RESULTADOS

Inicialmente, são apresentados alguns resultados de simulações realizadas com o Modelo 1, que corresponde à situação atual do galpão. A Figura 3 apresenta os campos de velocidade nos planos horizontais correspondentes às alturas de 1,60 m e 2,60 m com relação ao piso e a Figura 4 os de temperatura nos mesmos planos. De acordo com a Tabela 4 as velocidades nos pontos de medição estão entre 1,1 e 4,7 m/s ( $2,9 \pm 1,8$  m/s) e as temperaturas entre 35 e 39,8°C ( $37,4 \pm 2,4$ °C). Os resultados de simulação mostram predomínio de velocidades do ar entre 1,5 e 4,0 m/s e temperaturas entre 36 e 40°C nas áreas que envolvem os pontos de medição, indicando boa concordância do modelo desenvolvido com as medições. Nos corredores entre os grupos geradores as velocidades do ar são menores e as temperaturas aumentam, de modo que nesses locais os trabalhadores estarão sob condições térmicas extremas, como pode ser verificado nas Figuras 3 e 4. Se todos os grupos geradores estiverem em operação, provavelmente o cenário do ambiente térmico será ainda mais desfavorável do que aquele que foi esboçado com base nas medições disponíveis e nos resultados das simulações do Modelo 1. Com isso, mesmo com descanso em ambiente climatizado o tempo de trabalho seria inferior aos 42 minutos obtidos na avaliação preliminar.

A Figura 5 apresenta os campos de velocidade e a Figura 6 os de temperatura do ar para o Modelo 2 em planos horizontais a 1,60 e 2,60 m de altura do piso. Nesse modelo, toda a vazão de ar, 200 m<sup>3</sup>/s, é resfriado até 26°C e insuflado igualmente pelos oito ventiladores da fachada Norte, posicionados à altura de 6 m do piso. Comparados ao

Modelo 1 verificam-se diferenças significativas nos padrões desses campos. Observa-se na Figura 5 que há predomínio de velocidades entre 0,5 e 3 m/s em torno dos grupos geradores, nos planos relativos às duas alturas consideradas. A Figura 6 mostra que nos campos de temperatura ocorre predomínio de temperaturas entre 33 e 37°C, com alguns pontos localizados atingindo 38°C, e somente nas camadas de ar muito próximas às superfícies aquecidas as temperaturas atingem ou superam os 40°C. Essas diferenças são causadas principalmente pela maior densidade do ar insuflado que desloca o ar aquecido presente nos corredores em direção ao lanternim.

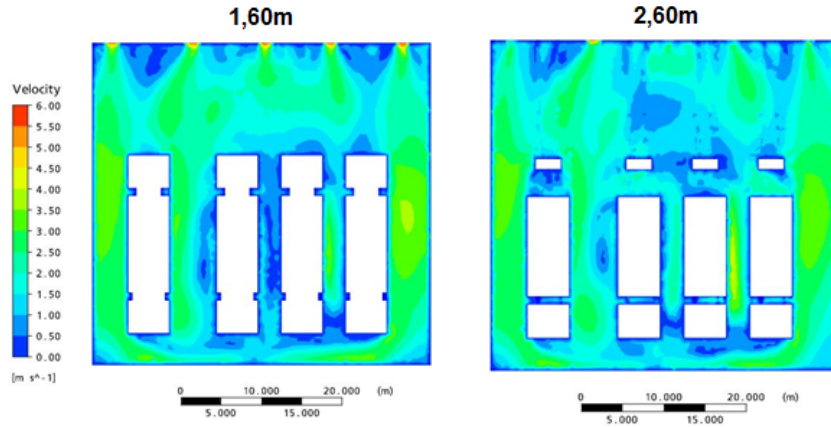


Figura 3. Campos de velocidade no interior do galpão (Modelo 1).

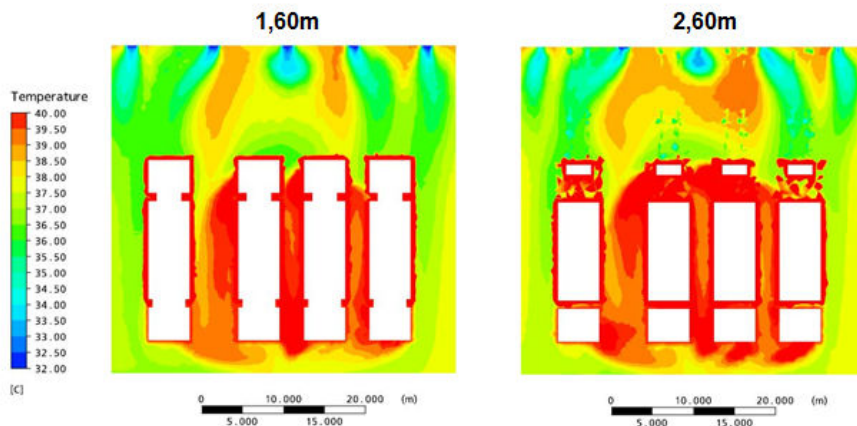


Figura 4. Campos de temperatura no interior do galpão (Modelo 1).

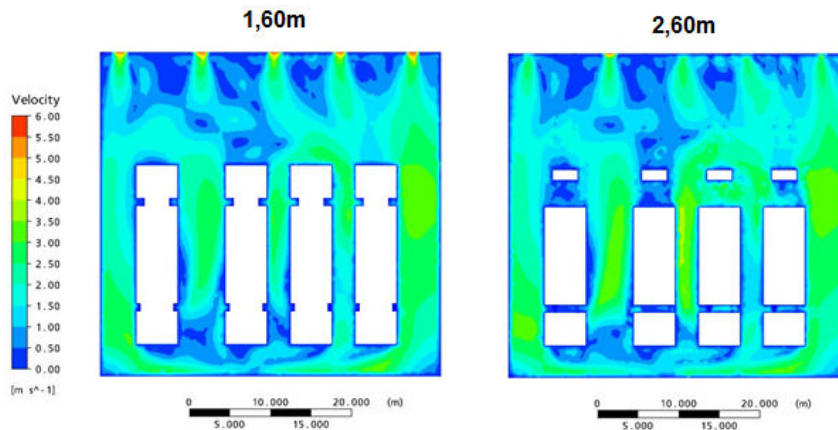


Figura 5. Campos de velocidade no interior do galpão (Modelo 2).

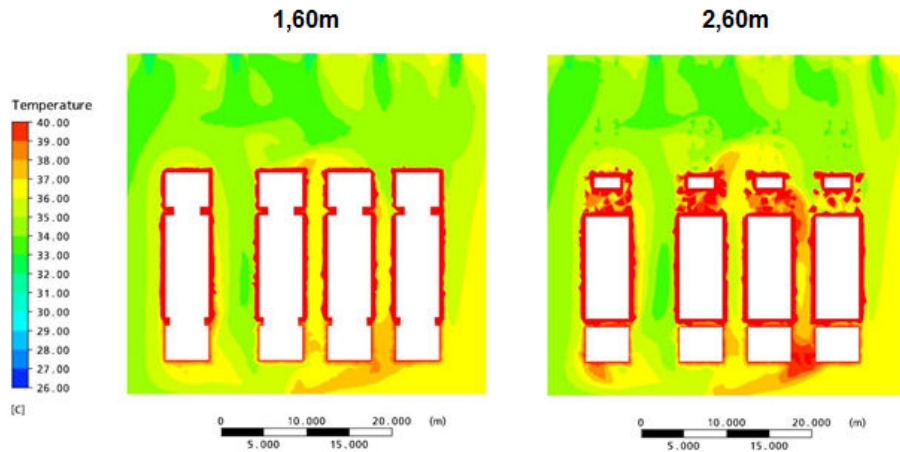


Figura 6. Campos de temperatura no interior do galpão (Modelo 2).

A Figura 7 apresenta os campos de velocidade e a Figura 8 os de temperatura do ar para o Modelo 3 em planos horizontais a 1,60 e 2,60 m de altura do piso. Nesse modelo, 50 m<sup>3</sup>/s de ar é resfriado até 26°C e insuflado igualmente pelos cinco ventiladores da fachada Sul, posicionados em fileira à altura de 3 m do piso. Comparados ao Modelo 1 verificam-se diferenças significativas nos padrões desses campos, porém não muitas se comparado ao Modelo 2. Observa-se na Figura 7 que há predomínio de velocidades entre 1,5 e 3,5 m/s em torno dos grupos geradores, nos planos relativos às duas alturas consideradas. A Figura 8 mostra que nos campos de temperatura ocorre predomínio de temperaturas entre 32 e 36°C, com alguns pontos localizados atingindo 37°C, e somente nas camadas de ar muito próximas às superfícies aquecidas as temperaturas atingem ou superam os 40°C.

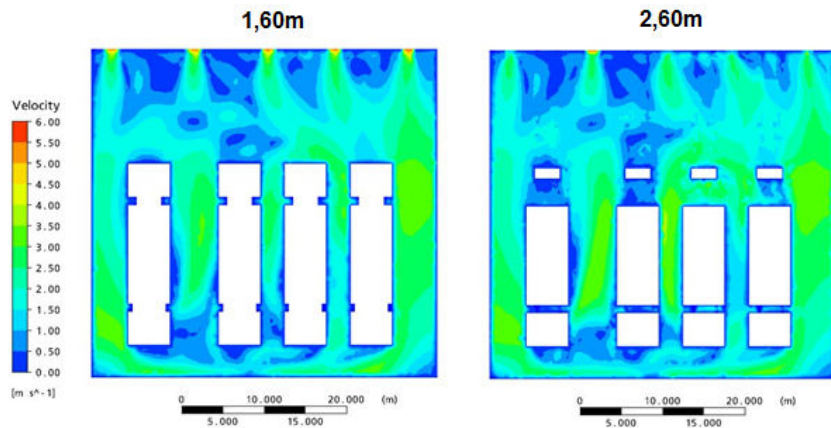


Figura 7. Campos de velocidade no interior do galpão (Modelo 3).

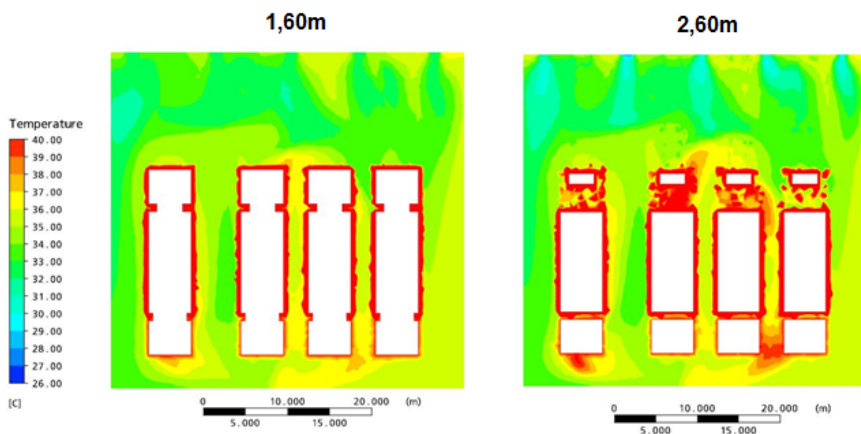


Figura 8. Campos de temperatura no interior do galpão (Modelo 3).

Os campos de velocidade e temperatura do ar obtidos por simulações com os modelos 2 e 3 apresentam semelhanças acentuadas de padrões e valores, porém bastante diferentes dos resultados correspondentes do Modelo 1. Uma forma de escolher entre os modelos 2 e 3 seria comparar as necessidades de resfriamento do ar em cada um. No Modelo 2, deve-se resfriar 200 m<sup>3</sup>/s de 32°C até 26°C; no Modelo 3, será 50 m<sup>3</sup>/s para a mesma diferença de temperatura. Assim, em termos de menor consumo de energia o Modelo 3 é mais apropriado. Considerando esse fator o Modelo 3 será avaliado em termos de exposição ocupacional ao calor.

O *IBUTG* é calculado pela Equação (1) em função da temperatura de bulbo úmido natural e da temperatura de globo negro, valores que as simulações não fornecem. A temperatura de globo negro é função da temperatura de bulbo seco do ar, da velocidade relativa do ar e da temperatura radiante média, como mostra a Equação (3). Além desses três fatores a temperatura de bulbo úmido natural depende também da umidade relativa do ar. As temperaturas das superfícies dos grupos geradores não variam muito com as condições de operação, pois o sistema de resfriamento mantém as temperaturas de trabalho em cargas parciais. As características térmicas das paredes e pisos amortecem as influências das variações ocorridas na temperatura do ar externo e na incidência de radiação solar e não alteram os ganhos de calor através dessas estruturas. Assim, a temperatura radiante média no interior do galpão também não sofre grandes variações. Por outro lado, o resfriamento de ar até a temperatura de insuflação, 26°C, pode ser feito sem alteração de seu conteúdo de umidade, e mesmo que isto ocorresse, seria apenas de 50 m<sup>3</sup>/s, que corresponde a 14,3% da vazão total insuflada. Portanto, a umidade relativa também não varia substancialmente. Assim, eliminando a temperatura de globo negro entre as Equações (1) e (2), pode-se correlacionar o *IBUTG* com a temperatura de bulbo seco do ar. Os dados de medições foram utilizados para obter essa correlação, de modo que o *IBUTG* pode ser calculado com os resultados das simulações do Modelo 3, pela seguinte correlação:

$$IBUTG = 0,346 T_{ar} + 18,73 \quad \therefore \quad R^2 = 0,585 \quad (7)$$

No Modelo 3, os campos de temperatura em torno dos pontos de medição apresentam valores que variam entre 32 e 36°C. Toma-se a média de 34°C como representativa para realizar a avaliação da exposição ocupacional ao calor, semelhante à realizada no item 4. Nesse caso, o *IBUTG* calculado pela Equação (7) será igual a 30,5. Substituindo esse valor nas Equações (5) e (6), tem-se:

$$\overline{IBUTG} = \frac{30,5t_t + 28t_d}{60} \quad (\text{sem climatização}) \quad (8)$$

$$\overline{IBUTG} = \frac{30,5t_t + 23t_d}{60} \quad (\text{com climatização}) \quad (9)$$

Considerando a taxa metabólica de 220 kcal/h (143 W/m<sup>2</sup>), na Tabela 3 o  $\overline{IBUTG}_{MAX}$  será de 29,4. Esse valor não se altera, pois depende unicamente da taxa metabólica. Assim, com descanso em ambiente sem climatização o tempo de trabalho será de 33 minutos e o de descanso 27 minutos com metabolismo ponderado de 166 kcal/h (108 W/m<sup>2</sup>). Com descanso em ambiente climatizado o tempo de trabalho será de 51 minutos e o de descanso 9 minutos com metabolismo ponderado de 202 kcal/h (131 W/m<sup>2</sup>). Nas duas situações admitiu-se que no local de descanso a taxa metabólica é de 100 kcal/h (65 W/m<sup>2</sup>).

Na situação do Modelo 1, o trabalho não era permitido sem que fossem tomadas medidas adicionais de controle do ambiente térmico, como pode ser observado na Tabela 2. Por isso, o descanso do trabalhador fora do local de trabalho em ambiente climatizado ou não. Na situação do Modelo 3, seria permitido 15 minutos de trabalho com 45 minutos de descanso no próprio local. Obviamente, esta combinação não é de interesse.

## 7. CONCLUSÕES

Considerando os Modelos 2 e 3 verifica-se que não há diferenças significativas nos padrões e valores predominantes nos campos de velocidade e de temperatura. Entretanto, se comparados ao Modelo 1 encontrar-se-ão diferenças que alteram decisivamente o ambiente térmico e a exposição ocupacional ao calor.

Admitindo descanso em ambiente climatizado, o tempo de trabalho em cada hora passou de 42 para 51 minutos – aumento de 21,4 %. Se o descanso ocorresse em local não climatizado esse tempo passaria de 19 para 33 minutos – aumento de 73,7 %. Em ambos os casos ocorreu aumento da taxa de metabolismo ponderado: no primeiro, de 184 kcal/h (120 W/m<sup>2</sup>) para 202 kcal/h (131 W/m<sup>2</sup>) e no segundo de 138 kcal/h (90 W/m<sup>2</sup>) para 166 kcal/h (108 W/m<sup>2</sup>). Essa elevação das taxas metabólicas não compromete a saúde dos trabalhadores, pois as condições térmicas estão de acordo com as diretrizes contidas nas normas [1], [2] e [5].

A correlação dada pela Equação (7) foi utilizada porque as simulações não fornecem os outros parâmetros para cálculo do *IBUTG*. Nesse caso, além dos campos de velocidade e temperatura do ar seria necessário obter os campos de umidade relativa e temperatura radiante média, para calcular as temperaturas de bulbo úmido natural e as temperaturas de globo negro.



## 8. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) que através de uma bolsa de Pós-Doutorado Senior, permitiu o redirecionamento em nosso campo de estudo e pesquisa para treinamento em CFD (Computational Fluids Dynamics);

Ao Prof. Dr. Clóvis R. Maliska, um agradecimento especial, por ter se colocado à disposição para ser o Professor Responsável por esse estágio, e com o qual cursei disciplinas de inegável conteúdo e qualidade, em convecção de calor e métodos numéricos em volumes finitos.

## 9. REFERÊNCIAS

- [1] NR-15. Atividades e operações insalubres. Norma Regulamentadora, Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil.
- [2] FUNDACENTRO. Ministério do Trabalho e Emprego. NHO-06, Norma para avaliação de exposição ocupacional ao calor, 1985.
- [3] ISO *Standard* 7726. Ergonomics of the thermal environments: instruments and methods for measuring physical quantities, 1998.
- [4] ASHRAE. Handbook of fundamentals. Atlanta-GA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2005.
- [5] ISO *Standard* 7243. Hot environments: estimation of the heat stress on the work man, based on the WBGT-index (wet-bulb globe temperature), 1989.

## 10. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelos conteúdos do material impresso incluídos neste trabalho.

## USE OF CFD IN THE ANALYSIS OF OCCUPATIONAL EXPOSURE TO HEAT IN A THERMAL POWER PLANT

Jorge E. Corrêa<sup>1</sup>, [jecorrea@ufpa.br](mailto:jecorrea@ufpa.br)  
Clóvis R. Maliska<sup>2</sup>, [maliska@sinmec.ufsc.br](mailto:maliska@sinmec.ufsc.br)

<sup>1</sup>Federal University of Pará, Technology Institute, LABCLIMA

<sup>2</sup>Federal University of Santa Catarina, SINMEC

**Abstract:** *This paper analyzes the conditions of heat occupational exposure of workers while performing maintenance work inside a shed housing four generators of a thermal power plant. With measurement results of the WBGT Index (Wet-Bulb Globe Temperature) one can estimate the exposure time at work according to the NR-15 standard in order to identify the conditions that exceed the maximum time allowed in order to obtain a diagnosis of the thermal environment. Preliminary tests indicate that considering a rest environment without air conditioning, the maximum working time is 19 minutes with a resting time of 41 minutes, using a weighted metabolism of 138 kcal/h (90 W/m<sup>2</sup>). On the other hand, if a rest environment with an air conditioned system is considered, then the working time increases to 42 minutes, associated to a resting time of only 18 minutes with a weighted metabolism of 184 kcal/h (120W/m<sup>2</sup>). Therefore, the situation where an employee rests in an air conditioned environment, the working time is 120% greater. The computer program ANSYS Workbench Release 11.0 is used in the construction of simplified geometrical models of the shed, including all the associated equipment, mesh generation and simulations of velocity air temperature fields. These results allow one to verify whether the proposed changes to increase the working time will be able to maintain the environmental conditions within the limits prescribed by the standards, which deal with the adequacy of the thermal environment, aiming to preserve the workers health.*

**Keywords:** *CFD, Occupational exposure to heat, Air conditioning systems.*