

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SIMULAÇÃO CFD DE UM SISTEMA DE EXAUSTÃO EM SALA DE TESTES DE  
CORTE COM MOTOSSERRAS

por

Bernardo Sartori Francio

Monografia apresentada ao  
Departamento de Engenharia Mecânica da  
Escola de Engenharia da Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul, como parte  
dos requisitos para obtenção do diploma de  
Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, maio de 2021

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

## CIP - Catalogação na Publicação

Sartori Francio, Bernardo  
Simulação CFD de um sistema de exaustão em sala de testes de corte com motosserras / Bernardo Sartori Francio. -- 2021.  
26 f.  
Orientador: Diogo Elias da Vinha Andrade.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. simulação CFD. 2. monóxido de carbono. 3. sistema de exaustão. 4. motosserra. I. da Vinha Andrade, Diogo Elias, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bernardo Sartori Francio

SIMULAÇÃO CFD DE UM SISTEMA DE EXAUSTÃO EM SALA DE TESTES DE  
CORTE COM MOTOSSERRAS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA  
DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Diogo Elias da Vinha Andrade

Comissão de Avaliação:

Prof<sup>a</sup>. Letícia Jenisch Rodrigues

Prof. Francis Henrique Ramos França

Prof. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, maio de 2021

## AGRADECIMENTOS

Aos professores por todas as lições e por serem exemplos tanto pessoais quanto profissionais, à Universidade por fornecer um ensino de alta qualidade e referência. Ao Vanderlei Zalamea, grande mentor e amigo, por acreditar no meu potencial e me proporcionar um ambiente de trabalho amistoso e promissor. Aos meus pais e amigos que me acompanharam durante os pontos altos e baixos da minha caminhada.

*When I meet God  
I am going to ask him two questions:  
Why relativity?  
And why turbulence?  
I really believe he will have an answer for the first.*

*Werner Heisenberg*

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA  
MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2021

SIMULAÇÃO CFD DE UM SISTEMA DE EXAUSTÃO EM SALA DE  
TESTES DE CORTE COM MOTOSSERRAS

**Francio, Bernardo Sartori**

bsfrancio@gmail.com

**Resumo.** *O objetivo do presente trabalho é aprimorar um sistema de exaustão para uma sala de testes de corte com motosserra através de uma simulação computacional fluidodinâmica (CFD). O intuito do sistema projetado é remover os gases produtos da combustão, como o monóxido de carbono (CO) que é extremamente tóxico, incolor e inodoro. O sistema atual é composto de um conjunto de exaustores, uma coifa e um conjunto de insuflamento. A partir de testes experimentais, foram coletados os dados de entrada da simulação para definição das variáveis e condições de contorno como vazão volumétrica de CO, sua temperatura e massa específica e insuflamento de ar puro na sala. Os meios necessários de instrumentação são apresentados para que seja possível obter a correlação com os resultados da simulação e, uma vez validada, foi realizado um estudo de refinamento de malha. Com isso, avaliam-se as possíveis soluções para o problema através de um estudo de casos envolvendo as geometrias da coifa e dos sistemas de exaustão e insuflamento. Por meio da alteração da geometria da coifa, obteve-se o resultado mais satisfatório para o problema pois mostrou-se capaz de remover todo o CO da sala, respeitando os limites operacionais propostos.*

**Palavras-chave:** *monóxido de carbono, sistema de exaustão, simulação CFD.*

**CFD Simulation of an exhaust system in chainsaw cutting test room**

**Abstract.** *The objective of the present work is to improve an exhaust system for a chain saw cutting test room through a fluid dynamic computational simulation (CFD). The purpose of the designed system is to remove combustion gases, such as carbon monoxide (CO), which is extremely toxic, colourless and inodorous. The current system consists of a set of exhaust fans, a hood and an insufflation set. From experimental tests, the input data of the simulation were collected to define the variables and boundary conditions such as volumetric flow of CO, its temperature and density and the supply of fresh air in the room. The necessary means of instrumentation are presented so that it is possible to obtain the correlation with the results of the simulation and, once validated, a study of mesh refinement was carried out. With this, the possible solutions to the problem are evaluated through a case study involving the geometry of the hood and the exhaust and insufflation systems. By changing the hood geometry, the most satisfactory result was obtained for the problem, as it was shown to be able to remove all CO from the room, respecting the proposed operational limits.*

**Keywords:** *carbon monoxide, exhaust system, CFD simulation.*

## NOMENCLATURA

$a$	Variável de entrada	
$t$	Tempo	[s]
$x_i$	Coordenada cartesiana	
$u_i$	Velocidade instantânea local	[m/s]
$\rho$	Massa específica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$p$	Pressão	[N/m <sup>2</sup> ]
$T$	Temperatura	[K]
$\mu$	Viscosidade dinâmica local	[N/(m <sup>2</sup> .s)]
$k$	Condutividade térmica	[W/(m.K)]
$g_i$	Componente cartesiana da aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$S$	Termo fonte da geração de calor	[W/m <sup>3</sup> ]
$S_{ij}$	Tensor deformação	
$\delta_{ij}$	Símbolo de Kronecker	
$\Phi$	Função dissipação	
$\varepsilon$	Taxa de dissipação da energia turbulenta	[m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
$k$	Energia cinética turbulenta por unidade de massa	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$\mu_t$	Viscosidade turbulenta	

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. FUNDAMENTAÇÃO.....	8
3. METODOLOGIA.....	9
4. RESULTADOS.....	14
5. CONCLUSÃO.....	20
6. TRABALHOS FUTUROS.....	21

## 1. INTRODUÇÃO

Um problema inerente dos motores a combustão interna é a emissão de gases nocivos na atmosfera. Dentre os gases está o monóxido de carbono (CO), produto da combustão incompleta dos combustíveis fósseis, que é perigoso aos seres humanos devido à sua grande toxicidade, além de ser incolor e inodoro. Motosserras são máquinas movidas a combustão muito utilizadas em serviços de jardinagem, podas de árvores, entre outras atividades. Para avaliar a potência dessas máquinas são construídas salas de testes com ambiente e condições controladas de forma a ser possível simular o seu uso e validar o seu funcionamento. Como consequência, é exigido que um sistema de exaustão robusto seja dimensionado de tal forma que os pesquisadores possam operar nestas salas sem que estejam expostos aos riscos de inalação e intoxicação por CO. As principais técnicas para controle de ambientes sujeitos a materiais tóxicos, conforme descrito por Crawl e Louvar (2011), são os sistemas de ventilação e os sistemas de diluição, sendo o primeiro o mais comum. Dentre os sistemas de ventilação, a forma construtiva mais tradicional é composta de dutos e de grelhas para os sistemas de insuflamento e de exaustão (Burnett e Chan, 1997), usualmente aplicados em estacionamentos subterrâneos e edifícios garagem tal como descreve Sittisak et al. (2020).

O dimensionamento de sistemas de exaustão é uma das atividades rotineiras exercidas por engenheiros voltados para a área da mecânica dos fluidos e fenômenos de transporte. Estes, por sua vez, dispõem de ferramentas capazes de simplificar a resolução das equações de transporte envolvidas por meio de softwares de simulação numérica, como é o caso dos simuladores de dinâmica dos fluidos computacional (do inglês, CFD) conforme descrito por Versteeg (2007).

O uso de CFD para problemas envolvendo remoção de poluentes tem sido amplamente utilizado nas mais variadas aplicações, desde pequenos ambientes (Bulinska, 2014) até grandes túneis e construções subterrâneas (Karimi et al, 2019). Os softwares de simulação têm seu uso justificado por permitirem o estudo de sistemas envolvendo condições de alta periculosidade, com amplo detalhamento nos resultados e de forma a promover uma redução considerável no custo de implementação de projetos e realização de experimentos (Versteeg, 2007).

É nesse âmbito que o objetivo do presente trabalho é aprimorar um sistema de exaustão numa sala de testes de corte com motosserra, visando remover os gases produtos da combustão interna, como o monóxido de carbono, a fim de garantir a segurança do operador de máquina durante o procedimento de corte e evitando o acionamento prematuro do sistema de alarmes. Este processo de aprimoramento do sistema de exaustão foi realizado através de um estudo de casos desenvolvido numa rotina de simulações no software *Flow-3D* de dinâmica dos fluidos computacional. Inicialmente o caso padrão foi comparado e validado com resultados de testes experimentais, na sequência outras configurações foram simuladas com o objetivo de encontrar a solução que melhor atendesse aos critérios de segurança sob os menores custos de implementação. Ao final desse processo, foi proposta uma configuração que atende as exigências de segurança.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO

O método empregado para análise de problemas via programas de simulação fluidodinâmica computacional consiste na resolução de um conjunto de equações diferenciais não-lineares através de processos iterativos, chegando a um resultado aproximado do escoamento real. Ao longo da simulação são resolvidas as equações de conservação da massa, conservação da quantidade de movimento linear e conservação de energia descritas, respectivamente, conforme as Eq. (2.1), (2.2) e (2.3):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ 2\mu \left( S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij} \right) \right] - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_p u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \left( \frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) + \rho \Phi + S \quad (2.3)$$

Onde o termo  $S_{ij} = 1/2(\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i)$  é o tensor tensão e a função dissipação é descrita como  $\Phi = 2(S_{ij}S_{ij} - S_{kk}^2/3)$ . O modelo de turbulência utilizado pelo software trata-se do modelo RNG  $k - \varepsilon$ , que apesar das limitações descritas por Yakhot (1986), oferece uma solução adequada para problemas de dispersão de poluentes em ambientes internos conforme verificado por diversos autores (Van Hoof, 2013; Yang et al., 2014) graças a sua robustez e por ser indicado para uso industrial. Vale ressaltar que o software utilizado calcula as equações de conservação de cada espécie fluida separadamente, isto é, três equações para o monóxido de carbono e três equações para o ar. Além disso, também é considerado um modelo de interfaces fluidas, onde os fluidos são considerados imissíveis e suas condições de contorno são calculadas ponto-a-ponto (*Flow-3D: User's Guide*, 2020).

A equação governante para a energia cinética turbulenta ( $k$ ) no tempo é descrita em (2.3) enquanto que a equação da taxa de dissipação de energia turbulenta é descrita em (2.4), segundo Launder e Spalding (1974):

$$\frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k - G_k - \rho \varepsilon \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial(\rho U_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - R - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.5)$$

Onde  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1,92$  são constantes tabeladas (*Flow-3D: User's Guide*, 2020). A viscosidade turbulenta,  $\mu_t$ , é definida como:  $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$  onde  $C_\mu = 0,09$  é uma constante de proporcionalidade definida empiricamente (Launder e Spalding, 1974).

### 3. METODOLOGIA

O método utilizado para o desenvolvimento das simulações está esquematizado no fluxograma apresentado na Fig. 3.1. O primeiro passo foi a definição dos objetivos da simulação, que neste caso eram garantir a representatividade da simulação com os experimentos e buscar uma solução para otimizar a exaustão de poluentes da sala, garantindo a segurança do operador. Em seguida, definiram-se as variáveis de entrada, descritas na Tabela 3.1. Parâmetros como, por exemplo, a concentração de CO e massa específica dos gases de escape foram medidos experimentalmente enquanto que parâmetros como a vazão de insuflamento e dos e

exaustores foram obtidos através dos valores fornecidos pelos fabricantes. As Figuras A.1 e A.2 do anexo ilustram as especificações da sonda de fio quente e do detector de CO da parede, respectivamente.

Figura 3.1 – Fluxograma do método de organização da simulação.

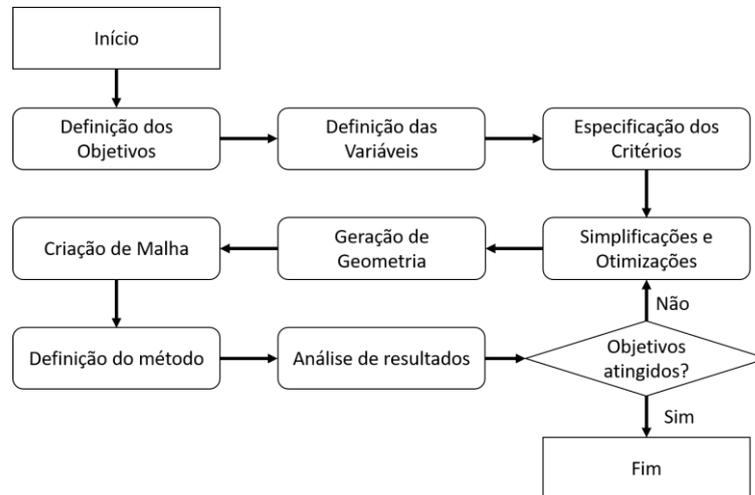


Tabela 3.1 – Dados de entrada para a simulação.

<i>Variável</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>
Massa específica do ar em 25°C	1,25	Kg/m <sup>3</sup>
Massa específica do CO em 25°C	1,14	Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade dinâmica CO	2,7.10 <sup>-5</sup>	Pa.s
Temperatura do CO no escape da motosserra	500	°C
Concentração de CO na mistura	7,7	%
Vazão volumétrica CO	0,03	m <sup>3</sup> /s
Vazão volumétrica na Coifa	6000	m <sup>3</sup> /h
Vazão volumétrica no Exaustor	3000	m <sup>3</sup> /h
Vazão volumétrica do Insuflamento	4500	m <sup>3</sup> /h

Com as variáveis definidas seguiu-se para o estabelecimento dos critérios, que são o instante de acionamento do sensor de CO e a posição dos sensores de velocidade conforme os experimentos realizados. Um critério de erro de segunda ordem e erro absoluto inferior a 10<sup>-3</sup> foi também utilizado conforme sugerido pelo fabricante do software. Com isto, prosseguiu-se para as simplificações de modelo, com o intuito de manter a robustez dos resultados obtidos, porém buscando reduzir o custo computacional das simulações. Sendo assim, as primeiras versões buscavam verificar as características físicas do modelo adicionando-as gradativamente, iniciando apenas com efeitos da quantidade de movimento e diferença de massa específica, até a inclusão do efeito de dois fluidos imiscíveis com transferência de calor, conforme sugerido por Versteeg (2007).

Tendo em mãos os resultados das simplificações, pôde-se desenvolver os modelos tridimensionais da sala com auxílio de programas de desenho assistidos por computador (CAD), para então determinar a região do domínio fluido e geração de malha através do software *Flow-3D*. Num primeiro momento, trabalhou-se com a geometria mais simples possível da região de interesse com o intuito de verificar o comportamento do gás no sistema em uma malha grosseira. O software por padrão gera malhas do tipo volumes finitos hexaédricos (cubos) e é recomendado pela fabricante que a razão entre volumes de malhas adjacentes não deva ser

menor do que 1:2, ou seja, um volume refinado não deve ter menos do que a metade da medida de lado de um volume grosseiro na sua vizinhança. Assumindo estas recomendações, notou-se que a simulação oferecia resultados mais estáveis quando a malha próxima à fonte geradora de poluentes possuísse volumes finitos da ordem de 15 mm.

Determinada a mínima dimensão dos volumes necessária para as malhas, estudou-se a região de interesse para a análise. Conforme supracitado, inicialmente simulou-se apenas o domínio fluido contendo a motosserra, a coifa e os sensores, removendo a parte da sala onde estão o suporte do tronco e parte do teto como ilustrado na Fig. 3.2. Notou-se que esta simplificação não oferecia resultados condizentes com a realidade pois limitava em demasia o domínio fluido, de forma que se incrementou as dimensões do modelo progressivamente até o estado de discretizar completamente o volume da sala real. A Tabela B.1 no Apêndice mostra o histórico de versões simuladas e é possível perceber que a malha da primeira versão contou com cerca de 650 mil volumes, convergindo em aproximadamente 22 minutos, enquanto que a versão final apresentou aproximadamente 1,2 milhão de volumes com um tempo de solução de 1 dia e 9 horas. Houve ainda versões mais refinadas que serviram com o propósito de avaliar o critério de independência de malha, apresentando aproximadamente 3 milhões de elementos e em torno de 2 dias e 19 horas contabilizadas para convergência. Todas as simulações foram realizadas em uma estação de trabalho com 12 núcleos de processamento com configurações de um processador Intel® Xeon® E-2246G de 3,6 GHz, 128 GB de memória e placa de vídeo GeForce® Quadro® P2200 com 5 GB de memória gráfica DDR5.

Juntamente com a análise dos refinamentos de malha, fez-se a avaliação das condições de contorno da sala, utilizando-se o plano ZX máximo, que representa o forro, com a condição de contorno de pressão atmosférica enquanto que nas outras fronteiras foram definidas condições de contorno de parede sem deslizamento. Essa condição se deve ao fato de que os gases após serem succionados pela coifa, são filtrados e lançados à atmosfera. Foi aplicado na motosserra uma fonte geradora de gases de escape e nos insuflamentos fontes geradoras de ar puro, enquanto que na extremidade da tubulação da exaustão um sumidouro de ambos os fluidos. Uma superfície de controle foi posicionada próximo a saída da tubulação de exaustão para avaliar a vazão volumétrica de CO a ser expelida da sala. Estas geometrias podem ser vistas na Fig. 3.3, bem como os sensores de concentração de monóxido de carbono listados por 1 e 2, além dos anemômetros de fio quente indicados por 3 e 4. Esses pontos de medição na simulação foram necessários para obter a correlação com o experimento e realizar o estudo de refino de malha. Para verificar a independência de malhas, Roache (1994) propõe a criação de refinamentos sucessivos de malha, sendo neste caso criados três refinamentos de malha: grosseira, intermediária e fina, apresentando respectivamente 960 mil, 1,2 milhão e 2,85 milhões de volumes de controle cada. Pelos resultados apresentados na Fig. 3.4, concluiu-se que a malha intermediária foi capaz de apresentar resultados satisfatórios para o decorrer dos testes de caso.

Figura 3.2 – Geometria simplificada da sala de testes da primeira versão.

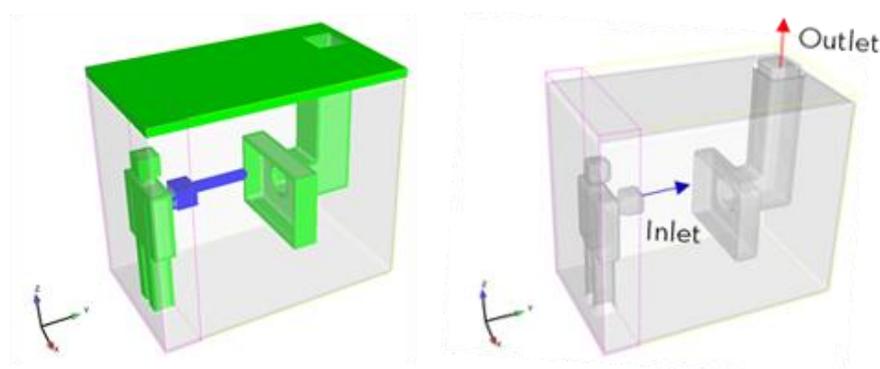


Figura 3.3 – Elementos da sala na simulação.

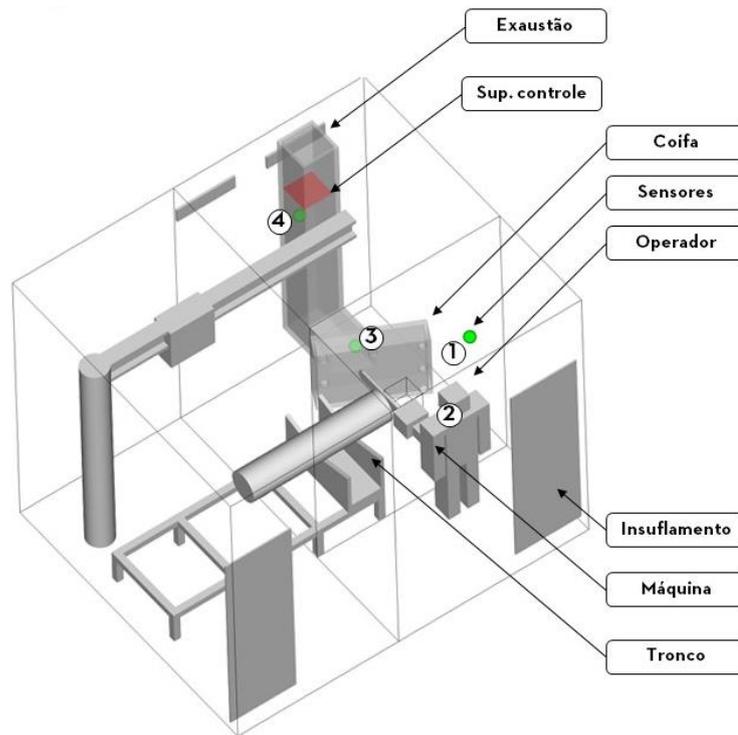
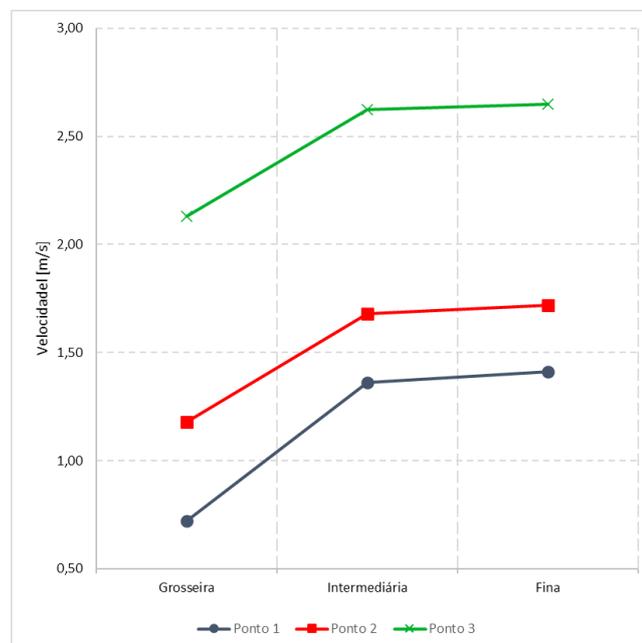


Figura 3.4 – Velocidade nos sensores de velocidade para verificar independência de malha para cada refino após 20 s do acionamento da motosserra.



Como hipóteses do problema, foram considerados escoamento incompressível e turbulento de um fluido e modelo RNG  $k - \epsilon$  para a configuração inicial e convergência de resultados, efeitos de temperatura negligenciáveis (apenas cálculo de quantidade de movimento), aproximação de primeira ordem para equação do transporte, escoamento viscoso e condição de não-deslizamento nas fronteiras sólidas do domínio. Ao final das simulações,

considerou-se a temperatura dos fluidos e trocas térmicas dos gases, mas notou-se que não houveram alterações significativas nos resultados da simulação, devido ao curto intervalo de tempo e por utilizar-se um modelo que não considera a mistura de gases, de forma que os gases não apresentaram variação significativa nas suas massas específicas, as trocas térmicas ocorrem somente por contato e seus efeitos podem ser negligenciados. Esta simplificação se justifica, pois, assumindo um modelo de interfaces entre os fluidos, isto é, um modelo em que os fluidos não se misturam, permite-se uma redução do custo computacional consideravelmente e evita a divergência dos critérios de solução.

Por fim, variou-se a vazão dos insuflamentos e da exaustão até se obter valores de velocidade conforme os obtidos experimentalmente. Notou-se que o escoamento dos insuflamentos entrava em regime plenamente desenvolvido após 10 s de simulação, e esse perfil de velocidades afetava no resultado de velocidades dos gases de escape. Como nos experimentos a motosserra é acionada muito tempo depois dos insuflamentos, considerou-se esse atraso de 10 s no acionamento da motosserra na simulação. Com as velocidades simuladas equivalentes às experimentais foi verificado que o tempo de acionamento dos sensores de CO instalados na sala também eram condizentes entre valores simulados e valores experimentais. Dessa forma, os parâmetros da simulação foram considerados como representativos para o fenômeno físico observado.

Com todos estes parâmetros definidos, pôde-se prosseguir para a etapa de aprimoramento do sistema de exaustão. Foram propostas cinco versões de melhoria a serem avaliadas, buscando obter-se a maior eficiência da coifa sem grandes modificações estruturais e com baixo investimento. Todos os elementos da coifa são ilustrados na Fig. 3.5 enquanto que a Fig. 3.6 ilustra todas as versões calculadas na simulação de casos. Durante as simulações de condições de contorno, observou-se que o exaustor à esquerda da motosserra apresentava baixo impacto na remoção de monóxido de carbono na sala. Logo uma das versões seria a de aumentar a vazão da coifa e do exaustor à direita fechando a entrada do exaustor da esquerda (V02). Outra potencial solução seria a de aplicar defletores nas bordas da coifa a fim de direcionar os gases para a chapa perfurada (V03). Esta chapa foi removida numa das versões testadas para que fosse possível verificar sua eficácia (V04). Na sala real utiliza-se um duto flexível para conectar a coifa à tubulação rígida que leva para os filtros, desta forma é possível movê-la em outras posições. Com isso, em uma das versões foi verificado o efeito da remoção de poluentes com a coifa paralela à parede dos sensores de CO (V05). Por fim, propôs-se uma condição de insuflamento e exaustão vertical com o objetivo de direcionar o ar de cima para baixo (V06). Como esta configuração requer alto investimento para ser implementada, foi testada por último.

Figura 3.5 – Vista em detalhe da coifa e os elementos que a compõe.

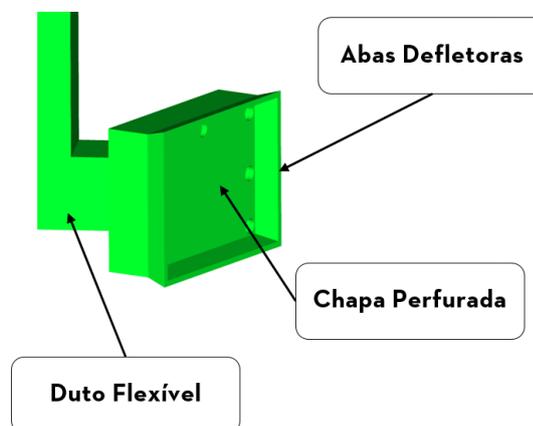
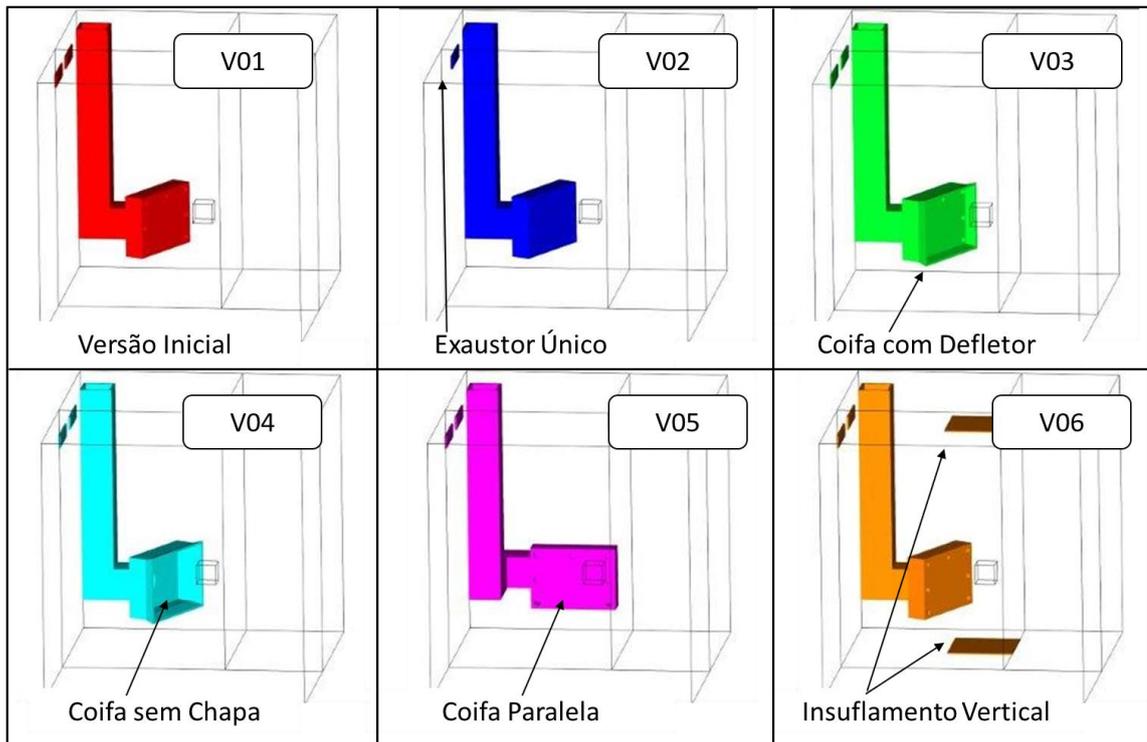


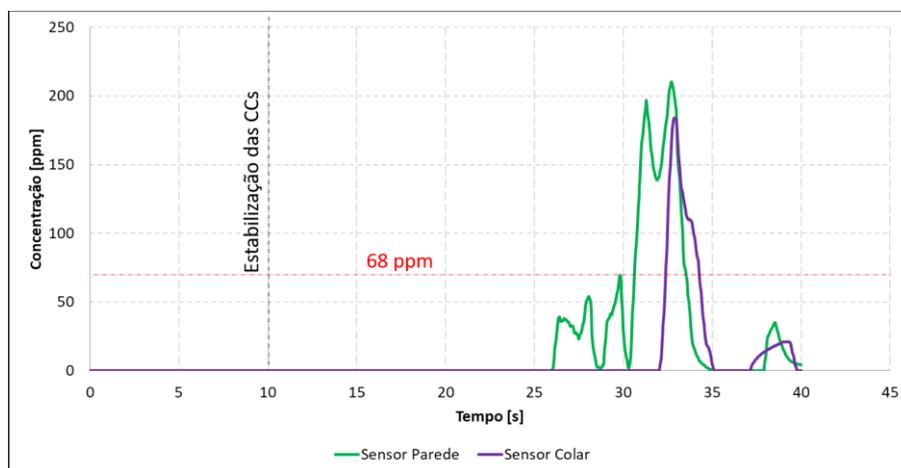
Figura 3.6 – Geometrias das versões simuladas do Teste de Casos.



#### 4. RESULTADOS

Num primeiro momento, buscou-se obter a correlação da simulação com os experimentos através do tempo de acionamento dos detectores de monóxido de carbono e então verificar com os sensores de velocidade do tipo fio quente. Constatou-se que nos experimentos executados, o detector instalado na parede (representado pelo ponto 1 na Fig. 3.3) era acionado decorridos 20 s de teste enquanto que o detector posicionado no peito do operador era acionado cerca de 5 s depois. A Fig. 4.1 apresenta as concentrações em termos de ppm (parte por milhão) em volume de CO detectado pelos sensores da parede e do colar do operador. A linha em vermelho indica o limite de concentração até disparo do sensor de 68 ppm e a linha preta vertical indica o acionamento da motosserra, defasado em 10 s conforme mencionado anteriormente.

Figura 4.1 – Concentração de CO medida pelos sensores da simulação.



Desta figura, é possível notar que o acionamento dos sensores está de acordo com os resultados obtidos experimentalmente e, em somatória com os resultados obtidos através da independência de malha, assume-se que o modelo é válido e a simulação é confiável.

Para verificar o comportamento dos fluidos no interior da sala, gerou-se superfícies de contorno em termos de velocidade. Foram realizados três cortes no sentido horizontal do plano XY (vista de topo) nas alturas representativas para o modelo, nas cotas em relação ao piso da altura de operação da motosserra a 1,3m, de instalação dos detectores a 1,5 m e a das exaustões a 3,9 m conforme mostra a Fig. 4.2. As imagens obtidas dos resultados das velocidades em cada uma dessas superfícies são listadas pelas Figs. 4.3, 4.4 e 4.5, respectivamente.

Figura 4.2 – Plano indicando os três cortes realizados na simulação para as superfícies de contorno sendo (1) a altura do escape da máquina, (2) a altura dos detectores de CO e (3) a altura dos exaustores.

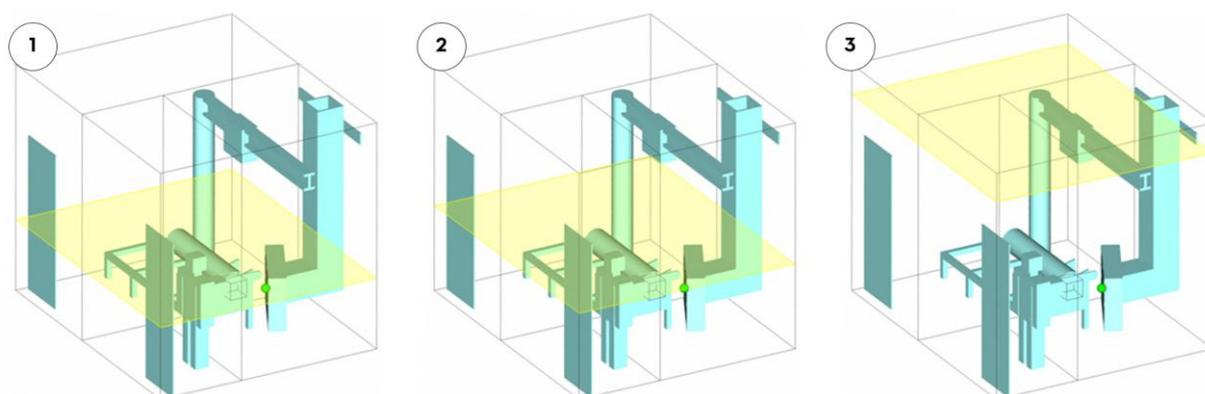


Figura 4.3 – Superfície de contorno de velocidades a 1,3 m do piso após 20 s de acionamento da motosserra.

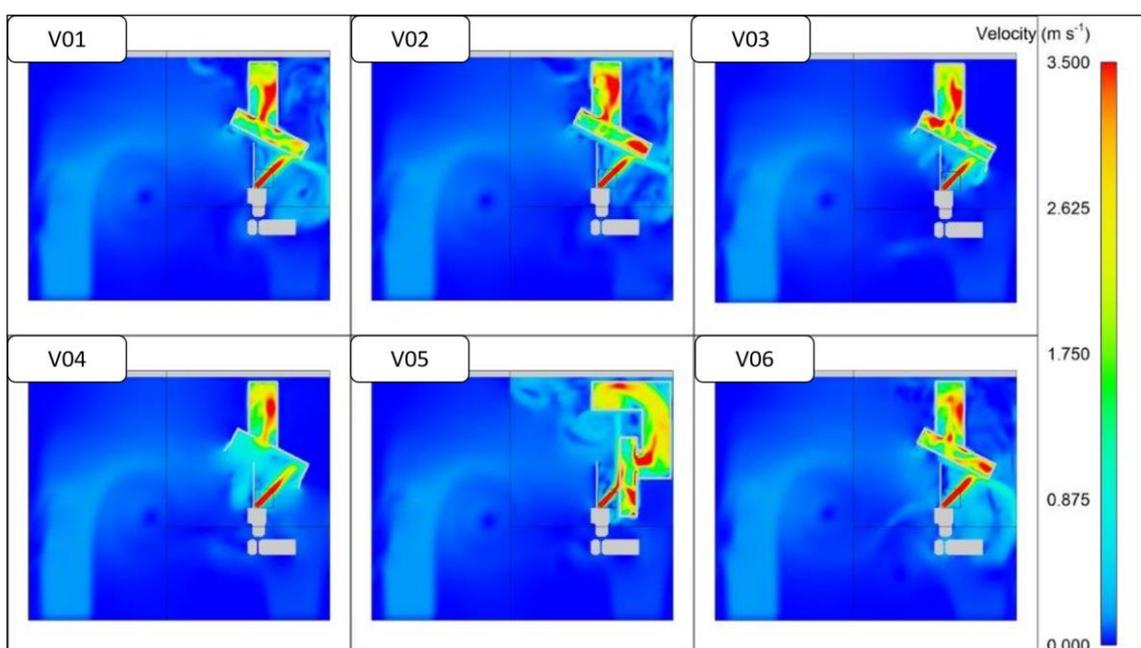


Figura 4.4 – Superfície de contorno de velocidades a 1,5 m do piso após 20 s de acionamento da motosserra.

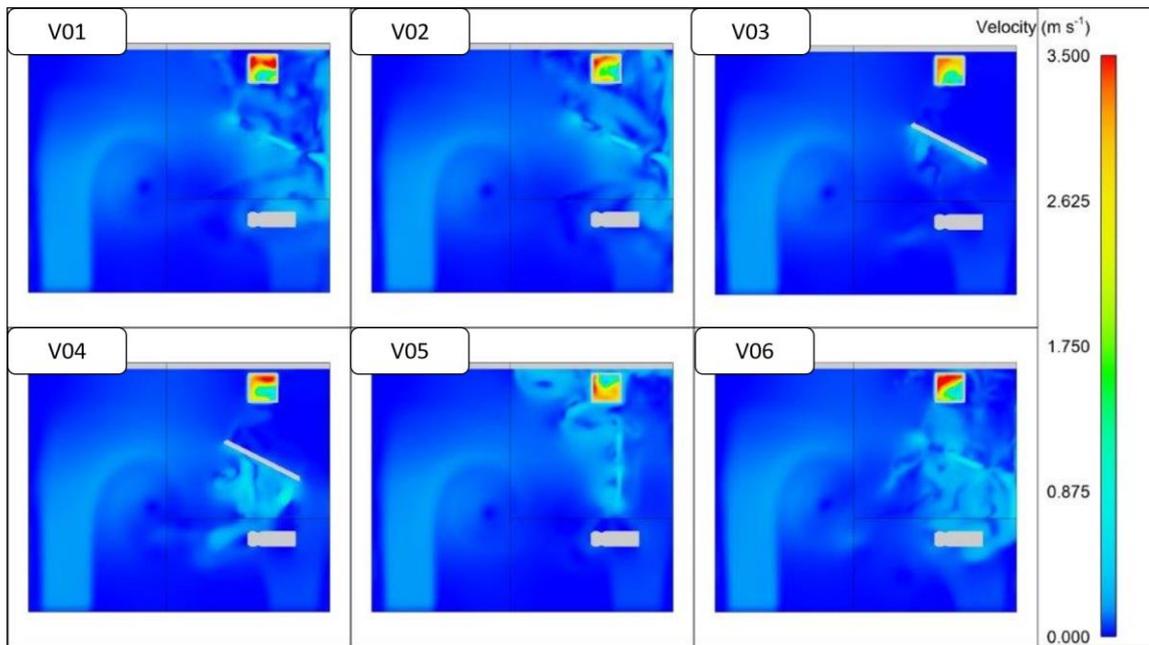
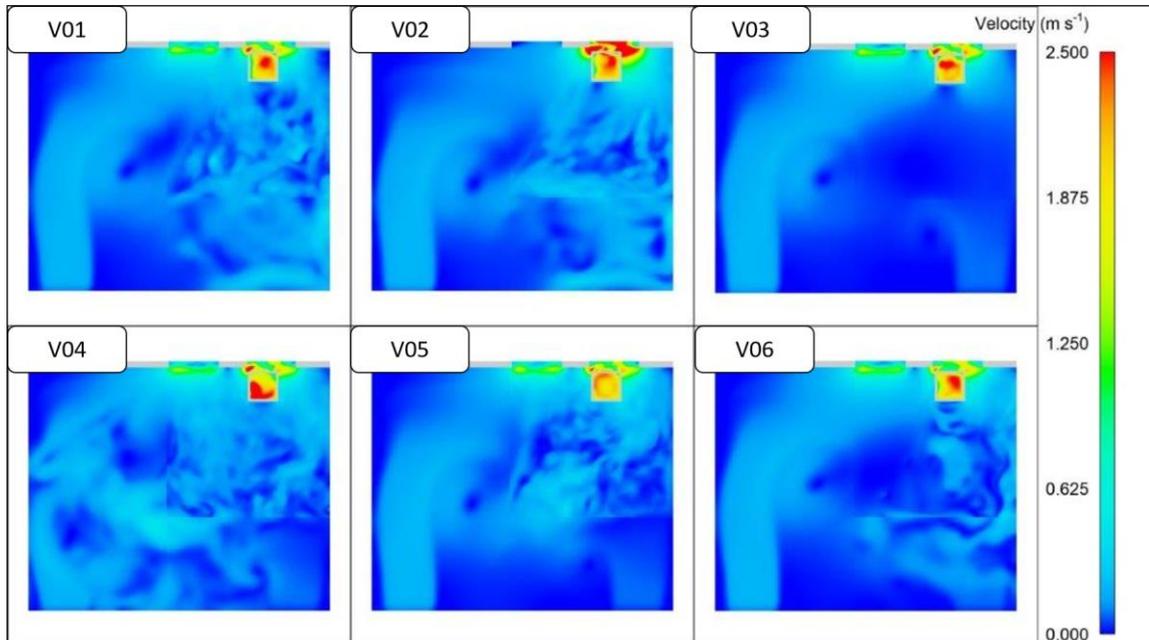


Figura 4.5 – Superfície de contorno de velocidades a 3,9 m do piso após 20 s de acionamento da motosserra.



É possível notar que na Fig. 4.3 o escoamento dos gases de escape de V01, V02 e V06 está direcionado diretamente para a parede da direita onde está localizado o sensor, o que inviabiliza a execução de testes na sala ao acionar o alarme em poucos segundos, além de expor o operador ao risco de inalação. Em V04 nota-se que os gases de escape ficam no interior da coifa a baixas velocidades, o que sugere que a coifa está operando com baixa eficiência. Em V05 nota-se que o escoamento é direcionado para o fundo da sala, mantendo o operador e o detector fora de exposição o que poderia sugerir uma possível solução para o problema. Já em

V03, é possível perceber que os gases de escape são praticamente succionados em sua totalidade, mantendo o operador e o sensor livres de um ataque direto dos gases, mostrando-se uma potencial solução. A Fig. 4.4 corrobora com estas afirmações pois notou-se que a tendência do escoamento dos gases de escape é de manter sua direção para a parede à direita e em direção ao operador nas versões 1,2 e 6 e de seguir ao fundo da sala na versão 5. Na versão 4 notou-se que o escoamento não é captado pela coifa e segue para o operador enquanto que em 3 segue sem poluentes fora da coifa. Na Fig. 4.5, entretanto, nota-se uma recirculação dos gases de escape na versão V05 em direção ao operador, o que sugere que o sistema de exaustão não é suficiente para a remoção completa dos gases, de forma que há a tendência dos gases se concentrarem no forro ao longo do tempo.

Uma outra maneira de visualizar esse efeito é através da diferença de massas específicas conforme mostrado nas Fig. 4.6, 4.7 e 4.8, onde a escala parte de  $1,15 \text{ kg.m}^{-3}$  referente ao monóxido em tom de verde até  $1,25 \text{ kg.m}^{-3}$  referente ao ar em tom de azul e sendo a massa específica média em tom de magenta.

Figura 4.6 – Superfície de contorno de massas específicas a 1,3 m do piso após 20 s de acionamento da motosserra.

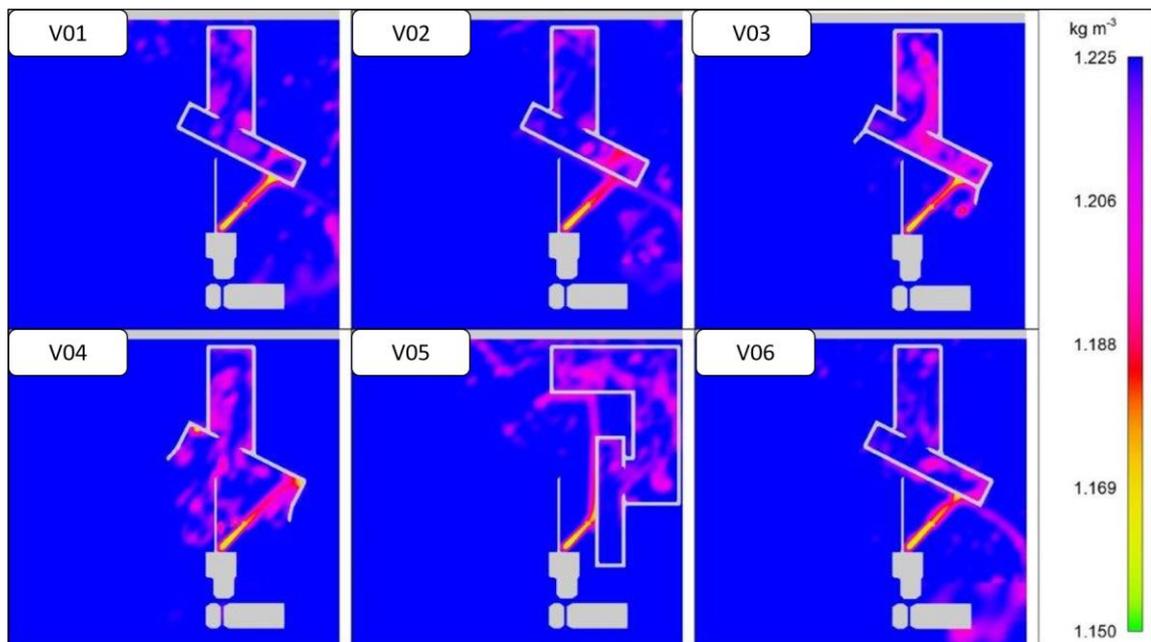


Figura 4.7 – Superfície de contorno de massas específicas a 1,5 m do piso após 20 s de acionamento da motosserra.

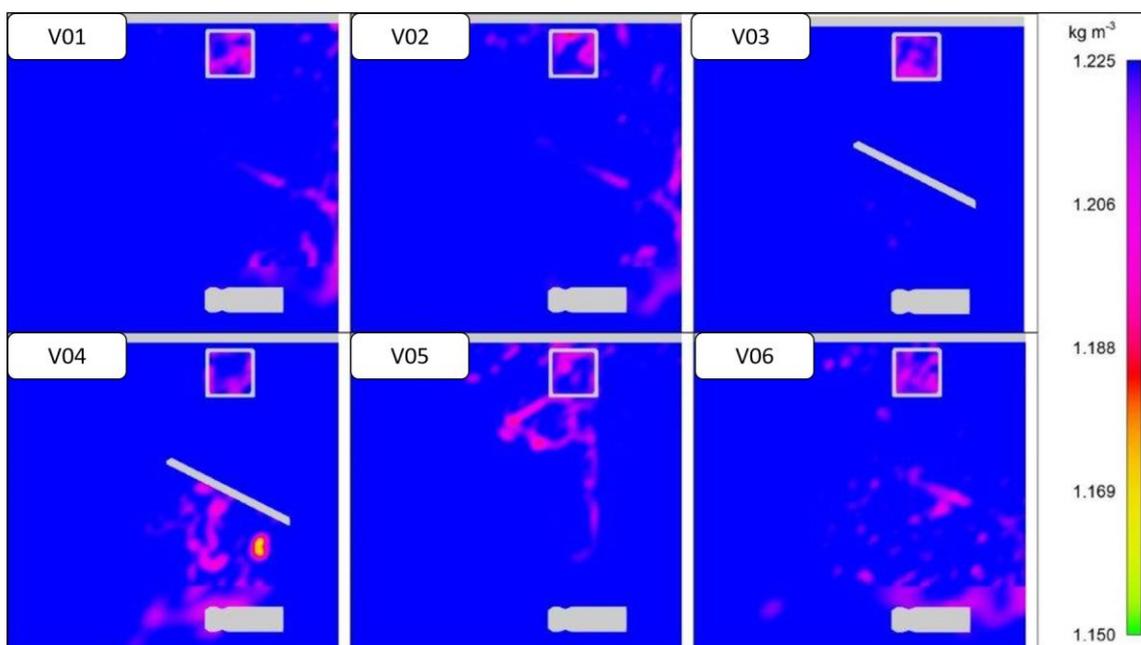
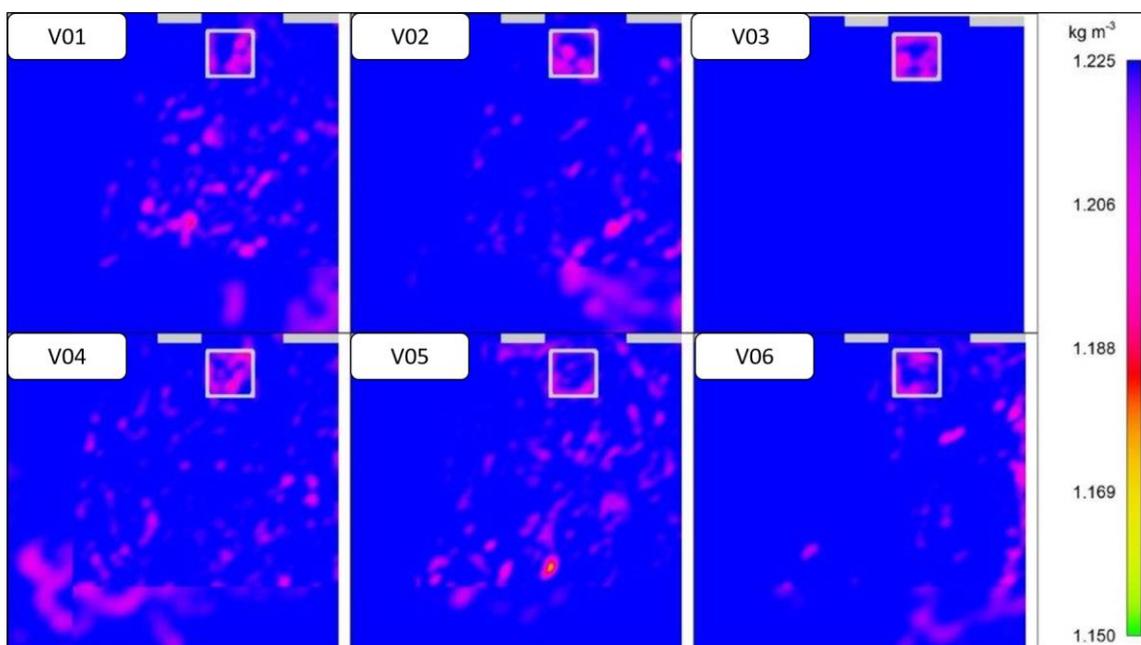


Figura 4.8 – Superfície de contorno de massas específicas a 3,9 m do piso após 20 s de acionamento da motosserra.

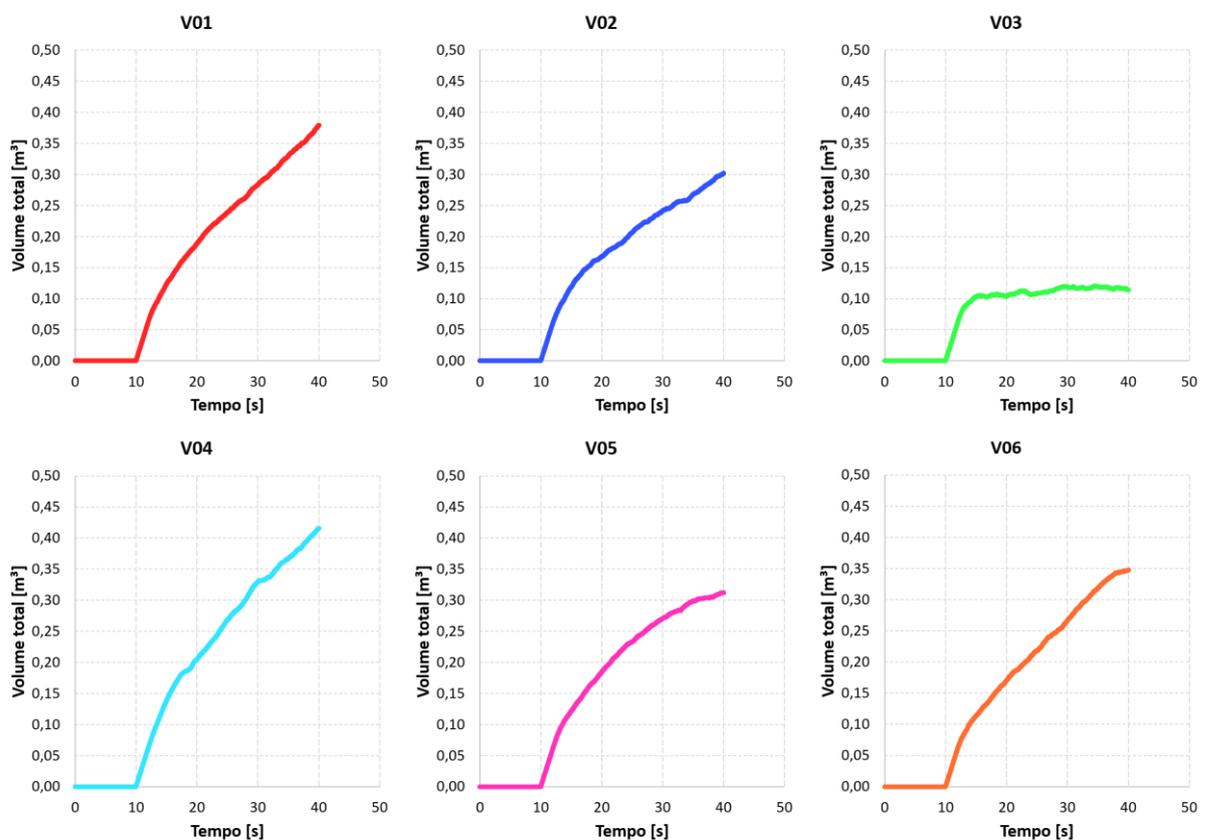


Na Fig. 4.6 nota-se uma grande concentração de CO na região do sensor da parede, e esse efeito se repete nas versões 2 e 6. Na Fig. 4.7 fica evidente que a versão 4 não oferece uma solução devido ao acúmulo de massa de CO próximo ao rosto do operador, sendo que essa solução pode ser descartada. Na Fig. 4.8 então demonstra-se que apenas a versão 3 poderia oferecer uma condição segura de operação na sala, enquanto que em todas as versões restantes há a tendência dos poluentes se concentrarem na região oposta aos exaustores pois percebe-se

que o escoamento segue para a região de recirculação no interior da sala, conforme ilustrado nas Fig. 4.4 e 4.5 nos campos de velocidade.

Outra maneira encontrada para validar as soluções foi verificar o volume total de emissões geradas na sala ao longo do tempo, conforme ilustrado na Fig. 4.9. As versões que apresentassem um volume de monóxido maior do que a versão inicial seriam descartadas, restando apenas aquelas cujo volume total fosse inferior. Na situação inicial, tem-se que após 40 s de simulação o volume de CO já era maior do que  $0,35 \text{ m}^3$ . Sendo assim, as versões que apresentassem volume maior que esse seriam automaticamente descartadas, como é o caso da V04. Conforme indicado pela Fig. 4.9, as versões que apresentaram resultados de volume total inferiores a versão inicial foram V02, V03, V05 e V06.

Figura 4.9 – Volume total de monóxido ao longo do tempo na sala.

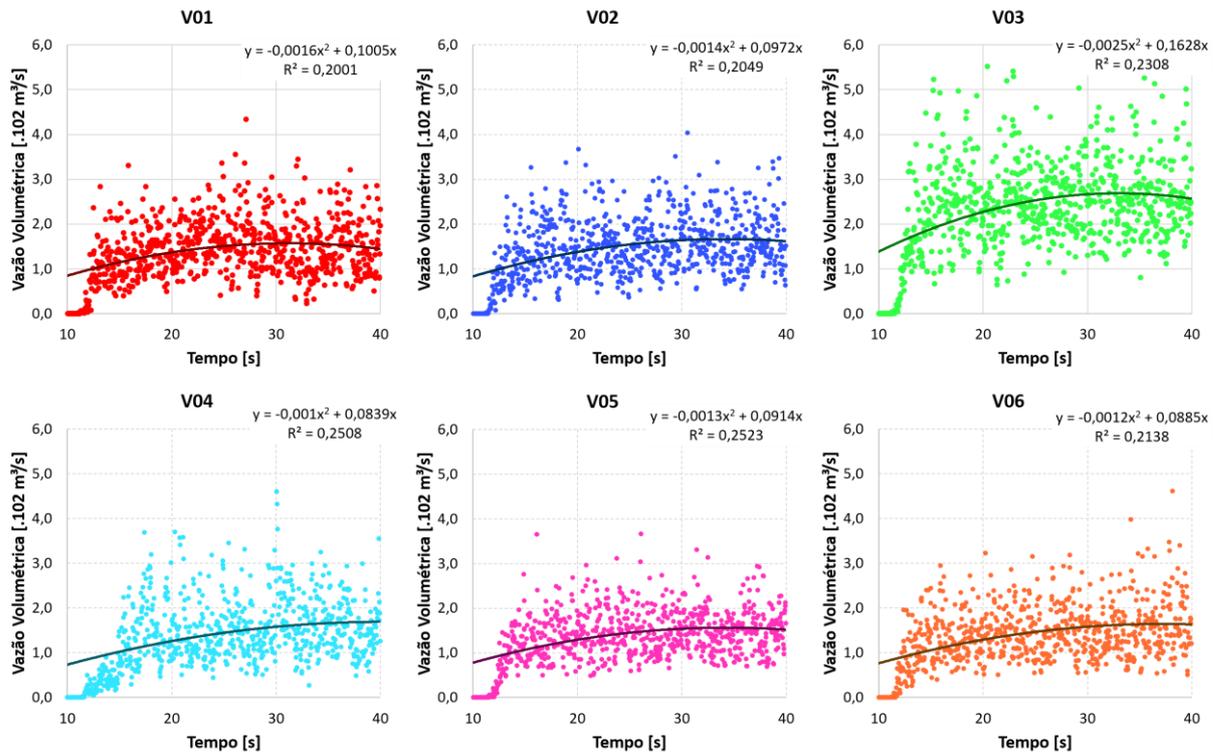


Nas outras versões, é possível concluir que o volume de CO aumenta com o tempo e em um instante de operação suficientemente longo, a sala estará ocupada em sua totalidade por CO, i.e., o sistema de exaustão não é capaz de remover o monóxido de carbono na mesma taxa com que ele é gerado, lembrando que a vazão volumétrica da motosserra estava configurado para  $0,03 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . A versão V05 aparenta uma estabilização após 40 segundos mantendo-se em  $0,3 \text{ m}^3$ , mas realizou-se uma versão com 60 s que comprova que o volume continua aumentando com o tempo, descartando-se assim esta versão.

Dessa forma, apenas a V03 mostra-se eficaz na remoção dos gases poluentes, mantendo-o a uma taxa constante, constituindo uma solução para o problema. Nas outras versões, é possível concluir que o volume de CO aumenta com o tempo e em um instante de operação suficientemente longo, a sala estará ocupada em sua totalidade por CO, i.e., o sistema de exaustão não é capaz de remover o monóxido de carbono na mesma taxa com que ele é gerado, lembrando que a vazão volumétrica da motosserra estava configurado para  $0,03 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Finalmente, para avaliar a eficiência da coifa, criou-se no software uma superfície de controle no interior do duto vertical a fim de medir a vazão volumétrica de CO ao longo da simulação. Os resultados são exibidos na Fig. 4.10.

Figura 4.9 – Vazão volumétrica de CO ao longo do tempo através da superfície de controle. As linhas contínuas representam curvas de ajuste aos dados simulados.



Destes gráficos é possível perceber que apenas a V03 é capaz de remover todo o monóxido de carbono gerado, visto que em média  $0,03 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  passam pela superfície de controle. As demais versões mostram perfil praticamente idêntico para este critério, isto é, apresentam uma vazão volumétrica inferior a  $0,03 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  de forma que comprova-se que estas versões de coifa (1, 2, 4, 5 e 6) não podem ser uma solução ao problema, pois o CO iria se concentrar na sala, atingindo o limite de 68 ppm ocasionando o disparo do alarme dos sensores.

## 5. CONCLUSÃO

No presente trabalho, por meio de um software de simulação fluidodinâmica foi possível estabelecer uma comparação entre um experimento e uma simulação de forma representativa, mesmo que com algumas simplificações nos modelos matemáticos e físicos. Com isso, permitiu-se condicionar e aprimorar o sistema de exaustão de uma sala de testes de corte com motosserra através de diferentes casos, de forma a estabelecer um comparativo entre as potenciais soluções avaliando e prevendo seu comportamento para aplicação no ambiente em questão. Dentre os casos avaliados, buscou-se aquele que fosse capaz de remover todos os gases produtos da combustão interna, como o monóxido de carbono, garantindo a segurança do operador da máquina durante o procedimento de corte e evitando o acionamento prematuro do sistema de alarmes. Foram coletadas as informações para estabelecimento das condições de contorno do problema como vazões, temperaturas e massas específicas por meio de experimentos e instrumentações na sala real. Através de condicionamentos e estudos de

independência de malha se obteve a validação da simulação. Num primeiro momento, simulações rápidas e com domínio fluido reduzido foram calculadas a fim de se verificar o comportamento físico dos gases ao passo que, conforme foram apresentando resultados satisfatórios, implementou-se mais complexidade ao sistema adicionando efeitos de transferência de calor. Após esta etapa, foi possível perceber que no problema em questão as trocas térmicas poderiam ser negligenciadas, otimizando-se o custo computacional e conseguiu-se melhores convergências de resultado ao remover as trocas térmicas do sistema. Dessa forma, foi implementando um modelo de interface fluida onde os gases da combustão e o ar puro da sala não se misturam.

Tendo em vista as simplificações utilizadas e as condições de contorno reproduzindo as condições reais da sala, foi possível estabelecer o estudo de casos e obter a melhor solução sob o menor custo de implementação. Foram propostas cinco versões além da inicial (V01). Sendo uma versão considerando um dos exaustores do teto coberto (V02), uma com defletores instalados na coifa de exaustão (V03), uma versão onde removeu-se a chapa frontal perfurada da coifa (V04), um reposicionamento da coifa no sentido paralelo à motosserra (V05) e um sistema de insuflamento e exaustão vertical (V06) cujo objetivo era empurrar os gases para baixo, evitando a exposição da face do operador aos gases nocivos.

Para avaliar cada situação, foram realizados cortes no plano horizontal em três alturas características para a validação, como a altura da janela de escape da motosserra, a altura dos detectores de CO e a altura dos exaustores próximo ao forro. Aplicando-se superfícies de contorno de velocidade e de massa específica média, foi possível perceber que as versões V02, V04 e V06 não são soluções uma vez que o escoamento do escape está em contato direto com a face do operador. Somando estes resultados com os resultados de vazão volumétrica no interior da coifa e de volume total gerado na sala ao longo do tempo, fica evidente que a versão com os defletores (V03) é a melhor versão dentre as testadas.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como trabalhos futuros, serão aplicados os defletores na coifa na sala de experimentos e serão conduzidos testes a fim de verificar a eficácia da versão proposta nesse trabalho. Simulações futuras poderão ser conduzidas para melhorar o tempo de cálculo e aplicar físicas mais complexas ao sistema, além de verificar outras posições para o detector de monóxido de carbono para que este não seja acionado prematuramente e ainda assim esteja em uma zona que possa representar com precisão a concentração de CO na sala. Também é possível conduzir um experimento aplicando uma concentração maior de óleo na mistura de combustível para que seja possível visualizar os gases do escape e obter-se um maior entendimento do seu comportamento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CROWL, Daniel A.; LOUVAR, Joseph F. **Chemical process safety: fundamentals with applications**. Second Edition, Pearson Education, 2001.

BURNETT, J.; CHAN, M. Y. Criteria for air quality in enclosed car parks. Em: **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport**. Thomas Telford-ICE Virtual Library, 1997. Disponível em: <<http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/itrans.1997.29379>>

SITTISAK, P.; CHARINPANITKUL T.; CHALERMSINSUWAN, B. Enhancement of carbon monoxide removal in an underground car park using ventilation system with single and twin jet fans. Em: **Tunnelling and Underground Space Technology**. Volume 97, 2020.

VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W. **Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. Second Edition, Pearson Education, 2007.

BULIŃSKA, A.; POPIOŁEK, Z.; BULIŃSKI, Z.; Experimentally validated CFD analysis on sampling region determination of average indoor carbon dioxide concentration in occupied space. Em: **Building and Environment**. Volume 72, 2014.

KARIMI, H.; RIAZI, B.; MOHAMMADI, M. Application of Computational Fluid Dynamics in the Simulation of Carbon Monoxide Distribution, a Case Study: Sayad Underground Tunnel in Tehran. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/333918937\\_Application\\_of\\_Computational\\_Fluid\\_Dynamics\\_in\\_the\\_Simulation\\_of\\_Carbon\\_Monoxide\\_Distribution\\_a\\_Case\\_Study\\_Sayad\\_Underground\\_Tunnel\\_in\\_Tehran](https://www.researchgate.net/publication/333918937_Application_of_Computational_Fluid_Dynamics_in_the_Simulation_of_Carbon_Monoxide_Distribution_a_Case_Study_Sayad_Underground_Tunnel_in_Tehran)>

YAKHOT, V.; ORSZAG, S. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. **Journal of scientific computing**, v. 1, n. 1, p. 3-51, 1986.

VAN HOOFF, T.; BLOCKEN, B. CFD evaluation of natural ventilation of indoor environments by the concentration decay method: CO<sub>2</sub> gas dispersion from a semi-enclosed stadium. **Building and Environment**, v. 61, p. 1-17, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132312003216>>

YANG, L., YE, M., HE, B. CFD simulation research on residential indoor air quality. Em **Science of The Total Environment**. Volume 472, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969713014228>>

Flow-3D. Flow-3D User's Guide. Versão 12, 2020.

LAUNDER, B. E. e SPALDING, D. B. The numerical computation of turbulent flows. Em **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, vol. 3, 1974. pp. 269-289

MALISKA, Clovis R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional: fundamentos e coordenadas generalizadas**. Segunda Edição. Rio de Janeiro, LTC, 2004.

ROACHE, P. J. Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies, **Journal of Fluids Engineering**, Vol. 116, 1994; 405-413.

**ANEXO**

Figura A.1 – Especificações técnicas do anemômetro usado nos experimentos. Disponível em: <<https://static-int.testo.com/media/b2/5b/911ffc2b76a6/testo-405-Data-sheet.pdf>>

testo 405



**Technical data / Accessories**

**testo 405**

testo 405 thermal anemometer with duct holder, incl. attachment clip and batteries



Part no. 0560 4053

**General technical data**

Storage temperature	-20 to +70 °C
Operating temperature	0 to +50 °C
Battery type	3 AAA micro batteries
Battery life	Approx. 20 h
Dimensions	490 x 37 x 36 mm
Length Probe shaft	300 mm
Diameter Probe shaft / Probe shaft tip	Ø 16 mm / Ø 12 mm
Weight	115 g (with batteries, without packaging)

0981 9754/msp/02.2020

**Sensor types**

	<b>Thermal</b>	<b>NTC</b>
Measuring range	0 to 5 m/s (-20 to 0 °C) 0 to 10 m/s (0 to +50 °C) 0 to +99990 m <sup>3</sup> /h	-20 to +50 °C
Accuracy ±1 digit	±(0.1 m/s + 5% of m.v.) (0 to +2 m/s) ±(0.3 m/s + 5% of m.v.) (remaining range)	±0.5 °C
Resolution	0.01 m/s	0.1 °C

**Accessories for measuring instrument**

	<b>Part no.</b>
ISO calibration certificate velocity, two point calibration; calibration points 5m/s and 10m/s	0520 0094
ISO calibration certificate velocity, hot wire, vane anemometer, Pitot tube; calibration points 1; 2; 5; 10 m/s	0520 0004

Subject to change without notice.



Figura A.2 - Especificações técnicas do detector de CO instalado na sala. Disponível em: <[https://www.det-tronics.com/content/documents/90-1199-10.3\\_\(GT3000\).pdf](https://www.det-tronics.com/content/documents/90-1199-10.3_(GT3000).pdf)>

SPECIFICATIONS	
<b>Calibration</b>	Sensors are calibrated at the factory. Gas type and range are read by the transmitter. Calibration is initiated at the detector, at the UD10/UD20 Universal Display Unit, or by some other HART interface device.
<b>Operating Voltage</b>	24 Vdc nominal; Operating range is 12 to 30 Vdc.
<b>Power Consumption</b>	0.8 watt maximum @ 30 Vdc.
<b>Max. Loop Resistance</b>	300 ohms at 18 Vdc, 600 ohms at 24 Vdc.
<b>Current Output</b>	4-20 mA (Normal operating mode) 3.8 mA indicates calibrate mode 3.5 mA or less indicates a fault condition.
<b>Wiring</b>	2x22 AWG, 1x16 AWG, 600V, 20'.
<b>Storage Temp.</b>	(GTX) -55°C to +75°C (-67°F to +167°F). (GTS) 0°C to +20°C (+32°F to +68°F) Ideal: +4°C to +10°C (+39°F to +50°F).
<b>Storage Life</b>	6 months in factory-sealed packaging.
<b>Humidity Range</b>	15 to 90% RH.
<b>Tropicalization / PC BD Protection</b>	Conformal coated printed circuit boards: CTI Rating of 600V, maximum allowed by standard. Third party tested per ASTM-D-3638-07.
<b>Pressure Range</b>	Atmospheric ±10%.
<b>Warm-Up</b>	Warm-up time can last up to 150 seconds.
<b>Thread Options</b>	3/4" NPT or M25.
<b>Enclosure Material</b>	GTX Transmitter: 316 Stainless Steel GTS Sensor Module: PPA (30% Carbon filled).
<b>Expected Operating Life</b>	GTS: 2 years in an open air environment.
<b>Expected Shelf Life</b>	GTS: 6 months in factory sealed packaging.
<b>Warranty (For the GTX. See Table below for the GTS)</b>	18 months from date of shipment.
<b>Certification</b>	
<b>Explosion-Proof Model</b>	FM/CSA: Class I, Div. 1, Groups A, B, C & D (T4). Class I, Div. 2, Groups A, B, C & D (T4). Class I, Zone 1, AEx d mb [ia Ga] IIC T4. IP66. Conduit seal not required. Acidic atmospheres excluded. IECEX: Ex d mb [ia Ga] IIC T4 Gb IP66. IECEX FMG 10.0003X. INMETRO: UL-BR 15.0752X. Ex db mb [ia Ga] IIC T4 Gb IP66. Tamb -40°C to +50°C (H <sub>2</sub> S). Tamb -20°C to +50°C (other).
<b>Intrinsically Safe Model</b>	FM: IS Class I, Div. 1, Groups A, B, C & D (T4). Class I, Zone 0, AEx ia IIC (T4). Performance verified per ANSI/ISA 92.00.01 and FM6340/41. IP66. CSA: Class I, Div. 1 & 2, Groups A, B, C & D (T4). IP66. IECEX: Ex ia IIC T4 Ga IP66. IECEX FMG 08.0005X. INMETRO: UL-BR 15.0404X. Ex ia IIC T4 Gb IP66. Tamb -40°C to +50°C.
<b>SIL Approval</b>	IEC 61508 Certified SIL 2 Capable. SIL Certification includes H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> S+ and O <sub>2</sub> models only.

Factory Mutual Performance Approved Electrochemical Gas Sensors

Gas	Range	Response Time <sup>1</sup>	Accuracy/Repeat-ability (Whichever is Greater)	Operating Temperature Range	Zero Drift	Performance Approved Standard	Storage Temperature Range	Warranty (from ship date)
Hydrogen Sulfide+ (H <sub>2</sub> S+)	0-20 PPM	T20 = ≤10 Sec., T50 = ≤13 Sec., T90 = ≤23 Sec.	±2 ppm or ±10% of Reading	-40°C to +55°C	± 1 ppm/Mo.	ISA 92.00.01 <sup>4</sup>	10°C to 30°C	18 months
Hydrogen Sulfide+ (H <sub>2</sub> S+)	0-50 PPM	T20 = ≤6 Sec., T50 = ≤9 Sec., T90 = ≤15 Sec.	±2 ppm or ±10% of Reading	-40°C to +55°C	± 1 ppm/Mo.	ISA 92.00.01 <sup>4</sup>	10°C to 30°C	18 months
Hydrogen Sulfide+ (H <sub>2</sub> S+)	0-100 PPM	T20 = ≤6 Sec., T50 = ≤8 Sec., T90 = ≤15 Sec.	±2 ppm or ±10% of Reading	-40°C to +55°C	± 2 ppm/Mo.	ISA 92.00.01 <sup>4</sup>	10°C to 30°C	18 months
Ammonia (NH <sub>3</sub> )	0-100 PPM <sup>2</sup>	T50 = 24 Sec., T90 = 65 Sec.	±4 ppm or ±10% of Reading	-20°C to +40°C	± 2 ppm/Mo.	FM6340 <sup>4</sup>	0°C to 20°C	12 months
Ammonia (NH <sub>3</sub> )	0-500 PPM <sup>2</sup>	T50 = 30 Sec., T90 = 120 Sec.	±4 ppm or ±10% of Reading	-20°C to +40°C	± 10 ppm/Mo.	Det-Tronics Verified	0°C to 20°C	12 months
Oxygen (O <sub>2</sub> ) <sup>5</sup>	1-25% V/V <sup>3</sup>	T20 = 7 Sec., T90 = 30 Sec.	< 0.5% V/V	-20°C to +50°C	< 2 %/Mo.	Det-Tronics Verified	0°C to 20°C	18 months
Carbon Monoxide (CO)	0-100 PPM	T50 = 15 Sec., T90 = 40 Sec.	±5 ppm or ±10% of Reading	-20°C to +50°C	± 2 ppm/Mo.	ISA 92.00.01 <sup>4</sup>	0°C to 20°C	18 months
Carbon Monoxide (CO)	0-500 PPM	T50 = 12 Sec., T90 = 25 Sec.	±5 ppm or ±10% of Reading	-20°C to +50°C	± 9 ppm/Mo.	ISA 92.00.01 <sup>4</sup>	0°C to 20°C	18 months
Sulfur Dioxide+ (SO <sub>2</sub> +)	0-20 PPM	T50 = 12 Sec., T90 = 30 Sec.	±0.6 ppm or ±10% of Reading	-40°C to +55°C	± 0.4 ppm/Mo.	Det-Tronics Verified	0°C to 20°C	12 months
Sulfur Dioxide+ (SO <sub>2</sub> +)	0-100 PPM	T50 = 15 Sec., T90 = 35 Sec.	±0.6 ppm or ±10% of Reading	-40°C to +55°C	± 0.4 ppm/Mo.	Det-Tronics Verified	0°C to 20°C	12 months
Chlorine (Cl <sub>2</sub> )	0-10 PPM	T50 = ≤14 Sec., T90 = ≤34 Sec.	±0.6 ppm or ±10% of Reading	-20°C to +50°C	< 0.2 ppm/Mo.	Det-Tronics Verified	0°C to 20°C	12 months
Hydrogen (H <sub>2</sub> )	0-1000 PPM	T50 = 8 Sec., T90 = 60 Sec.	±50 ppm or ±10% of Reading	-20°C to +40°C	± 20 ppm/Mo.	Det-Tronics Verified	0°C to 20°C	18 months
Nitrogen Dioxide (NO <sub>2</sub> )	0-20 PPM	T50 = 7 Sec., T90 = 31 Sec.	±2 ppm or ±10% of Reading	-20°C to +40°C	± 0.1 ppm/Mo.	Det-Tronics Verified	0°C to 20°C	12 months

<sup>1</sup> Time to reach percentage of final reading when gas concentration equal to full scale is applied to sensor.  
<sup>2</sup> Background concentrations of ammonia may shorten lifetime of sensor.  
<sup>3</sup> Sensor approved for oxygen depletion (< 21% V/V) only.  
<sup>4</sup> Factory Mutual Performance Approved.  
<sup>5</sup> Oxygen sensor will indicate fault if <1% volume oxygen is detected.

Specifications subject to change without notice.

All trademarks are the property of their respective owners.  
 © 2020 Detector Electronics Corporation. All rights reserved.



**Corporate Office**  
 6901 West 110<sup>th</sup> Street  
 Minneapolis, MN 55438 USA  
[www.det-tronics.com](http://www.det-tronics.com)  
 Phone: +1 952.941.6665  
 Toll-free: +1 800.765.3473  
 Fax: 952.829.8750  
 det-tronics@carrier.com

## APÊNDICE

Tabela B.1 – Histórico de versões simuladas.

<i>Versão da simulação</i>	<i>Elementos</i>	<i>Duração</i>	<i>Observação</i>
Versão inicial	65000	22min	Dimensão da sala 1,75x3x2,7m
Refino de malha	227000	4h	Refino de malha
Refino de malha	1580000	1d19h	Refino de malha
Refino otimizado	520000	13h	Refino de malha otimizado
Coifa rotacionada 45°	227000	5h	Rotação de 45° da coifa
Refino de malha	520000	13h	Refino de malha
Aumento do Domínio	635000	15h	Dimensão da sala 1,75x3x3,9m
Aumento do Domínio	872000	1d2h	Dimensão da sala 3,8x3,8x3,9m
Adição dos Exaustores	882000	1d3h	Total de duas exaustões e coifa
Aumento do Domínio	970000	1d8h	Dimensão da sala 4,8x4x3,9m
Refino de malha	990000	1d8h	Refino de malha
Física para dois fluidos	990000	1d8h	Física de interação física entre de CO de ar
Física de Transf. De Calor	990000	1d8h	Transferência de calor
Condições de Contorno	960000	23h	Redução na vazão do exaustor
Condições de Contorno	960000	1d5h	Corrigido parâmetro de solução RNG
Condições de Contorno	960000	1d12h	Redução na vazão de insuflamento
Condições de Contorno	960000	1d8h	Redução na vazão de insuflamento
V01 Teste de Casos	960000	1d8h	Atraso no acionamento da motosserra
Refino de malha	1200000	1d13h	Refino para convergência de malha
Refino de malha	2850000	2d20h	Refino para convergência de malha
V02 Teste de Casos	1200000	1d13h	Desativado um dos exaustores
V03 Teste de Casos	1200000	1d9h	Coifa com abas
Refino de malha	2850000	2d13h	Refino de malha
V04 Teste de Casos	1200000	1d9h	Removido chapa perfurada da coifa
V05 Teste de Casos	1200000	1d9h	Coifa posicionada normal a parede
Tempo total	1200000	1d9h	Aumentado tempo de simulação para 60s
V06 Teste de Casos	1200000	1d9h	Insuflamento vertical