

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

ESTUDO COMPUTACIONAL DOS EFEITOS DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO
FORÇADA SOBRE O TEMPO DISPONÍVEL PARA EVACUAÇÃO DE PESSOAS EM
UM INCÊNDIO EM COMPARTIMENTO

por

Gabriel Ochôa Victor

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, novembro de 2020.

CIP - Catalogação na Publicação

Ochoa Victor, Gabriel
ESTUDO COMPUTACIONAL DOS EFEITOS DO SISTEMA DE
VENTILAÇÃO FORÇADA SOBRE O TEMPO DISPONÍVEL PARA
EVACUAÇÃO DE PESSOAS EM UM INCÊNDIO EM COMPARTIMENTO /
Gabriel Ochoa Victor. -- 2020.
26 f.
Orientador: Felipe Roman Centeno.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2020.

1. Ventilação Forçada. 2. Incêndio Confinado. 3.
FDS. I. Centeno, Felipe Roman, orient. II. Título.

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

Gabriel Ochoa Victor

ESTUDO COMPUTACIONAL DOS EFEITOS DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO
FORÇADA SOBRE O TEMPO DISPONÍVEL PARA EVACUAÇÃO DE PESSOAS EM
UM INCENDIO EM COMPARTIMENTO

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

Energia e Fenômenos de Transporte.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Roman Centeno

Comissão de Avaliação:

Prof. Guilherme Fiorot

Prof. Andrés Mendiburu

Porto Alegre, novembro de 2020.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pelo apoio incondicional durante todo o período de graduação e também aos professores pela orientação e aprendizagem.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2020

ESTUDO COMPUTACIONAL DOS EFEITOS DO SISTEMA DE
VENTILAÇÃO FORÇADA SOBRE O TEMPO DISPONÍVEL PARA
EVACUAÇÃO DE PESSOAS EM UM INCÊNDIO EM COMPARTIMENTO

Victor, Gabriel Ochôa

ochoa.engenharia@gmail.com

Resumo.

O objetivo deste trabalho é estudar o impacto que o sistema de ventilação forçada inflige no tempo disponível para evacuação de pessoas (ASET) em um cenário de incêndio em compartimento. O presente estudo foi realizado através da modelagem numérica usando o software Fire Dynamics Simulator (FDS), considerando nove diferentes variações em parâmetros que constituem o sistema de ventilação forçada (vazões de insuflamento e de exaustão, posições dos dutos de insuflamento e de exaustão). Para cada caso foram determinados os tempos disponíveis para evacuação de pessoas em quatro regiões distintas dentro do local. Os resultados mostraram que, para o cenário em análise, a posição do sistema de exaustão é o fator de maior relevância na variação do ASET, sendo viável aumentá-lo em até 21% através de combinações nos parâmetros de vazão e localidade dos dutos, comprovando que, ao ser projetado de maneira adequada, o sistema de ventilação forçada de uma sala pode ter efeito benéfico em uma situação de incêndio confinado.

Palavras-chave: Ventilação forçada, incêndio confinado, FDS, modelagem numérica.

Abstract.

The objective of this work is to study the impact that the forced ventilation system has on the available safe egress time of people (ASET) in a compartment fire scenario. The present study was carried out through numerical modeling using the Fire Dynamics Simulator (FDS) software, considering nine different variations in parameters that constitute the forced ventilation system (inflow and outflow rates, positions of the insufflation and exhaustion ducts). For each case, the available safe egress time for evacuation of people in four different regions within the site was determined. The results showed that, for the scenario under analysis, the position of the exhaust system is the most relevant factor in the variation of ASET, being viable to increase it up to 21% through combinations in the flow parameters and location of the ducts, proving that, when properly designed, a room's forced ventilation system can have a beneficial effect in a confined fire situation.

Keywords: Forced Ventilation, compartment fire, FDS, numerical modeling.

NOMENCLATURA

Símbolo	Significado	Unidade
$X_{F,l}$	Fração de combustível acima da poça	Adimensional
h_v	Calor de vaporização	[kJ/kg]
W_f	Peso molecular do combustível	[g/mol]
R	Constante universal dos gases	[m ³ /(°C*mol)]
T_s	Temperatura da superfície	[°C]
T_b	Temperatura de ebulição do combustível	[°C]
P_m	Pressão	[Pa]
T_g	Temperatura da fase gasosa	[°C]
h_m	Coefficiente de transferência de massa	Adimensional
\dot{m}''	Taxa de perda de massa	[kg/(m ² *s)]
S_h	Coefficiente de Sherwood	Adimensional
D_{lg}	Coefficiente de difusão entre o vapor do combustível e o gás presente no ambiente	Adimensional
ρ_f	Densidade do combustível	[kg/m ³]
δ_f	Espessura da camada de combustível	[m]
K	Coefficiente de perda entre os nós dos dutos	Adimensional
$\Delta p_{nós}$	Diferença de pressão entre dois nós	[Pa]
u_{duto}	Velocidade específica para a secção de duto	[m/s]
\dot{V}	Vazão volumétrica	[m ³ /s]
A_{duto}	Área de secção transversal do duto	[m ²]
ϕ	Global Equivalence Ratio	Adimensional
Δh_{O_2}	Calor de combustão por unidade de massa de oxigênio consumida	[kJ/kg]
\dot{m}_{O_2}	Taxa de insuflamento de oxigênio	[kg/s]

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novas tecnologias trouxe um avanço exponencial de conhecimento nas últimas décadas. A possibilidade de um computador simular eventos reais através de equações matemáticas tem o potencial de solucionar problemas recorrentes na sociedade moderna. Situações como o incêndio causado por um sobreaquecimento no sistema de ar condicionado no Museu Nacional do Brasil em 2018 levantam questionamentos de como esses avanços podem ser utilizados de forma mais efetiva na prevenção de eventos onde o dano causado pelo fogo põe em risco a vida humana e os patrimônios culturais do país.

No final do século XX o estudo desenvolvido por Gordonova (1997) visava compreender como o sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado, HVAC (da sigla em inglês para *Heating, Ventilating and Air Conditioning*) espalhava os gases quentes proveniente da queima do combustível em uma situação de incêndio, iniciando a ideia de utilizar um computador para simular os efeitos da dispersão da fumaça nos dutos de ventilação através de softwares CFD (da sigla em inglês para *Computational Fluid Dynamics*).

No período entre 2006 e 2011 o Instituto de Proteção contra Radiação e Segurança Nuclear, IRSN (da sigla em francês para *Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire*) construiu uma instalação chamada de *DIVA Facility* onde foram desenvolvidos diversos experimentos sobre os mecanismos para propagação de calor e fumaça. O estudo intitulado de *OECD Prisme Project* desenvolvido por Audoin et al. (2013), apresentou mais de 35 incêndios experimentais de larga escala realizados pelos pesquisadores durante o período.

Como a realização de experimentos de incêndio é uma atividade muito perigosa e possui custo elevado, o Instituto Nacional de Normas e Tecnologias, NIST (da sigla em inglês para *National Institute of Standards and Technology*), entidade governamental dos Estados Unidos, criou um software de distribuição gratuita chamado de FDS (da sigla em inglês para *Fire Dynamics Simulator*) que utiliza as equações de Navier-Stokes para resolver simulações de incêndio com ênfase no transporte de calor e fumaça. Recentemente o estudo realizado por Wahlqvist (2013) comprovou que é possível empregar de forma efetiva o software FDS para modelar computacionalmente os incêndios realizados pela IRSN.

O presente trabalho objetiva aprofundar os estudos sobre o impacto que o sistema de ventilação forçada pode infligir sobre o tempo disponível para evacuação de pessoas, ASET (da sigla em inglês *Available Safe Egress Time*) para casos de incêndio confinado. Para tanto, empregou-se como base a situação experimental realizada no projeto *OECD Prisme* para desenvolver uma representação computacional da *DIVA Facility* no software FDS, estudando numericamente nove cenários de incêndio em que variam diferentes parâmetros (vazões e posições dos dutos) envolvendo o sistema de ventilação forçada instalado no local.

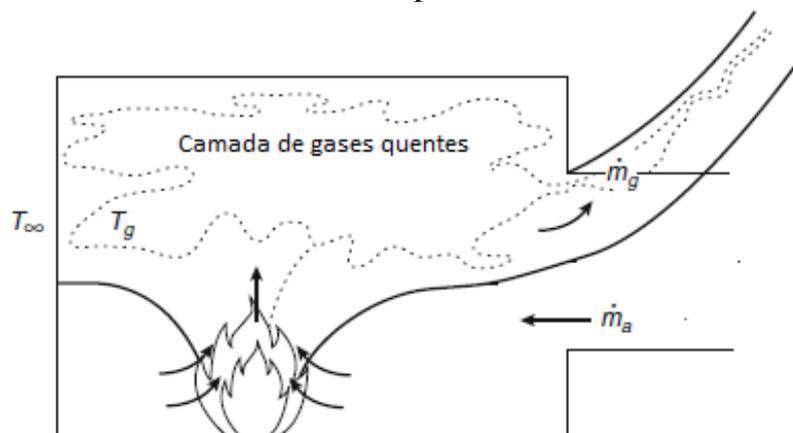
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. A dinâmica de gases em um incêndio em compartimento

O modelo de incêndio em compartimento possui uma abordagem para situações onde há um incêndio em locais que possuem uma abertura ou ventilação externa. Os gases quentes e a energia liberada pelo fogo são direcionados ao teto formando uma coluna denominada de pluma, este fenômeno se sucede graças à diferença de densidade entre os produtos da combustão e o ar. Ao atingir o teto do compartimento, a pluma se alastra paralelamente a ele direcionando-se até a região das paredes, neste ponto, os gases quentes começam a escoar em direção ao solo em um movimento cíclico dentro do compartimento. A camada de gases quentes aumenta em espessura, até atingir a altura da porta, quando começa a escoar para fora

do compartimento. A Figura 1 representa a formação da camada de gases quentes no modelo de incêndio em confinamento.

Figura 1 – Formação das camadas de gases quentes no modelo de incêndio em confinamento. Fonte: Adaptado de SFPE, 2016.



A este modelo é dado o nome de modelo de duas zonas, pois o ar, que está em uma temperatura mais amena (e então é mais denso), se posiciona em uma camada inferior do compartimento alimentando a chama, e os gases quentes se localizam na camada superior do ambiente como ilustrado na Figura 1. O conceito da modelagem por duas zonas se baseia na uniformidade das duas regiões, considerando a hipótese de que as propriedades térmicas e as temperaturas são equivalentes para pontos distintos dentro de cada camada.

2.2. Simulação numérica no software Fire Dynamics Simulator

O programa FDS é um software CFD que emprega o método de volumes finitos, aplicando as equações de Navier-Stokes para realizar simulações de incêndio com enfoque na transferência de calor e transporte de fumaça. O procedimento padrão do FDS é atualizar as equações para conservação da quantidade de movimento, energia e espécies químicas para cada volume de controle fazendo uso da metodologia LES (da sigla em inglês para *Large Eddy Simulation*) que aplica um filtro espacial, capaz de detectar as oscilações turbulentas a serem resolvidas. Por empregar a metodologia LES, o software FDS divide o domínio em volumes retilíneos cabendo ao usuário definir somente as três dimensões da malha que será utilizada. Ao resolver as equações de quantidade de movimento, o software emprega um algoritmo preditor-corretor para cada passo de tempo, verificando se o critério de CFL (*Courant, Friedrichs, Lewy*) é satisfeito, caso não seja, o passo de tempo é ajustado, voltando ao início do procedimento preditor.

O modelo de combustão é baseado em frações de mistura das espécies químicas envolvidas em uma reação de única etapa global, conforme equação presente no ANEXO B. O FDS é capaz de incorporar fontes de calor, condições de contorno, transporte de radiação através das camadas de gases quentes, decomposição térmica de materiais, além de uma variedade de componentes que auxiliam a descrever incêndios em prédios.

O programa possui dois modelos para representar a pirólise. A metodologia denominada pelo software de pirólise simples se caracteriza por empregar valores prescritos introduzidos pelo usuário para a taxa de calor liberado, HRR (da sigla em inglês para *Heat Release Rate*) ou para a taxa de massa queimada, MLR (da sigla em inglês para *Mass Loss Rate*). O segundo modelo utilizado pelo software é chamado de pirólise complexa e pode ser dividido em dois casos, combustível líquido ou combustível sólido. Segundo o McGrattan (2019), para

combustíveis líquidos a taxa na qual o combustível evapora durante queima é função da temperatura do líquido e da concentração de vapor de combustível acima da superfície onde ele está posicionado. Para determinar a fração de combustível que está acima da poça, o software utiliza a Equação (1).

$$X_{F,l} = \exp \left[-\frac{h_v W_f}{R} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_b} \right) \right] \quad (1)$$

onde $X_{F,l}$, é a fração de combustível acima da superfície, h_v é o calor de vaporização, W_f é peso molecular do combustível, T_s é a temperatura da superfície, T_b é a temperatura de ebulição do combustível e R é a constante universal dos gases. Com exceção da constante R , as demais variáveis são fornecidas direta ou indiretamente pelo usuário. Na determinação da taxa de evaporação, \dot{m}'' , também chamada de taxa de massa queimada, o FDS utiliza a Equação (2).

$$\dot{m}'' = h_m \frac{P_m W_f}{RT_g} \ln \left(\frac{X_{F,g} - 1}{X_{F,l} - 1} \right) \quad (2)$$

onde h_m é o coeficiente de transferência de massa, P_m é a pressão, T_g é a temperatura na fase gasosa e $X_{F,g}$ é a fração volume de vapor na célula adjacente a superfície do combustível. O valor do coeficiente de transferência de massa é determinado através da Equação (3).

$$h_m = \frac{S_h D_{lg}}{L} \quad (3)$$

onde S_h é o coeficiente de Sherwood, D_{lg} é o coeficiente de difusão entre o vapor do combustível e o gás presente no ambiente e L é um coeficiente de escala que possui valor 1 para a pirólise líquida. Utilizando os resultados para \dot{m}'' , o programa é capaz de determinar o período total de queima do combustível através da Equação (4).

$$t_b = \rho_f \delta_f / \dot{m}'' \quad (4)$$

onde t_b é tempo de queima, ρ_f é a densidade do combustível fornecida pelo usuário e δ_f é a espessura da camada de combustível, também inserida pelo usuário.

Em cenários onde há equipamentos de ar condicionado ou exaustão mecânica, o software pode ser programado para modelar redes de dutos HVAC capazes de insuflar ou retirar gases dos ambientes simulados. Para tanto, o FDS utiliza a Equação (5) para contabilizar as perdas de carga que ocorrem dentro dos dutos.

$$K = 2\Delta p_{nós} / (\rho_{ar} u_{duto}^2) \quad (5)$$

onde K é o coeficiente de perda entre os nós dos dutos, $\Delta p_{nós}$ é a diferença de pressão entre dois nós, ρ_{ar} é a densidade do ar passando pelo duto e u_{duto} é a velocidade para a secção de duto que pode ser calculada pela Equação 6.

$$u_{duto} = \dot{V} / A_{duto} \quad (6)$$

sendo V a vazão volumétrica que passa pelo duto e A_{duto} a área de secção transversal do duto.

2.3. Global Equivalence Ratio

O GER (da sigla em inglês para *Global Equivalence Ratio*) é um parâmetro empregado para definir se um incêndio em compartimento pode sofrer alterações devido à insuficiência de ar no local, a Equação (7) é indicada para sua determinação. (SFPE, 2016)

$$\phi = \dot{Q}/(\Delta h_{O_2} \dot{m}_{O_2}) \quad (7)$$

onde ϕ representa o Global Equivalence Ratio, Δh_{O_2} é o calor de combustão por unidade de massa de oxigênio consumida, \dot{Q} é o pico para taxa de calor liberado pelo fogo e \dot{m}_{O_2} é a taxa de insuflamento de oxigênio. Quando o resultado for $\phi < 1$ o compartimento é considerado bem ventilado, indicando que aumentar a vazão de insuflamento não trará variações relevantes na taxa de calor liberado pelo combustível durante a queima. Se o valor determinado for $\phi > 1$, significa que o compartimento é considerado mal ventilado e pode sofrer variações decorrentes ao aumento na vazão de insuflamento. O valor de \dot{m}_{O_2} pode ser obtido através da Equação (8) é utilizada para condições de ventilação mecânica.

$$\dot{m}_{O_2} = 0,23\rho\dot{V} \quad (8)$$

Para a Equação (8), ρ é a densidade do ar e \dot{V} é a vazão volumétrica de ar que entra no compartimento devido à ventilação forçada.

3. METODOLOGIA

3.1. Descrição do Problema

A primeira etapa na elaboração de um modelo computacional é a realização de uma validação dos dados desenvolvidos via simulação utilizando como referência resultados obtidos previamente através de experimentos. O intuito desse procedimento é garantir que os valores gerados pelo software são condizentes com a realidade. Para este estudo foram empregados o software FDS, um código base disponibilizado no domínio virtual Github e os resultados experimentais obtidos no projeto OECD Prisme apresentado por Audouin et al. (2013), que são concedidos de forma gratuita pela IRSN.

O domínio criado no software é apenas um dos quatro ambientes contidos na estrutura denominada de *DIVA Facility*, a sala empregada no estudo possui 120 m³ de volume total, sendo 6,0 m de comprimento, 5,0 m de largura e 4,0 m de altura. As únicas aberturas no domínio são o difusor de insuflamento localizado no lado norte e a grelha de exaustão posicionada na região sul, ambos situados a 3,3 m do piso com dimensões semelhantes de 0,4 m de comprimento, 0,4 m de largura e 0,5 m de altura. O sistema de insuflamento fornece vazão constante de 560 m³/h e a exaustão retira gases do ambiente com vazão de 680 m³/h. A Figura 2 ilustra o ambiente através de vista de topo com indicações para os principais componentes presentes no local.

Conforme ilustra a Figura 2, no centro do ambiente há um suporte com área de 0,4 m² e altura de 0,4 m onde 15 kg do combustível Tetra Propileno Hidrogenado, cuja fórmula química é C₁₂H₂₆, estão depositados inicialmente no estado líquido e após o início do incêndio queimam por um período de 3190 segundos. As paredes são constituídas de concreto revestido de lã mineral, possuindo 0,3 m de espessura. A Tabela 1 apresenta os parâmetros necessários para representar os materiais da parede de forma apropriada no software.

Figura 2 – Vista de topo do local em estudo

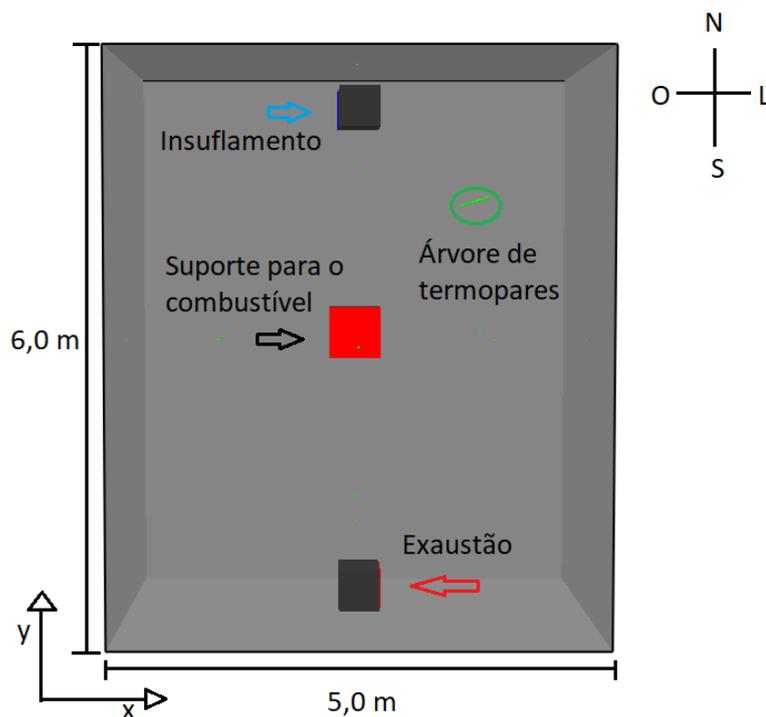


Tabela 1 – Parâmetros dos materiais que constituem as paredes do domínio.

Propriedades	Concreto	Lã Mineral
Condutividade térmica (W/m.K)	1,5	0,102
Capacidade térmica (J/kg.K)	736	840
Emissividade	0,7	0,95
Densidade (kg/m ³)	2430	140

Além de empregar as propriedades indicadas pela Tabela 1 para reproduzir as condições de contorno foi necessário modelar diversos termopares do tipo K posicionados em uma árvore vertical na extremidade nordeste e também localizados no centro das paredes, sendo que, estes últimos estão acompanhados por sensores CAPTEC capazes de mensurar o fluxo de calor incidente. Na determinação da massa de combustível queimado foi empregado um sistema de balança no suporte central.

3.2. Modelagem do sistema HVAC

O software FDS permite ao usuário modelar diversos elementos que constituem a rede de ventilação. Para estudar os efeitos que o sistema HVAC implica durante a situação de incêndio confinado, a rede de dutos presente no experimento apresentado por Audouin (2013) foi replicada computacionalmente utilizando as informações contidas no Anexo A fornecidas pelo trabalho de Wahlqvist (2013) que foram aplicadas na Equação (5) e Equação (6) para obter as perdas ocasionadas devido a estrutura física dos dutos. A Tabela 2 apresenta os dados para o coeficiente K empregado no código FDS para modelar o sistema de ventilação forçada.

Tabela 2 – Coeficientes K empregados no software FDS

Duto	Insuflamento		Exaustão	
Trecho	0-1	7-12	12-15	22-23
K	13,241	1,621	16,744	35,796

A rede de dutos não é visível no domínio criado pelo software FDS, por isso, os valores ilustrados na Tabela 2 auxiliam a calcular de forma semelhante as perdas de carga existentes na estrutura física dos dutos. Os valores de K apresentados pela Tabela 2 são utilizados em todas as simulações, independente das variações propostas no sistema de ventilação forçada. O trecho 0-1 representa o duto em que o ventilador de insuflamento está instalado, o trecho 7-12 ilustra o duto conectado ao difusor de insuflamento presente no local, o trecho 12-15 representa o duto conectado a grelha de exaustão e o trecho 22-23 indica o duto no qual estão presentes o ventilador de exaustão e a saída ao ambiente.

3.3. Modelagem por Pirólise Complexa e Validação do código numérico

A opção de modelagem por pirólise complexa se difere dos demais métodos ao não prescrever diretamente no código o valor para a taxa de calor liberado, HRR ou para a taxa de massa queimada, MLR. Nesta abordagem o valor para taxa de massa queimada \dot{m}'' é calculado diretamente pelo software através da Equação (2), aplicando as propriedades específicas do material e as condições de contorno do ambiente. As propriedades específicas utilizadas para o combustível Tetra Propileno Hidrogenado estão dispostas na Tabela 3 e são baseadas no estudo realizado por van Hees et al. (2014).

Tabela 3 – Propriedades do combustível utilizadas no modelo de pirólise complexa.

Propriedade	Valor utilizado no modelo de pirólise complexa no FDS
Calor de Combustão (kJ/kg)	42000
Condutividade Térmica (W/m.K)	0,18
Calor Específico (kJ/kg.K)	2,4
Densidade (kg/m ³)	758
Temperatura de Ebulição (°C)	188

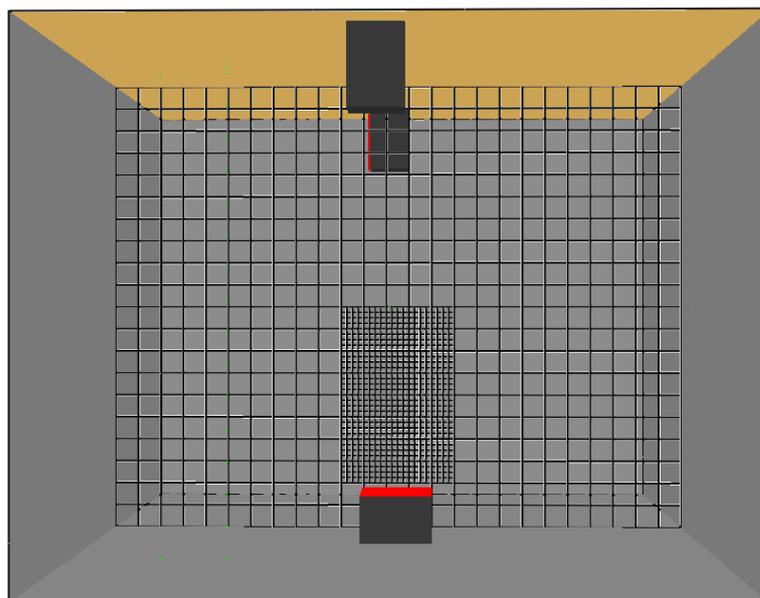
Para garantir que o software esteja retornando dados compatíveis com a realidade é necessário fazer uma validação dos resultados comparando-os com os valores experimentais. O Gráfico 1 disponível no APÊNDICE A apresenta a comparação de valores experimentais e numéricos para os resultados de HRR (em kW) durante todo o período de queima. Ao observa-lo, nota-se uma oscilação dos dados obtidos pelo FDS em relação aos valores experimentais. Isso ocorre porque os valores distribuídos gratuitamente pela IRSN sofreram um tratamento de dados, incluindo um filtro que estabiliza os resultados oscilantes para uma média aproximada. Com isso, é necessário analisar os demais dados disponíveis para garantir que a modelagem numérica é válida. O Gráfico 2 presente no APÊNDICE A aponta uma comparação para resultados obtidos por um termopar posicionado na árvore nordeste a uma altura de 3,3 metros denominado de TE3,3. Os valores apresentados pelo Gráfico 2 indicam que o modelo numérico é capaz de representar de forma adequada as temperaturas no interior da sala. Adicionalmente, é também verificado se os resultados obtidos numericamente para os fluxos de calor nas paredes também concordam com os dados experimentais. O Gráfico 3

disponível no APENDICE A apresenta uma comparação para o fluxo de calor (em W/m^2), obtido por um sensor localizado no região central da parede sul, denominado de FCS. As informações apresentadas pelo Gráfico 3 corroboram para o fato de que o modelo é capaz de representar os valores para fluxo de calor de forma semelhante aos resultados experimentais. Desta forma, é possível comprovar que o modelo computacional desenvolvido empregando a pirólise complexa no software FDS é válido para o problema em questão e pode ser utilizado na continuidade do trabalho.

3.4. Estudo de malha

Para realizar o estudo de malha na representação elaborada foi aplicado um método semelhante ao descrito por Suard et al. (2014), na qual os valores para quatro variáveis de saída foram comparados em quatro malhas distintas. A malha 1 divide o domínio em volumes iguais com 20 cm em todas as dimensões, a malha 2 separa o domínio em duas regiões, uma mais externa com volumes de dimensões 20 cm e outra mais centralizada, acima do suporte para o combustível possuindo 1,2 m de comprimento, 1,0 m de largura e 1,6 m de altura, contendo volumes de 10 cm em todas as direções. A malha 3 também divide o domínio em duas regiões, a região externa com volumes de dimensões 20 cm e a região interna possuindo 1,2 m de comprimento, 1,0 m de largura e 1,6 m de altura com volumes de 5 cm em todas as direções. A malha 4 é constituída por volumes de dimensões iguais de 10 cm por todo o domínio. A Figura 3 ilustra como a região centralizada é mais refinada em relação a região externa na malha 3.

Figura 3 – Divisão dos volumes contidos no domínio para a malha 3.



A Figura 3 ilustra como foi feita a divisão dos volumes para a malha 3, sendo o refinamento na região interna a única diferença para a malha 2. As variáveis escolhidas para comparação foram as temperaturas no ambiente em uma altura de 1,3 metros denominada de TE 1,3, as temperaturas em uma altura de 2,3 metros indicada por TE 2,3, o fluxo de calor na região central da parede sul chamado de FCS e o fluxo de calor no centro da parede norte apresentado por FCN. Para medida de comparação, foi considerada a média dos valores obtidos durante o período permanente da simulação, ou seja, de 600 s até 3190 s. A Tabela 4 apresenta os valores empregados para o estudo de malha.

Tabela 4 – Valores empregados no estudo de malha para o modelo numérico criado

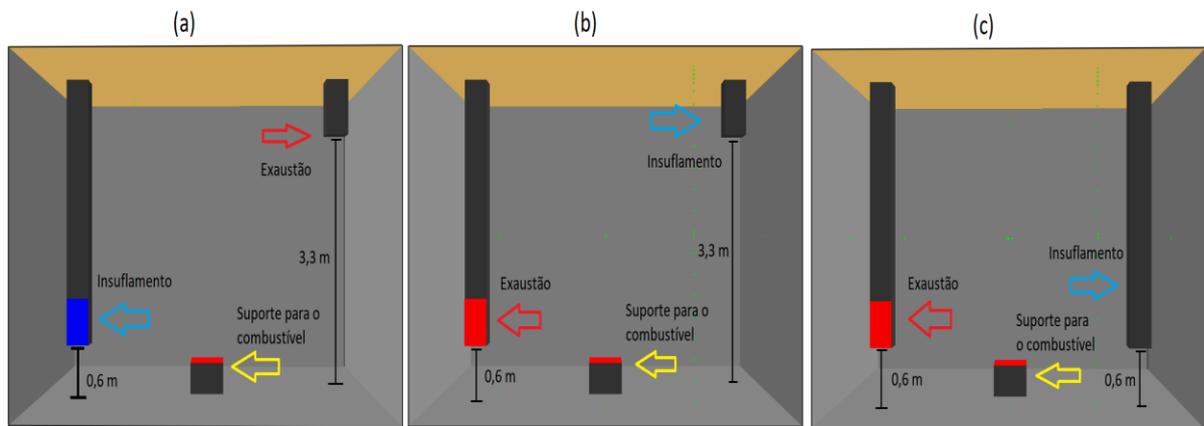
Identificação	Nº de Volumes	Passo de tempo (s)	TE 1,3 (°C)	TE 2,3 (°C)	FCS (W/m ²)	FCN (W/m ²)	Tempo de Simulação (h)
Experimento	-	-	137,96	166,28	1496,38	1507,25	-
Malha 1	15000	0,158	142,16	161,85	1624,90	1616,40	3
Diferença % Malha 1 x Experimento	-	-	3%	3%	9%	7%	-
Malha 2	16690	0,08	142,80	161,00	1618,20	1611,40	7
Diferença % Malha 2 x Experimento	-	-	4%	3%	8%	7%	-
Malha 3	30360	0,04	141,77	159,80	1601,50	1588,90	18
Diferença % Malha 3 x Experimento	-	-	3%	4%	7%	5%	-
Malha 4	120000	0,08	136,13	162,70	1570,50	1600,50	48
Diferença % Malha 4 x Experimento	-	-	1%	2%	5%	6%	-

Ao estudar os dados dispostos na Tabela 4, a malha 4 destaca-se das demais por possuir valores mais semelhantes aos experimentais, sua maior quantidade de volumes discretizados viabiliza a melhora dos resultados e por esse motivo ela será adotada na continuidade do trabalho.

3.5. Modificações nos parâmetros de ventilação forçada

Buscando entender a relevância de cada parâmetro envolvido no sistema de ventilação forçada em uma situação de incêndio confinado, foram elaborados nove cenários distintos baseados no caso original desenvolvido pelo Projeto Prisme. A primeira modificação simulada constituiu-se em uma transição da localidade do difusor de insuflamento, que originalmente estava posicionado próximo ao teto como ilustrado na Figura 1, a nova posição fixou o insuflamento a 0,6 m do piso, sem alterar as dimensões do difusor, conforme mostra a Figura 4(a). Na segunda modificação houve a alteração da grelha de exaustão para uma posição a 0,6 metros do chão, sem variação nas dimensões da grelha, a Figura 4(b) ilustra a posição da grelha de exaustão na segunda simulação. O terceiro caso executou uma combinação das duas primeiras modificações posicionando o difusor de insuflamento e a grelha de exaustão a uma distância de 0,6 m do piso conforme apresentado pela Figura 4(c).

Figura 4 – (a) Insuflamento posicionado na região inferior; (b) Exaustão posicionada na região inferior; (c) Ambos os dutos na região inferior.



Diferentemente das modificações ilustradas pela Figura 4, as demais mudanças não são visíveis no domínio. A quarta alteração aplicada aumentou a vazão de insuflamento de 560 m³/h para 1212 m³/h, valor compatível com máquinas de ar condicionado de capacidade 24000 BTU/h. No quinto caso ampliou-se a vazão de insuflamento para valores semelhantes a aparelhos de ar condicionado com potência de 48000 BTU/h que possuem vazão de 2280 m³/h. No sexto cenário um dispositivo damper foi configurado no duto de insuflamento, programado para fechar totalmente a passagem de ar após 10 segundos do início do incêndio. A sétima variação empregou uma metodologia semelhante ao sexto caso adicionando um damper no duto de exaustão, configurado para interromper totalmente a passagem de ar após 10 segundos. Na oitava simulação a vazão de exaustão do sistema foi duplicada, aumentando o valor de 680 m³/h para 1360 m³/h. Por fim, a nona mudança foi uma combinação de insuflamento na região inferior com vazão de 1212 m³/h e exaustão na posição superior com vazão de 2040 m³/h.

3.6. Determinação do tempo disponível para evacuação (ASET)

Proteger a vida humana é a principal preocupação durante uma situação de incêndio, por isso, o tempo disponível para evacuação de pessoas do local é um parâmetro crítico que avalia quanto tempo as pessoas têm para deixar o local antes que as condições fiquem insalubres. O estudo SFPE (2016) apresenta uma metodologia que indica dois parâmetros principais para quantificar o valor de ASET em diferentes situações de incêndio. O primeiro critério adotado é um limite mínimo de 0,91 metros para a camada inferior (ar fresco). Quando a camada de fumaça ultrapassa esse limite em relação ao solo, os gases quentes podem ser inalados, ocasionando perda de consciência no ser humano. Além da intoxicação, a camada de fumaça afeta a locomoção e a visibilidade durante o processo de evacuação, tornando inviável as pessoas se moverem com a velocidade necessária para sair do ambiente antes de sofrer danos à saúde. O outro critério para determinação do ASET é a temperatura da camada de gases quentes ultrapassar 186°C, ao chegar a este ponto, as condições do ambiente ficam insalubres e colocam em risco a vida das pessoas. O ASET é o tempo necessário para que algum dos dois critérios seja atingido independente da ordem em que ocorram.

Nas situações desenvolvidas nesse trabalho, foram calculados os pontos de ASET para os nove cenários elaborados e também para o cenário original. Como o duto de insuflamento está posicionado na região norte e o duto de exaustão na região sul, o tempo disponível foi determinado em quatro locais distintos próximos das extremidades norte, sul, leste e oeste.

Assim, é possível verificar se as modificações afetam o ambiente apenas onde os dutos estão posicionados ou se os efeitos abrangem toda a região de estudo.

4. RESULTADOS

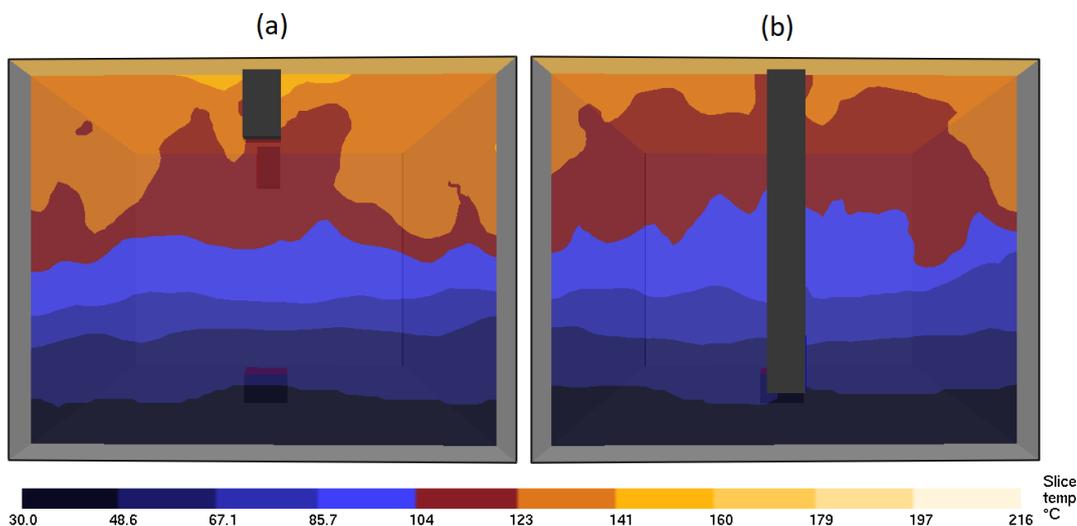
Aplicando os critérios apresentados por SFPE (2016), as simulações descritas na Seção 3.5 foram realizadas e então foram determinados os tempos disponíveis para evacuação de pessoas para os nove casos e também para a simulação original do experimento realizado no projeto Prisme. Em todos os cenários estudados o primeiro parâmetro atingido foi a diminuição crítica da altura da camada de ar, ou seja, a fumaça ultrapassou o limite de 0,91 metro. A Tabela 5 aponta os resultados de ASET (em segundos) para quatro pontos situados próximos ao centro das paredes em cada uma das situações simuladas.

A primeira modificação realizada trocou a posição da grelha de insuflamento para uma região de altura inferior, os valores apresentados pela Tabela 5 indicam que essa modificação não afetou de forma significativa no ASET. Porém, o ar insuflado pelo difusor na parte inferior do ambiente auxilia na manutenção de baixas temperaturas na camada de ar puro situada na região mais baixa da sala. Aplicando a hipótese do modelo de incêndio em compartimento, manter a zona de ar com temperaturas mais amenas é um fator importante na evacuação do local, pois seria nessa região que as pessoas presentes na sala estariam se locomovendo em direção a saída. A Figura 5(a) ilustra o campo de temperaturas na sala após 100 segundos do início do incêndio para o caso original e a Figura 5(b) apresenta o campo de temperaturas no mesmo período de tempo para a situação com insuflamento inferior.

Tabela 5 – Valores determinados para o tempo disponível de evacuação de pessoas para cada simulação desenvolvida.

Tempo disponível para evacuação de pessoas (segundos)						
Modificação/Localidade	Norte	Sul	Leste	Oeste	ASET médio	Diferença % para o ASET do caso original
Original	109	106	110	108	108	-
Insuflamento Inferior	106	106	104	106	106	-1,8%
Exaustão Inferior	98	97	93	92	95	-13,6%
Os dois dutos em posições inferiores	92	95	90	94	93	-16,1%
Insuflamento Duplicado	104	109	109	107	107	-0,9%
Insuflamento Quadruplicado	101	110	108	107	107	-0,9%
Damper no duto de Insuflamento	106	108	107	105	107	-0,9%
Damper no duto de Insuflamento e Exaustão	93	92	89	91	91	-18,7%
Exaustão Duplicada	109	109	111	110	110	+1,8%
Insuflamento Inferior + Exaustão Triplicada + Insuflamento Duplicado	128	134	133	129	131	+21,3%

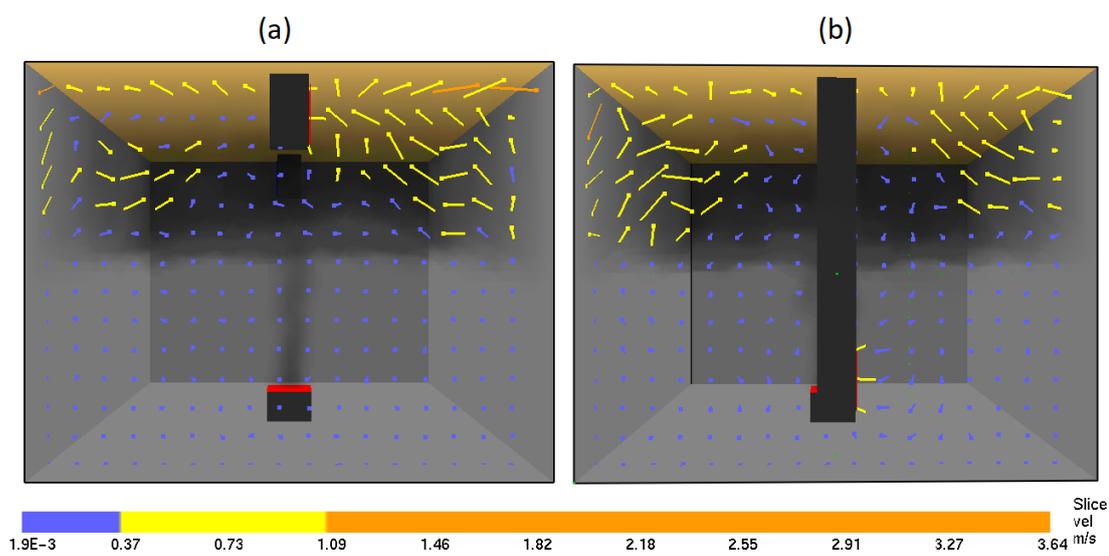
Figura 5 – (a) Campo de temperaturas para o caso original em 100 s; (b) Campo de temperaturas para insuflamento inferior em 100 s. Posição $y = 5,4$ m.



A Figura 5 mostra a região laranja de temperaturas acima de 128°C em uma área mais abrangente para o caso original do que na situação com insuflamento inferior. Apesar de não afetar de forma significativa o tempo total disponível para evacuação essa mudança pode auxiliar tornando as temperaturas mais amenas durante o incêndio, evitando queimaduras e diminuindo o nível de CO_2 na zona de ar puro.

O segundo caso introduziu uma variação na altura em que a grelha de exaustão estava posicionada. Conforme indicam os dados disponíveis na Tabela 5, essa modificação prejudica de forma relevante o tempo disponível para evacuação das pessoas, diminuindo 17 segundos (-13,6%) em relação ao tempo original. A Figura 6(a) apresenta os vetores de velocidade no caso original para 40 segundos após o início do incêndio e a Figura 6(b) ilustra os vetores de velocidade na situação em que a exaustão está posicionada na região inferior para mesmo instante de tempo.

Figura 6 – (a) Vetores de velocidade no caso original no instante 40 s; (b) Vetores de velocidade para o cenário com exaustão inferior no instante 40 s. Posição $y = 0,6$ m.



A Figura 6(a) apresenta os gases quentes indicados pelos vetores se movimentando com maior velocidade em direção a grelha de exaustão. A Figura 6(b) ilustra o escoamento representado pelos vetores seguindo o fluxo previsto pelo modelo de incêndio confinado, os gases quentes gerados pelo fogo sobem por diferença de densidade forçando a fumaça a se espalhar primeiramente na parte superior do ambiente. Quando a exaustão está posicionada no teto do local os produtos da combustão são retirados logo no início do incêndio, entretanto, ao posicionar a grelha na parte inferior, a exaustão retira apenas ar puro do local até que a altura da fumaça desça a um nível inferior.

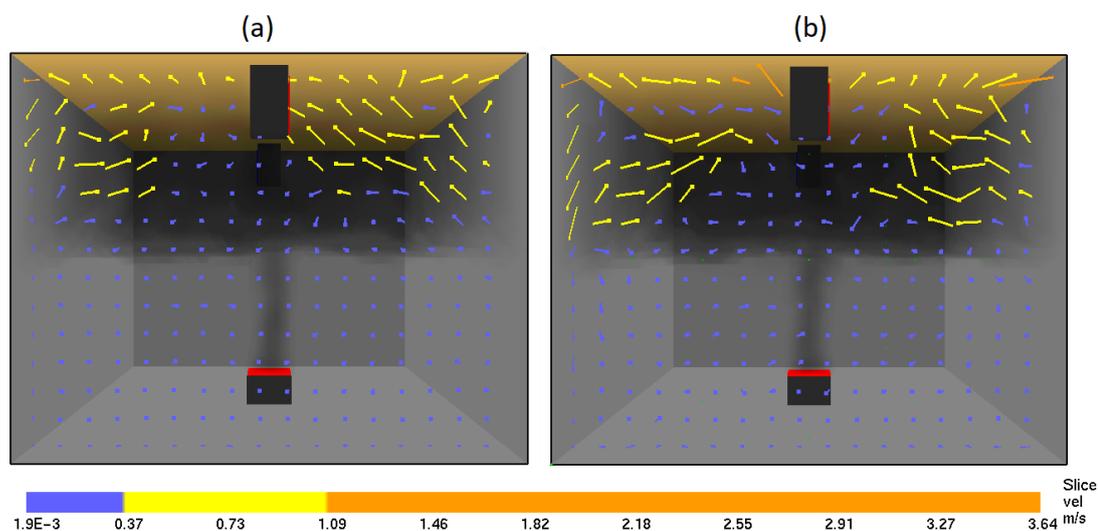
O terceiro cenário simulado implementou uma combinação das duas primeiras variações, posicionando o difusor de insuflamento e a grelha de exaustão na região inferior do ambiente. Observando os valores de ASET apresentados pela Tabela 5, entende-se que essa alteração é desfavorável em uma situação de incêndio confinado, reduzindo em até 20 segundos o tempo (-16,1%) disponível para evacuação de pessoas. Este resultado aponta que a adversidade causada pela exaustão localizada na parte inferior da sala afeta de forma mais negativa o período de evacuação de pessoas do que o efeito causado pelo insuflamento de ar frio nas zonas inferiores.

O quarto e o quinto cenários ampliaram, respectivamente, a vazão de insuflamento de 560 m³/h para 1212 m³/h e 2280 m³/h. Analisando os resultados disponíveis na Tabela 5 os valores determinados para ASET nos dois casos não apresentam mudanças relevantes em comparação ao caso original. A explicação para as variações pouco expressivas é baseada no conceito de Global Equivalence Ratio (ϕ), um coeficiente que auxilia a classificar os locais de estudo em ambientes bem ventilados ou mal ventilados. Nos casos em estudo, a ventilação é introduzida mecanicamente no sistema e por isso a Equação (7) deve ser empregada em conjunto com a Equação (8) para o cálculo do GER. Aplicando os dados resultantes nas equações obteve-se para o caso original $\phi_1 = 0,95$, na situação em que a vazão de insuflamento era duplicada $\phi_2 = 0,48$ e na modificação onde a vazão de insuflamento era quadriplicada $\phi_3 = 0,27$. Em todas as situações $\phi < 1$ resultando em ambientes classificados como bem ventilados, essa caracterização implica que o local possui oxigênio suficiente para realizar a combustão sem necessitar de maior volume de ar insuflado, sendo assim, a queima é limitada pelo combustível (que é a mesma em todos os casos), assim como a produção de fumaça. Por consequência, aumentar as vazões de insuflamento não acarreta em variações relevantes na taxa de calor liberado e também no valor para o tempo disponível para evacuação de pessoas.

O sexto caso simulado foi a implantação de um damper no duto de insuflamento. Este dispositivo estava configurado para fechar totalmente a passagem de ar pelo duto após 10 segundos do início do incêndio. Conforme os dados dispostos na Tabela 5, o efeito produzido por esse acessório diminuiu levemente os valores do tempo disponível para evacuação de pessoas. Esse resultado evidencia o fato de que no local de estudo havia oxigênio suficiente para realizar a queima completa do combustível, sustentando a teoria apresentada pelo $\phi < 1$ onde insuflamento de ar inflige pouca relevância para a taxa de calor liberado durante o incêndio e sobre o espalhamento da camada de fumaça.

A sétima modificação inseriu um segundo dispositivo damper que encerra de forma completa a passagem de ar no duto de exaustão após 10 segundos do início do incêndio. Como é esperado, os resultados apresentados pela Tabela 5 mostram uma diminuição expressiva de 21 segundos (-18,7%) no tempo disponível em comparação a situação original. A Figura 7(a) mostra os vetores de velocidade para o caso original no instante de 45 segundos após o início do incêndio e a Figura 7(b) apresenta os vetores de velocidade para o caso com o acessório damper instalado no duto de exaustão e no duto de insuflamento para o mesmo período de tempo.

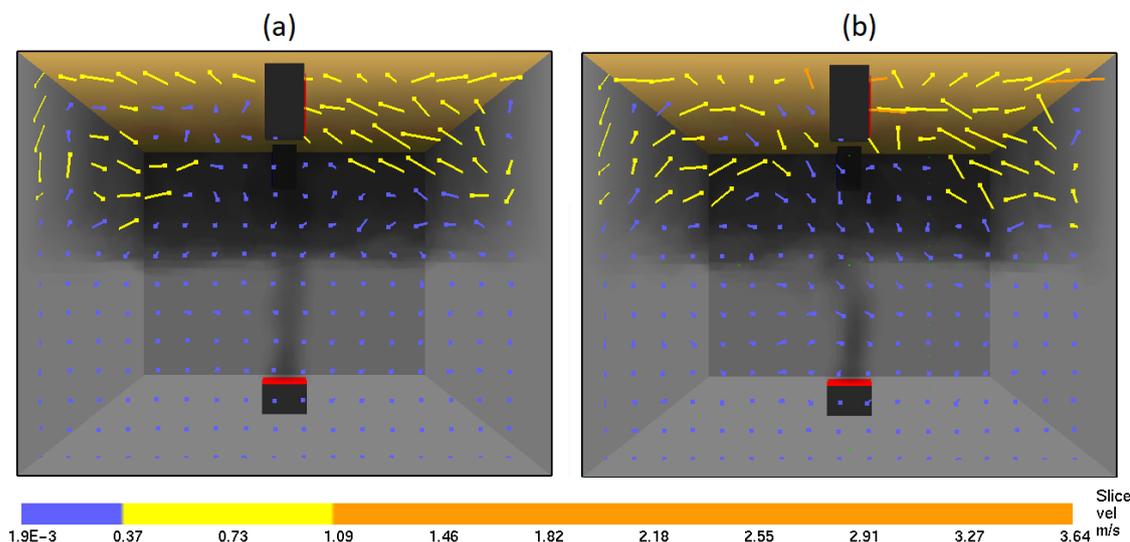
Figura 7 – (a) Vetores de velocidade para o caso original no instante 45 s; (b) Vetores de velocidade para a sétima modificação no instante 45 s. Posição $y = 0,6\text{m}$.



A Figura 7 ilustra a importância da grelha de exaustão durante a formação da camada de gases quentes. No caso original a grelha de exaustão desloca os gases quentes indicados pelos vetores amarelos de velocidade entre 0,37 m/s a 1,09 m/s em sua direção, contendo a dispersão dos produtos da combustão, entretanto, na situação onde o acessório bloqueia a saída de ar do local, os vetores de velocidade que representam a fumaça seguem o modelo de incêndio confinado. Este caso se assemelha a situações onde ocorre acúmulo de poeira e detritos nos dutos de exaustão, a discrepância nos valores ASET reforça a importância da manutenção periódica e da limpeza do sistema HVAC.

A oitava modificação ampliou a vazão de exaustão de 680 m³/h para 1360 m³/h. Os dados indicados pela Tabela 5 apresentam uma leve melhora no tempo disponível em comparação ao caso original. A Figura 8(a) apresenta os vetores de velocidade para o caso original no instante de 47 segundos após o início do incêndio e a Figura 8(b) ilustra os vetores de velocidade para a situação onde a exaustão tem vazão duplicada no mesmo instante de tempo.

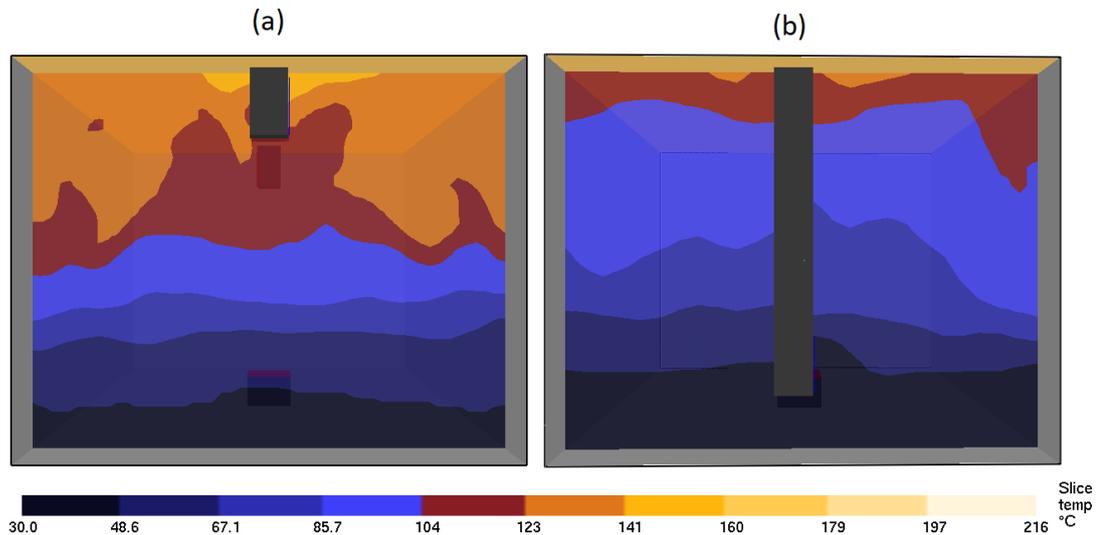
Figura 8 – (a) Vetores de velocidade para o caso original no instante de 47 s; (b) Vetores de velocidade para a exaustão duplicada no mesmo período de tempo. Posição $y=0,6\text{m}$



Duplicar a vazão de exaustão implica em retirar maior volume de fumaça do local, a Figura 8(b) ilustra esse efeito ao mostrar vetores de velocidade que estão situados em regiões opostas à grelha de exaustão sendo afetados por ela, explicando a melhora significativa no ASET para a região sul, pois é a posição onde a grelha de exaustão está localizada no ambiente.

A última modificação estudada combinou as variações que apresentaram efeitos positivos sobre o tempo disponível para evacuação de pessoas, duplicou-se a vazão de insuflamento posicionada na região inferior e triplicou-se a vazão de exaustão localizada na região superior. Os resultados apresentados pela Tabela 5 apontam um impacto muito positivo no ASET, elevando em 28 segundos (21,3%) o tempo total disponível para evacuação de pessoas. A Figura 9(a) apresenta o campo de temperaturas para o caso original no instante de 100 segundos após o início do incêndio e a Figura 9(b) ilustra o campo de temperaturas para a situação onde as vazões estão ampliadas e o difusor de insuflamento está posicionado na região inferior no mesmo período de tempo.

Figura 9 – (a) Campo de temperaturas para o caso original no instante de 100 s; (b) Campo de temperaturas para a nona modificação para o mesmo período de tempo. Posição $y = 5,4$ m.



A Figura 9 ilustra as temperaturas mais elevadas em cores alaranjadas para o caso original, onde as temperaturas na camada de gases quentes estão no intervalo entre 123°C a 141°C , enquanto para a situação com as vazões ampliadas às temperaturas na camada superior estão na faixa de $85,7^{\circ}\text{C}$ até 104°C . Os resultados indicados pela Tabela 5 e os campos de temperatura ilustrados pela Figura 8 corroboram para afirmar que o conjunto de modificações empregadas foram favoráveis em prol de viabilizar maior tempo disponível para evacuação de pessoas em situações de incêndio confinado.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo numérico sobre a influência do sistema de ventilação forçada em um compartimento em situação de incêndio sobre o tempo disponível para evacuação de pessoas (ASET).

A primeira etapa do estudo constituiu-se na elaboração de um modelo numérico desenvolvido no software FDS capaz de reproduzir numericamente um dos casos de incêndio estudados experimentalmente por Audouin (2013). Tendo como objetivo principal analisar a

relevância dos elementos que compõem o sistema de ventilação forçada na determinação do tempo disponível para evacuação do local, foram analisadas a influência da posição dos dutos de insuflamento e exaustão e também das suas vazões.

Com base nos resultados apresentados, foi possível analisar como cada parâmetro da rede de ventilação afeta o comportamento do incêndio. No primeiro caso estudado, variou-se a altura do difusor de insuflamento deslocando-o para uma localidade próxima ao piso. Esta mudança não acarretou em diferenças relevantes no tempo disponível para evacuação, porém, teve efeito amenizador nas temperaturas presentes na camada inferior, auxiliando no processo de desocupação do ambiente durante o incêndio. A segunda situação analisada posicionou a grelha de exaustão na região inferior do ambiente e esta variação trouxe efeitos prejudiciais ao ASET, reduzindo o tempo em 17 segundos; esse resultado demonstra a importância que a exaustão mecânica possui em uma ocasião de risco. O terceiro cenário elaborado foi uma combinação dos dois anteriores posicionando o insuflamento e a exaustão próximos ao piso. O resultado obtido foi negativo em relação ao caso original, mostrando que a exaustão mecânica é um fator relevante e deve ser projetada de maneira correta para auxiliar na proteção a vida humana.

Os cenários quatro e cinco ampliaram a vazão de insuflamento para valores semelhantes a evaporadoras de ar condicionado presentes em domicílios domésticos. Essa alteração não provocou efeitos significativos no tempo disponível para evacuação. Esse fenômeno é explicado pelo coeficiente Global Equivalence Ratio que caracterizou o ambiente estudado como bem ventilado, dessa forma, a ampliação na vazão de insuflamento não gera mudanças nos valores para a taxa de calor liberado durante a queima do combustível e assim a produção de fumaça também é a mesma.

A sexta modificação implantou um damper no duto de insuflamento que impedia a passagem de ar após dez segundos do início do incêndio. Os resultados para o tempo disponível não sofreram alterações relevantes, confirmando a teoria de que o ambiente é bem ventilado e a vazão de insuflamento influencia pouco neste caso. Para a sétima variação um dispositivo damper também foi instalado no duto de exaustão, fechando a passagem de gases de exaustão após dez segundos. O ASET foi prejudicado drasticamente sofrendo uma redução em vinte e um segundos. Este resultado é congruente com os dados obtidos no terceiro cenário concluindo novamente que a exaustão mecânica é um fator determinante no tempo disponível para evacuação.

Para o caso oito a vazão de exaustão foi duplicada obtendo resultados levemente melhores do que na situação original evidenciando novamente sua relevância em retirar fumaça do local. Na última variação analisada todas as modificações que causaram efeitos positivos foram combinadas no intuito de indicar como o sistema de ventilação forçada pode atuar de forma benéfica em casos de incêndio confinado. Os resultados dessa variação foram os que apresentaram o maior aumento no ASET, proporcionando vinte segundos a mais de tempo disponível do que no caso original, possibilitando a conclusão de que ao ser projetada corretamente, a rede de ventilação e ar condicionado pode ser empregada de forma efetiva para auxiliar no tempo disponível para evacuação em situações de incêndio.

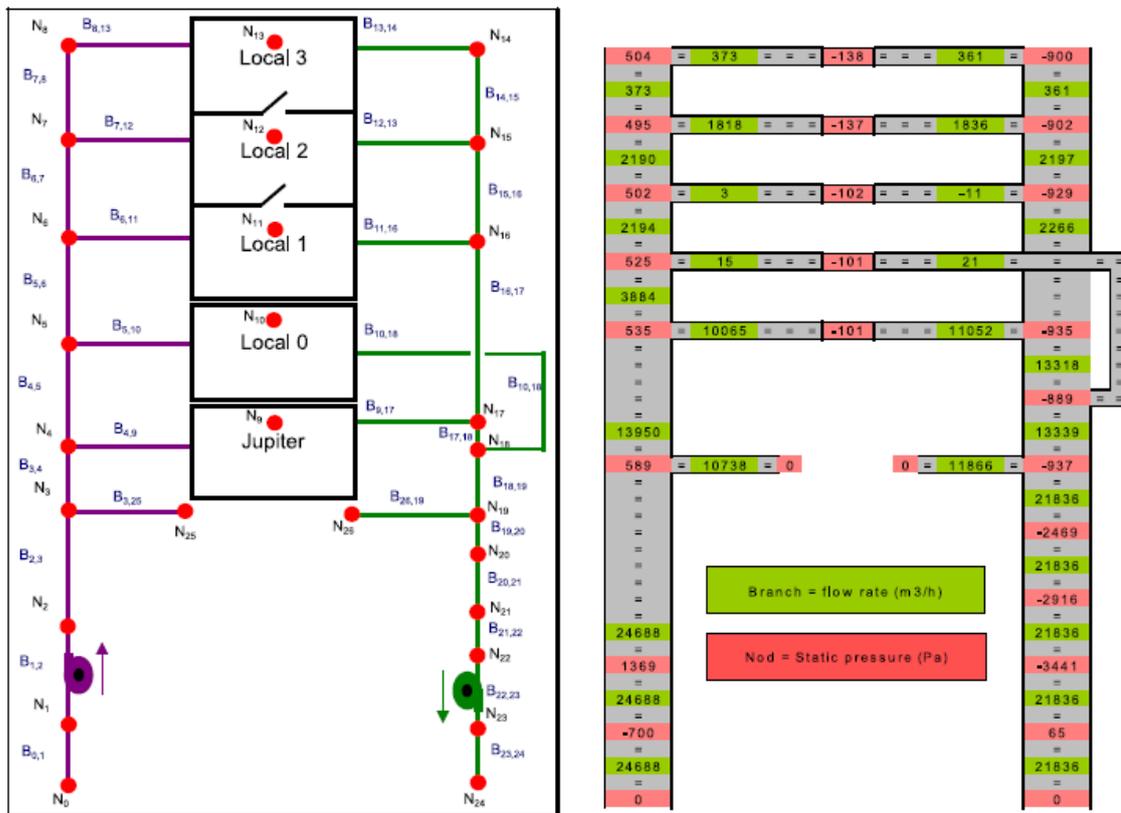
Em estudos futuros, sugere-se a análise dos efeitos do sistema HVAC no tempo disponível para evacuação em locais mais complexos contendo portas, janelas e ambientes interligados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-1**: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários Parte 1: Projetos das Instalações. 1 ed. Rio de Janeiro, 2008. 60 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-3**: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários Parte 3: Qualidade do ar interior. 1 ed. Rio de Janeiro, 2008. 24 p.
- AUDOUIN, L.; RIGOLLET, L.; PRÉTREL, H.; SAUX, W. Le; RÖWEKAMP, M.. OECD PRISME project: fires in confined and ventilated nuclear-type multi-compartments - overview and main experimental results. **Fire Safety Journal**, [S.L.], v. 62, p. 80-101, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.07.008>.
- COOPER, Leonard Y.. A concept for estimating available safe egress time in fires. **Fire Safety Journal**, [S.L.], v. 5, n. 2, p. 135-144, jan. 1983. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0379-7112\(83\)90006-1](http://dx.doi.org/10.1016/0379-7112(83)90006-1).
- GORDONOVA, Polina. **Spread of smoke and fire gases via the ventilation system**. 1997. 240 f. Tese (Doutorado) - Curso de Architecture, Division Of Building Science, Lund University, Lund, 1997.
- MATOS, Lucas Vinicius. **ESTUDO NÚMÉRICO DO ESCOAMENTO DE GASES POR UMA ABERTURA DURANTE UM INCÊNDIO EM AMBINETE CONJUGADO**. 2017. 25 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- MCCAFFREY, B. J.; QUINTIERE, J. G.; HARKLEROAD, M. F.. Estimating room temperatures and the likelihood of flashover using fire test data correlations. **Fire Technology**, [S.L.], v. 17, n. 2, p. 98-119, maio 1981. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02479583>.
- MCGRATTAN, K.; HOSTIKKA, S.; MCDERMOTT, R.; FLOYD, J.; VANELLA, M. **Fire Dynamics Simulator User's Guide**, 2019
- SFPE, **Handbook of Fire Protection Engineering**, Society of Fire Protection Engineers, U.S.A, 5 edition, 2016.
- SUARD, S.; KOCHED, A.; PRÉTREL, H.; AUDOUIN, L.. Numerical simulations of fire-induced doorway flows in a small scale enclosure. **International Journal Of Heat And Mass Transfer**, [S.L.], v. 81, p. 578-590, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.10.069>.
- VAN HEES, P.; JOHANSSON, N.; WAHLQVIST, J. Swedish PRISME project - part 2 - Use of test results from PRISME for practical applications in Sweden. **Department of Fire Safety Engineering and System Safety Lund University, Sweden**, 2011.
- VAN HEES, P.; WAHLQVIST, J.; HOSTIKKA, S.; SIKANEN, T.; HUSTED, B.; MAGNUSSON, T. Prediction and validation of pool fire development in enclosures by means of CFD Models for risk assessment of nuclear power plants. **Nordic Nuclear Safety Research**, 2014
- WAHLQVIST, Jonathan; VAN HEES, Patrick. Validation of FDS for large-scale well-confined mechanically ventilated fire scenarios with emphasis on predicting ventilation system behavior. **Fire Safety Journal**, [S.L.], v. 62, p. 102-114, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.07.007>.
- WANG, Lei; QUINTIERE, James G.. An analysis of compartment fire doorway flows. **Fire Safety Journal**, [S.L.], v. 44, n. 5, p. 718-731, jul. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.02.001>.

ANEXO A – Informações sobre a estrutura de dutos presente no projeto OECD Prisme

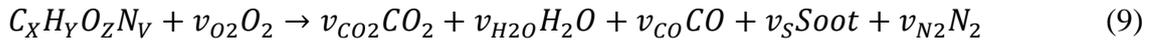
A Figura abaixo representa a rede de dutos presente na DIVA Facility, indicando valores para a diferença de pressão entre as seções de duto. As suas informações foram aplicadas nas equações (5) e (6) para calcular os coeficientes K apresentados na Tabela 2.



(Fonte: Adaptado de Wahlqvist, Jonathan; Van Hees, Patrick. 2016)

ANEXO B - Equações empregadas pelo FDS

O trabalho de McGrattan, (2019) descreve as equações empregadas pelo software nas simulações. A Equação 9 é utilizada pelo FDS para representar a reação de combustão em uma etapa global, para tanto o software considera que o combustível é composto primariamente dos elementos C, H, O e N. Ao usuário cabe informar a fórmula química do combustível, a produção de CO e a produção de particulado.



Para representar a conservação de massa, o software emprega a Equação 10, onde a variável u representa a velocidade, ρ indica a massa específica e t o tempo.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (10)$$

A Equação 11 define a conservação de momentum no volume de controle, onde p indica a pressão, $\dot{m}_b''' u_{b,i}$ corresponde aos efeitos da pirólise e $f_{d,i}$ representa as informações sobre partículas Lagrangianas.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + f_{d,i} + \dot{m}_b''' u_{b,i} \quad (11)$$

A Equação 12 representa o transporte das espécies agrupadas, a variável D_α descreve a difusividade mássica, Z_α representa a fração mássica de ar, \dot{m}_α''' e $\dot{m}_{b,\alpha}'''$ indicam a adição de massa devido a evaporação de partículas.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Z_\alpha) + \nabla \cdot (\rho u Z_\alpha) = \nabla \cdot [\rho D_\alpha \nabla Z_\alpha] + \dot{m}_\alpha''' + \dot{m}_{b,\alpha}''' \quad (12)$$

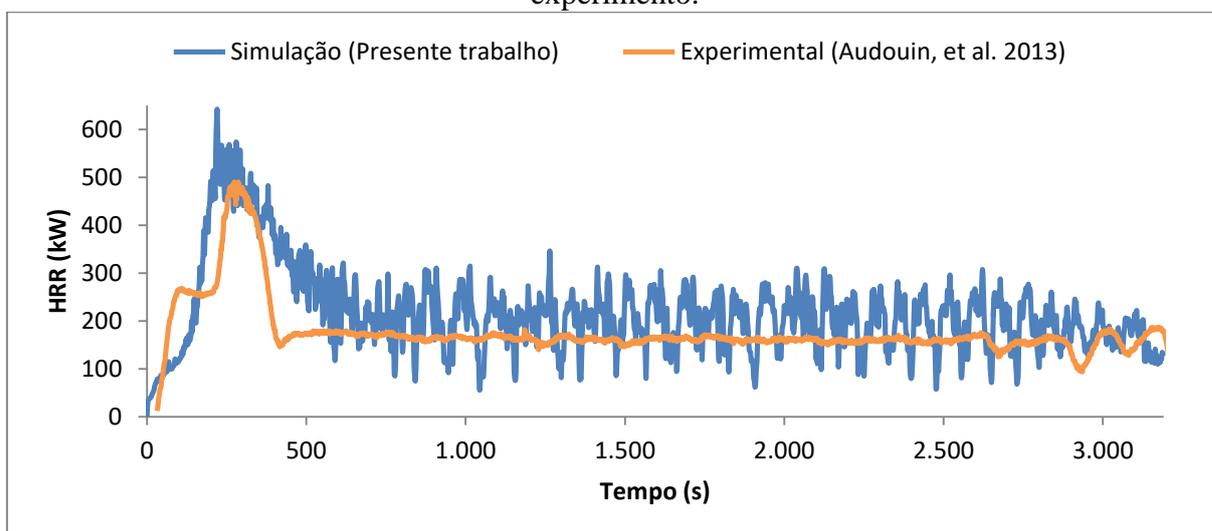
Para representar a conservação de energia, a Equação 13 calcula a variação da entalpia h_s devido a convecção, difusão, variação de pressão e radiação. A variável q''' representa a taxa de calor liberado por unidade de volume, q_b''' se refere a energia transferida para as partículas e q'' representa os fluxos de calor por condução, difusão e radiação.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho u h_s) = \frac{Dp}{Dt} + q''' + q_b''' - \nabla \cdot q'' \quad (13)$$

APENDICE A – Gráficos empregados na validação do modelo.

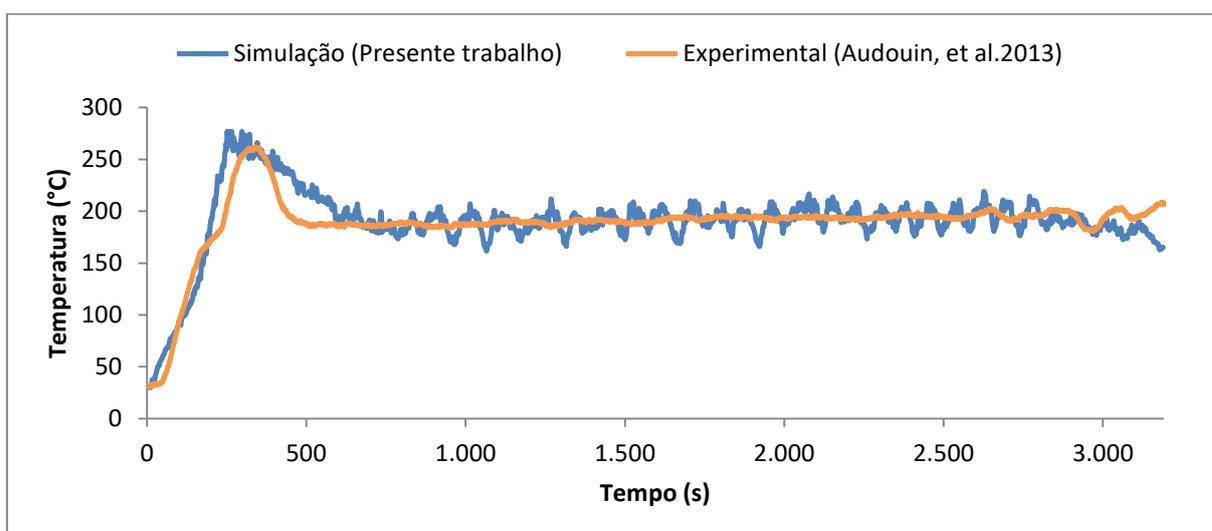
O Gráfico 1 apresenta a comparação de valores experimentais e numéricos para os resultados de HRR (em kW) sendo utilizado para realizar a validação do modelo numérico criado.

Gráfico 1 – Comparação para valores transientes de HRR obtidos via simulação e experimento.



O Gráfico 2 aponta uma comparação para resultados obtidos por um termopar posicionado na árvore nordeste a uma altura de 3,3 metros denominado TE3,3, sendo empregado na validação do modelo numérico criado.

Gráfico 2 - Comparativo entre valores transientes de temperatura experimentais e valores obtidos com o FDS em uma altura de 3,3m.



O Gráfico 3 apresenta a comparação para o fluxo de calor, obtido por um sensor localizado na região central da parede sul, denominado FCS. Este gráfico também foi utilizado na validação do modelo numérico criado.

Gráfico 3 - Comparativo experimento x FDS para fluxo de calor transiente na parede sul.

