

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DA DISPERSÃO DE POLUENTES E DA  
GEOMETRIA DA CHAMA DE POÇAS DE DIESEL E BIODIESEL**

**RAFAEL GIALDI SALVAGNI**

**Dissertação de Mestrado**

**São Leopoldo, fevereiro de 2018**

ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DA DISPERSÃO DE POLUENTES E DA  
GEOMETRIA DA CHAMA DE POÇAS DE DIESEL E BIODIESEL

Rafael Gialdi Salvagni

Trabalho submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UNISINOS como pré-requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Mestre Engenheiro Mecânico

Orientadora: Profa. Dra. Maria Luiza Sperb Indrusiak - UNISINOS

Coorientador: Prof. Dr. Felipe Roman Centeno - UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira - UFRGS

Profa. Dra. Flávia Schwarz Franceschini Zinani - UNISINOS

Prof. Dr. Paulo Roberto Wander - UNISINOS

S182a Salvagni, Rafael Gialdi.

Análise numérico-experimental da dispersão de poluentes e da geometria da chama de poças de diesel e biodiesel / Rafael Gialdi Salvagni. – 2018.

174 f. : il.; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.

“Orientadora: Profa. Dra. Maria Luiza Sperb Indrusiak;  
Coorientador: Prof. Dr. Felipe Roman Centeno ”.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

(Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252)

*Só existem dois dias no ano em que nada pode ser feito.  
Um se chama ontem e o outro se chama amanhã, portanto hoje é o dia  
certo para que se faça algo.*

*Dalai Lama*

## AGRADECIMENTOS

À Deus pela saúde e conforto para seguir adiante frente aos obstáculos.

Aos meus pais, Antônio e Lia, que nunca mediram esforços para mostrar o verdadeiro valor da educação, ética, caráter, moral e da família.

À minha irmã Renata, pelo apoio e incentivo durante esta jornada.

À Jenifer, minha namorada, amiga e companheira, por toda a dedicação e zelo, pela incrível compreensão pelas ausências frequentemente necessárias, pela qual não posso deixar de prestar meu enorme amor e carinho.

À professora Dra. Maria Luiza Indrusiak, pela excelente orientação e por todas as conversas motivadoras.

Ao professor Dr. Felipe Centeno, que além da ideia inicial do projeto, deu grande apoio e auxílio nas atividades.

Aos excelentíssimos professores componentes da banca, pelos comentários que foram de grande ajuda ao aperfeiçoamento do trabalho.

Aos nobres colegas Gabriel Kuhn, Henrique Schardosin, Henrique Zenker, Jonatan da Silva, José Maurício Leitão, Lucas Ezequias, Osvaldo Guazelli e Patrícia Scalco com quem trocava diversas ideias relativas ao dia-a-dia, proporcionando momentos de descontração.

Aos estimados colegas do grupo The Master's do PPGEM Unisinos.

Ao PPGEM Unisinos pela oportunidade de desenvolvimento intelectual.

À CAPES, pelo investimento na educação continuada e pela bolsa oferecida.

A todos os colegas, amigos e professores que de alguma forma me apoiaram e encorajaram durante mais esta jornada.

## RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo numérico-experimental da dispersão de poluentes e da geometria da chama de uma poça de combustível. Foi realizada a modelagem da combustão em uma poça, com a dispersão da pluma em função do vento incidente, com o objetivo de caracterizar o fenômeno. Foi utilizado um túnel de vento em escala laboratorial para executar a análise experimental de poças de diesel (S-500) e biodiesel (B-100), em um tanque cilíndrico com tamanho reduzido de  $\varnothing 110 \times 57,4$  mm. Além disso, foi utilizado o programa FDS para análise e comparação dos dados em escala de mesma grandeza da bancada experimental. A influência da velocidade do vento sobre a geometria da chama – inclinação, altura e comprimento – foi analisada, bem como outras questões pertinentes à estrutura da chama, como temperatura adimensional da chama, da pluma e temperatura periférica. Por último, uma análise da taxa de queima mássica foi feita para complementar os dados experimentais e obter mais informações sobre o comportamento da chama. Os dados experimentais foram aplicados nas correlações semi-empíricas de comprimento e ângulo de chama, a fim de comparar seu comportamento com a previsão de outros autores. Foi observado nos experimentos que, com a mudança da geometria da chama, ocorre a mudança da posição e conseqüentemente da dispersão da pluma. O ângulo da chama mostrou variação diretamente proporcional à velocidade do escoamento. A variação da altura e comprimento de chama foi inversamente proporcional à velocidade do escoamento. Os comportamentos do ângulo e da altura concordaram com a literatura, mas o comprimento apresentou diferenças. A temperatura adimensional da chama aumentou com o aumento da velocidade, sendo a do biodiesel 49% superior à do diesel. A temperatura adimensional da pluma apresentou um decremento com o aumento da velocidade de escoamento, atingindo, para o diesel, temperaturas cerca de 110% menores em relação ao biodiesel. A mesma tendência ocorreu com a temperatura periférica, que reduziu conforme aumentou a distância de medição da poça, havendo diferença de 20,3% entre os dois combustíveis. A taxa de queima mássica foi verificada e se observou que foi regida por diferentes mecanismos de trocas térmicas e flutuabilidade, o que provocou comportamentos diferentes para o diesel e o biodiesel, sendo as taxas de queima do diesel maiores, em geral. Os dados experimentais obtidos foram comparados com os resultados da análise numérica realizada no FDS. Obteve-se boas aproximações para o ângulo, comprimento, altura e temperaturas da pluma e periférica. As temperaturas da chama mostraram tendência diferente em relação aos dados experimentais. As análises de dispersão de poluentes mostraram uma tendência de redução abrupta das concentrações com o aumento da distância em velocidades menores e uma redução mais suave e constante para as maiores velocidades nos ensaios experimentais, apresentando, no entanto, uma grande diferença em relação aos valores numéricos, embora com tendências semelhantes, para ambos os combustíveis.

Palavras-chave: Incêndio em poça. Dispersão de poluentes. FDS. Diesel. Biodiesel.

## ABSTRACT

This work presents a numerical-experimental study of pollutants dispersion and flame geometry in a pool fire. Combustion modeling in a pool fire with plume dispersion as a function of the incident wind is carried out with the objective of phenomenon characterization. A laboratory-scale wind tunnel is used to perform the experimental analysis of diesel (S-500) and biodiesel (B-100) pool fire in a cylindrical tank with a reduced size of  $\text{Ø}110 \times 57.4$  mm. In addition, the FDS software was used to analyze and compare the results, using a model in a scale of the same magnitude of the experimental setup. The wind speed influence on the flame geometry – tilt angle, height and length – was analyzed as well as other questions related to the structure of the flame, such as dimensionless flame and plume temperature and outer layer temperature. Finally, an analysis of the mass burning rate was done to complement the experimental data and to obtain more information about the flame behavior. The data obtained were applied in the semi-empirical correlations of flame length and tilt angle to compare their behavior with the prediction of other authors. It Was observed that the change of flame geometry induces a change of plume position and dispersion. The behavior of the flame geometry was observed; the angle changes proportionally to the air flow speed. The variation in flame height and length was inversely proportional to air flow speed. The angle tilt and height agreed with the literature, but the length presented differences. The temperature of the flame increased with increasing of air flow speed being the values for biodiesel 49% higher than for diesel. The plume temperature presented a decrease with the increase of air flow speed, temperatures for diesel were about 110% smaller than for biodiesel. The same trend occurred with the measured outer layer temperature that reduced as the pool fire measurement distance increased, with a 20.3% difference between the fuels. The mass burning rate was governed by different mechanisms of heat feedback and buoyancy, which caused different behaviors for diesel and biodiesel, with diesel mass burning rates being higher in general. The experimental data obtained were compared with the results of the numerical analysis performed in the FDS software, and thus the numerical validation was done. The simulated results for tilt angle length, height and temperature of the plume and the outer layer agree well with experimental ones. The flame temperatures show an inverse trend in relation to experimental data. Pollutant dispersion analyzes showed a trend of abrupt reduction of concentration with increasing distance at lower air flow speed and a smoother and steady reduction at higher speeds, yet presenting a large discrepancy in relation to the numerical values for both fuels.

Keywords: Pool fire. Pollutants dispersion. FDS. Diesel. Biodiesel.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 – Incêndio provocado pelo vazamento de gás no terminal de containers no Porto de Santos/SP em 14/01/2016.....  | 19 |
| Figura 1.2 – Incêndio provocado pelo vazamento de álcool anidro e gasolina no Porto de Santos/SP em 17/04/2015.....   | 19 |
| Figura 1.3 – Pluma com muita fumaça provocada pelo incêndio em um vazamento de álcool anidro e gasolina no Porto de Santos/SP em 17/04/2015.....  | 20 |
| Figura 2.1 – Detalhes do tanque de armazenamento de combustíveis.....   | 31 |
| Figura 2.2 – Tanque de teto fixo.....   | 32 |
| Figura 2.3 – Tanque de teto flutuante.....  | 33 |
| Figura 2.4 – Esquema do detalhe da região da pluma de uma chama.....  | 39 |
| Figura 2.5 – Esquema de medições de geometria da chama: (a) ângulo e comprimento e (b) ângulo.....  | 42 |
| Figura 3.1 – Detalhes do túnel de vento utilizado nos experimentos práticos.....  | 49 |
| Figura 3.2 – Medidas do túnel de vento utilizado nos experimentos práticos.....   | 49 |
| Figura 3.3 – Medidas da seção transversal do túnel de vento e pontos de medição do perfil de velocidade.....  | 51 |
| Figura 3.4 – Medidas da seção transversal do túnel de vento e pontos de medição do perfil de velocidade; os pontos adicionais na altura de 125 mm (símbolos vazados) se referem às medições com o anemômetro..... | 51 |
| Figura 3.5 – Detalhe de fontes pontuais típicas: (a) tanque de armazenamento e (b) chaminé industrial.....  | 53 |
| Figura 3.6 – Esquema detalhado da montagem do experimento (Vista lateral). Todas as medidas indicadas estão em milímetros.....  | 54 |
| Figura 3.7 – Esquema detalhado da montagem do experimento (Vista frontal). Todas as medidas indicadas estão em milímetros.....  | 55 |
| Figura 3.8 – Variação do ângulo da chama em decorrência dos vórtices devido ao escoamento turbulento na saída do túnel de vento.....  | 55 |
| Figura 3.9 – Desprendimento da chama em função da velocidade do vento: (a) vídeo e (b) termografia.....   | 56 |
| Figura 3.10 – Detalhe do teste de determinação da convergência dos resultados experimentais.....  | 57 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 3.11 – Esquema detalhado da montagem do analisador de gases no experimento (Vista lateral). Todas as medidas indicadas estão em milímetros.....   | 58 |
| Figura 3.12 – Esquema detalhado da montagem da balança para medição da taxa de queima mássica .....  | 59 |
| Figura 3.13 – Esquema de medição do ângulo e do comprimento da chama: (a) conversão preto e branco; (b) integralização; (c) criação dos centroides e ponto médio .....   | 61 |
| Figura 3.14 – Esquema de medição das características da chama e pontos de referência .....   | 61 |
| Figura 3.15 – Esquema de medição das temperaturas da chama e da pluma e ajustes dos parâmetros da câmara de termografia.....   | 64 |
| Figura 4.1 – Visualização do modelo 3D pelo Smokeview .....  | 74 |
| Figura 4.2 – Visualização das malhas do modelo 3D .....  | 75 |
| Figura 4.3 – Visualização dos perfis de temperatura da chama e da pluma pelo Smokeview .   | 81 |
| Figura 4.4 – Visualização da chama e da dispersão da pluma no Smokeview.....   | 82 |
| Figura 5.1 – Evolução da geometria da chama com diesel em função do aumento da velocidade do vento .....   | 83 |
| Figura 5.2 – Evolução da geometria da chama com biodiesel em função do aumento da velocidade do vento .....  | 84 |
| Figura 5.3 – Detalhe das trocas térmicas e esquema das componentes de uma poça de combustível aberta em queima livre.....  | 85 |
| Figura 5.4 – Variação da taxa de queima mássica experimental e simulação versus velocidade do vento .....  | 86 |
| Figura 5.5 – Variação da perda de massa em função do tempo: (a) ensaios experimentais diesel e (b) ensaios experimentais biodiesel.....  | 89 |
| Figura 5.6 – Variação do ângulo de inclinação da chama experimental e simulação versus velocidade do vento .....   | 91 |
| Figura 5.7 – Variação do ângulo de inclinação da chama: (a) correlações semi-empíricas e diesel experimental versus a velocidade do vento e (b) correlações semi-empíricas e biodiesel experimental versus a velocidade do vento ..... | 92 |
| Figura 5.8 – Variação do comprimento da chama experimental e simulação versus velocidade do vento .....  | 95 |
| Figura 5.9 – Variação do comprimento da chama: (a) correlações semi-empíricas e diesel experimental versus a velocidade do vento e (b) correlações semi-empíricas e biodiesel experimental versus a velocidade do vento .....          | 96 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5.10 – Variação da altura da chama experimental e simulação versus velocidade do vento .....   | 99  |
| Figura 5.11 – Evolução das caixas de medição da temperatura adimensional ( $T^*$ ) da chama e da pluma em função da velocidade do vento para o ensaio experimental de diesel..... | 100 |
| Figura 5.12 – Campos de temperatura adimensional ( $T^*$ ) da chama e da pluma em função da velocidade do vento para o ensaio numérico de diesel.....                             | 101 |
| Figura 5.13 – Variação da temperatura adimensional da chama experimental e numérico versus a velocidade do vento .....  | 102 |
| Figura 5.14 – Variação da temperatura adimensional da pluma para os ensaios experimentais e numéricos versus a velocidade do vento.....   | 104 |
| Figura 5.15 – Variação da temperatura periférica do diesel para ensaios experimentais versus a velocidade do vento e ensaios numéricos versus a velocidade do vento.....          | 107 |
| Figura 5.16 – Variação da temperatura periférica do biodiesel para ensaios experimentais versus a velocidade do vento e ensaios numéricos versus a velocidade do vento.....       | 108 |
| Figura 5.17 – Variação da concentração de CO para o diesel versus a distância de propagação da pluma: (a) dados experimentais e (b) resultados numéricos.....                     | 110 |
| Figura 5.18 – Variação da dispersão de CO para o biodiesel versus a distância de propagação da pluma: (a) dados experimentais e (b) resultados numéricos.....                     | 111 |
| Figura 5.19 – Variação da dispersão de NO para o diesel versus a distância de propagação da pluma: (a) dados experimentais e (b) resultados numéricos. (escalas diferentes).....  | 112 |
| Figura 5.20 – Variação da dispersão de NO para o biodiesel versus a distância de propagação da pluma: (a) dados experimentais e (b) resultados numéricos.....                     | 113 |
| Figura 5.21 – Variação da dispersão de SO <sub>2</sub> para o diesel versus a distância de propagação da pluma: (a) resultados experimentais, (b) resultados numéricos .....      | 115 |
| Figura 5.22 – Variação da dispersão de SO <sub>2</sub> para o biodiesel versus a distância de propagação da pluma: (a) resultados experimentais, (b) resultados numéricos.....    | 116 |

## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 2.1 – Propriedades do óleo diesel .....  | 34  |
| Tabela 2.2 – Propriedades do biodiesel .....  | 36  |
| Tabela 2.3 – Resumo das condições de ensaio e coeficientes de correlação das equações semi-empíricas para ângulo da chama (Lam e Weckman, 2015b).....       | 43  |
| Tabela 2.4 – Resumo das condições de ensaio e coeficientes de correlação das equações semi-empíricas para comprimento da chama (Lam e Weckman, 2015b) ..... | 46  |
| Tabela 3.1 – Resumo das medições possíveis e incertezas do analisador de gases .....  | 58  |
| Tabela 4.1 – Resumo das medições do teste de sensibilidade de malha nas simulações com velocidade prescrita de $0 \text{ m s}^{-1}$ .....                   | 80  |
| Tabela 5.1 – Resumo das medições dos testes com óleo diesel das simulações numéricas...   | 117 |
| Tabela 5.2 – Resumo das medições dos testes com biodiesel das simulações numéricas .....  | 117 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|         |  |
|---------|--|
| 3D      | Três Dimensões ou tridimensional – <i>3 Dimensions</i>   |
| ABNT    | Associação Brasileira de Normas Técnicas   |
| ANP     | Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis  |
| API     | <i>American Petroleum Institute</i>  |
| ASTM    | <i>American Society for Testing and Materials</i>  |
| BR      | Petrobrás – Petróleo Brasileiro S.A.   |
| CCD     | Dispositivo de carga acoplada – <i>Charge-Coupled Device</i>   |
| CFD     | Fluidodinâmica Computacional – <i>Computational Fluid Dynamics</i>                                   |
| CLP     | Camada Limite Planetária   |
| CONTEC  | Comissão de Normalização Técnica   |
| CPU     | Unidade Central de Processamento – <i>Central Processing Unit</i>                                    |
| CRESESB | Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito  |
| FDS     | Simulador de Dinâmica de Incêndios – <i>Fire Dynamics Simulator</i>                                  |
| FISPQ   | Ficha de Informação de Segurança para Produtos Químicos  |
| GB      | GigaBytes - Unidade de medida de informação equivalente a<br>1.073.741.824 bytes                     |
| GLP     | Gás Liquefeito de Petróleo   |
| GNL     | Gás Natural Liquefeito   |
| INERIS  | <i>L'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques</i>                              |
| IR      | Infravermelho – <i>InfraRed</i>  |
| IUPAC   | <i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>   |
| LES     | Simulação de Grandes Vorticidades – <i>Large Eddy Simulation</i>                                     |
| MUST    | Campo de Teste de Simulação Urbana – <i>The Mock Urban Setting Trial</i>                             |
| NBR     | Normas Brasileiras de Regulação  |
| NIST    | <i>National Institute of Standards and Technology</i>  |
| PC      | Computador Pessoal – <i>Personal Computer</i>  |
| ppm     | Partes por milhão - Unidade de concentração de gases adimensional<br>equivalente a mg m <sup>3</sup> |
| RANS    | <i>Reynolds-averaged Navier–Stokes</i>   |
| RAM     | Memória de Acesso Aleatório – <i>Random Access Memory</i>  |
| REFAP   | Refinaria Alberto Pasqualini   |

SFPE *Society of Fire Protection Engineers*  
SGS *Escala de Submalha – Subgrid Scale*  
UHC *Hidrocarbonetos Não Queimados – Unburned HydroCarbon*

## LISTA DE SIMBOLOS

### Símbolos Romanos

|                    |   |                                       |
|--------------------|---|---------------------------------------|
| $A$                | Área da seção transversal                                   | [m <sup>2</sup> ]                     |
| $C1$               | Constante de correlação semi-empírica                       | [-]                                   |
| $C2$               | Coefficiente de ajuste da correlação semi-empírica          | [-]                                   |
| $C3$               | Coefficiente de ajuste da correlação semi-empírica          | [-]                                   |
| $c_p$              | Calor específico  | [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] |
| $D$                | Diâmetro nominal  | [m]                                   |
| $D^*$              | Diâmetro característico                                     | [m]                                   |
| $Dh$               | Diâmetro hidráulico   | [m]                                   |
| Dist               | Distância   | [m]                                   |
| $\mathbf{f}$       | Vetor de forças externas                                    | [N]                                   |
| $\mathbf{F}$       | Componentes da convecção/difusão                            | [-]                                   |
| $Fr$               | Número de Froude  | [-]                                   |
| $g$                | Aceleração da gravidade                                     | [m s <sup>-2</sup> ]                  |
| $\mathbf{g}$       | Vetor gravidade normal                                      | [m s <sup>-2</sup> ]                  |
| $h$                | Entalpia sensível   | [kJ mol <sup>-1</sup> ]               |
| $H$                | Altura  | [m]                                   |
| $\mathcal{H}$      | Pressão modificada  | [kPa]                                 |
| $\Delta H_{c,eff}$ | Calor de combustão efetivo                                  | [kJ kg <sup>-1</sup> ]                |
| $L$                | Comprimento   | [m]                                   |
| $\dot{m}'''$       | Taxa de produção mássica das espécies por unidade de volume | [kg m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> ] |
| $\dot{m}''$        | Taxa de massa de combustível queimada por unidade de área   | [kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ] |
| $\dot{m}$          | Taxa de massa de combustível queimada                       | [kg s <sup>-1</sup> ]                 |
| $p$                | Pressão   | [kPa]                                 |
| $P$                | Perímetro molhado   | [m]                                   |
| $\bar{p}$          | Pressão de segundo plano                                    | [kPa]                                 |
| $\mathcal{Q}''$    | Vetor do fluxo de calor por condução e radiação             | [kW m <sup>-2</sup> ]                 |

|               |   |  |
|---------------|---|--|
| $\dot{Q}$     | Taxa de calor liberada por unidade de volume                    | [kW m <sup>-3</sup> ]                  |
| $Q$           | Taxa de calor liberada  | [kW]                                   |
| $r$           | Raio nominal  | [m]                                    |
| $\mathcal{R}$ | Constante universal dos gases                                   | [J K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> ] |
| $Re$          | Número de Reynolds  | [-]                                    |
| $rH$          | Umidade Relativa – relative Humidity                            | [%]                                    |
| $T$           | Temperatura   | [K]                                    |
| $T^*$         | Temperatura adimensional  | [-]                                    |
| $t$           | Tempo   | [s]                                    |
| $\mathbf{u}$  | Vetor velocidade  | [m s <sup>-1</sup> ]                   |
| $V$           | Velocidade  | [m s <sup>-1</sup> ]                   |
| $V_c$         | Velocidade mínima para a inclinação da chama ocorrer            | [m s <sup>-1</sup> ]                   |
| $V_{c,mod}$   | Velocidade mínima modificada para a inclinação da chama ocorrer | [m s <sup>-1</sup> ]                   |
| $\Delta x$    | Tamanho nominal da célula de malha                              | [m]                                    |
| $w$           | Velocidade normalizada da pluma                                 | [m s <sup>-2</sup> ]                   |
| $W$           | Massa molar das espécies  | [kg kmol <sup>-1</sup> ]               |
| $Y$           | Fração mássica das espécies                                     | [kg kg <sup>-1</sup> ]                 |
| $z$           | Coordenada vertical   | [m]                                    |
| $Z$           | Fração mássica das espécies aglomeradas                         | [kg kg <sup>-1</sup> ]                 |

#### Símbolos Gregos

|               |                       |                                       |
|---------------|-----------------------|---------------------------------------|
| $\varepsilon$ | Emissividade          | [-]                                   |
| $\Delta$      | Diferença ou variação | -                                     |
| $\nabla$      | Divergente            | -                                     |
| $\vartheta$   | Taxa de dissipação    | [-]                                   |
| $\partial$    | Derivada parcial      | -                                     |
| $\Sigma$      | Somatório             | -                                     |
| $\int$        | Integral              | -                                     |
| $\mu$         | Viscosidade dinâmica  | [kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ] |

|             |                                 |                       |
|-------------|---------------------------------|-----------------------|
| $\omega$    | Vetor componente de vorticidade | [-]                   |
| $\rho$      | Massa específica                | [kg m <sup>-3</sup> ] |
| $\tau_{ij}$ | Tensor de tensões viscosas      | [-]                   |
| $\theta$    | Ângulo de inclinação da chama   | [°]                   |

#### Subscritos

|          |   |   |
|----------|---|---|
| $0$      | Inicial   | - |
| $a$      | Ar a temperatura ambiente                                       | - |
| $atm$    | Ambiente  | - |
| $b$      | <i>Boiling</i> – ponto de evaporação de partículas ou gotículas | - |
| $e$      | Externa   | - |
| $g$      | Vapores do combustível no ponto de ebulição                     | - |
| $m$      | Zona de pressão na $m$ ésima ordem                              | - |
| $máx$    | Máxima  |   |
| $med$    | Medida – grandeza mensurada por instrumento                     |   |
| $ref$    | Referência  | - |
| $\alpha$ | Espécie química genérica  | - |
| $\infty$ | Condições à temperatura ambiente                                | - |



## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>18</b> |
| 1.1 OBJETIVOS.....  | 21        |
| <b>1.1.1 Objetivo Geral .....</b>   | <b>21</b> |
| <b>1.1.2 Objetivos Específicos.....</b>   | <b>21</b> |
| 1.2 JUSTIFICATIVA .....   | 21        |
| 1.3 DELIMITAÇÕES.....   | 22        |
| 1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA.....  | 22        |
| <b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>  | <b>23</b> |
| 2.1 POLUIÇÃO E POLUENTES.....   | 23        |
| <b>2.1.1 Processo de Formação de NO<sub>x</sub> .....</b>   | <b>24</b> |
| 2.1.1.1 NO <sub>x</sub> Térmico.....  | 24        |
| 2.1.1.2 NO <sub>x</sub> Imediato .....  | 25        |
| 2.1.1.3 NO <sub>x</sub> do Combustível.....   | 25        |
| <b>2.1.2 Processo de Formação de SO<sub>x</sub>.....</b>  | <b>26</b> |
| 2.2 DETERMINAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE CO, CO <sub>2</sub> , NO, SO <sub>2</sub> E O <sub>2</sub> NOS GASES DE COMBUSTÃO ..... | 26        |
| 2.3 MODELOS NUMÉRICOS .....   | 27        |
| 2.4 MODELOS EXPERIMENTAIS .....   | 31        |
| <b>2.4.1 Tanques de Armazenamento de Combustíveis.....</b>  | <b>31</b> |
| <b>2.4.2 Combustíveis.....</b>  | <b>33</b> |
| 2.4.2.1 Óleo Diesel .....   | 34        |
| 2.4.2.2 Biodiesel .....   | 35        |
| <b>2.4.3 Túnel de Vento.....</b>  | <b>36</b> |
| <b>2.4.4 Definição da Análise de Poluentes .....</b>  | <b>37</b> |
| <b>2.4.5 Definição da Chama e da Pluma.....</b>   | <b>38</b> |
| <b>2.4.6 Determinação do Limite de Velocidade do Vento .....</b>  | <b>40</b> |
| <b>2.4.7 Correlações Semi-empíricas para Geometria da Chama .....</b>   | <b>40</b> |
| <b>2.4.8 Determinação das Taxas de Queima Mássica de Combustível.....</b>   | <b>46</b> |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS DA ANÁLISE EXPERIMENTAL.....</b>   | <b>48</b> |
| 3.1 TÚNEL DE VENTO .....  | 48        |
| <b>3.1.1 Perfil de Escoamento do Túnel de Vento .....</b>   | <b>50</b> |
| 3.2 POÇA DE COMBUSTÍVEL.....  | 52        |

|   |     |
|---|-----|
| 3.3 A BANCADA EXPERIMENTAL E SEUS ACESSÓRIOS .....                          | 53  |
| 3.3.1 Metodologia de Análise das Temperaturas.....                          | 54  |
| 3.3.2 Metodologia de Análise da Geometria da Chama.....                     | 55  |
| 3.3.3 Metodologia da Determinação de Convergência das Amostras .....        | 57  |
| 3.3.4 Metodologia de Análise da Concentração de Poluentes .....             | 57  |
| 3.3.5 Metodologia de Análise da Taxa de Queima Mássica de Combustível ..... | 59  |
| 3.4 TRATAMENTO DE DADOS .....   | 60  |
| 3.4.1 Análise de Dados da Geometria da Chama .....                          | 60  |
| 3.4.2 Análise de Dados da Temperatura da Chama e da Pluma.....              | 62  |
| 3.4.3 Adimensionalização da Temperatura da Chama e da Pluma.....            | 65  |
| 3.4.4 Análise de Dados da Temperatura Periférica.....                       | 65  |
| 3.4.5 Análise de Dados da Taxa de Queima Mássica de Combustível.....        | 65  |
| 3.4.6 Análise de Dados da Concentração de Poluentes .....                   | 66  |
| 3.4.7 Comparação das Correlações Semi-empíricas .....                       | 66  |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS DA ANÁLISE NUMÉRICA .....                             | 68  |
| 4.1 FDS.....  | 68  |
| 4.2 LES .....   | 68  |
| 4.3 MÉTODO DE RESOLUÇÃO DO FDS.....   | 69  |
| 4.3.1 Partículas Lagrangeanas .....   | 70  |
| 4.3.2 Aproximação de Deardorff.....   | 70  |
| 4.4 EQUAÇÕES PARA RESOLUÇÃO NUMÉRICA.....                                   | 70  |
| 4.5 TRATAMENTO DOS DADOS NUMÉRICOS .....                                    | 73  |
| 4.5.1 Análise de Sensibilidade de Malha .....                               | 76  |
| 4.5.2 Análise de Dados de Temperatura.....                                  | 81  |
| 4.5.3 Análise de Dados Geometria .....                                      | 82  |
| 4.6 DESENVOLVIMENTO DOS CÓDIGOS FONTE.....                                  | 82  |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....   | 83  |
| 5.1 TAXA DE QUEIMA MÁSSICA.....   | 83  |
| 5.2 ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DA CHAMA .....                                     | 90  |
| 5.3 COMPRIMENTO DA CHAMA .....  | 93  |
| 5.4 ALTURA DA CHAMA .....   | 98  |
| 5.5 TEMPERATURA NA REGIÃO DA CHAMA .....                                    | 99  |
| 5.6 TEMPERATURA NA REGIÃO DA PLUMA.....                                     | 103 |
| 5.7 TEMPERATURA NA REGIÃO PERIFÉRICA.....                                   | 105 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.8 DISPERSÃO DE POLUENTES .....  | 109 |
| 5.8.1 Dispersão de CO .....   | 109 |
| 5.8.2 Dispersão de NO .....   | 111 |
| 5.8.3 Dispersão de SO <sub>2</sub> .....  | 114 |
| 5.9 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS .....  | 117 |
| 5.10 ANÁLISE GLOBAL DAS PROPRIEDADES DA CHAMA .....   | 118 |
| 6 CONCLUSÕES .....  | 124 |
| 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....  | 126 |
| REFERÊNCIAS .....   | 127 |
| APÊNDICE A - PROGRAMA PARA OBTENÇÃO DOS RESULTADOS DO ÓLEO DIESEL .....                                     | 135 |
| APÊNDICE B - PROGRAMA PARA OBTENÇÃO DOS RESULTADOS DO BIODIESEL .....                                       | 150 |
| APÊNDICE C - GRÁFICOS COMPLEMENTARES DAS MEDIÇÕES DE TEMPERATURA PERIFÉRICA DA CHAMA.....                   | 154 |
| APÊNDICE D - GRÁFICOS COMPLEMENTARES DAS CORRELAÇÕES DE GEOMETRIA DA CHAMA .....                            | 157 |
| APÊNDICE E - GRÁFICOS COMPLEMENTARES DAS MEDIÇÕES DE DISPERSÃO DE POLUENTES .....                           | 161 |
| ANEXO A - CÓDIGO FONTE DO MATLAB PARA OBTENÇÃO DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO, COMPRIMENTO E ALTURA DA CHAMA ..... | 168 |

## 1 INTRODUÇÃO

Combustíveis derivados do petróleo, nos dias atuais, são a principal fonte de geração de energia utilizada no mundo. O uso de combustíveis líquidos é principalmente encontrado em veículos automotores, ou melhor dizendo, em seus tanques de armazenamento. Os combustíveis líquidos representam a maior parcela do mercado para o uso em meios de transporte – carros, ônibus, caminhões, aviões – e para isso anualmente é necessário o processamento de bilhões de litros de combustíveis líquidos como gasolina, diesel, metanol, querosene, entre outros.

Os combustíveis são produzidos em refinarias e em grandes volumes, fazendo com que seja necessária sua armazenagem dentro destes complexos industriais. Esta armazenagem é feita em grandes tanques de aço que possuem grande capacidade volumétrica, havendo a posterior distribuição através de transporte rodoviário para os postos de combustíveis.

Além dos combustíveis provenientes do petróleo, mais recentemente entraram no mercado também os combustíveis renováveis, com ênfase nos biodieséis que estão sendo utilizados em substituição aos combustíveis fósseis, principalmente o óleo diesel. O biodiesel, após seu processo de produção, também é armazenado em grandes tanques, devido a isso, os riscos são os mesmos que com os demais combustíveis líquidos.

Juntamente com a necessidade de utilização dos tanques de armazenagem, surgem os problemas que podem ser causados por eles. Com o acúmulo de combustíveis vem o risco de acidentes com incêndios e explosões, que podem ser causados pela autoignição dos vapores gerados pelas grandes quantidades de líquidos que eventualmente evaporam na temperatura ambiente. Os acidentes em tanques de combustíveis já causaram diversas perdas humanas, ambientais e materiais e, nos dias atuais, muitos pesquisadores continuam as investigações deste tema para que seja possível o aperfeiçoamento das previsões sobre o comportamento das chamas em caso de um sinistro e para uma correta tomada de decisão nas ações para minimizar os possíveis problemas decorrentes do mesmo.

Os problemas que podem ser causados por acidentes envolvendo tanques de armazenagem de combustíveis são muito estudados há diversos anos devido à sua relevância na determinação de ações que podem ser tomadas em problemas envolvendo um cenário de catástrofe. Estes estudos ajudam no direcionamento de decisões, na previsão da potencialidade de risco do evento, e também na estimativa de outros fatores que podem influenciar na vizinhança e expandir os danos decorrentes de um acidente.

Recentemente noticiários divulgaram problemas ocorridos após explosões em tanques de armazenamento no litoral de São Paulo. Estes acidentes provocaram problemas aos moradores no entorno do local em que ocorreu o episódio.

No porto de Santos, uma ocorrência recente, Figura 1.1, provocou, além de danos materiais, problemas respiratórios aos moradores. O acidente aconteceu quando uma reação química provocou muita fumaça, que se espalhou para outras três cidades no litoral de São Paulo. A fumaça gerada obrigou ao fechamento temporário do maior porto do Brasil. (G1, 2016).



Figura 1.1 – Incêndio provocado pelo vazamento de gás no terminal de containers no Porto de Santos/SP em 14/01/2016  
Fonte: Site G1 (2016).

Conforme G1 (2015), outro acidente atingiu tanques de combustível de uma empresa no bairro da Alemoa, em Santos, no litoral de São Paulo, conforme mostra a Figura 1.2.



Figura 1.2 – Incêndio provocado pelo vazamento de álcool anidro e gasolina no Porto de Santos/SP em 17/04/2015  
Fonte: Site G1 (2015).

O fogo provocou uma pluma gigantesca com muita fumaça, que podia ser avistada de diversas cidades, conforme Figura 1.3. Algumas pessoas foram atendidas ainda no local, mas não houve vítimas fatais, e outras pessoas foram levadas ao hospital após terem sofrido problemas em decorrência da inalação de fumaça.



Figura 1.3 – Pluma com muita fumaça provocada pelo incêndio em um vazamento de álcool anidro e gasolina no Porto de Santos/SP em 17/04/2015

Fonte: Site G1 (2015).

Pelos exemplos relatados, percebe-se a importância do estudo e análise de incêndio em tanques e dispersão de poluentes causada por incêndios e vazamentos, visando elaborar um cenário completo que demonstre a influência dos ventos que fazem com que ocorra a dispersão da pluma bem como a mudança da geometria da chama.

Dentre os problemas causados por acidentes com combustão de gases, líquidos inflamáveis e outros, com a geração de grandes plumas com muita fumaça, estão a poluição, problemas de saúde, odores fortes etc.

Para obter dados que auxiliem na minimização destes problemas e obter também uma previsão confiável das consequências deste tipo de acidente, o estudo dos efeitos do vento sobre a chama e a pluma, com o uso de uma poça de combustível, em escala reduzida, é aplicado.

Como o estudo em um tanque de tamanho real não é simples de ser feito, exigindo grandes espaços e condições difíceis de serem controladas, uma vez que a geração de ventos laterais para tanques de 5, 10, 30 m ou até mais é quase inviável devido às dimensões que os ventiladores necessitariam possuir, se faz uso de poças de combustíveis, que simulam este tipo de situação em escala laboratorial, e túneis de vento para simulação das condições atmosféricas, neste caso o vento incidente sobre a poça.

Diversos autores já publicaram artigos que descrevem estudos destas características da chama e da pluma e o assunto é amplamente estudado para a obtenção de correlações que possam determinar estas características como por exemplo, Lam e Weckman (2015a), Chen, Song e Lv (2012), Hu et al. (2013), Hu et al. (2016) e Jiang e Lu (2013). Este assunto continua sendo, entretanto, foco de estudos para aperfeiçoar as previsões e obter correlações mais precisas para a geometria da chama e dispersão da pluma, tanto para poças em pequena escala, com dimensões de 0,1 m de diâmetro, como nos trabalhos de Woods, Fleck e Kostiuk (2006) e Hu et al. (2015), para poças de grandes dimensões, chegando a 18 m de diâmetro (e.g. Sjöström et al., 2015), ou maiores, como nos trabalhos de Argyropoulos et al. (2010) e Lautkaski (1992).

## 1.1 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho estão subdivididos em objetivo geral e objetivos específicos, descritos a seguir.

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é determinar a geometria, temperatura adimensional e dispersão dos poluentes em função da velocidade do vento e do tipo de combustível, em poças de diesel e biodiesel.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Desenvolver e validar, por comparação com a literatura, metodologia experimental para análises de incêndios em tanques de combustível.
- b) Desenvolver e validar, por comparação com os resultados experimentais, modelagem numérica para análise de incêndios em tanques de combustível.
- c) Realizar a comparação dos resultados dos modelos numérico e experimental com os dados da literatura.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O estudo da geometria da chama e os efeitos do vento sobre ela se torna de suma importância para que possam ser feitas previsões da posição e deslocamento da coluna de fumaça com gases tóxicos gerados e também verificar possíveis potencializações de um

acidente pela ocorrência de novos incêndios na região vizinha ao sinistro.

Com o estudo da geometria da chama em relação à variação da velocidade do vento é possível determinar a distância que a chama poderá alcançar, bem como a dispersão dos poluentes, com o intuito de verificar as possibilidades de ações de combate para as vizinhanças de um acidente. Aplicando-se a metodologia do estudo também ao biodiesel é possível verificar o comportamento, em incêndios, deste novo tipo de combustível que ainda é pouco estudado, obtendo dados a fim de se conquistar uma percepção sobre suas principais características.

### 1.3 DELIMITAÇÕES

Como o trabalho tem um caráter bem abrangente no que tange às diversas variáveis envolvidas no processo de dispersão de poluentes, alguns tópicos serão limitados conforme descrito a seguir.

Não será feita uma análise detalhada da camada limite de vento e nem sua caracterização, sendo assim será utilizada a velocidade média no túnel de vento para os ensaios.

A poça de combustível será utilizada justaposta à saída do túnel para que seja simulado um ambiente aberto.

### 1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

O presente trabalho é constituído de sete capítulos, cuja estrutura é descrita a seguir.

No Capítulo 1 é feita a apresentação do trabalho.

No Capítulo 2 faz-se a revisão bibliográfica sobre o tema deste trabalho, a qual se inicia com as definições sobre dispersão de poluentes, estrutura da chama e análise de poças de combustível.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos aplicados no experimento da análise da chama, da pluma e da dispersão de poluentes.

No Capítulo 4 são apresentados os materiais e métodos aplicados na simulação numérica da análise da chama, da pluma e da dispersão de poluentes.

No Capítulo 5 são apresentados e analisados os resultados obtidos com os testes experimentais e simulações numéricas.

No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões alcançadas neste trabalho.

Finalmente, no Capítulo 7, são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 POLUIÇÃO E POLUENTES

Segundo Carvalho Jr. e Lacava (2003), a poluição já é parte integrante da sociedade industrial e é uma das consequências da geração de energia através do processo de combustão. Os efeitos da poluição no meio ambiente estão ligados a problemas de ordem política, social e econômica.

De acordo com Wark, Warner e Davis (1997), as emissões de poluentes em um processo podem ser classificadas conforme segue:

- a) Emissões atmosféricas: produtos que deixam o local do processo através do ar;
- b) Emissões em correntes líquidas: produtos que deixam o local do processo através das correntes de líquidos, mais comumente água;
- c) Resíduos sólidos: produtos que deixam o local do processo na forma sólida;
- d) Emissões térmicas: propagação de energia (radiação ou convecção) que aumenta a temperatura do meio circundante ao processo.

Conforme Carvalho Jr. e Lacava (2003), diferentemente das emissões em correntes líquidas e dos resíduos sólidos de uma indústria, os poluentes atmosféricos apresentam um grande volume por unidade de massa e, uma vez lançados na atmosfera, misturam-se com o ar e são levados pelas correntes de vento, em um movimento que basicamente não pode ser controlado. É comum poder-se ver e sentir o cheiro dos poluentes atmosféricos e não é necessário dispor de uma instrumentação sofisticada para verificar sua presença em muitos locais, principalmente zonas industriais. Pode-se afirmar que uma das maiores fontes de emissão de poluentes são os gases resultantes de dispositivos que aproveitam a energia térmica liberada pelas reações de combustão. Apesar do ser humano utilizar a combustão como fonte de energia há milênios, a emissão de poluentes só ganhou destaque no cenário mundial a partir do início da década de 1970. As preocupações com o meio ambiente começaram a ganhar mais notoriedade há cerca de trinta anos com a evidência do efeito estufa e os problemas causados por ele. Assim, muitas pesquisas e desenvolvimentos na área de combustão têm como objetivo a minimização das emissões de poluentes, pois as indústrias e o setor de transportes, tanto nos países desenvolvidos como naqueles em desenvolvimento, estão baseados, em grande parte, na queima de combustíveis fósseis e, ao que tudo indica, deverão permanecer dessa forma por algumas décadas ainda.

Ainda de acordo com Carvalho Jr. e Lacava (2003), consideram-se os principais agentes causadores de poluição atmosférica presentes nos gases de combustão, ou seja, o material particulado, o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), os hidrocarbonetos não-queimados (UHC), as dioxinas e os furanos.

### 2.1.1 Processo de Formação de NO<sub>x</sub>

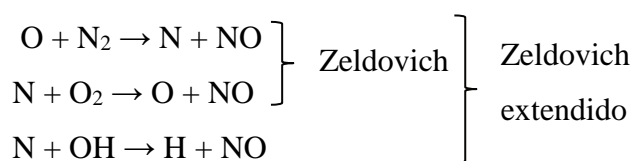
Dentre os muitos poluentes produzidos em uma combustão, os óxidos de nitrogênio são talvez os mais nocivos ao ser humano, plantas e animais. Segundo Muzio e Quartucy (1997) os principais óxidos de nitrogênio na atmosfera são óxido nítrico (NO), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), sendo que somente os dois primeiros são coletivamente denominados de NO<sub>x</sub>.

O NO tem um tempo de vida média de alguns dias antes de se converter a NO<sub>2</sub>. Considerado o agente nocivo dentre os óxidos de nitrogênio presentes nos gases de exaustão, o NO<sub>2</sub> não representa mais que 5% do NO<sub>x</sub> gerado na combustão. (HAYHRST e VINCE, 1980).

Observam-se três mecanismos principais de formação do NO<sub>x</sub> durante os processos de combustão, levando em consideração a cinética química do nitrogênio: térmico; imediato; do combustível.

#### 2.1.1.1 NO<sub>x</sub> Térmico

O NO<sub>x</sub> térmico é o principal mecanismo de formação de poluentes nitrogenados no processo de queima de combustíveis isentos de nitrogênio, segundo Miller e Bowmam (1989). Originalmente este mecanismo foi chamado de “Mecanismo de Zeldovich” em homenagem ao pesquisador russo que propôs este mecanismo de formação. A formação de NO<sub>x</sub> térmico ocorre a partir de reações químicas com elevadas energias de ativação, portanto altamente dependente da temperatura. Isso explica a produção de NO<sub>x</sub> na região de altas temperaturas das chamas. O sistema oxigênio-nitrogênio, segundo o mecanismo de Zeldovich, tem como principais reações:



A reação inicial,  $O + N_2$ , possui uma elevada energia de ativação e portanto terá sua taxa aumentada com o aumento da temperatura.

Segundo o mecanismo de Zeldovich a taxa de formação de NO é muito mais lenta do que a taxa das reações de combustão e a maioria do NO é formado após a combustão completa. Por isso o processo de formação de NO térmico pode ser desacoplado do processo de combustão e sua taxa de formação pode ser calculada assumindo equilíbrio das reações de combustão. (HAYHRST e VINCE, 1980).

#### 2.1.1.2 $NO_x$ Imediato

A presença de  $NO_x$  na região de chama com mistura rica em combustível, que não poderia ser explicada pelo mecanismo térmico, foi explicada por Fenimore (1971), que observou a velocidade de formação do  $NO_x$  térmico onde as reações são relativamente lentas. Assim foi proposto um novo mecanismo denominado por ele de  $NO_x$  imediato, segundo o qual radicais de hidrocarbonetos reagem rapidamente com o nitrogênio molecular formando NH, HCN e CN que conduzem a formação de NO.

Quando há altas concentrações de O e OH os compostos HCN são então convertidos em NO pelo mesmo mecanismo do  $NO_x$  do combustível, completando o mecanismo do  $NO_x$  imediato em chama rica em combustível. (VAN DER LANS, GLARBORG e DAM-JOHANSEN, 1997).

#### 2.1.1.3 $NO_x$ do Combustível

Uma das principais origens de óxidos de nitrogênio em combustíveis fósseis é do nitrogênio contido no próprio combustível. Esta fonte é particularmente importante na emissão de óxido de nitrogênio em combustíveis como, por exemplo, o carvão e seus derivados, onde se tem normalmente de 0,5 a 2,0% de nitrogênio. (MILLER e BOWMAN, 1989). Os autores afirmaram que medidas feitas em laboratório com vários tipos de combustíveis ricos em nitrogênio mostraram que: a conversão de nitrogênio em NO é quase independente do tipo dos compostos nitrogenados e depende fortemente das condições locais de combustão. As altas temperaturas locais favorecem a quebra das ligações, aumentando a taxa de  $NO_x$  do combustível, e a relação estequiométrica rica em combustível favorece a formação de HCN que é fortemente oxidado a NO na região posterior à chama, esta última demonstrada por Van der Lans, Glarborg e Dam-Johansen (1997). Ainda segundo os autores,

a conversão é altamente dependente da concentração inicial de compostos nitrogenados na mistura ar/combustível.

### 2.1.2 Processo de Formação de SO<sub>x</sub>

Nos processos de combustão, todo o enxofre presente no combustível reage com o O<sub>2</sub> formando dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e uma pequena parcela de trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>), aos quais se denomina genericamente de SO<sub>x</sub>.

## 2.2 DETERMINAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE CO, CO<sub>2</sub>, NO, SO<sub>2</sub> E O<sub>2</sub> NOS GASES DE COMBUSTÃO

Conforme Carvalho Jr. e Lacava (2003), uma maneira comum de detectar continuamente o CO e o CO<sub>2</sub> em produtos de combustão consiste no uso de um analisador tipo infravermelho. Um instrumento desse tipo produz radiação que passa por uma célula onde a amostra flui continuamente. Uma curva de calibração, em geral provida pelo fabricante, é utilizada para converter as leituras do painel frontal ou do gravador para valores de concentração. Um analisador tipo infravermelho também pode ser usado para detectar outros gases, como SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO e NH<sub>3</sub>.

Ainda conforme Carvalho Jr. e Lacava (2003), para detectar continuamente o O<sub>2</sub> (gás oxigênio) em gases de combustão, é comum utilizar analisadores paramagnéticos. Esses instrumentos usam a propriedade paramagnética do oxigênio. Um material paramagnético é atraído por um campo magnético, enquanto um diamagnético é repelido. O oxigênio é um dos poucos gases paramagnéticos. Esses equipamentos são conhecidos como analisadores termomagnéticos, nos quais variações da intensidade do fluxo magnético são medidas pela mudança de temperatura, a qual provoca uma alteração na resistência elétrica dos termistores.

Os analisadores de sucção são outro tipo de analisador utilizado para medição de gases de combustão. (INSTRUTEMP, 2016). Os analisadores possuem uma sonda que faz a sucção dos gases, que entram por uma câmara e são analisados através de sensor compensado de hidrogênio, que são sensores catalíticos. Esta tecnologia é utilizada na detecção de gases combustíveis, tais como hidrocarbonetos, e funciona através de oxidação catalítica. Os sensores deste tipo de detector são tipicamente construídos a partir de uma bobina de fio de platina tratada. Quando um gás combustível entra em contato com a superfície do catalisador, ela é oxidada e a resistência da fiação é alterada pelo calor que é liberado, onde um circuito de ponte de Wheatstone é normalmente usado para indicar a mudança de resistência.

## 2.3 MODELOS NUMÉRICOS

Os programas de fluidodinâmica computacional, CFD (*Computational Fluid Dynamics*), permitem a simulação numérica de todos os processos físicos ou físico-químicos que apresentam escoamento de fluidos.

A predição dos campos de concentração de espécies químicas, velocidade, pressão, temperatura e propriedades turbulentas é efetuada através de modelos baseados nos princípios de conservação de massa e das espécies químicas, da energia e da quantidade de movimento, no domínio do espaço e do tempo.

Os programas CFD são amplamente utilizados para: Simulação computacional de difusão e convecção de substâncias em bacias hidrográficas; Planejamento e gestão de recursos hídricos; Aerodinâmica e aerotermodinâmica de veículos aeroespaciais; Aerodinâmica de veículos terrestres (trens, caminhões, carros etc.); Refrigeração de reatores nucleares; Indústria de petróleo; Caracterização de poluição ambiental, análise e simulação de lançamento de poluentes e contaminantes em correntes hídricas; Hidrodinâmica e hemodinâmica computacionais; Previsão de tempo; Projeto de sistemas propulsivos e de geração de energia em geral. Devido a esta ampla gama de possibilidades em diversos campos da engenharia para o uso de programas CFD, sabendo-se que os modelos para as aplicações supracitadas já estão bem desenvolvidos e são bastante confiáveis e que também há programas comerciais e livres que podem ser usados com bons resultados, optou-se pela utilização, no modelo numérico do presente trabalho, de um programa gratuito, o FDS (*Fire Dynamics Simulator*).

Li et al. (2015), em estudo recente, desenvolveram um modelo aprimorado de dispersão de gases tóxicos com o uso do programa SLABi, que é um aprimoramento do programa comercial SLAB. O programa SLAB tem como proposta o modelamento de dispersão atmosférica para liberações de gases mais densos que o ar, desenvolvido pelo Laboratório Nacional Lawrence Livermore, com suporte do Departamento de Energia Norte-Americano, ele pode prever variações temporais em função das variações dos ventos e pode tratar de vários tipos de liberações de gases, incluindo evaporações provenientes de poças ao nível do solo até jatos horizontais elevados. O estudo se baseou na formulação de um submodelo do termo fonte que foi desenvolvido para calcular a taxa de emissão da fonte e os parâmetros relacionados. O modelo fonte avalia a taxa de liberação de vazamentos de gases, gases pressurizados, líquidos ou fluidos em duas fases.

Li et al. (2015) utilizam um estudo de caso para comparação com o modelo formulado, postulando a liberação de cloro líquido ( $\text{Cl}_2$ ) de uma fábrica em Beijing, China, após o rompimento de um tanque de armazenamento. O SLABi foi aprimorado para levar em conta a variação dos vetores do vento em função do tempo enquanto faz a previsão da dispersão dos gases tóxicos. Isto torna possível refletir em tempo real as mudanças meteorológicas na previsão das dispersões. Neste estudo foram encontrados bons resultados quando comparados com os dados do caso de estudo avaliados, fazendo com que o SLABi possa auxiliar equipes de apoio de acidentes a tomar decisões com uma orientação rápida e precisa, afim de minimizar os danos a pessoas e ao meio ambiente.

Tauseef, Rashtchian e Abbasi (2011) aplicam o método CFD na simulação de dispersão de gases densos na presença de obstáculos, a quantificação do perfil de concentrações espacial e temporal de nuvens de vapor resultantes de liberações em acidentes industriais é de grande importância para uma correta previsão dos perfis de concentrações, não só ajudando a tomar decisões de prevenção e mitigação como também podem ajudar na tomada de decisões de modificações que podem ajudar na prevenção de qualquer tipo de escalada do evento. No seu trabalho foram aplicados diversos tipos de modelos de turbulência para comparação com o trabalho experimental, previamente realizado, chamado de Trial 26. No experimento do Trial 26 foi proposto um cenário de vazamento de gás em um tanque, de uma mistura de Freon-12 e nitrogênio, liberado com a passagem por um obstáculo cúbico colocado a 50 m do local de liberação. Foram medidas as concentrações em diversos pontos e com elevações diferentes. Estes resultados foram comparados com os modelos de turbulência simulados com a obtenção de bons resultados na comparação entre o modelo experimental e o modelo numérico.

Mouilleau e Champassith (2009) apresentam em sua publicação que bons resultados foram encontrados quando a dispersão atmosférica de gases é modelada com o uso do FDS considerando explicitamente as flutuações do vento. Partindo deste ponto e considerando o uso das características principais do LES (*Large Eddy Simulation* – Simulação de grandes vórtices) vários casos foram selecionados para cobrir uma grande gama de espectros de escoamentos, situações práticas e importantes problemas em relação a segurança. Comparações entre dados de simulações e dados experimentais foram feitas considerando o modelo de medições de desempenho sugeridas pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

Foram utilizadas, por Mouilleau e Champassith (2009), as técnicas de LES no estudo, e neste contexto, como a resolução de malha não foi refinada o suficiente para capturar a

mistura de processos em escalas relevantes, um modelo de escala de submalha, seguindo a análise de Smagorinsk (1963), foi utilizado. Um importante ponto a ser esclarecido para o uso do FDS é que todas as variáveis consideradas, para as componentes de velocidade (U, V, W), correspondem a valores instantâneos e não a valores médios como na formulação em RANS. (*Reynolds-averaged Navier–Stokes*). Como consequência, para ser possível de rodar o FDS, é necessário especificar os limites dos valores de velocidade instantânea. Para este modelamento do escoamento atmosférico, o vento instantâneo precisa ser especificado, e então os seguintes pressupostos foram utilizados: a variação da velocidade do vento em função da altura é modelada em função da lei das potências, sendo o expoente uma função do comprimento da rugosidade e da classe de estabilidade; as flutuações do vento foram assumidas como sendo senoidais com períodos de 300 s para as flutuações horizontais e 100 s para as flutuações verticais; a direção média do vento, as flutuações do vento e as direções do escoamento cruzado do vento foram avaliadas conforme diversas literaturas referenciadas no trabalho de Mouilleau e Champassith (2009).

Mouilleau e Champassith (2009), primeiramente, utilizaram uma liberação em condições de dispersão passiva para avaliar as habilidades do FDS em uma configuração de um ambiente aberto e plano, onde a dispersão foi conduzida somente pelas propriedades de escoamento atmosférico. Então foram feitas simulações com base em experimentos para comparações. Foram tomados os dados experimentais de testes de campo de dispersão de amônia conduzidos pelo INERIS (*L'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques*), porém o FDS não é capaz de lidar com liberações de gases multifásicos. Para contornar esta limitação, foi utilizada uma metodologia simples de mistura de gases. Foram também conduzidos testes de dispersão de GNL provenientes da vaporização de poças que foram originalmente executados pelos testes Falcon, que são uma série de experimentos de campo em grandes escalas feitos pelo Laboratório Nacional Lawrence Livermore. E por último foram executados testes para comparação com os experimentos MUST (*The Mock Urban Setting Trial*) que são experimentos de campo desenvolvidos para investigar a dispersão instantânea em um traçado através de uma grande variedade de obstáculos, levando em conta a influência destes obstáculos sobre a dispersão.

Mouilleau e Champassith (2009) conduziram uma validação para determinar a habilidade do FDS para modelar dispersões atmosféricas. Os melhores resultados foram obtidos com as simulações executadas com o modelamento explícito das flutuações do vento e mostraram que as concentrações máximas foram provisionadas com boa aproximação, contudo não para as condições em casos com instabilidades. Da mesma maneira, a forma

média da nuvem de dispersão em função do tempo foi prevista com boa concordância para as condições atmosféricas estáveis, porém com maiores misturas das concentrações para as condições neutras e instáveis. Assim, com base nos resultados foi possível concluir que o FDS, unido com o modelo tradicional de turbulência  $k-\epsilon$ , é uma alternativa viável ao código RANS.

Pode-se concluir que muitos estudos são focados na área de dispersões de gases e poluentes e o assunto é amplamente estudado devido à sua grande importância e relevância para o contexto industrial e também nas questões que dizem respeito à poluição urbana e problemas de saúde causados por emissões liberadas na ocasião de acidentes.

Os estudos de dispersão são geralmente direcionados para substâncias tóxicas, inflamáveis ou ambas, pois a liberação acidental de substâncias como estas pode causar vítimas e grandes perdas econômicas. (BELLASIO; BIANCONI, 2005).

Ainda segundo Bellasio e Bianconi (2005), os modelos matemáticos são muito úteis para previsão das consequências dos acidentes e planejamento de medidas para reduzir os danos. Um bom número de modelos tem sido aplicado para suporte a decisões no caso de liberação acidental de substâncias tóxicas e/ou inflamáveis em fase líquida ou gasosa. Para permitir que decisões sejam tomadas com tempo suficientemente curto para permitir o aviso do acidente e possível redução do impacto, modelos de dispersão de gases tóxicos devem ser computacionalmente eficientes e aplicáveis para vários tipos de gases perigosos. Idealmente, o cálculo deve levar apenas alguns segundos ou até poucos minutos.

Os modelos de dispersão de gases podem ser agrupados em cinco categorias: modelos empíricos (BRITTER; MC-QUAID, 1988), modelos de caixa (KAISER; WALKER, 1978; BRITTER, 2009), modelos de similaridade (HAVENS, 1988), modelos tridimensionais de elementos finitos (ERMAK; CHAN, 1986) e modelos de camada superficial (ERMAK, 1990).

Os modelos empíricos são computacionalmente eficientes, mas tem baixa precisão. Modelos de caixa são também chamados de modelos integrais. Eles utilizam a combinação de leis de conservação aplicadas à nuvem ou pluma, suplementadas por relações semi-empíricas derivadas de pesquisas de dispersão. Modelos de caixa e de similaridade não são computacionalmente exigentes e são fáceis de usar, mas os resultados das previsões apresentam relativamente menos precisão porque algumas suposições utilizadas nas simulações podem ser, fisicamente, não razoáveis. Os modelos tridimensionais de elementos finitos como CFD possuem uma boa precisão. (LI et al., 2015).



A partir destas considerações o modelo CFD foi então escolhido para a análise numérica do problema, devido à sua precisão de resultados em comparação a outros métodos. A determinação do modelo numérico será obtida através do modelamento do cenário da poça de combustível em chamas com o auxílio do programa FDS.

O FDS é um programa do tipo CFD que é desenvolvido pelo NIST (*National Institute of Standards and Technology*), uma agência de pesquisa do governo norte-americano, que simula modelos de escoamento de fluidos direcionado a incêndios. O programa resolve numericamente uma forma das equações de Navier-Stokes para baixas velocidades, em escoamentos termicamente direcionados, com ênfase no transporte de calor proveniente de incêndio. (NIST, 2016).

Dentre os vários programas disponíveis no mercado optou-se pelo uso do FDS devido ao seu caráter focado na simulação de incêndios e por ser um programa gratuito.

## 2.4 MODELOS EXPERIMENTAIS

### 2.4.1 Tanques de Armazenamento de Combustíveis

Os tanques de armazenamento são equipamentos de caldeiraria pesada, sujeitos normalmente a pressões aproximadamente atmosféricas que são destinados, principalmente, ao armazenamento de petróleo e seus derivados. (BARROS, 1998). A ABNT NBR 17505-1 (2013) define que tanque de armazenamento é qualquer vaso com capacidade líquida superior a 230 litros, destinado à instalação fixa e não utilizado no processamento. Os principais componentes de um tanque de armazenamento podem ser observados na Figura 2.1.

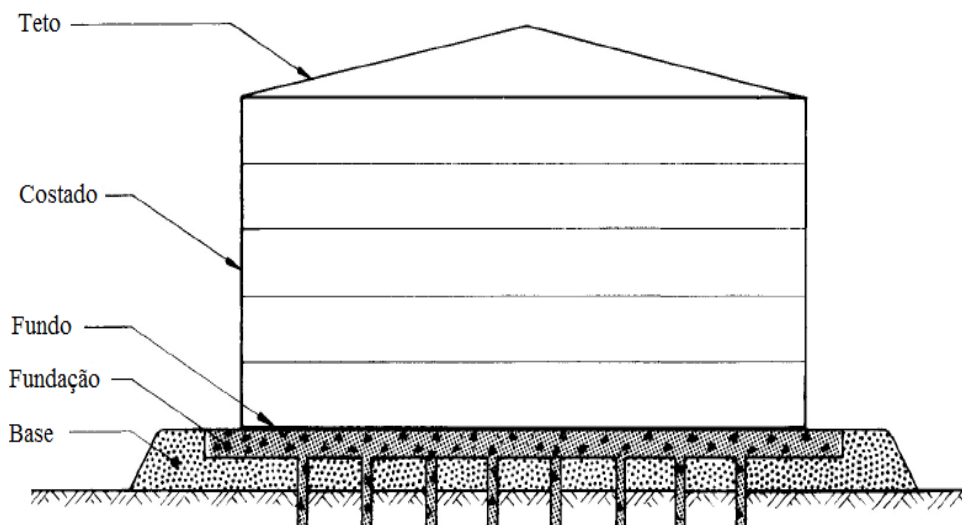


Figura 2.1 – Detalhes do tanque de armazenamento de combustíveis  
Fonte: Adaptado de Barros (1998).

Segundo a ABNT NBR-7821 (1983) os tanques são classificados, de acordo com o tipo de teto com que são construídos, da seguinte forma:

- a) Tanques sem teto;
- b) Tanques de teto fixo;
  - b.1) com teto suportado;
    - de teto cônico suportado;
    - de teto em domo suportado;
    - de tetos em gomos suportados;
  - b.2) com teto autoportante;
    - de teto cônico autoportante;
    - de teto em domo autoportante;
    - de teto em gomos autoportantes;
- c) Tanques de teto flutuante;
  - c.1) de teto duplo;
  - c.2) de teto pontão.

Os tanques sem teto são aqueles que não possuem nenhum tipo de cobertura e são aplicados ao armazenamento de água. (CONTEC, 2014).

Tanques de teto fixo, Figura 2.2, são aqueles cujos tetos estão ligados diretamente à parte superior de seus costados, sendo que os autoportantes são aqueles cujos tetos são apoiados exclusivamente na periferia dos costados enquanto que os de tetos suportados possuem uma estrutura de perfis metálicos internos para apoio dos tetos. (BARROS, 1998).



Figura 2.2 – Tanque de teto fixo  
Fonte: Adaptado de Barros (1998).

Os tanques de teto flutuante, Figura 2.3, são aqueles cujos tetos estão diretamente apoiados sobre a superfície dos líquidos armazenados. Estes tipos de tanques minimizam as

perdas por evaporação, mas necessitam de um sistema de selagem entre o teto e o costado. (BARROS, 1998).



Figura 2.3 – Tanque de teto flutuante  
Fonte: Adaptado de Barros (1998).

A maioria dos incêndios em tanques de teto flutuante ocorre no anel formado entre a periferia do teto e o costado do tanque, causado por vazamento de vapor pelo selo, sendo a ignição dada por descargas atmosféricas. (KLETZ, 1999).

#### 2.4.2 Combustíveis

Segundo Coelho e Costa (2007), os combustíveis são as substâncias que, quando aquecidas, sofrem uma reação química de oxidação com liberação de calor. Os combustíveis podem ser classificados em sólidos, líquidos e gasosos. Podem também ser classificados como combustíveis renováveis e não renováveis. Como exemplo de combustíveis não renováveis podemos citar os combustíveis fósseis e de renováveis podemos citar biomassa e biocombustíveis. Os principais combustíveis fósseis são os derivados do petróleo (gasolina, diesel, querosene e metanol), o carvão e o gás natural, e dentre os principais combustíveis renováveis podemos citar casca de vegetais e bagaços e óleos vegetais – canola, soja, girassol, mamona etc. – e óleo de gordura animal.

Carvalho Jr. e McQuay (2007) definem combustíveis como substâncias químicas que, quando em contato com um oxidante, podem produzir uma reação exotérmica, que libera energia na forma de calor. Compostos formados por carbono e hidrogênio são tipicamente considerados bons combustíveis.

### 2.4.2.1 Óleo Diesel

O óleo diesel é um combustível líquido derivado de petróleo, composto por hidrocarbonetos com cadeias de 8 a 16 carbonos e, em menor proporção, por nitrogênio, enxofre e oxigênio. No Brasil, o diesel é comercializado nas versões S-10 e S-500, sendo que o número que segue a letra S indica o teor de enxofre máximo no combustível, sendo 10 e 500 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente.

A Tabela 2.1 apresenta um resumo das principais propriedades do óleo diesel.

Tabela 2.1 – Propriedades do óleo diesel

| Propriedade                              | Valor               | Unidade                             | Referência                          |
|--|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Fórmula molecular                        | C13H39 <sup>1</sup> | -                                   | Menezes e Catalunã (2008)           |
| Massa molecular <sup>1</sup>             | 185                 | g mol <sup>-1</sup>                 | Menezes e Catalunã (2008)           |
| Taxa de formação de CO <sup>2</sup>      | 0,019               | g g <sup>-1</sup>                   | Tab. A.40 (pg. 3475), Hurley (2016) |
| Taxa de formação de fuligem <sup>2</sup> | 0,054               | g g <sup>-1</sup>                   | Tab. A.40 (pg. 3475), Hurley (2016) |
| Poder calorífico                         | 45253               | kJ kg <sup>-1</sup>                 | Análise calorímetro - Unisinos      |
| Calor latente de vaporização             | 234,25              | kJ kg <sup>-1</sup>                 | Tab. pg. 80, API (1988)             |
| Condutividade térmica                    | 0,15                | W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>   | Matbase (2017)                      |
| Calor específico                         | 1,8                 | kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> | Tab. pg. 80, API (1988)             |
| Temperatura de ebulição                  | 461                 | K                                   | Tab. pg. 80, API (1988)             |
| Massa específica <sup>2</sup>            | 844                 | kg m <sup>-3</sup>                  | Tab. pg. 80, API (1988)             |
| Ponto de fulgor                          | 347                 | K                                   | Tab. pg. 80, API (1988)             |

<sup>1</sup> valor médio.

<sup>2</sup> valores pressupostos, devido ao valor exato da fórmula média não estar disponível.

Para um melhor entendimento sobre as propriedades apresentadas na Tabela 2.1, e que estarão mencionadas também na Tabela 2.2, cada item é apresentado conforme segue:

- Fórmula molecular de uma substância apresenta a sua composição química elementar com a representação de seu número de átomos. É a combinação de símbolos químicos e índices que expressam os números reais dos átomos de cada elemento presente em uma molécula. (IUPAC, 1993);
- Massa molecular de uma substância é a massa de uma molécula dessa substância relativa à unidade de massa atômica. (IUPAC, 1993);
- Taxa de formação de CO é a massa de CO produzida por unidade de massa de combustível reagido. (MCGRATTAN et al., 2016);

- d) Taxa de formação de fuligem é a massa de fuligem produzida por unidade de massa de combustível reagido. (MCGRATTAN et al., 2016);
- e) Poder calorífico é a entalpia de reação durante um processo de combustão de fluxo constante quando 1 kg de combustível é queimado completamente a uma temperatura e pressão específicas e representa a quantidade de calor liberado. (ÇENGEL e BOLES, 2006);
- f) Calor latente de vaporização é a quantidade de energia absorvida em um processo de troca de fase durante a vaporização. (ÇENGEL e BOLES, 2006);
- g) Condutividade térmica é definida como uma medida da capacidade dos materiais de conduzir energia térmica ou calor. (ÇENGEL e BOLES, 2006);
- h) Calor específico é definido como a energia necessária para elevar a temperatura de uma unidade de massa de uma substância em 1 K. (ÇENGEL e BOLES, 2006);
- i) Temperatura de ebulição é a temperatura em que ocorre a mudança de fase de uma substância passando de líquido para vapor. (ÇENGEL e BOLES, 2006);
- j) Massa específica é definida como a massa por unidade de volume de uma substância. (ÇENGEL e BOLES, 2006);
- k) Ponto de fulgor é a menor temperatura na qual um combustível libera vapor em quantidade suficiente para formar uma mistura inflamável por uma fonte externa de calor. O ponto de fulgor não é suficiente para que uma combustão seja mantida. (API, 1988).

#### 2.4.2.2 Biodiesel

O biodiesel é um combustível líquido derivado de produtos renováveis de origem animal (graxas e sebos), vegetal (óleo de soja, canola, mamona, algodão etc.) e óleo de cozinha reciclado, utilizado em substituição ao óleo diesel. (ALLEMAN e MCCORMIK, 2016). No Brasil o biodiesel é comercializado através de leilões e na sua adição no óleo diesel. O biodiesel normatizado e que é indicado nos leilões pela ANP é o B-100.

O biodiesel utilizado neste trabalho é o B-100, produzido pela Oleoplan, composto por óleo de soja (59,5%), gordura animal (35%), óleo de canola (5%) e óleo recuperado (0,5%).

Conforme Oleoplan (2016) o biodiesel B-100 possui uma natureza de éster metílico de ácidos graxos, composto por hidrocarbonetos com cadeias de 12 a 24 carbonos e, em menor proporção, por nitrogênio, enxofre e oxigênio.

A Tabela 2.2 mostra um resumo com as principais propriedades do biodiesel utilizado.

Tabela 2.2 – Propriedades do biodiesel

| Propriedade                  | Valor   | Unidade                             | Referência                          |
|------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Fórmula molecular            | C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> <sup>1</sup> | -                                   | Costa (2009)                        |
| Massa molecular              | 292 <sup>1</sup>  | g mol <sup>-1</sup>                 | Costa (2009)                        |
| Taxa de formação de CO       | 0,002 <sup>2,4</sup>  | g g <sup>-1</sup>                   | Tab. A.40 (pg. 3474), Hurley (2016) |
| Taxa de formação de fuligem  | 0,004 <sup>2,4</sup>  | g g <sup>-1</sup>                   | Tab. A.40 (pg. 3474), Hurley (2016) |
| Poder calorífico             | 39934   | kJ kg <sup>-1</sup>                 | Análise calorímetro - Unisinos      |
| Calor latente de vaporização | 320 <sup>3</sup>  | kJ kg <sup>-1</sup>                 | Tab 1.1, Vertes et al. (2010)       |
| Condutividade térmica        | 0,165   | W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>   | Simões et al. (2009)                |
| Calor específico             | 1,67  | kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> | Zaitsau e Verevkin (2013)           |
| Temperatura de ebulição      | 473   | K                                   | PETROBRAS – FISPQ (2015)            |
| Massa específica             | 879   | kg m <sup>-3</sup>                  | Oleoplan (2016)                     |
| Ponto de fulgor              | 446   | K                                   | Oleoplan (2016)                     |

<sup>1</sup> valor médio.

<sup>2</sup> valores estimados, devido ao valor exato da fórmula média não estar disponível.

<sup>3</sup> valor aproximado, considerado como biodiesel de soja.

<sup>4</sup> valor aproximado, considerado como etil laurato.

Dentre os combustíveis mais vendidos no Brasil está o diesel, que é responsável por 40,43% do total de vendas, as quais incluem gasolina tipo C, óleo diesel, gasolina de aviação, GLP, óleo combustível, querosene de aviação, querosene iluminante, biodiesel e etanol hidratado. Já o biodiesel é responsável por 3,13% das vendas de combustíveis no Brasil, mas, para a manutenção de uma política ambiental e de sustentabilidade, este número ainda é insuficiente, mesmo com a resolução da ANP que liberou a adição de 7% do biodiesel no diesel de petróleo. (ANP, 2017).

Devido ao fato do diesel ser o combustível mais vendido no Brasil e também ao seu comportamento menos volátil e mais seguro quanto à inflamabilidade, decidiu-se utilizá-lo nos experimentos práticos. O biodiesel é ainda mais seguro, em relação ao diesel, devido ao seu alto ponto de fulgor. Os dois combustíveis foram utilizados para uma comparação de suas características na queima e propriedades de geometria da chama.

### 2.4.3 Túnel de Vento

Segundo Barlow, Pope e Rae (1999), túnel de vento é um aparato de simulação experimental capaz de demonstrar fenômenos de escoamento de fluidos, especialmente para

fins de estudos aerodinâmicos de modelos e protótipos utilizados nas mais variadas áreas, pois torna possível a análise realista dos efeitos do escoamento, englobando toda a complexidade do escoamento real de fluidos sobre as superfícies, de forma rápida, econômica e precisa. Permite muitas e variadas possibilidades de aquisições representativas de dados, através da versatilidade de suas aplicações.

Mehta e Bradshaw (1979) já consideravam a aplicação de túneis de vento como importante ferramenta de engenharia, desde a década de 1930, em virtude do efeito do escoamento turbulento incidente à estrutura de aeronaves. A aplicação e pesquisa dos efeitos do escoamento em protótipos torna possível a correção de projeto com significativa aproximação, através da similaridade.

Na seção de materiais e métodos podem ser verificados os detalhes do túnel de vento que foi utilizado neste trabalho e seus componentes.

#### **2.4.4 Definição da Análise de Poluentes**

Segundo Degrazia e Goulart (2004), algumas situações são caracterizadas por velocidades baixas do vento horizontal. Nestas situações de vento calmo, a direção de transporte dos contaminantes liberados por fontes pontuais contínuas como, por exemplo, as chaminés industriais, não podem ser simuladas com satisfatória precisão e desta forma os modelos de dispersão tradicionais, baseados na equação de difusão-advectação, não podem ser aplicados para calcular a concentração de poluentes na camada limite planetária, CLP, sendo que as responsáveis por esta indeterminação na direção da pluma de contaminantes são as oscilações de baixa frequência na direção do vento horizontal. Uma vez que este fenômeno ocorre com bastante frequência em todas as épocas do ano (e principalmente à noite), compreendê-lo e descrevê-lo é de fundamental importância na modelagem do transporte e da difusão de contaminantes na baixa atmosfera.

Os estudos de dispersão e turbulência em situações de vento calmo são extremamente difíceis. Quando a velocidade do vento médio horizontal tende a zero, a maioria dos modelos de dispersão não pode ser aplicado para simular o campo de concentração de contaminantes. (DEGRAZIA; GOULART, 2004). Em geral os modelos baseados na equação de difusão-advectação podem ser empregados apenas quando os ventos horizontais médios são maiores do que  $2 \text{ m s}^{-1}$ . (LINES; DEAVES; ATKINS, 1997).

Segundo Degrazia e Moraes (1989), modelar corretamente a distribuição da concentração de contaminantes emitidos por fontes elevadas, nas regiões próximas, intermediárias e distantes do ponto de emissão, é um problema teórico difícil e de grande importância prática. No caso

de poluentes abandonados por fontes pontuais contínuas elevadas, o processo de difusão turbulenta em regiões próximas à fonte é distinto daquele que ocorre a grandes distâncias. Em regiões vizinhas à fonte, a distribuição da concentração de contaminantes é determinada pelas propriedades estatísticas da turbulência no ponto de emissão, isto é, na vizinhança da fonte as partículas do fluido ainda conservam algumas características das suas posições e velocidades iniciais. Este tipo de vinculação da dispersão inicial é modelado por uma equação da difusão que emprega coeficientes de transporte turbulentos dependentes do tempo de viagem das partículas do fluido. Para regiões distantes da fonte, por causa do já longo tempo de difusão, a distribuição da concentração é determinada pelas propriedades locais da turbulência. Neste caso, o movimento das partículas torna-se completamente aleatório e os coeficientes de difusão são funções apenas da turbulência e não mais do tempo de viagem das partículas. (DEGRAZIA; MORAES, 1989).

#### **2.4.5 Definição da Chama e da Pluma**

Na combustão, o fenômeno mais visível deste processo é a chama. De acordo com Turns (2000), a chama é uma propagação autossustentada de uma zona de combustão localizada a velocidades subsônicas. Por definição, nos estudos de combustão podemos classificá-la como modo de chama ou de não-chama, sendo as chamas caracterizadas em duas classes: as chamas pré-misturadas e as chamas não-pré-misturas (difusivas).

Turns (2000) menciona que, nas chamas pré-misturadas, o combustível e o oxidante são misturados em um nível molecular antes que ocorra qualquer reação química significativa. Em motores de explosão por centelha, por exemplo, ocorrem chamas pré-misturadas. Já em chamas difusivas, os reagentes estão inicialmente separados e a reação só ocorre na interface entre o combustível e o oxidante, onde a mistura ocorre. Um dos exemplos mais conhecidos de chama difusiva é a que ocorre em uma vela.

Conforme Glassman e Yetter (2008), toda reação química é acompanhada ou por uma absorção ou por uma liberação de energia, que geralmente se manifesta como calor. É possível determinar esta quantidade de calor e, portanto, a temperatura e composição do produto da combustão.

Com as definições anteriormente mencionadas, é possível dizer que uma combustão, após iniciada, na presença do combustível e do oxidante, irá permanecer ativa até que seja consumido todo o volume de combustível disponível ou até que o oxidante seja isolado através de algum mecanismo de combate, como o uso de espuma ou CO<sub>2</sub>.



De acordo com Quintiere (2006), a pluma de uma chama é descrita como uma coluna vertical ascendente de gases resultantes de uma chama. O termo pluma é geralmente usado para descrever a região de não combustão (i.e., partículas sólidas, fumaça e gases tóxicos), a qual pode dominar o escoamento longe da fonte de combustão, especialmente se a fonte é pequena. A pluma é principalmente conduzida por sua flutuabilidade. Isto significa que o escoamento é induzido na pluma devido ao aumento na temperatura e consequente redução na densidade. Uma pluma é normalmente turbulenta e não laminar. Assim, qualquer incêndio terá uma pluma turbulenta associada.

A flutuabilidade da pluma pode ser melhor definida como as forças de empuxo de Arquimedes que participam da elevação da pluma, em geral, causadas pela baixa densidade dos gases induzidas pelas altas temperaturas. (BRIGGS, 1965).

Na Figura 2.4 é possível verificar o esquema de uma poça de combustível em chamas com o detalhe da chama turbulenta e a região da pluma, onde  $r$  é a direção radial,  $D$  é o diâmetro da poça,  $z$  é a coordenada vertical e  $w$  é a velocidade vertical normalizada da pluma.

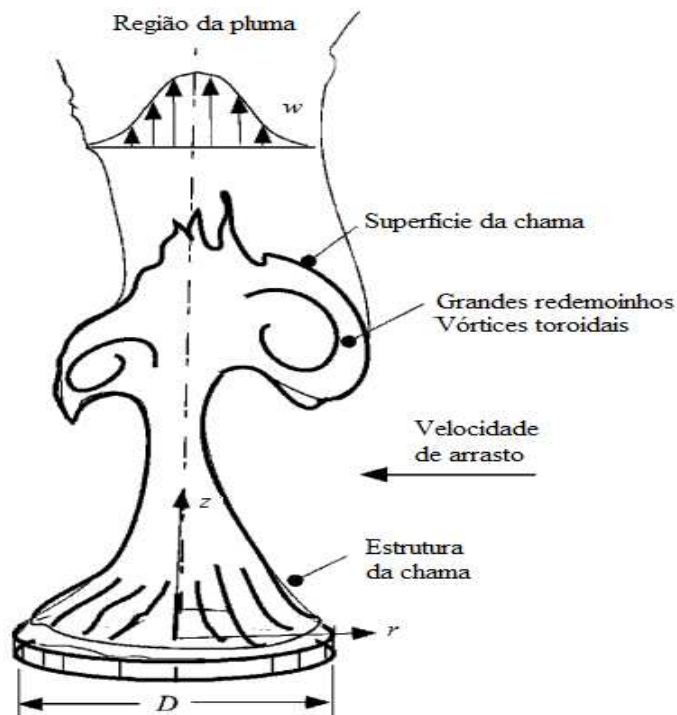


Figura 2.4 – Esquema do detalhe da região da pluma de uma chama  
Fonte: Adaptado de Quintiere (2006).

Com base na conceituação de Hurley (2016), a pluma é considerada a corrente de fluido, geralmente em regime turbulento (exceto, quando o incêndio tem dimensões muito pequenas), proveniente da combustão.

Para Drysdale (2011), o termo pluma é utilizado para descrever a coluna convectiva ascendente acima da chama, e possui uma estrutura que é determinada por sua interação com o fluido circundante.

Com base nas explicações supracitadas pode-se afirmar que a análise da dispersão dos poluentes se dá a partir da pluma e o presente estudo faz uso desta premissa para, nessa região, fazer a determinação da concentração de poluentes.

#### **2.4.6 Determinação do Limite de Velocidade do Vento**

Com base nos dados fornecidos pela página Geógrafos (2016) foi possível obter as coordenadas geográficas da cidade de São Leopoldo, que são: 29° 45 min 37 s Sul e 51° 08 min 50 s Oeste, à altitude de 15 m. A cidade foi tomada como referência, obviamente, devido à localização do laboratório no qual foram executados os ensaios experimentais e numéricos.

Com estes dados, em CRESESB (2016), foi determinada a velocidade média anual dos ventos para a cidade, que é de  $4,94 \text{ m s}^{-1}$ .

Esta informação, juntamente com as limitações do túnel de vento, foi utilizada para a delimitação da velocidade a ser utilizada nos estudos numérico-experimentais.

#### **2.4.7 Correlações Semi-empíricas para Geometria da Chama**

De acordo com o trabalho recente de Lam e Weckman (2015a), uma das mais importantes motivações para a condução de pesquisas sobre incêndios é desenvolver a habilidade de prever problemas provenientes do incêndio em um determinado cenário. Face à presença de um destes cenários, uma das primeiras etapas é determinar a dimensão do incêndio e a intensidade de queima, isto requer um conhecimento das características da geometria da chama, temperatura da chama e taxa de calor liberado. A coleta de dados experimentais de qualidade é crucial para a precisão destas previsões e o modelo de validação é na verdade uma importante parte do desenvolvimento do modelo do incêndio. Portanto, uma simulação experimental realista, ainda que controlada, de um cenário de um incêndio é necessária para a melhoria dos modelos de incêndio existentes e para o desenvolvimento de novos modelos.

Lam e Weckman (2015b) conduziram várias pesquisas sobre poça de combustível em chamas com a incidência de ventos, onde o foco principal foram os parâmetros que descrevem a geometria da chama, particularmente aqueles necessários para estimativa da transferência de calor por radiação e os riscos térmicos provenientes do incêndio.

A geometria da chama é um tema estudado há muitas décadas devido à sua importância na análise de incêndios, de maneira mais comum, aqueles que se originam em poças, como incêndios em tanques de combustível.

Os parâmetros mais comuns relativos à geração de dados sobre a geometria de uma chama em poça de incêndio são: o ângulo de inclinação, a altura, a distância de despreendimento e o comprimento. Apesar de não estar ligada à geometria, é importante também a aquisição da temperatura da chama nos ensaios, pois é uma referência associada aos demais fenômenos do processo de combustão.

Hu et al. (2016) utiliza uma câmera CCD, com frequência de aquisição de 30 imagens por segundo, para visualizar a geometria da chama. As imagens gravadas dos quadros da chama (em torno de 1500) na fase estacionária de queima foram utilizadas para gerar a média e quantificar o ângulo da chama.

Lam e Weckman (2015a) explicitam que, na maioria dos estudos da literatura, a geometria da chama foi caracterizada utilizando fotos ou imagens de vídeos do incêndio, enquanto que no seu estudo os valores para arrasto da chama, ângulo de inclinação e comprimento da chama são obtidos baseados em quadros de vídeo, mas a temperatura da chama é determinada com o uso de um conjunto de termopares distribuídos ao longo da chama e da pluma.

Lautkaski (1992) faz uso da comparação de correlações para ângulo da chama contra imagens de queima em um tanque de armazenamento real, em um acidente em 1989, na Finlândia. São obtidos dados que validam as correlações e as características geométricas da chama analisada: ângulo de inclinação e a relação de arrasto da chama, este último definido através de um modelo matemático.

Segundo Lam e Weckman (2015a), o arrasto da chama ocorre quando a densidade dos vapores do combustível é maior do que a do ar circundante, fazendo com que os vapores permaneçam próximos ao solo até que sejam suficientemente aquecidos para subir devido à flutuabilidade, causando um aumento do diâmetro da poça.

Na Figura 2.5 são observadas duas maneiras de obtenção da geometria da chama. Em (a) Lam e Weckman (2015a), utilizam a linha de centro da poça de diâmetro  $D$  como referência para a medição do ângulo de inclinação ( $\theta$ ) e o comprimento da chama ( $L$ ), já em (b) Lautkaski (1992) utiliza a borda adjacente ao lado de ataque do vento para obtenção do ângulo de inclinação ( $\theta$ ).

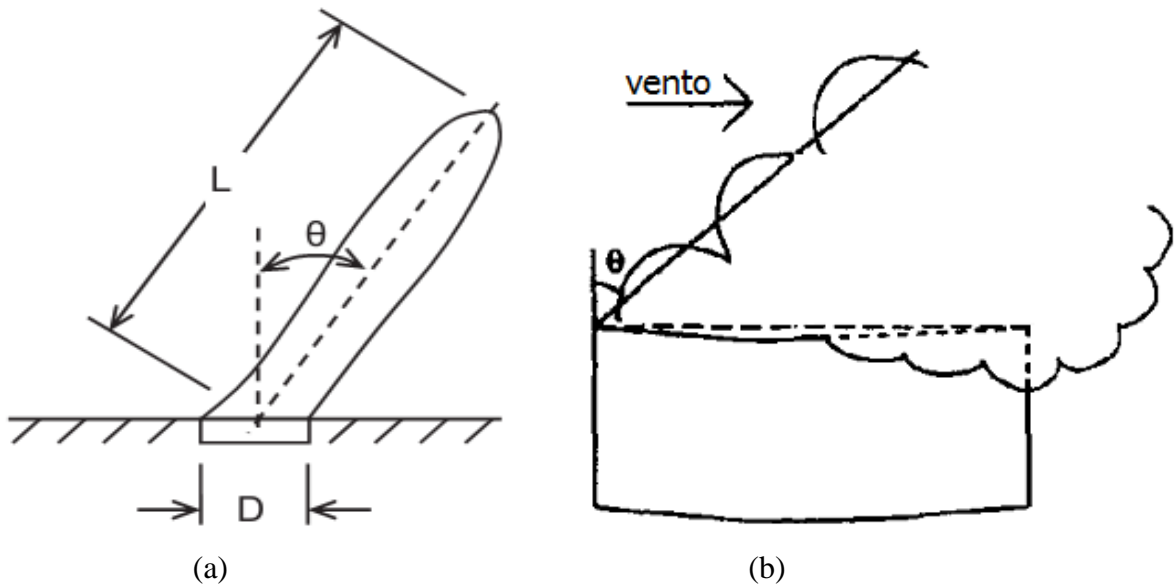


Figura 2.5 – Esquema de medições de geometria da chama: (a) ângulo e comprimento e (b) ângulo

Fonte: Adaptado de Lam e Weckman (2015a) e Lautkaski (1992).

Como pode ser observado, diversos autores se utilizam de variadas técnicas para a obtenção de dados correspondentes às características geométricas da chama. Estas análises evidenciam as peculiaridades de cada chama, que podem determinar suas características de queima com cada combustível.

Lam e Weckman (2015b) fazem a comparação dos dados com os valores previstos por correlações semi-empíricas disponíveis na literatura. Os resultados são comparados com os dados medidos para determinar alguma fragilidade nas correlações que modelam a física do processo.

As correlações para o ângulo de inclinação da chama que foram utilizadas por Lam e Weckman (2015b) são descritas a seguir. Estas correlações foram obtidas de vários autores e foram resumidas por Lam e Weckman (2015b). As correlações são apresentadas nas equações gerais (2.1) e (2.2).

A Eq. (2.1) é utilizada para determinação do ângulo de inclinação da chama:

$$\cos \theta = C1 \left( \frac{V}{V_c} \right)^{C2}; \frac{V}{V_c} \geq 1 \quad (2.1)$$

onde  $\theta$  é o ângulo de inclinação da chama,  $V$  é a velocidade do escoamento,  $V_c$  é a velocidade do escoamento mínima para a inclinação da chama ocorrer (Eq. 2.9),  $C1$  e  $C2$  são os coeficientes de ajuste da correlação semi-empírica e, os quais estão apresentados na Tabela 2.3.

A Eq. (2.2) é utilizada para determinação do ângulo de inclinação da chama com velocidade modificada:

$$\cos \theta = C1 \left( \frac{V}{V_{c,mod}} \right)^{C2}; \frac{V}{V_{c,mod}} > 1 \quad (2.2)$$

onde  $V_{c,mod}$  é a velocidade do escoamento mínima modificada para a inclinação da chama ocorrer, Eq. (2.10). Os valores dos coeficientes C1 e C2 estão apresentados na Tabela 2.3. Apenas a Eq. (2.4) desta tabela é utilizada na Eq. (2.2), todas as demais equações se aplicam na Eq. (2.1).

Para cada correlação, as condições principais em que foram reproduzidas para obtenção dos dados experimentais, como velocidade do vento, tipo e dimensões do queimador e combustível, serão apresentadas e resumidas na Tabela 2.3, onde serão apresentadas as equações que serão utilizadas nas comparações com os dados experimentais posteriormente.

Tabela 2.3 – Resumo das condições de ensaio e coeficientes de correlação das equações semi-empíricas para ângulo da chama (Lam e Weckman, 2015b)

| Velocidade [m s <sup>-1</sup> ] | Combustível Utilizado | Dimensões da Poça [m]                              | C1   | C2     | Eq. |
|---------------------------------|-----------------------|--|------|--------|-----|
| 1,5 a 5,6                       | Lascas de madeira     | 0,91 × 0,13 até 0,91 × 0,61                        | 0,7  | -0,49  | 2.3 |
| 1,3 a 7,9                       | GNL <sup>1</sup>      | Ø 1,8 até 24,4                                     | 1    | -0,5   | 2.4 |
| 1,8 a 14,4                      | GNL <sup>2</sup>      | 6,1 × 6,1 até 15,2 × 12,2                          | 0,87 | -0,272 | 2.5 |
| 1,8 a 14,4                      | GNL <sup>3</sup>      | 6,1 × 6,1 até 15,2 × 12,2                          | 0,86 | -0,25  | 2.6 |
| 0 a 2,3                         | Gasolina e Diesel     | Ø 1,5 até 6  | 0,92 | -0,26  | 2.7 |
| 0 a 3                           | Acetona               | 0,21 × 0,21; 0,29 × 0,15; 0,45 × 0,11; 0,58 × 0,07 | 1,06 | -0,73  | 2.8 |

<sup>1</sup> única a utilizar a equação geral 2.2.

<sup>2</sup> utilizado em chama cônica.

<sup>3</sup> utilizado em chama cilíndrica.

A seguir, são definidas algumas equações auxiliares que são utilizadas nas correlações resumidas por Lam e Weckman (2015b). A Eq. (2.9) representa a velocidade mínima do escoamento para o início da inclinação da chama e a Eq. (2.10) é a velocidade mínima modificada do escoamento para o início da inclinação da chama.

$$V_c = \left( \frac{g \dot{m}'' D}{\rho_a} \right)^{1/3} \quad (2.9)$$

$$V_{c,mod} = \left( \frac{g \dot{m}'' D}{\rho_g} \right)^{1/3} \quad (2.10)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\dot{m}''$  é a taxa de combustível queimado por unidade de área,  $\rho_a$  é a massa específica do ar à temperatura ambiente e  $\rho_g$  é a massa específica dos vapores do combustível no ponto de ebulição.

Segundo Lam e Weckman (2015b), nas equações de determinação do ângulo de inclinação da chama é assumido que o fluxo de quantidade de movimento de entrada de ar é proporcional ao fluxo de quantidade de movimento dos gases da chama e que a taxa mássica de entrada de ar é proporcional à taxa de queima mássica do combustível, determinações que foram retiradas de Thomas, Pickard e Wraight (1963). Além disto, são incluídas simplificações para adaptar as correlações na linha da fonte de combustível. Isto resulta na expressão da velocidade do escoamento característica  $V_c$ , que representa a velocidade mínima do escoamento necessária para que ocorra o ângulo de inclinação da chama. Para a velocidade característica modificada  $V_{c,mod}$  foi realizada uma modificação, com a inclusão da massa específica do vapor do combustível ao invés da massa específica do ar na temperatura ambiente, isto foi feito para melhorar a aproximação dos dados experimentais com chamas de GNL.

A taxa de combustível queimado por unidade de área  $\dot{m}''$  é determinada empiricamente, e o procedimento a ser adotado para tal será explicado no Capítulo 3.3, na metodologia experimental para obtenção da taxa de queima mássica.

As correlações de Lam e Weckman (2015b) são apresentadas nas equações gerais (2.11), (2.12), (2.13) e (2.14).

A Eq. (2.11) é utilizada para determinação do comprimento da chama:

$$\frac{L}{D} = C1 \left( \frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{C2} \left( \frac{V}{V_c} \right)^{C3} \quad (2.11)$$

onde  $L$  é o comprimento da chama e  $C1$ ,  $C2$  e  $C3$  são os coeficientes de ajuste da correlação semi-empírica, os quais estão apresentados na Tabela 2.4.

A Eq. (2.12) é utilizada para determinação do comprimento da chama em função da velocidade modificada:

$$\frac{L}{D} = C1 \left( \frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{C2} \left( \frac{V}{V_{c,mod}} \right)^{C3} \quad (2.12)$$

A Eq. (2.13) é utilizada para determinação do comprimento da chama em função do número de Froude:

$$\frac{L}{D} = C1 \left( \frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{C2} Fr^{C3} \quad (2.13)$$

onde  $Fr$  é o número de Froude.

Segundo White (2009), o número de Froude é o parâmetro adimensional que indica a razão entre as forças de inércia e as forças gravitacionais. É o principal parâmetro que determina as condições de pressão de superfície livre mais importantes e descreve os escoamentos em que efeitos de superfície livre são relevantes. É determinado pela Eq. (2.14):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (2.14)$$

onde  $V$  é a velocidade do escoamento do vento sobre a superfície.

Ainda conforme Lam e Weckman (2015b) a Eq. (2.15) é utilizada para determinação do ângulo de inclinação da chama a partir do número de Froude:

$$\frac{L}{D} = C1 Fr^{C2} + C3 \quad (2.15)$$

Os valores de  $\dot{m}''$  foram obtidos através do processo descrito na seção de materiais e métodos para as velocidades ensaiadas.

Os coeficientes para as correlações para o comprimento da chama são apresentadas a seguir. Estas correlações foram obtidas de vários autores e foram resumidas por Lam e Weckman (2015b).

Para cada correlação, as condições principais em que foram reproduzidas para obtenção dos dados experimentais, como velocidade do vento, tipo e dimensões do queimador e combustível, estão apresentadas e resumidas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Resumo das condições de ensaio e coeficientes de correlação das equações semi-empíricas para comprimento da chama (Lam e Weckman, 2015b)

| Velocidade [m s <sup>-1</sup> ] | Combustível Utilizado     | Dimensões da Poça [m]       | C1    | C2    | C3     | Eq.               |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------|-------|--------|-------------------|
| 1,5 a 5,6                       | Lascas de madeira         | 0,91 × 0,13 até 0,91 × 0,61 | 70    | 0,86  | -0,11  | 2.16 <sup>1</sup> |
| 1,5 a 5,6                       | Lascas de madeira         | 0,91 × 0,13 até 0,91 × 0,61 | 55    | 2/3   | -0,21  | 2.17              |
| 1,3 a 7,9                       | GNL                       | Ø 1,8 até 24,4              | 1     | -0,19 | 0,06   | 2.18 <sup>2</sup> |
| 1,8 a 14,4                      | GNL<br>(chama cônica)     | 6,1 × 6,1 até 15,2 × 12,2   | 4,7   | 0,121 | -0,114 | 2.19              |
| 1,8 a 14,4                      | GNL<br>(chama cilíndrica) | 6,1 × 6,1 até 15,2 × 12,2   | 6,2   | 0,254 | -0,044 | 2.20              |
| 0 a 2,3                         | Gasolina e Diesel         | Ø 1,5 até 6                 | 4,201 | 0,181 | -0,082 | 2.21              |
| 0 a 2,5                         | Acetona                   | 0,1 × 0,1 até 0,3 × 0,3     | 0,8   | 0,5   | 2,8    | 2.22 <sup>3</sup> |

<sup>1</sup> única a utilizar a equação geral 2.13

<sup>2</sup> única a utilizar a equação geral 2.12

<sup>3</sup> única a utilizar a equação geral 2.15

#### 2.4.8 Determinação das Taxas de Queima Mássica de Combustível

A taxa de queima de massa de combustível em uma poça em chamas depende do retorno de calor proveniente da chama para a superfície do combustível, que ocorre na forma de transferência de calor condutiva, radiativa e convectiva. A contribuição relativa a cada um destes componentes depende de um vasto número de parâmetros que inclui o diâmetro da poça, o material da poça, a forma da chama, a distribuição espacial da temperatura, a concentração das espécies e a fração volumétrica de fuligem. A taxa de queima de massa de combustível é determinada pela razão entre a massa queimada por segundo e a área da poça, e a proposta de Hamins, Yang e Kashiwagi (1999) foi fazer um modelo matemático global para obtenção destes valores.

Jiang (1992) fez a determinação da taxa de queima de combustível em compartimentos de incêndio com o uso de modelos em escala reduzida. Em seu trabalho foi feita a utilização de uma célula de carga para a medição da taxa de queima mássica. Foram utilizadas poças de 5 a 20 cm de diâmetro com 2 cm de altura, fabricadas em aço com 2 mm de espessura com etanol como combustível.

Hu et al. (2016) faz o estudo experimental da taxa de queima e do ângulo de chama em poça de incêndio com escoamento incidente, onde foram utilizadas poças de heptano, de diversos tamanhos (entre 250 e 700 mm) em um escoamento cruzado com ventos em



velocidades de 0 a  $4,5 \text{ m s}^{-1}$ . A medição da taxa de queima foi feita com uma balança eletrônica dotada de uma camada de isolamento. A poça foi colocada próxima à saída, ao invés ser colocado no interior do túnel, para reduzir os complexos efeitos das restrições impostas pelas paredes. Se fosse colocada dentro do túnel, como as dimensões da seção transversal não são grandes o suficiente para a poça, ocorreria interações complexas entre a pluma da chama e o teto e as paredes do túnel, o que mudaria de maneira considerável os campos de escoamento próximos à poça.

Assim a taxa de queima mássica será determinada, pois é um importante parâmetro que caracteriza uma queima em poça. A seguir no Capítulo 3.3 será apresentada a metodologia de determinação deste parâmetro no presente trabalho.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS DA ANÁLISE EXPERIMENTAL

O presente trabalho faz a investigação do comportamento de incêndio em poças de combustível de diesel e biodiesel, em um túnel de vento de escala laboratorial, para obtenção de dados experimentais de geometria e dispersão da chama no incêndio.

#### 3.1 TÚNEL DE VENTO

O túnel de vento que foi utilizado é construído com um ventilador centrífugo de pás voltadas para trás, modelo GTS 400-1, com vazão volumétrica máxima de  $7500 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , pressão estática 60 mmCA, rotação 2604 rpm e potência 2,64 kW, da BerlinerLuft.

O túnel possui uma câmara de normalização do escoamento na saída do ventilador e uma colmeia de regularização de vorticidade na entrada da seção de ensaios. Será utilizada apenas uma das seções do túnel, de 1,25 m de comprimento, mais a seção de teste que possui 0,5 m, totalizando uma seção de 1,75 m, para que o escoamento não esteja desenvolvido na saída da seção.

Esta solução se explica devido ao fato que, para manter a proporção da camada limite, as velocidades do túnel deveriam ser muito baixas, e desta forma, a escala da camada limite planetária, se comparada com a do tanque, é tal que o gradiente de velocidade deveria ser muito pequeno. Desta maneira, portanto, é mais realista simular uma velocidade constante, o que se consegue com o escoamento não desenvolvido. A mesma solução foi adotada por Woods, Fleck e Kostiuk (2006); Tang et al. (2015); Roh et al. (2007); Lam e Weckman (2015a); Jiang e Lu (2013), entre outros.

Conforme descrito em Fox, McDonald e Pritchard (2014), em muitos estudos com modelos, para conseguir semelhança dinâmica, é preciso reproduzir diversos grupos adimensionais. Na maioria dos casos, esta semelhança dinâmica entre o modelo e o protótipo não pode ser atingida de maneira completa. Por exemplo, para o escoamento sobre a chama se faz necessário igualar o número de Reynolds e o número de Froude, reproduzindo-os tanto no modelo como na escala. Estes números são inversamente proporcionais, isto é, conforme aumenta o número de Reynolds diminui o número de Froude e vice-versa. Devido a isso, na prática é impossível satisfazer o número de Reynolds e o número de Froude simultaneamente, pois seriam necessárias velocidades de escoamento muitíssimo baixas e extremamente altas.

Desta forma foi utilizado o escoamento com ventos cruzados sobre a poça, considerando apenas um tanque, sem tentar atingir a similaridade dinâmica com as condições

de tanques reais, uma vez que o objetivo não seria atingido com uma tentativa de escalonamento conforme explicitado acima.

Na Figura 3.1 é possível observar o túnel de vento e seus principais componentes. O motor, que é responsável pelo movimento do ventilador, o ventilador, responsável pela produção de vento, o *plenum*, responsável pela normalização e redução de turbulência na saída do ventilador e a colmeia, responsável pela estabilização e uniformização do escoamento ao longo do túnel. A seção de teste é responsável por acondicionar os equipamentos e dispositivos de teste e normalmente é a peça que sofre deterioração e é eventualmente sacrificada após os ensaios. A seção de saída do túnel é retangular e possui 250 mm de altura e 280 mm de largura.

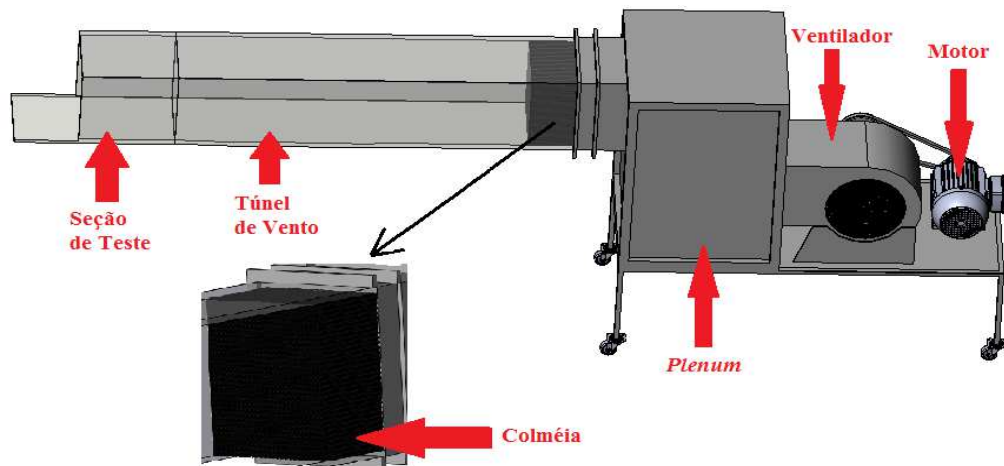


Figura 3.1 – Detalhes do túnel de vento utilizado nos experimentos práticos

Na Figura 3.2 é possível verificar as dimensões do túnel de vento e suas vistas. As medidas estão indicadas em mm.

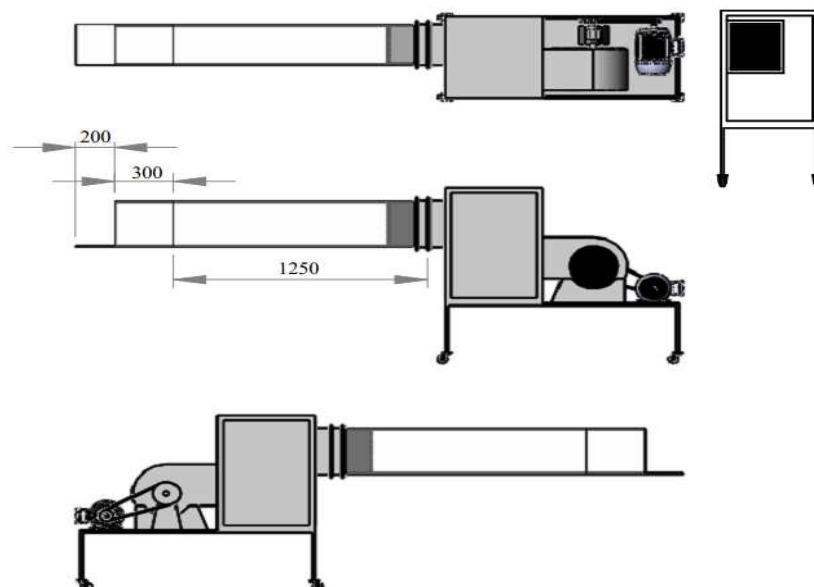


Figura 3.2 – Medidas do túnel de vento utilizado nos experimentos práticos

Em dutos de seção circular, a dimensão característica a ser aplicada é o próprio diâmetro do duto. (ÇENGEL e CIMBALA, 2007). Para escoamentos em dutos não circulares, o diâmetro característico para o número de Reynolds ( $Re$ ) é o chamado diâmetro hidráulico ( $Dh$ ), Eq. (3.1):

$$Dh = \frac{4A}{P} \quad (3.1)$$

onde  $A$  é a área da seção transversal e  $P$  é o perímetro molhado.

A seguir estão os dados de propriedades do ar para as condições dos experimentos:

$T_{ref} = 301 \text{ K}$  (obtido através de medição com instrumento, termômetro);

$\rho = 1,1729 \text{ kg m}^{-3}$  (valor calculado para ar real);

$\mu = 1,8494 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  (valor calculado para ar real).

A temperatura de referência foi obtida através da medição do ar do escoamento na saída do túnel. A posição do termômetro está indicada Figura 3.6. A partir dos valores acima indicados, calcularam-se as condições dos ensaios com a velocidade mínima de  $0,4 \text{ m s}^{-1}$  e com velocidade máxima de  $6,2 \text{ m s}^{-1}$ , resultando números de Reynolds entre 6701 e 103871, ou seja, da ordem de  $7 \cdot 10^3$  a  $1 \cdot 10^5$ . Com os dados acima é possível verificar que, para qualquer velocidade de ensaio o escoamento no túnel de vento é em regime turbulento.

### 3.1.1 Perfil de Escoamento do Túnel de Vento

Para a definição mais clara da velocidade do vento no túnel, foi feita a análise do perfil de velocidades no túnel. Neste ensaio foi utilizado um manômetro digital Mark III série 475, dotado de um tubo de pitot em “L” com  $6 \times 3 \text{ mm}$  da Dwyer (incerteza de  $\pm 0,5\%$  do fundo de escala). A velocidade é calculada a partir dos valores de pressão e obtida por meio da Eq. (3.2) (Fox, McDonald e Pritchard, 2014):

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_a}} \quad (3.2)$$

onde  $\Delta p$  é a diferença entre as pressões estática e de estagnação obtidas com o tubo de pitot.

Na Figura 3.3, mostram-se os pontos de medição na saída do túnel de vento, correspondente à seção transversal do mesmo. As medidas indicadas no desenho correspondem à altura em mm a partir do topo da seção.

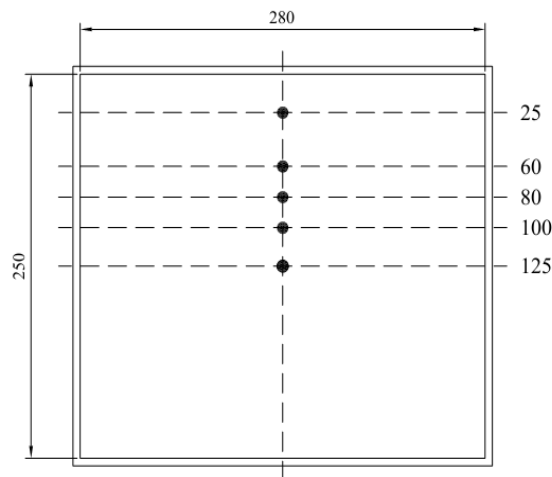


Figura 3.3 – Medidas da seção transversal do túnel de vento e pontos de medição do perfil de velocidade

Na Figura 3.4 estão apresentados os dados obtidos com as medições e o perfil de velocidade do túnel de vento. Foram feitas as medições em todos os pontos indicados na figura anterior, e em adendo, foi também utilizado um anemômetro digital portátil modelo Icel AN-10 (incerteza de  $\pm 3\% + 0,1$  m/s), para uma comparação, já que este equipamento, devido às dimensões de sua ventoinha de medição ocupar uma boa parte da área da seção transversal do túnel, não é o mais adequado para determinar o perfil de camada limite.

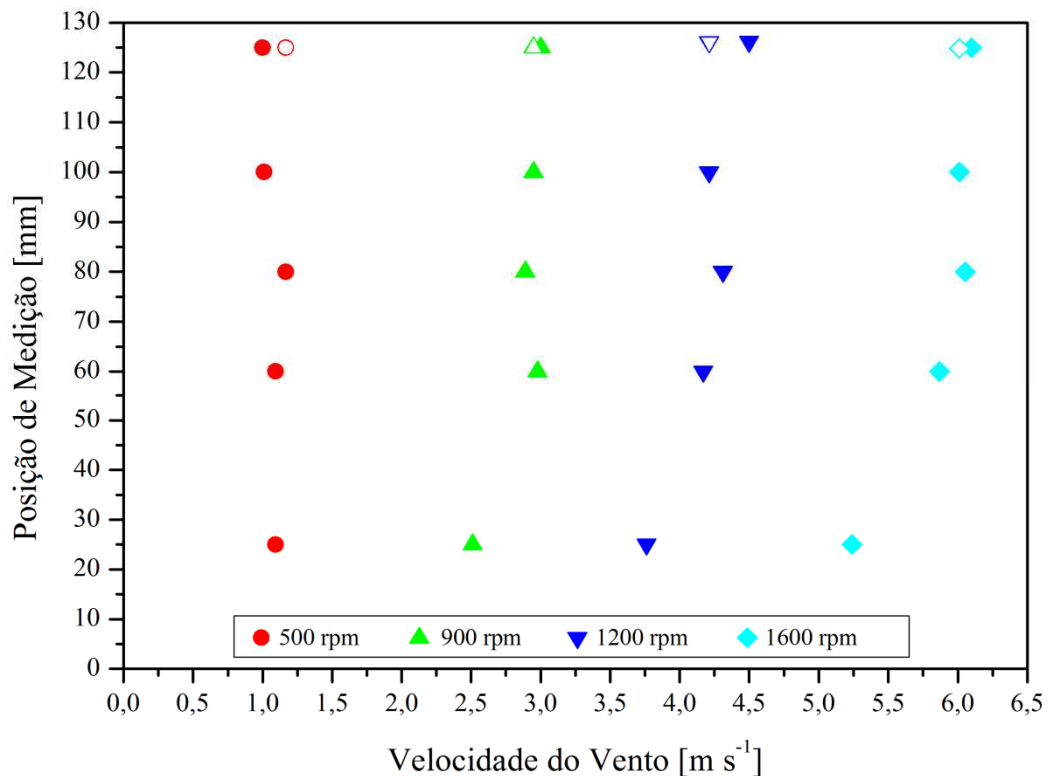


Figura 3.4 – Medidas da seção transversal do túnel de vento e pontos de medição do perfil de velocidade; os pontos adicionais na altura de 125 mm (símbolos vazados) se referem às medições com o anemômetro

Observa-se que o perfil do escoamento turbulento, como o túnel não atinge o valor de  $10 Dh$ , é parcialmente desenvolvido, o que fica em pleno acordo com as características da camada limite planetária, que é um escoamento turbulento e instável. A camada limite planetária se desenvolve em muitos quilômetros de altura, então, as alturas dos tanques reais são muito pequenas em relação à altura da CLP. Portanto, é uma boa aproximação considerar constante a velocidade que incide na altura da superfície superior do tanque e também da poça. Apenas bem próximo ao solo, e à superfície inferior da poça, isto é diferente.

À medida que a velocidade média do escoamento aumenta, fica mais claro que todas as velocidades medidas são muito próximas, podendo ser consideradas iguais pela incerteza de medição. Apenas a velocidade mais próxima à parede é tipicamente menor, caracterizando uma camada limite de pequena espessura, não desenvolvida, conforme já era esperado.

Para a medição dos valores de velocidade do vento, após a partida do motor, foram aguardados 5 min e então obtida a velocidade média do escoamento com o tubo de Pitot no túnel conforme explicado anteriormente. Este tempo foi definido empiricamente para a estabilização do escoamento no túnel, já que a rampa de partida do motor faz com que o mesmo precise de um tempo determinado para atingir sua máxima velocidade em regime pleno de trabalho e, também, para que a temperatura do escoamento se estabilize.

### 3.2 POÇA DE COMBUSTÍVEL

Para modelar as dimensões da poça, foi feito contato com o setor de Engenharia da REFAP – BR, com sede em Canoas/RS, e obtidas as características dimensionais dos tanques de armazenamento que ali se encontram.

Segundo dados levantados junto ao setor de engenharia, as medidas dos tanques de diesel que são utilizados na REFAP seguem conforme indicado abaixo:

- a) Teto flutuante – Diâmetro 45,70 m, Altura 14,40 m;
- b) Teto fixo – Diâmetro 36,50 m, Altura 14,40 m;
- c) Teto fixo – Diâmetro 27,50 m, Altura 14,40 m.

A partir disto foi levado em consideração o tamanho do tanque real de teto fixo “c” e feito um modelo do tanque mantendo a proporção de altura por diâmetro e, de acordo com as dimensões possíveis para compatibilizar o tanque com o túnel de vento, chegou-se às medidas de 110 mm de diâmetro por 57,6 mm de altura.

Como a poça de combustível pode ser considerada uma fonte pontual, a análise dos gases de combustão na pluma, para cada velocidade ensaiada, será feita, com o analisador de gases Kane, por meio de uma série de medições em função da distância da fonte de geração dos poluentes. Na Figura 3.5(a) e (b) pode ser vista a semelhança entre a queima em um tanque e uma chaminé industrial, que é chama de fonte pontual. Nos dois casos da figura é possível verificar o deslocamento da pluma pela incidência de ventos laterais.

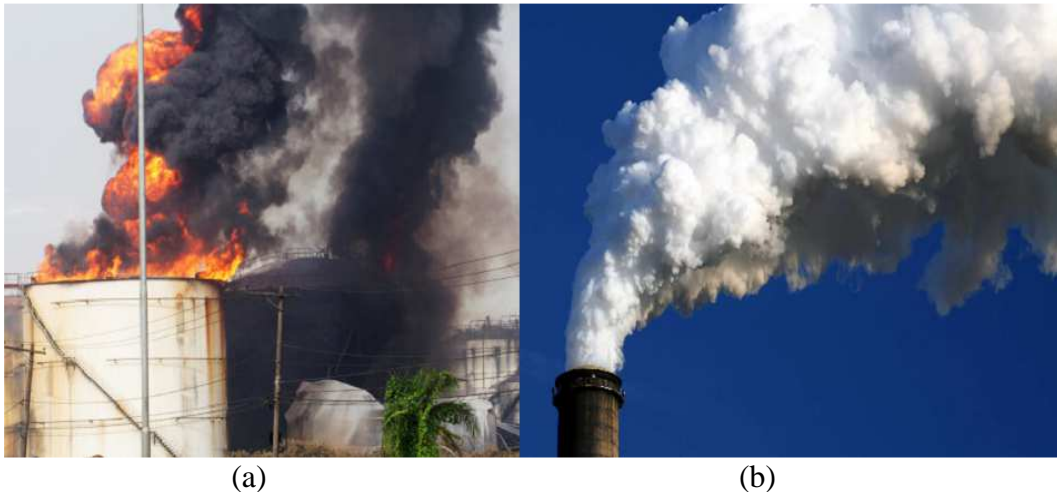


Figura 3.5 – Detalhe de fontes pontuais típicas: (a) tanque de armazenamento e (b) chaminé industrial

### 3.3 A BANCADA EXPERIMENTAL E SEUS ACESSÓRIOS

A bancada experimental é um conjunto de equipamentos utilizados para propiciar a montagem adequada das condições de teste com seus instrumentos de medição e acessórios para a execução dos ensaios necessários para a determinação de resultados que serão posteriormente utilizados para a análise do fenômeno estudado.

A bancada de testes deste trabalho utiliza os seguintes equipamentos e materiais:

- a) um túnel de vento de seção retangular de 250 mm de altura por 280 mm de largura;
- b) uma câmera infravermelha termográfica modelo Flir A320;
- c) uma câmera digital de 16 megapixels modelo Canon S-825;
- d) um termômetro digital de vareta com termopar tipo K modelo Incotherm 6132;
- e) um dispositivo de aquisição de dados com 8 canais modelo Novus Fieldlogger;
- f) um recipiente de aço com 110 mm de diâmetro por 57,6 mm de altura;
- g) quatro termopares tipo K;
- h) um manômetro digital modelo Dwyer Mark III serie 475;
- i) um tubo de pitot em L de 6' de comprimento com 3 mm de diâmetro modelo Dwyer 166-6-CF;

- j) um termo-higrômetro modelo Minipa MT-240;
- k) um termômetro digital de dois canais com termopares tipo K de junta exposta modelo Minipa MT-520;
- l) anemômetro digital portátil modelo Icel AN-10;
- m) balança eletrônica digital modelo Marte AD5000;
- n) um analisador de gases modelo Instrutemp Kane 940.

### 3.3.1 Metodologia de Análise das Temperaturas

A Figura 3.6 mostra os detalhes da vista lateral da montagem da seção de testes e a instrumentação utilizada. O túnel de vento foi utilizado para emular o vento incidente, a câmera infravermelha termográfica foi utilizada para a determinação da temperatura adimensional ( $T^*$ ) da chama (incerteza de medição de  $\pm 2$  K ou  $\pm 2\%$  da leitura), a câmera fotográfica foi utilizada para a determinação do ângulo de inclinação e do comprimento de chama. O termômetro digital de vareta foi utilizado para determinar a temperatura de referência do vento de saída do túnel (incerteza de  $\pm 1$  K), o dispositivo de aquisição de dados com 8 canais (incerteza de  $\pm 0,2\%$  da leitura) com os quatro termopares tipo K (incerteza de  $\pm 0,75\%$  da leitura ou  $\pm 2,2$  K) foram utilizados para medição da temperatura da vizinhança da poça, montados de 50 em 50 mm de distância radial, medida a partir da linha da borda superior do tanque e a jusante do mesmo. O esquema detalhado da vista frontal do experimento pode ser visto na Figura 3.7.

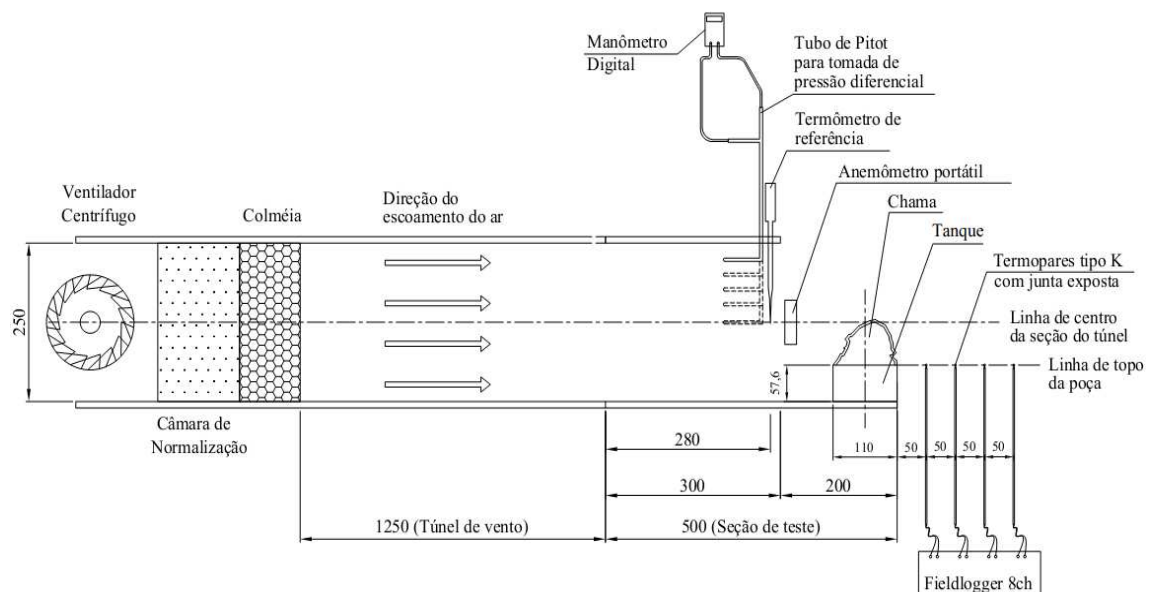


Figura 3.6 – Esquema detalhado da montagem do experimento (Vista lateral). Todas as medidas indicadas estão em milímetros



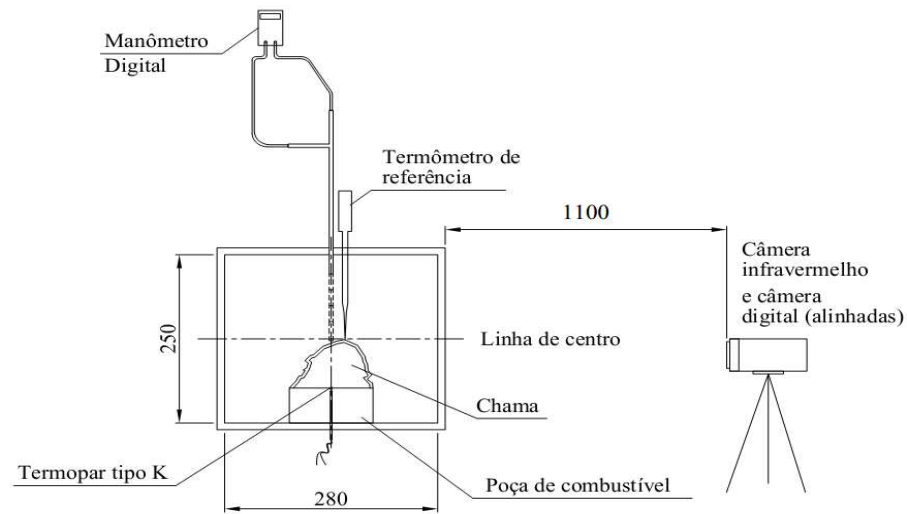


Figura 3.7 – Esquema detalhado da montagem do experimento (Vista frontal). Todas as medidas indicadas estão em milímetros

### 3.3.2 Metodologia de Análise da Geometria da Chama

Conforme pode ser visto na Figura 3.8, ocorre uma variação da inclinação da chama para uma mesma velocidade ensaiada, devido à combinação do escoamento incidente, que é turbulento na saída do túnel, com a turbulência inerente ao processo de combustão em estudo. Esta variação da inclinação é prevista na análise estatística, serão coletados vários ângulos e então será calculada a média dos valores obtidos, adicionando-se o erro das medições em função do desvio padrão. Foram feitos ensaios com 5 min de vídeo, a partir dos quais foram retirados, primeiramente 1 quadro a cada 10 segundos, em um total de 30 imagens, depois 1 quadro a cada 5 segundos, em um total de 60 imagens, e assim sucessivamente até que a convergência do valor do ângulo médio medido, isto se ocorreu para 1 quadro a cada 1 segundo, em um total de 300 imagens.



Figura 3.8 – Variação do ângulo da chama em decorrência dos vórtices devido ao escoamento turbulento na saída do túnel de vento

Outro fenômeno que pode ocorrer é o desprendimento da chama, gerando fagulhas que se propagam a uma distância grande, conforme pode ser visto na Figura 3.9a. Este fenômeno de desprendimento da chama ocorreu apenas nas velocidades maiores ensaiadas enquanto que nos ensaios com menores velocidades não houve ocorrências de desprendimento. É possível ainda verificar pelas imagens termográficas que a região onde ocorre o desprendimento é preenchida por gases quentes, conforme mostra a Figura 3.9b.

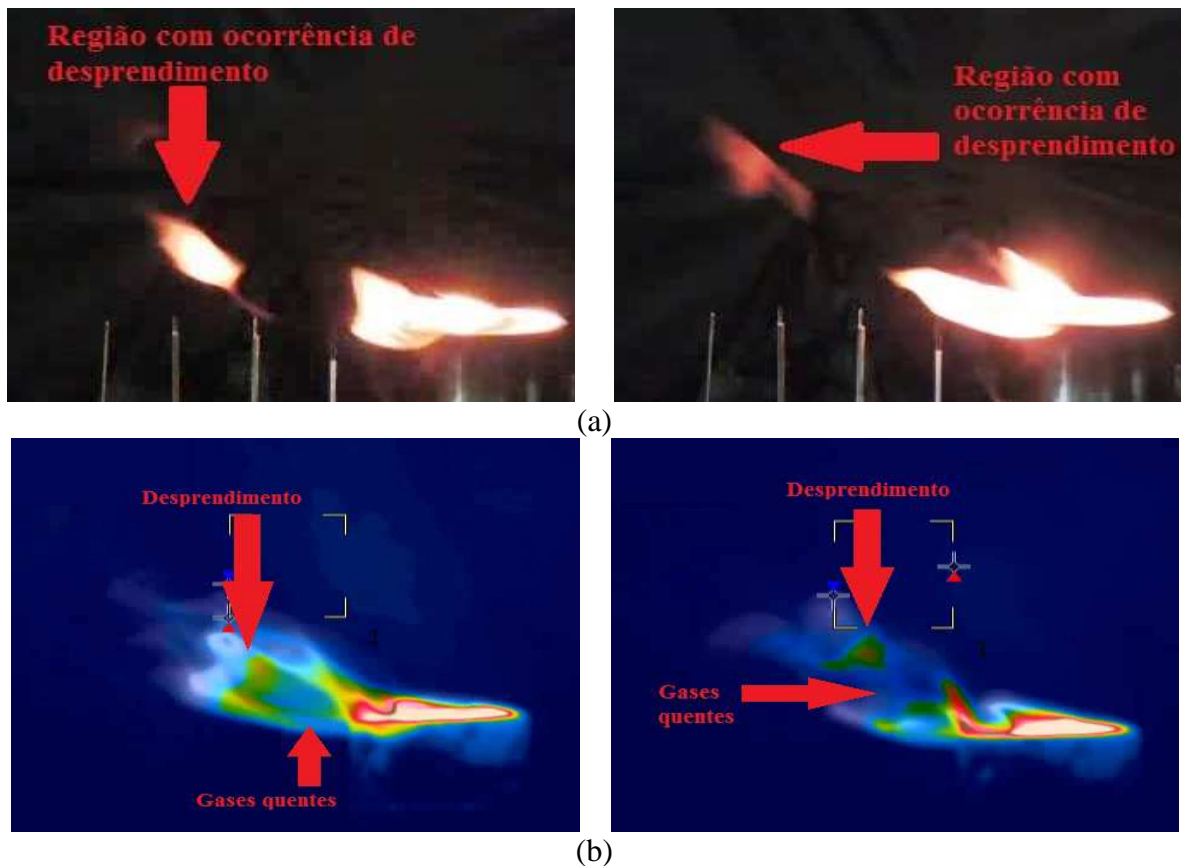


Figura 3.9 – Desprendimento da chama em função da velocidade do vento: (a) vídeo e (b) termografia

Este fenômeno é importante, pois, para se efetuar a medição do comprimento da chama, a parcela desprendida precisa ser considerada também e com isso o comprimento da chama tende a ser maior em velocidades maiores.

Foi feita uma análise dos dados, através da coleta dos quadros dos vídeos, conforme mencionado anteriormente, até o valor de 3600 amostras de imagens. Foi utilizado o valor da velocidade do escoamento incidente de  $2,5 \text{ m s}^{-1}$  do teste de diesel, escolhido aleatoriamente, para a observação dos dados.

### 3.3.3 Metodologia da Determinação de Convergência das Amostras

Conforme pode ser visto na Figura 3.10 ocorre uma tendência de estabilização da média dos valores medidos a partir de 300 amostras. O ângulo de inclinação da chama é o parâmetro mais relevante da geometria da chama, conforme explicado por diversos autores. Assim foi feita a escolha da quantidade de amostras, tomando por base principalmente os valores do ângulo de inclinação. Devido ao custo computacional e tempo de tratamento de dados, a amostra de 300 imagens se mostrou a mais adequada para ser utilizada. O erro das medições foi determinado pelo tratamento estatístico dos dados com um intervalo de confiança de 95%.

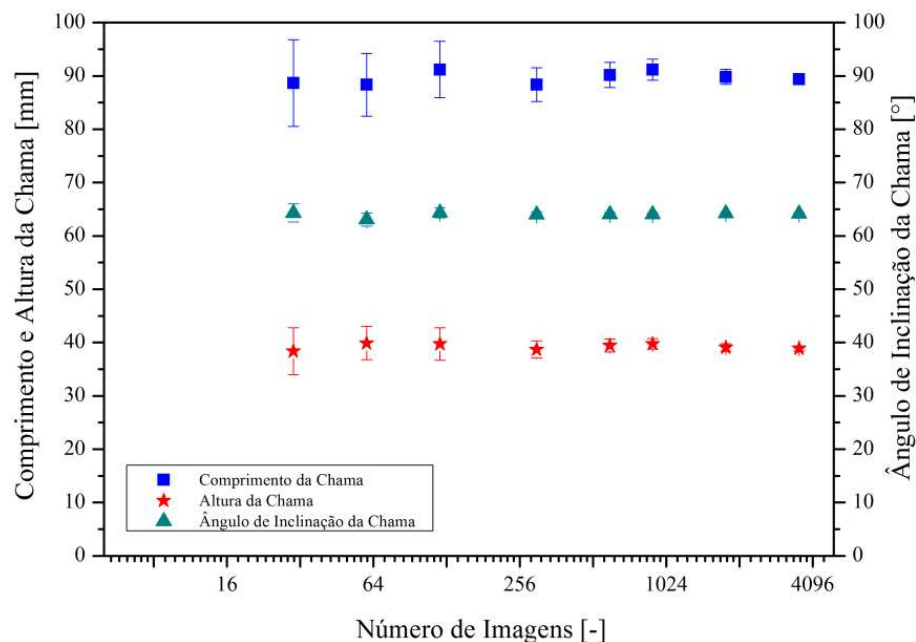


Figura 3.10 – Detalhe do teste de determinação da convergência dos resultados experimentais

Todos os dados apresentados na Figura 3.10 foram obtidos através da análise dos quadros extraídos dos vídeos dos ensaios e, com o auxílio do Matlab, foram feitas as medições dos valores indicados nas amostragens da determinação da convergência.

### 3.3.4 Metodologia de Análise da Concentração de Poluentes

O analisador de gases Kane 940 foi utilizado para a determinação das concentrações de  $\text{SO}_2$ , CO e NO nos gases de combustão ao longo de sua dispersão, estes foram os únicos gases medidos devido às limitações do equipamento de análise.

O instrumento possui a capacidade de medição de várias grandezas, na Tabela 3.1 são resumidas as medições possíveis, faixas de medição e incertezas apresentadas.

Tabela 3.1 – Resumo das medições possíveis e incertezas do analisador de gases

| Medição             | Faixa de medição | Incerteza   |
|---------------------|------------------|---|
| Temperatura         | 0 a 873 K        | $\pm 2,0$ K $\pm 0,3\%$ da leitura                                  |
| Pressão             | +150 a -150 mbar | $\pm 2,0\%$ da leitura da escala completa                           |
| Gás O <sub>2</sub>  | 0-21%            | $\pm 0,2\%$ da leitura  |
| Gás CO              | 0-10.000 ppm     | $\pm 20$ ppm < 400 ppm, $\pm 5\%$ < 5000 ppm, $\pm 10\%$ > 5000 ppm |
| Gás NO              | 0-5.000 ppm      | $\pm 5$ ppm < 100 ppm, $\pm 5\%$ > 100 ppm                          |
| Gás SO <sub>2</sub> | 0-5.000 ppm      | $\pm 5$ ppm < 100 ppm, $\pm 5\%$ > 100 ppm                          |

Fonte: Adaptado de Instrutemp (2016).

O analisador de gases possui uma sonda para a medição. A sonda foi posicionada, para todas as velocidades ensaiadas, seguindo a linha de centro da chama e da pluma, a partir da superfície da poça. Foi feita a verificação empírica no ensaio e regulado o pedestal de apoio para este alinhamento. A sonda foi colocada, inicialmente, a 300 mm de distância do centro da superfície da poça e, a partir desta medida inicial, foi afastada de 100 em 100 mm. A distância máxima de 1200 mm foi estabelecida, pois após este ponto já não era mais possível obter a medição dos poluentes. A altura da sonda foi regulada conforme a alteração do deslocamento da pluma pelo vento a fim de manter sempre um alinhamento coincidente com a linha de centro do escoamento da pluma. Esta altura foi verificada para cada uma das velocidades medidas e foi ajustada conforme a inclinação do deslocamento da pluma, conforme esquema detalhado na Figura 3.11.

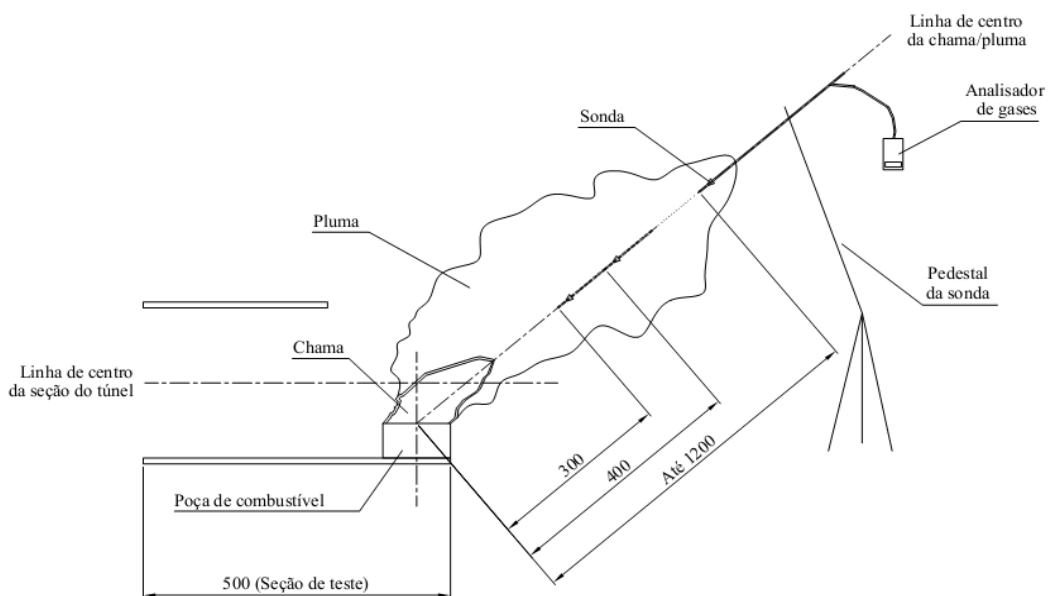


Figura 3.11 – Esquema detalhado da montagem do analisador de gases no experimento (Vista lateral). Todas as medidas indicadas estão em milímetros

As medições das concentrações de poluentes apresentaram variação ao longo da medição, devido a este fato, assim como para os parâmetros da geometria, foram feitas médias estatísticas das medidas obtidas nos ensaios.

### 3.3.5 Metodologia de Análise da Taxa de Queima Mássica de Combustível

Para emprego nas correlações semi-empíricas, foi necessário obter a taxa de queima mássica para cada velocidade ensaiada. Desta forma foi feito um ensaio de medição da taxa de queima, onde se fez uso de uma balança eletrônica AD5000 (incerteza de  $\pm 0,1$  g). Para execução das atividades de medição foi feito o isolamento térmico da superfície da balança com uma manta de lã de rocha para não exceder a temperatura máxima de uso do equipamento. Na Figura 3.12 pode ser observada a montagem do experimento.

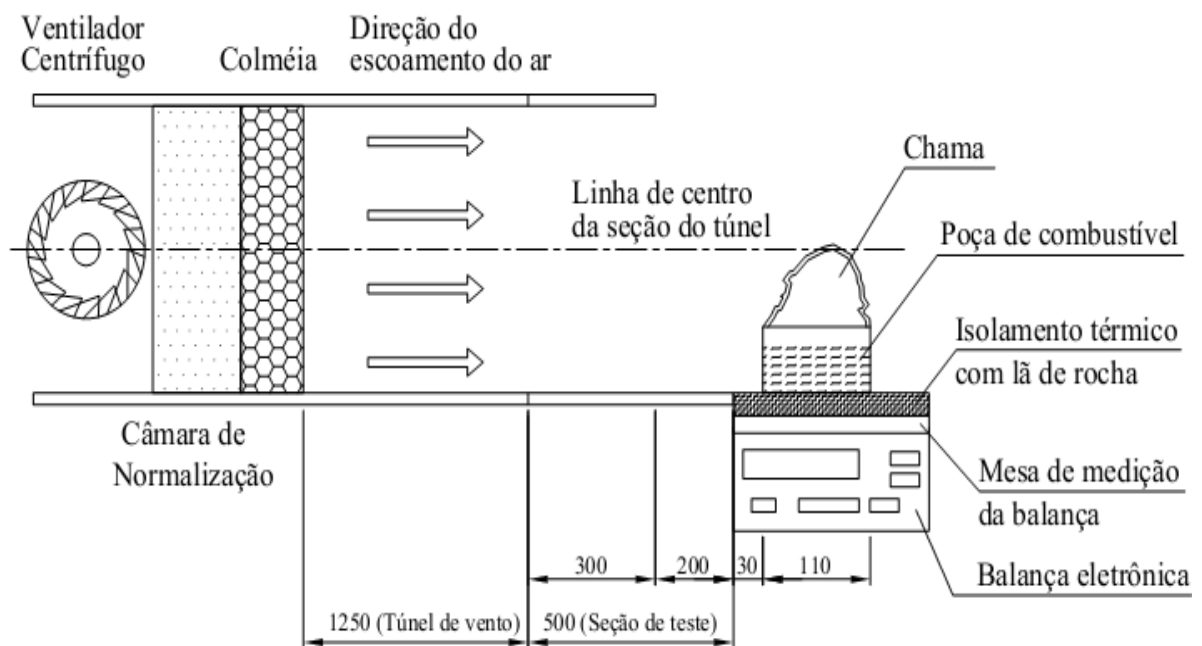


Figura 3.12 – Esquema detalhado da montagem da balança para medição da taxa de queima mássica

Após a inicialização e estabilização da balança, a poça foi colocada sobre o isolante térmico e a balança foi zerada. Iniciou-se o escoamento no túnel de vento com a velocidade pretendida e, passado o tempo de estabilização, o incêndio na poça foi iniciado. A partir daí foi feito um vídeo com 5 min de duração para obter a amostragem dos valores de perda mássica em função do tempo, que posteriormente, foi utilizado para o tratamento e na aquisição de dados, conforme será explicado no capítulo 3.4.

O processo foi repetido para cada uma das velocidades ensaiadas e para cada repetição do ensaio foi feita a limpeza da poça e preenchido o volume da poça para um novo incêndio.

### 3.4 TRATAMENTO DE DADOS

#### 3.4.1 Análise de Dados da Geometria da Chama

A análise estatística das imagens para a determinação do ângulo, do comprimento e da altura da chama foi feita a partir do uso de um código de instruções no programa Matlab (parceria com o Laboratório de Combustão de Universidade Federal do Rio Grande do Sul). O código faz a discretização das imagens, retirando a parte luminosa, e convertendo a imagem em uma escala de preto e branco. Após, faz um contorno polinomial, na parte branca, preenchendo o espaço do contorno com diversos retângulos (integralização), e cria o traçado dos pontos retornando o valor médio dos centroides dos quadrados dentro desta curva polinomial. É feita a regressão linear e após é gerada uma reta que representa a linha de tendência da média da curva. Assim, o comprimento da chama é a medida da projeção, a partir da linha de centro da poça, na altura da superfície superior do tanque até o centroide mais afastado encontrado, a altura de chama é a medida vertical do centroide mais afastado no eixo y e o ângulo da chama é o ângulo entre a linha de centro da chama que determina o comprimento e a linha de centro vertical (eixo y) no topo da borda superior do tanque.

Na Figura 3.13(a) é possível observar os passos da discretização e medição do ângulo pelo Matlab. As marcações em verde na Figura 3.13(b) são os retângulos que separam as curvas para criação dos pontos médios. Na Figura 3.13(c) é feita a criação dos pontos médios e posteriormente é feita a criação da reta no ponto médio de maior valor, em x e y, representada pela linha em vermelho que definirá o ângulo e o comprimento da chama. A partir destes valores foram geradas as curvas das correlações e demais medições relevantes e pertinentes à geometria da chama.

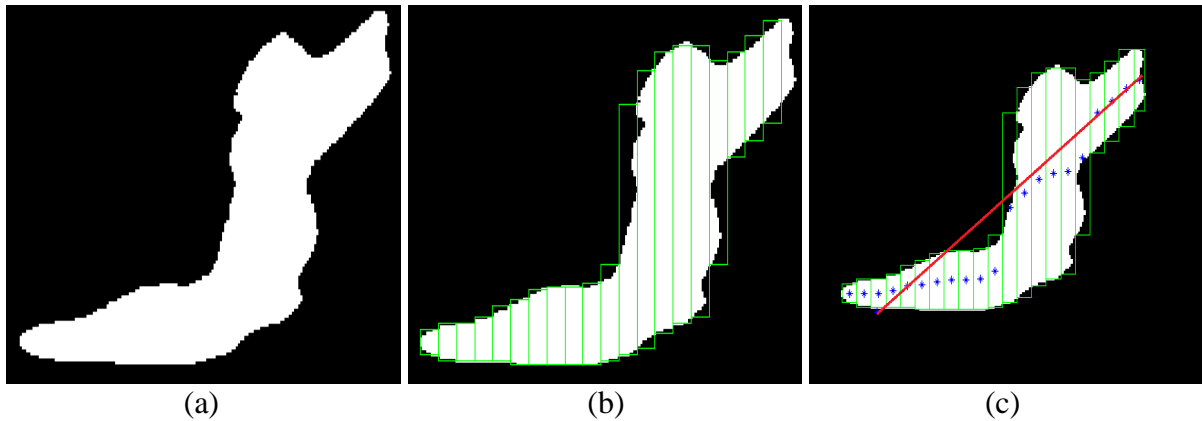


Figura 3.13 – Esquema de medição do ângulo e do comprimento da chama: (a) conversão preto e branco; (b) integralização; (c) criação dos centroides e ponto médio

A medida é feita a partir do ponto central da superfície superior do tanque, tomando o plano horizontal como referência (eixo x). Conforme a Figura 3.14, os valores do ângulo de inclinação da chama,  $\theta$ , da altura da chama, H, e do comprimento da chama, L, são todos feitos a partir do ponto de intersecção dos eixos x e y, que estão localizados na altura da linha da borda do topo do tanque e no centro do diâmetro, respectivamente.

Para cada velocidade de teste foram coletados vídeos com 5 min de duração, a partir dos quais foram obtidas as imagens para a determinação dos valores de cada parâmetro (ângulo da chama, comprimento da chama, altura da chama e temperaturas) na criação da análise estatística dos valores médios.

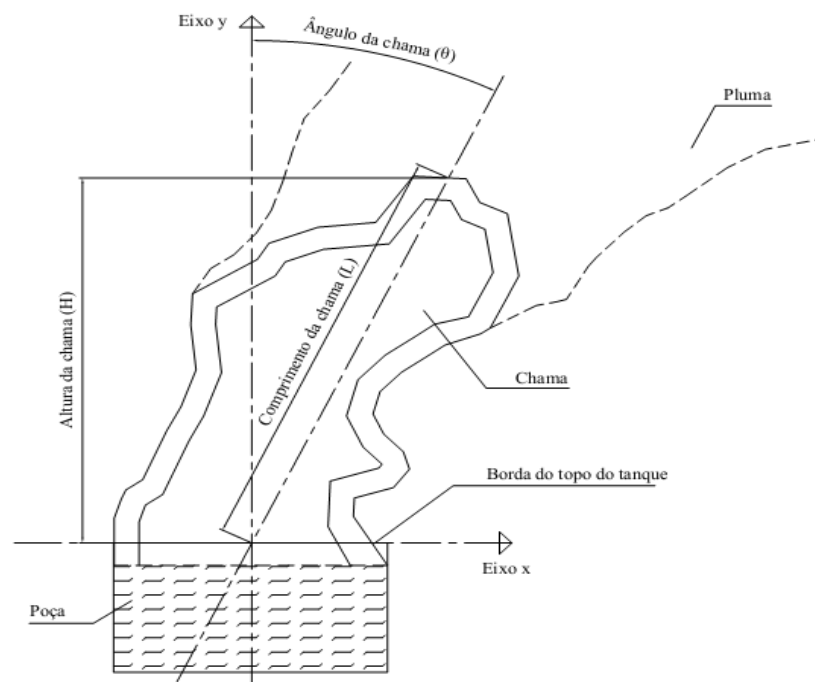


Figura 3.14 – Esquema de medição das características da chama e pontos de referência

O código fonte para a obtenção dos resultados da análise das imagens para as simulações, apresentado no Anexo A, foi desenvolvido em parceria com a equipe do Laboratório de Combustão de Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Os valores de ângulo e comprimento da chama foram obtidos a partir dos vídeos produzidos com a câmera digital, já a temperatura adimensional foi obtida a partir dos vídeos produzidos com a câmera termográfica, os vídeos foram gravados simultaneamente, com as câmeras alinhadas lateralmente, conforme pode ser visualizado na Figura 3.7.

O volume de combustível foi considerado como constante, já que a película superficial foi mantida a 10 mm de distância da linha da borda superior do tanque, com uma variação de aproximadamente  $\pm 5\%$ , e assim o volume de combustível é dado por  $4,524 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ . Este ajuste foi verificado através da observação de uma marca interna do tanque utilizada como referência e, a cada constatação de redução do nível de combustível, era feito o preenchimento de combustível no tanque com o auxílio de um alimentador manual.

#### **3.4.2 Análise de Dados da Temperatura da Chama e da Pluma**

Os dados de temperatura das análises termográficas foram obtidos a partir dos valores máximos na região central da chama e foram convertidos para valores adimensionais para qualificar a temperatura da chama. Para este estudo foi utilizada como referência a maior temperatura da chama e a maior temperatura da pluma, e então, qualificada a temperatura em cada velocidade ensaiada. Esta região é determinada dentro dos próprios programas de gravação de vídeo da câmera termográfica, o *FLIR IR Camera Player* e o *FLIR IR Monitor*, ambos distribuídos gratuitamente para uso em conjunto com as câmeras termográficas do fabricante FLIR. A temperatura adimensional é então obtida pelos pontos máximos detectados pela câmera e estes pontos máximos, que variam no tempo, formam os dados para determinação da temperatura adimensional máxima para cada velocidade medida. A análise estatística é feita com 300 amostras, que é a mesma quantidade utilizada para a determinação dos valores da geometria. Os valores médios de temperatura adimensional obtidos mostram a tendência da temperatura da chama.

Aqui é importante definir que o termo “tendência”, para a análise da temperatura, ocorre devido aos processos envolvidos na combustão e à influência direta da radiação no valor obtido pela câmera. A radiação altera a percepção da emissividade da câmera que é



ajustada para a obtenção dos valores de temperatura e devido a isso adimensionalizar os valores torna mais coerente a análise da termografia.

Para obter um fator de correção coerente, foi feita uma calibração com a câmera, sendo utilizado o seguinte procedimento:

- a) a poça foi colocada em um forno para homogeneizar sua temperatura em aproximadamente 100 K acima da temperatura ambiente e, este valor, foi determinado empiricamente para possibilitar a queima do biodiesel;
- b) com o auxílio de um termopar do tipo K com junta exposta, foi feito o contato entre o termopar e a superfície da parede do tanque e assim foi medida a temperatura;
- c) a câmera infravermelho foi ligada e direcionada sobre a mesma superfície do item anterior, após o direcionamento foi alterado o valor da emissividade, ajustado através do programa da câmera, até ocorrer a equivalência entre as temperaturas indicadas pelo termopar e pela câmera;
- d) com esse ajuste, chegou-se a um valor de 0,7 K de diferença, para a medição de 373 K, definindo assim a emissividade,  $\epsilon$ , com valor de 0,95;
- e) o processo foi repetido novamente com a superfície do tanque em temperatura ambiente e então foi verificada outra vez a temperatura, com o termopar e com a câmera infravermelho, sendo observada uma diferença de apenas 0,4 K.

A diferença maior, na temperatura mais alta, foi encontrada possivelmente devido à taxa de resfriamento do tanque com o ar ambiente, validando assim o valor ajustado para a emissividade.

Nas imagens, a escala de cores da temperatura corresponde às medições captadas alguns instantes antes, isso se deve a um atraso da atualização da escala, inerente à câmera termográfica, já que a mesma faz as medições a uma frequência de, no máximo, 30 Hz.

No canto superior esquerdo das imagens, Figura 3.15, no *Box 1* e no *Box 2*, são mostradas as temperaturas, máxima e mínima, medidas no instante da obtenção do quadro analisado. Assim, as temperaturas que são apresentadas nos campos do *Box 1* e *2* podem ser maiores do que aquelas que aparecem na escala de cores. O *Box 2* é colocado diretamente sobre a chama e indica a temperatura da mesma, já o *Box 1* é posicionada acima da chama na região da pluma e identifica a temperatura dos gases de combustão na pluma.

As duas caixas possuem uma área definida de 90 mm x 90 mm, este valor foi arbitrado e suas dimensões englobam quase totalmente a área da chama. Esta medida foi escolhida para que a temperatura do tanque não influenciasse na medição final da temperatura sobre a

chama, pois na posição escolhida da caixa de medição não ocorre a incidência sobre o material do tanque, já que a mesma está posicionada logo acima da linha da borda superior do tanque. Para a medida da pluma foi utilizado o mesmo tamanho de caixa para padronização do espaço de aquisição da temperatura.

A posição de medição da temperatura da pluma considerada foi aquela logo acima do final da ponta da chama. A posição do *Box 1* foi ajustada e corrigida para cada uma das condições de medição em função da velocidade do vento. Como o valor do comprimento da chama varia de acordo com o escoamento do vento ao longo do tempo, em algumas medições a ponta da chama ficou mais próxima do *Box 1* e outras mais longe. Porém, como não é possível ajustar a caixa de medição para cada uma das medidas, a posição foi observada empiricamente e ajustada antes do início de cada teste. A posição de medição ficou, portanto, sendo a posição da ponta da chama, com um ajuste de folga de cerca de 30 mm da ponta da chama.

A Figura 3.15 mostra uma situação típica, com a chama e a pluma, a escala de temperatura e as caixas de medição (*Box 1* e *2*) definidas pelos seus vértices. Os parâmetros ajustados na câmera e mostrados na parte inferior da imagem são a umidade relativa, rH, obtida a partir do termohigrômetro modelo MT-240 (incerteza de medição de  $\pm 5\%$ ), a temperatura ambiente,  $T_{atm}$ , obtida através do termômetro de vareta modelo 6132 (incerteza de medição de  $\pm 1$  K), a distância do corpo medido, *Dist*, medida através de uma trena, em metros, e a emissividade,  $\epsilon$ , ajustada de acordo com o procedimento anteriormente descrito, com o uso do termômetro digital de dois canais com termopares tipo K de junta exposta modelo MT-520 (incerteza de  $\pm 0,2\%$  da leitura + 1 dígito).

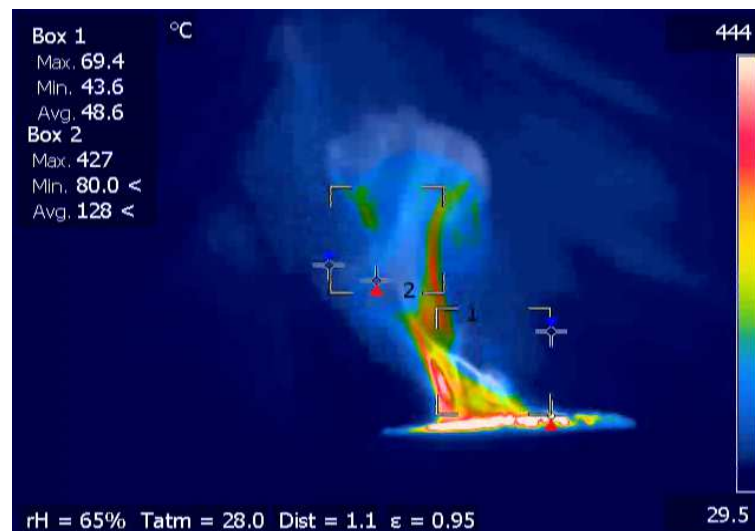


Figura 3.15 – Esquema de medição das temperaturas da chama e da pluma e ajustes dos parâmetros da câmera de termografia

A câmera infravermelha apresenta também algumas características técnicas importantes de serem mencionadas que são: campo de visão de 25 ° x 18,8 °; distância mínima de foco de 0,4 m; resolução espacial de 1,3 mrad; faixa de medição espectral de 7,5 a 13 μm; passo do detector com 25 μm; constante de tempo do detector de 12 ms; frequência de captura de imagens de 9 ou 30 Hz; sensibilidade térmica menor do que 0,05 °C a 30 °C; faixa de medição de objetos de -20 °C a 120 °C ou 0 °C a 350 °C ou 250 °C a 1200 °C; ajuste de correção de emissividade de 0,01 a 1.

### 3.4.3 Adimensionalização da Temperatura da Chama e da Pluma

Para a adimensionalização dos dados das temperaturas da chama e da pluma na análise qualitativa, foram utilizados os resultados obtidos a partir de equiparação do valor máximo das medições à temperatura ambiente, conforme apresentado na Eq. (3.3):

$$T^* = \frac{T_{m\acute{a}x} - T_{med}}{T_{med} - T_{atm}} \quad (3.3)$$

onde  $T_{med}$  é a temperatura medida, da chama ou da pluma,  $T_{m\acute{a}x}$  é a temperatura máxima medida, da chama ou da pluma e  $T_{atm}$  é a temperatura ambiente.

### 3.4.4 Análise de Dados da Temperatura Periférica

Os dados da temperatura periférica foram analisados através das informações coletadas dos 4 termopares tipo K de junta exposta que estão dispostos na posição radial do topo da borda superior do tanque, conforme visualizado na Figura 3.6. O dispositivo de aquisição de dados com 8 canais faz uma gravação de temperatura por segundo, tempo este configurado no instrumento. A partir destes dados, são verificadas as temperaturas médias ao longo do ensaio, com 300 s de duração, para cada velocidade ensaiada.

### 3.4.5 Análise de Dados da Taxa de Queima Mássica de Combustível

Para a análise de dados dos valores de taxa de queima mássica de combustível, foi verificado que, devido à sensibilidade da balança, os valores alteravam de maneira muito rápida em função do tempo, dificultando a leitura. Para a obtenção do valor, a estratégia adotada foi obter instantâneos dos quadros dos vídeos nos tempos pré-definidos. Nas

primeiras tentativas foram observados valores de 1 em 1 segundo e de 2 em 2 segundos. Ainda assim os valores se apresentaram difíceis de serem computados, então foi feita uma tentativa de computar os valores de 10 em 10 segundos, sendo este um passo de tempo aceitável, com valores observados de forma mais clara e coerente. Desta maneira foi convencionado para todas as medições de taxa de queima mássica a aquisição de dados de 10 em 10 segundos, a partir dos quais foram geradas as curvas para as poças de diesel e biodiesel em cada uma das velocidades ensaiadas.

#### **3.4.6 Análise de Dados da Concentração de Poluentes**

Para a análise de dados dos valores das concentrações de poluentes foi feita uma verificação *in-loco* na qual os dados disponíveis na tela do analisador de gases Kane 940, foram sendo tomadas a partir de uma planilha eletrônica, de 10 em 10 s, ao longo dos 300 s de testes experimentais, para cada velocidade ensaiada. A partir daí serão computadas as curvas de tendência de cada poluente amostrado (CO, NO e SO<sub>2</sub>) ao longo das distâncias ensaiadas.

O procedimento se repete para cada uma das distâncias conforme apresentado na Figura 3.11.

#### **3.4.7 Comparação das Correlações Semi-empíricas**

As correlações semi-empíricas foram obtidas de dados experimentais por outros autores para diversos combustíveis e tamanhos de poças, e sua utilização é importante fonte de comparação para valores de características da chama. As equações anteriormente apresentadas, no capítulo 2.4.7, foram utilizadas para demonstrar a aproximação do ângulo medido no experimento prático, contra o ângulo apresentado pelo FDS e também com os valores semi-empíricos apresentados por estas correlações que foram resumidas por Lam e Weckman (2015b).

Os dados obtidos com a utilização das correlações semi-empíricas podem demonstrar as características relativas a geometria da chama deste estudo em relação aos ensaios de diversos autores, comparando os dados obtidos entre este e outros estudos sobre geometria de chamas em poças. Isto é importante para validar as informações apresentadas no trabalho e mostrar se as correlações ficam próximas deste experimento, mesmo que estas correlações tenham sido observadas com o uso de diferentes combustíveis, velocidades e diâmetros de poça.

Desta forma, os dados obtidos, provenientes dos experimentos, foram inseridos nas equações semi-empíricas e serão apresentados no capítulo 5, comparadas com os dados experimentais.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS DA ANÁLISE NUMÉRICA

A análise numérica foi realizada com o aplicativo livre FDS. Nesta seção as características deste aplicativo, os parâmetros da simulação, e todos os detalhes referentes a sua utilização serão detalhados.

### 4.1 FDS

Para a análise numérica é importante primeiramente definir como são feitos os cálculos internamente pelo programa FDS. Conforme McGrattan et al. (2016), no método de cálculo de combustíveis líquidos, a taxa em que o líquido evapora no processo de combustão é função da temperatura do líquido, do fluxo de calor e da concentração de vapor de combustível sobre a superfície da poça. Para simplificação, o combustível líquido é tratado como um sólido termicamente espesso para o propósito de computar a condução de calor, porém não é considerada a convecção entre o líquido e a camada superficial.

Segundo Ryder et al. (2004), o programa de simulação de incêndios FDS é um código LES desenvolvido pelo NIST, ideal para a simulação de explosões e de incêndios em geometrias reais, com diversas vantagens sobre os códigos CFD mais tradicionais. As simulações transientes de incêndios e explosões podem ser realizadas com hardware menos sofisticado (menor custo) do que o necessário para códigos CFD tradicionais (computador tipo PC *versus* estações de trabalho Unix) e pode ser resolvido para longos históricos de tempo com recursos computacionais reduzidos. Esta menor necessidade de hardware está associada à própria dinâmica de desenvolvimento do programa, que é direcionado ao uso em problema envolvendo incêndios.

### 4.2 LES

A principal suposição por trás do uso da técnica de LES é que a turbulência de maior escala, que carrega a maior parte da energia do sistema, precisa ser resolvida diretamente a fim de representar precisamente o escoamento. Os pequenos vórtices são modelados. A modelagem dos vórtices de pequena escala reduz a demanda computacional e, portanto, aumenta a velocidade na qual uma simulação pode ser realizada. A modelagem de LES não utiliza parâmetros médios, portanto, uma solução transitória pode ser rapidamente obtida. O FDS foi desenvolvido especificamente para lidar com problemas relacionados ao fogo. O FDS resolve as equações dividindo o espaço do modelo em um grande número de células

retangulares e calculando a temperatura, a velocidade do gás, a concentração de espécies e outras variáveis pertinentes dentro de cada célula. A precisão do modelo é altamente dependente da resolução da malha, com resoluções de malha menores produzindo resultados mais precisos. (RYDER et al., 2004).

O LES foi formulado e desenvolvido inicialmente para o uso na solução de problemas atmosféricos e tornou-se uma poderosa ferramenta para o uso em simulações de engenharia com escoamentos turbulentos. Nesta formulação as tensões de Reynolds turbulentas, que aparecem na equação do movimento, são ajustadas proporcionalmente à deformação de grandes escalas, com coeficientes de vorticidade que são eles próprios proporcionais à magnitude do tensor de deformação e ao quadrado da distância de separação da malha. (SMAGORINSKY, 1963).

#### 4.3 MÉTODO DE RESOLUÇÃO DO FDS

O programa FDS, empregado no presente trabalho, é baseado no método de volumes finitos e resolve numericamente uma forma das equações de Navier-Stokes para escoamentos termicamente direcionados e dominados pelo empuxo, com ênfase no transporte de fumaça e na transferência de calor em incêndios. O algoritmo base emprega um esquema explícito preditor-corretor, com precisão de segunda ordem no tempo e no espaço. Para a fase gasosa, o modelo hidrodinâmico inclui equações de balanço de quantidade de movimento, energia e espécies químicas. Para a abordagem da turbulência emprega-se o modelo de submalha de Deardorff (1972). A radiação térmica é calculada usando uma técnica de volumes finitos, sobre a mesma malha, que resolve as equações do escoamento, sendo o modelo de propriedades radiantes o modelo de gás cinza. Além disso, o transporte de radiação é discretizado pela divisão de uma esfera em aproximadamente cem ângulos sólidos. Para a modelagem da combustão, é utilizado um modelo baseado na fração de mistura com reação química em uma única etapa global. Assim, considera-se que a combustão seja controlada pela mistura turbulenta e que a reação de combustível e oxigênio seja infinitamente rápida, independentemente da temperatura. Partículas Lagrangeanas são usadas para simular o movimento da fumaça. O programa FDS foi criado e desenvolvido no NIST para resolver problemas práticos de incêndios relacionados à engenharia de proteção de incêndios, além de ser também uma ferramenta para estudar fundamentos da dinâmica de incêndios e combustão. (MCGRATTAN et al., 2007).

### 4.3.1 Partículas Lagrangeanas

As partículas Lagrangeanas são tidas como um método onde a partícula é considerada como uma fase discreta e é traçado um caminho de forma individual para cada partícula. Com o estudo estatístico da trajetória da partícula, o método Lagrangeano é capaz de calcular a concentração de partículas e outros dados da fase. Dentro de cada tipo de modelo de partícula, existe uma grande quantidade de modelos que localizam várias características do movimento e da dispersão de partículas. O método Lagrangeano mais comum utilizado é a decomposição da velocidade de escoamento do fluido motriz em uma parte média e uma parte flutuante. O campo de velocidade média do fluido é resultante da computação de uma fase contínua e é interpolado a partir da localização das partículas e então, o modelo Lagrangeano retorna a componente flutuante. (ZHAN e CHEN, 2007; MAHDAVIMANESH et al., 2013).

### 4.3.2 Aproximação de Deardorff

A primeira aplicação do LES, originalmente formulado por Smagorinsky (1963) foi a aproximação feita por Deardorff, que fez a aplicação do método para uso em ensaios meteorológicos da turbulência na camada limite planetária, CLP. Usando este método, Deardorff obteve muitos conhecimentos úteis da estrutura turbulenta da CLP, como os parâmetros de escalonamento para a CLP convectiva. O seu método consiste no uso da escala de submalha, SGS (*subgrid scale*), onde as escalas resolvidas são obtidas com a introdução de um filtro espacial sobre as variáveis das equações de escalas não resolvidas e desta forma, as variáveis filtradas equivalem a uma média de volume e descrevem os movimentos turbulentos na escala resolvida, conforme Deardorff (1972).

## 4.4 EQUAÇÕES PARA RESOLUÇÃO NUMÉRICA

Para as aproximações e cálculos das partículas e campos de velocidade, são utilizadas as equações Eq. (4.1), (4.2), (4.3), (4.4) e (4.5). Estas equações fazem parte do guia de referência técnico do programa FDS, conforme McGrattan et al. (2007), e, a partir de derivações, discretizações temporais, discretizações espaciais, convergências e correções, as variáveis são resolvidas a partir destas equações gerais, cada equação de conservação enfatiza a importância da velocidade divergente e dos campos de vorticidade. Todas as derivações espaciais são aproximadas por diferenças finitas de segunda ordem e as variáveis de



escoamento são atualizadas em função do tempo, utilizando um esquema explícito de predição-correção de segunda ordem.

A Eq. (4.1) é a equação de conservação da massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla \rho = -\rho \nabla \mathbf{u} \quad (4.1)$$

onde  $t$  é o tempo e  $\mathbf{u}$  é o vetor velocidade.

A Eq. (4.2) é a equação da conservação das espécies:

$$\frac{\partial \rho Y_\alpha}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla \rho Y_\alpha = -\rho Y_\alpha \nabla \mathbf{u} + \nabla \rho D_\alpha \nabla Y_\alpha + \dot{m}_\alpha'' \quad (4.2)$$

onde  $Y_\alpha$  é fração mássica das espécies e  $\dot{m}_\alpha''$  é a taxa de produção mássica das espécies por unidade de volume.

A Eq. (4.3) é a equação da conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \omega + \nabla \mathcal{H} = \frac{1}{\rho} ((\rho - \rho_0) \mathbf{g} + \mathbf{f}_e + \nabla \tau_{ij}) \quad (4.3)$$

onde  $\omega$  é o vetor componente de vorticidade,  $\mathcal{H}$  é a pressão modificada (pressão total dividida pela massa específica),  $\mathbf{g}$  é o vetor gravidade,  $\mathbf{f}_e$  é o vetor de forças externas,  $\tau_{ij}$  é o tensor de tensões viscosas.

A Eq. (4.4) é a equação da pressão:

$$\nabla^2 \mathcal{H} = -\frac{\partial (\nabla \mathbf{u})}{\partial t} - \nabla \mathbf{F} ; \mathbf{F} = \mathbf{u} \omega - \frac{1}{\rho} ((\rho - \rho_m) \mathbf{g} - \mathbf{f}_e - \nabla \tau_{ij}) \quad (4.4)$$

onde  $\mathbf{F}$  são as componentes da convecção/difusão.

A Eq. (4.5) é a equação do estado:

$$\bar{p}_m(z, t) = \rho T \mathcal{R} \sum_\alpha \frac{Y_\alpha}{W_\alpha} \quad (4.5)$$

onde  $\bar{p}_m$  é a pressão de segundo plano da  $m$ -ésima zona de pressão,  $T$  é a temperatura,  $\mathcal{R}$  é a constante universal dos gases e  $W_\alpha$  é o massa molar das espécies dos gases.

Ainda segundo McGrattan et al. (2007), o FDS utiliza um modelo simplificado de combustão onde o combustível é normalmente considerado uma espécie simples e o ar e os produtos são considerados como espécies aglomeradas. As espécies aglomeradas representam uma mistura de espécies de gases que são transportadas e reagem de maneira conjunta. Assim,

do ponto de vista do modelo numérico, as espécies aglomeradas podem ser tratadas como espécies simples.

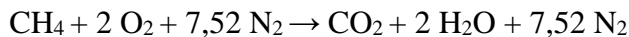
McGrattan et al. (2007) denota que a equação do transporte é de grande importância para a resolução dos modelos de transporte de massa e de espécies. É utilizada para espécies aglomeradas com a mesma forma da equação do transporte utilizada para espécies simples, e é dada pela Eq. (4.6):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Z_\alpha) + \nabla(\rho Z_\alpha \mathbf{u}) = \nabla(\rho D_\alpha \nabla Z_\alpha) + m_{\alpha}^{\prime\prime} + m_{b,\alpha}^{\prime\prime} \quad (4.6)$$

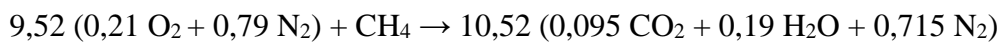
onde  $Z$  é a fração mássica das espécies aglomeradas,  $m_{b,\alpha}^{\prime\prime}$  é a taxa de produção de espécies por evaporação de gotículas ou partículas e  $m_{\alpha}^{\prime\prime}$  é taxa de produção mássica de espécies. Por definição temos que  $\sum Z_\alpha = 1$ ,  $\sum m_{\alpha}^{\prime\prime} = 0$  e  $\sum m_{b,\alpha}^{\prime\prime} = m_b^{\prime\prime}$  e é assumido que  $\sum \rho D_\alpha \nabla Z_\alpha = 0$ .

Um grupo de espécies aglomeradas é na verdade grupos de espécies primitivas que apenas existem em um escoamento em certas proporções. Por exemplo, pode-se assumir que o ar é uma espécie aglomerada composta de 21% de  $O_2$  e 79% de  $N_2$  em volume, com traços de vapor de água e dióxido de carbono. A suposição chave feita para as espécies primitivas aglomeradas em novos grupos de espécies é que elas são transportadas (implicando em difusividades iguais) e reagem juntas. (MCGRATTAN et al., 2007).

Em termos de espécies primitivas, a reação pode ser escrita como, por exemplo:



O que é equivalente a:



onde 9,52 mols de ar reagem com 1,0 mol de combustível formando 10,52 mols de produtos.

É importante explicar a resolução das equações, onde em uma determinada célula da malha em um enésimo passo de tempo, temos a densidade,  $\rho$ , a fração mássica das espécies aglomeradas,  $Z_\alpha$ , o vetor de velocidade,  $\mathbf{u}$ , e a integral de Bernoulli,  $H$ . Além disso, para cada divisão do domínio computacional, temos uma pressão de segundo plano,  $\bar{p}$  e a temperatura é encontrada a partir da equação do estado. Estas variáveis avançam no tempo utilizando um

esquema preditor/corretor explícito de segunda ordem. Maiores informações podem ser encontradas no *FDS Technical Reference Guide*. (MCGRATTAN et al., 2007).

Ainda conforme McGrattan et al. (2007), a equação da energia nunca é resolvida explicitamente, mas seus termos fonte estão incluídos na expressão divergente do escoamento, a fim de ser apresentada na forma derivada.

A Eq. (4.7) é a equação da conservação da energia (Primeira Lei da termodinâmica):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}'' - \dot{q}''_b - \nabla \cdot \mathbf{q}'' + \vartheta \quad (4.7)$$

onde  $h$  é a entalpia sensível,  $\dot{q}''$  é a taxa de calor liberada por unidade de volume da chama,  $\dot{q}''_b$  é a taxa de calor transferida por unidade de volume para as partículas evaporadas,  $\mathbf{q}''$  é o vetor do fluxo de calor por condução e radiação e  $\vartheta$  é taxa de dissipação.

A taxa de dissipação é a taxa com que a energia cinética é transferida para energia térmica devido à viscosidade do fluido e é dada pela equação Eq. (4.8):

$$\vartheta = \tau_{ij} \nabla \mathbf{u} \quad (4.8)$$

Já a entalpia sensível é uma função da temperatura e é determinada pela equação Eq. (4.9):

$$h = \int_{T_0}^T c_p(T) dT \quad (4.9)$$

onde  $c_p$  é o calor específico.

#### 4.5 TRATAMENTO DOS DADOS NUMÉRICOS

O modelo numérico será executado e comparado com base no modelo experimental para validar os dados obtidos na simulação do FDS.

O programa tem a capacidade de simular os ventos incidentes, tal como no experimento, e assim computar os resultados numéricos para a comparação de dados. Além disto, é possível, através do programa complementar do FDS, chamado Smokeview, obter uma visualização em 3D da chama, dos perfis de temperatura e da dispersão da pluma.

Conforme mostra a Figura 4.1, ao se criar um modelo, são apresentados em 3D os componentes da simulação para melhor visualização da montagem experimental.

Para reduzir a quantidade de tempo de simulação, o comprimento do túnel ficou representado com apenas 30 cm. Foi também adicionada uma condição de contorno de

velocidade prescrita na região da saída do túnel de vento, simulando o vento incidente sobre a poça. O domínio da simulação atende aos mesmos requisitos e delimitações do trabalho experimental, sendo as medidas de distância horizontal de propagação da pluma e da altura limite de ensaio limitadas às mesmas condições do laboratório. Assim, foram consideradas as dimensões de 1,75 m de comprimento (horizontal), 0,3 m de largura (relativo às medidas externas do túnel de vento) e 1,5 m de altura (vertical).

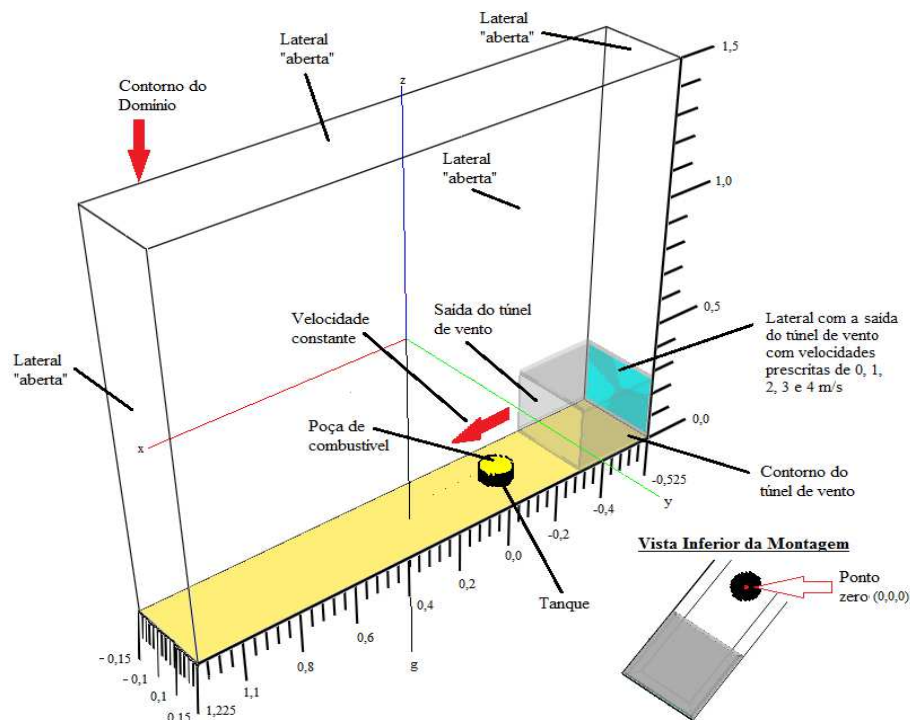


Figura 4.1 – Visualização do modelo 3D pelo Smokeview

O comprimento total de simulação é subdividido em:

- 0,3 m para a seção do túnel;
- 0,28 m para a distância entre a borda final do túnel e a borda final do tanque;
- 1,17 m para a distância entre a borda final do tanque e o final do comprimento de análise.

Além disso, o ensaio numérico foi feito com as seguintes condições de contorno que podem ser visualizadas nas indicações da Figura 4.1:

- temperatura ambiente média inicial de 301 K, o que concorda com os valores medidos nos ensaios experimentais;
- velocidades prescritas de 0, 2 e 4 m/s;
- velocidade prescrita constante;

d) ambiente totalmente aberto, sem consideração de paredes (condição de contorno para turbulência).

Conforme mostra a Figura 4.2 o modelo numérico foi dividido em 5 malhas, sendo:

- a) malha traseira de  $0,3 \times 0,3 \times 1,5$  m (X x Y x Z), na cor laranja, com as divisões das células em  $X = 0,017$  m,  $Y = 0,01$  m e  $Z = 0,017$  m, em um total de 48600 células;
- b) malha lateral direita de  $0,5 \times 0,09 \times 1,5$  m (X x Y x Z), na cor vermelha, com as divisões das células em  $X = 0,017 \times 0,01 \times 0,017$  em um total de 24300 células;
- c) malha de centro de  $0,5 \times 0,12 \times 1,5$  m (X x Y x Z), na cor verde, com as divisões das células em  $X = 0,01$  m,  $Y = 0,005$  m e  $Z = 0,01$  m, em um total de 180000 células;
- d) malha lateral esquerda de  $0,5 \times 0,09 \times 1,5$  m (X x Y x Z), na cor azul, com as divisões das células em  $X = 0,017$  m,  $Y = 0,01$  m e  $Z = 0,017$  m, em um total de 24300 células;
- e) malha frontal de  $0,95 \times 0,3 \times 1,5$  m (X x Y x Z), na cor violeta, com as divisões das células em  $X = 0,01$  m,  $Y = 0,01$  m e  $Z = 0,017$  m, em um total de 256600 células.

O conjunto com as 5 malhas totaliza 533700 células.

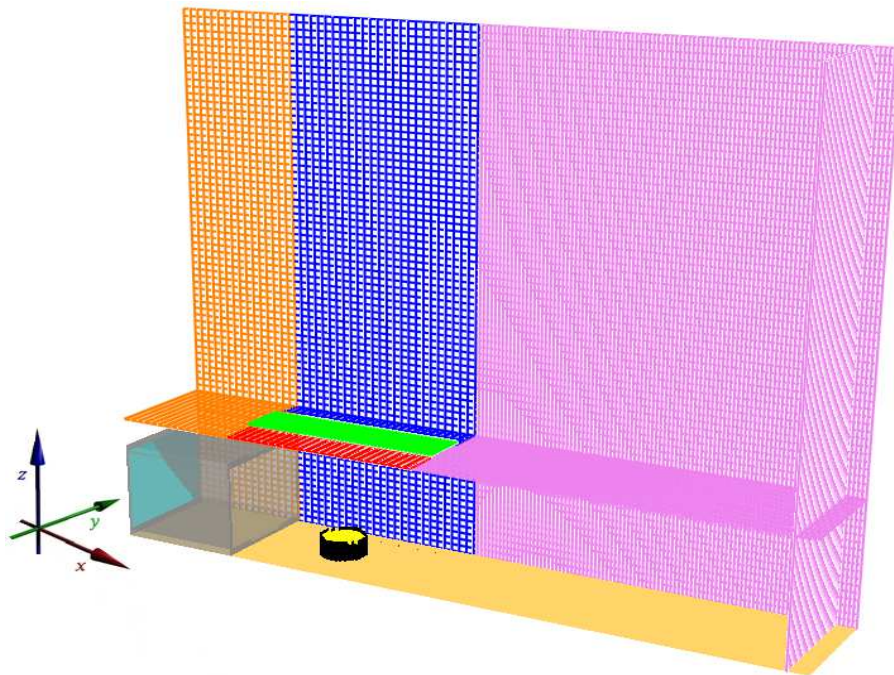


Figura 4.2 – Visualização das malhas do modelo 3D

#### 4.5.1 Análise de Sensibilidade de Malha

O princípio de sensibilidade de malhas é aplicado através de comparação de resultados de malhas de diferentes tamanhos, definindo a malha padrão como aquela que apresenta uma menor diferença em relação a uma malha mais refinada.

Por exemplo, o estudo de Jangannatha, Chandratilleke e Narayanaswamy (2010) analisou malhas com 14000 nós, considerada grosseira, 48072 nós, considerada média e 79000 nós, considerada refinada. Os resultados obtidos para a variação da velocidade média encontrada entre as análises utilizando a malha média e a malha fina foram inferiores a 5%, de modo que a malha média foi considerada adequada para o restante do seu estudo.

No estudo de Wahlqvist e van Hees (2013), uma validação dos estudos experimentais de queima em poça em salas compartimentadas interligadas por sistemas de exaustão forçada para testes de incêndio em plantas nucleares foi conduzida e, em todos os casos estudados, uma malha uniforme de células cúbicas de 10 cm x 10 cm x 10 cm foi utilizada. O método LES do FDS foi utilizado em todas as simulações e estas simulações utilizaram duas salas de 5 m x 4 m x 6 m (Largura por Altura por Comprimento) cada para os ensaios.

No trabalho de Shen, Huang e Chien (2008) foi simulado o incêndio de um hotel de Taiwan para análise comparativa. Foi representado todo o andar incendiado, com 46 m x 31 m x 3 m (Largura por Comprimento por Altura), onde todas as malhas foram divididas em células cúbicas de 10 cm de aresta, totalizando 4,4 milhões de células na área calculada. O total de células foi distribuído em 18 computadores para processamento em paralelo e uma CPU para coletar os dados de cada computador. Foram necessárias 90 h de processamento para execução de um teste de 100 s. Inicialmente foi utilizada uma malha cúbica de 15 cm que resultou em temperaturas bem abaixo dos valores esperados, com isso refinou-se a malha para 10 cm de aresta e os resultados foram concordantes com os valores esperados para a chama.

Já no trabalho de Mouilleau e Champassith (2009), foram estudadas liberações de gases em ambiente confinados, onde foram utilizados computadores “usuais” com dual core de 1,6 GHz com 2 GB RAM, usando um modelo com aproximadamente 1 milhão de volumes de controle. O resultado da análise de sensibilidade foram malhas de cubos regulares com aresta de 3,75 m para os estudos de dispersão de CO e amônia, 3 m para os testes na unidade de ensaio “A” e 0,8 m para os testes no experimento MUST. Foi verificada no trabalho a influência do tamanho de malha, em particular as simulações do teste na unidade de ensaio “A”, que foram feitas com malhas de células cúbicas de 4,5 e 6 m. Foi observado nos resultados obtidos no trabalho que com a malha grande, de 6 m (resolução grosseira), as

predições foram diferentes. Porém, as simulações com as malhas intermediária e refinada, de 4,5 e 3 m, ficaram muito próximas, mostrando convergência nos resultados. Os ensaios foram feitos com bons resultados de aproximações em testes que duraram 300, 600 e 1200 s simulados, com não mais que um dia de processamento.

À semelhança dos artigos consultados, no presente trabalho, para a seleção das divisões das malhas, foram feitos testes prévios e iterativos, de forma a verificar as diferenças entre os valores dos resultados. Conforme foi se reduzindo o tamanho da malha, o tempo de processamento cresceu exponencialmente. Os testes prévios mostraram que não houve diferença nas 5 primeiras casas decimais significativas e, ajustando os tamanhos de malhas, se chegou as dimensões de células anteriormente citados. As iterações com malhas maiores e mais refinadas chegaram a requerer tempos superiores a 8 h por cada segundo processado, enquanto que a malha mais grosseira dispendeu cerca de 1,5 h por segundo processado. Desta forma a malha mais grosseira foi selecionada devido aos valores encontrados e também, principalmente, devido ao tempo computacional envolvido para resolução da simulação.

O aumento do tamanho da célula na coordenada X para tamanhos maiores do que 1 cm se mostrou problemático, devido ao tamanho da poça, fazendo com que o FDS retornasse os cálculos com erros de instabilidade numérica. Em alguns testes ocorreu erro por falta de alocação de memória, principalmente devido ao escoamento do vento incidente.

Para o estudo de sensibilidade de malha, pode ser verificado que o valor adotado é considerado moderado para a resolução da dinâmica do incêndio em todo o domínio, baseado na relação necessária entre o diâmetro característico do incêndio,  $D^*$ , e a dimensão dos volumes de controle,  $\Delta x$ , onde  $D^*/\Delta x$  deve estar entre 4 e 16, conforme recomendado por Stroup e Lindeman (2013), que se utilizam desta faixa de valores para resolução de vários cenários de incêndio com precisão.

Salley e Lindeman (2016) utilizam a comparação do comprimento da chama com valores de  $D^*/\Delta x$  de 5, 10 e 20, com bons resultados de aproximação dos valores, onde é observado que o aumento do valor da taxa de calor liberada,  $\dot{Q}$ , faz com que os valores dos resultados sejam mais próximos entre si.

A relação  $D^*/\Delta x$  é uma forma de verificar se a malha está devidamente refinada e, para a determinação e verificação da malha, foi utilizada a calculadora de tamanho de malha de Overholt, 2017.

Com o uso da calculadora de tamanho de malha, Overholdt (2017), é obtido o diâmetro característico do incêndio conforme a Eq. (4.10):

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (4.10)$$

onde o subscrito  $\infty$  indica condições à temperatura ambiente.

Para obtenção da taxa de calor liberado no incêndio, conforme Stroup, Taylor e Hausman (2013) é utilizada a Eq. (4.11):

$$\dot{Q} = \dot{m} \Delta H_{c,eff} \quad (4.11)$$

onde  $\Delta H_{c,eff}$  é o calor de combustão efetivo e  $\dot{m}$  é a taxa de massa queimada.

De acordo com a Eq. (4.10), quanto menor for o valor de  $\dot{Q}$ , menor deverá ser o valor de  $D^*$ . Devido a isso foi verificado que a pior situação para a análise numérica é o ensaio com óleo diesel na velocidade de  $2 \text{ m s}^{-1}$  e taxa de queima mássica de  $0,003356 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , que produz uma taxa de calor liberado de apenas  $1,44 \text{ kW}$ . Com estes dados inseridos na Eq. 4.10, foram obtidos os seguintes dados:

- Diâmetro característico do incêndio  $D^*$  é  $0,07 \text{ m}$ ;
- Quando  $D^*/\Delta x = 4$  o tamanho de célula sugerido para a malha grosseira é de  $0,0175 \text{ m}$ , sendo os valores de  $\Delta x = 0,017 \text{ (X)}$ ;  $0,02 \text{ (Y)}$ ;  $0,017 \text{ (Z)}$  m, em um total de  $16200$  células;
- Quando  $D^*/\Delta x = 10$  o tamanho de célula sugerido para a malha moderada é de  $0,007 \text{ m}$ , sendo os valores de  $\Delta x = 0,007 \text{ (X)}$ ;  $0,007 \text{ (Y)}$ ;  $0,007 \text{ (Z)}$  m, em um total de  $279936$  células;
- Quando  $D^*/\Delta x = 16$  o tamanho de célula sugerido para a malha refinada é de  $0,0044 \text{ m}$ , sendo os valores de  $\Delta x = 0,004 \text{ (X)}$ ;  $0,004 \text{ (Y)}$ ;  $0,004 \text{ (Z)}$  m, em um total de  $1166400$  células.

Segundo Overholdt (2017), a malha do centro, onde está localizada a poça, para ser moderada, deve possuir  $\Delta x$  de  $0,007 \text{ m}$  com um total de  $279236$  células, porém devido a limitações e erros já citados anteriormente, a malha ficou com a melhor célula encontrada com tamanho de  $0,005 \text{ m}$  para X e  $0,01 \text{ m}$  para Y e Z, na malha de centro sobre a poça, e  $0,01$  e  $0,017 \text{ m}$  para as demais malhas.

Foram utilizados computadores com processadores de  $2,8 \text{ GHz}$  e  $8 \text{ GB RAM}$ ,  $3,6 \text{ GHz}$  e  $16 \text{ GB RAM}$  ou  $4 \times 2,4 \text{ GHz}$  e  $32 \text{ GB RAM}$  para o processamento das simulações com velocidades do escoamento de  $0, 2$  e  $4 \text{ m s}^{-1}$  com diesel e os mesmos valores de velocidade com biodiesel.



Wen et al. (2007) demonstra em seu estudo que a utilização de uma malha moderada apresenta ótima concordância de valores com os obtidos de uma malha refinada. Esta concordância representa a proximidade entre os valores numéricos e a diferença apresentada, dependendo do parâmetro, pode ser negligenciada. De fato, o uso de uma malha moderada se faz interessante quando os recursos computacionais são limitados, que é o caso deste trabalho.

Com o uso da análise de sensibilidade foi selecionada para o presente estudo uma malha moderada, que possui uma boa aproximação dos resultados em relação à malha refinada com um custo computacional bem menor.

Foi utilizado o teste de diesel em velocidade do vento nula, pois esta simulação exige um custo computacional menor em relação às simulações com escoamento, devido às iterações necessárias para os cálculos do deslocamento do ar com as velocidades prescritas. Foram simulados 3 segundos de teste e, para a comparação das diferentes malhas, foram utilizados os resultados numéricos para as temperaturas no ponto central da chama e no ponto correspondente ao termopar TP\_50 mm.

Foi feito um ensaio prévio de sensibilidade e chegou-se a um resultado computacional bem próximo para a temperatura média da malha moderada em relação à malha refinada. Conforme pode ser visualizado na Tabela 4.1, a análise de sensibilidade das malhas mostra que os valores das temperaturas no centro da chama (localizada na posição  $x = 0$  mm,  $y = 0$  mm e  $z = 60$  mm, que está no centro do tanque e na altura da borda superior) e no termopar TP\_50mm (que está localizado a 50 mm de distância radial a partir do final da borda superior do tanque) são bem próximos para as simulações moderada e refinada, e bem discrepantes comparados à malha grosseira, que subestima o valor das temperaturas. Contudo, o item determinante para a seleção da malha está no tempo total de simulação, pois a diferença entre as simulações foi superior a 3,6 vezes entre a malha moderada (Teste 4) e refinada (Teste 5) e cerca de 3 vezes entre a melhor malha grosseira (Teste 3) e a malha moderada (Teste 4). Este valor, para uma simulação de poucos segundos, não parece ser significativo, mas são simulados 600 s e o valor apresenta um custo enorme para o número total de horas reais de computação até a obtenção do resultado final.

Devido a esta verificação e à limitação de recursos computacionais disponíveis, foi então definido que seria utilizada uma malha moderada para a região da poça, na malha de centro, e uma malha grosseria para as demais regiões.

Tabela 4.1 – Resumo das medições do teste de sensibilidade de malha nas simulações com velocidade prescrita de  $0 \text{ m s}^{-1}$

| Teste                                      | Teste 1              | Teste 2            | Teste 3             | Teste 4             | Teste 5             |
|--|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>Tipo da Malha</b>                       | Grosseira            | Grosseira          | Grosseira           | Moderada            | Refinada            |
| <b>Malha IJK (x, y, z)</b>                 | 120, 40, 120         | 150, 35, 150       | 180, 40, 180        | 250, 45, 216        | 350, 60, 300        |
| <b>Dimensões (x, y, z) [m]</b>             | 1,75, 0,3, 1,5       | 1,75, 0,3, 1,5     | 1,75, 0,3, 1,5      | 1,75, 0,3, 1,5      | 1,75, 0,3, 1,5      |
| <b><math>\Delta x</math> (x, y, z) [m]</b> | 0,015, 0,0075, 0,012 | 0,012, 0,008, 0,01 | 0,01, 0,0075, 0,008 | 0,007, 0,007, 0,007 | 0,005, 0,005, 0,005 |
| <b><math>D^*/\Delta x</math></b>           | 4,7                  | 5,8                | 7,0                 | 10                  | 14                  |
| <b>Número de Células</b>                   | 576.000              | 787.500            | 1.296.000           | 2.430.000           | 6.300.000           |
| <b>Tempo Total de Simulação [s]</b>        | 2.443                | 310                | 4.604               | 13.600              | 49.667              |
| <b>Tempo por Segundo Simulado [s]</b>      | 814,3                | 103,4              | 1.534,7             | 4.533,3             | 16.555,7            |
| <b>Temperatura TP_50mm [K]</b>             | 301,44               | 301,00             | 301,92              | 302,12              | 301,99              |
| <b>Temperatura da Chama [K]</b>            | 835,45               | 301,00             | 1303,60             | 983,17              | 1000,83             |

Nos testes efetuados para a análise de sensibilidade também foi verificado que, na ocorrência de uma dimensão do volume de controle,  $\Delta x$  em y, maior do que 0,008 m, o programa foi incapaz de resolver o problema, retornando a temperatura ambiente como resposta. Este problema pode ser visualizado no Teste 2 apresentado na Tabela 4.1, onde ambas as temperaturas, da chama e do termopar TP\_50mm, retornaram o valor da temperatura ambiente declarada nas condições iniciais.

Pode ser verificado nos resultados dos testes de sensibilidade que ocorreu uma grande variação nos testes de malha grosseira onde foram encontradas temperaturas de 301, 835,45 e 1303,6 K em um mesmo ponto. A resolução do tamanho de malha tem influência direta nestes resultados, visto que, nos testes de resolução de malha moderada e refinada a diferença foi muito pequena. Essa diferença inaceitável ocorreu em virtude da capacidade de resolução de cada célula cúbica aplicada pelo FDS.

A diferença entre as temperaturas da chama da malha moderada para a refinada foi de aproximadamente 1,77% e a diferença entre as temperaturas do termopar TP\_50mm ficou em aproximadamente 0,05%, o que é condizente com o valor de 5% citado por vários autores, como por exemplo Jangannatha, Chandratilleke e Narayanaswamy (2010).

#### 4.5.2 Análise de Dados de Temperatura

Na Figura 4.3 é possível observar o tipo de perfis de temperatura que são gerados com a simulação. A partir destes perfis foram determinadas as temperaturas da chama e da pluma, onde o FDS cria arquivos com as camadas de análise. Será utilizada a camada em  $Y = 0$ , ou seja, perpendicular ao eixo Y, que coincide com a linha de centro do tanque, da chama e da pluma.

A partir destes arquivos é feita a extração de dados numéricos para a obtenção dos valores médios das temperaturas adimensionais da chama e da pluma, para comparação com os valores obtidos no trabalho experimental.

O FDS possui um pequeno programa incorporado em seus arquivos, desenvolvido em Fortran e chamado `fds2ascii.f90`, que faz a exportação dos valores das camadas gráficas para dados numéricos. Para a exportação, foram determinadas duas áreas de  $90 \times 90$  mm de análise, coincidentes ao *Box 1* e *Box 2*, utilizados na câmera termográfica, para a obtenção dos resultados na mesma região determinada na análise experimental.



Figura 4.3 – Visualização dos perfis de temperatura da chama e da pluma pelo Smokeview

Na Figura 4.4 é possível verificar o modelo da chama e da dispersão da pluma, a partir deste modelo foi feita a análise das características de ângulo de inclinação e altura da chama.

O programa possui um recurso de vídeo criado para visualizar a simulação em tempo real. A partir deste vídeo, que é utilizado no *Smokeview*, é feita a extração de imagens que serão utilizadas na determinação da geometria com o auxílio da rotina em *Matlab*.

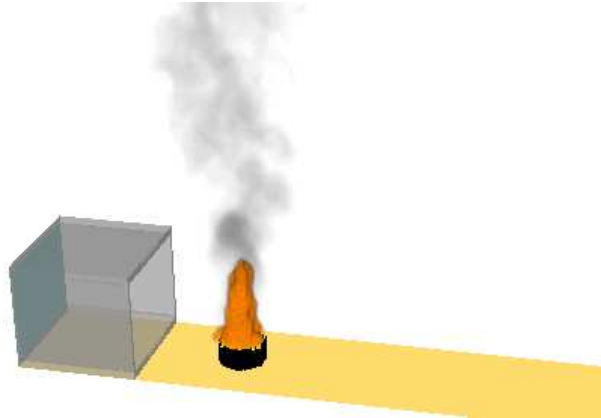


Figura 4.4 – Visualização da chama e da dispersão da pluma no Smokeview

#### 4.5.3 Análise de Dados Geometria

A análise dos dados da geometria dos ensaios numéricos é baseada no mesmo mecanismo utilizado nos ensaios experimentais. Para cada velocidade de teste foram coletados vídeos com 5 min de duração, a partir dos quais foram obtidas as imagens para a determinação dos valores de cada parâmetro (ângulo da chama, comprimento da chama, altura da chama e temperaturas) na criação da análise estatística dos valores médios.

Foram feitos ensaios com 5 min de vídeo, a partir dos quais foram retirados 1 quadro a cada 1 segundo, em um total de 300 imagens. Com as imagens extraídas a partir dos vídeos das simulações foi feita a análise estatística das imagens para a determinação do ângulo, do comprimento e da altura da chama a partir do uso de um algoritmo desenvolvido no programa Matlab, conforme já explicado no capítulo 3.4.1.

#### 4.6 DESENVOLVIMENTO DOS CÓDIGOS FONTE

O FDS funciona através do uso de linhas de comando parametrizadas com variáveis pré-determinadas (disponível na biblioteca de funções do programa) e que devem ser chamadas para que o programa crie as condições de contorno para a simulação. O programa pode ser feito em um bloco de notas e é executado através do terminal de comando do Windows<sup>TM</sup>.

No apêndice A está o programa desenvolvido para a obtenção dos resultados da análise numérica para a simulação da poça com o óleo diesel e no apêndice B, para a simulação da poça com o biodiesel.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os resultados aqui apresentados foram obtidos com uma temperatura ambiente entre 298 e 302 K. Os dados da geometria da chama foram tratados estatisticamente com intervalo de confiança de 95%.

### 5.1 TAXA DE QUEIMA MÁSSICA

Em um resumo geral existe uma concordância entre diversos autores sobre os três principais regimes aos quais uma poça em incêndio pode estar submetida: o regime de condução, controlado pelos efeitos provenientes principalmente da borda da poça, o regime de convecção, controlado pela chama, e o regime de radiação, dominado pela transferência de calor da chama para a superfície do combustível. Além disto, o escoamento de ar sobre poças provoca o aumento da turbulência e afeta a geometria da chama e os mecanismos de transferência de calor (condução, convecção e radiação) na poça em incêndio.

Na Figura 5.1 pode ser visualizada a evolução da chama com o aumento da velocidade no ensaio experimental do diesel. À medida que aumenta a velocidade do vento, inclinação, comprimento e altura da chama se alteram.

Na Figura 5.2 pode ser visualizada a evolução da chama com o aumento da velocidade no ensaio experimental do biodiesel.

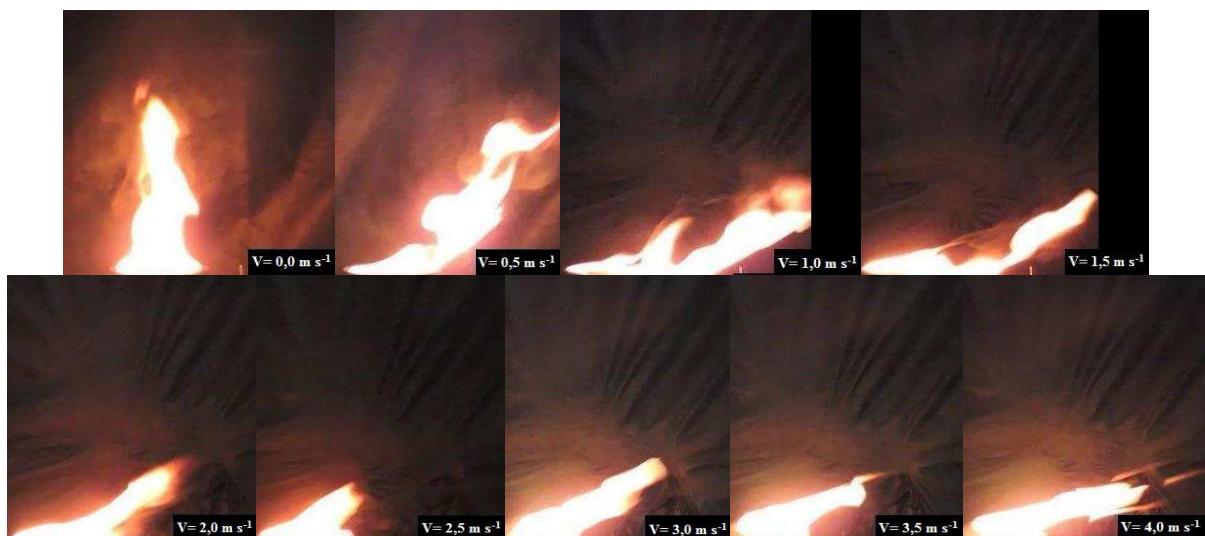


Figura 5.1 – Evolução da geometria da chama com diesel em função do aumento da velocidade do vento

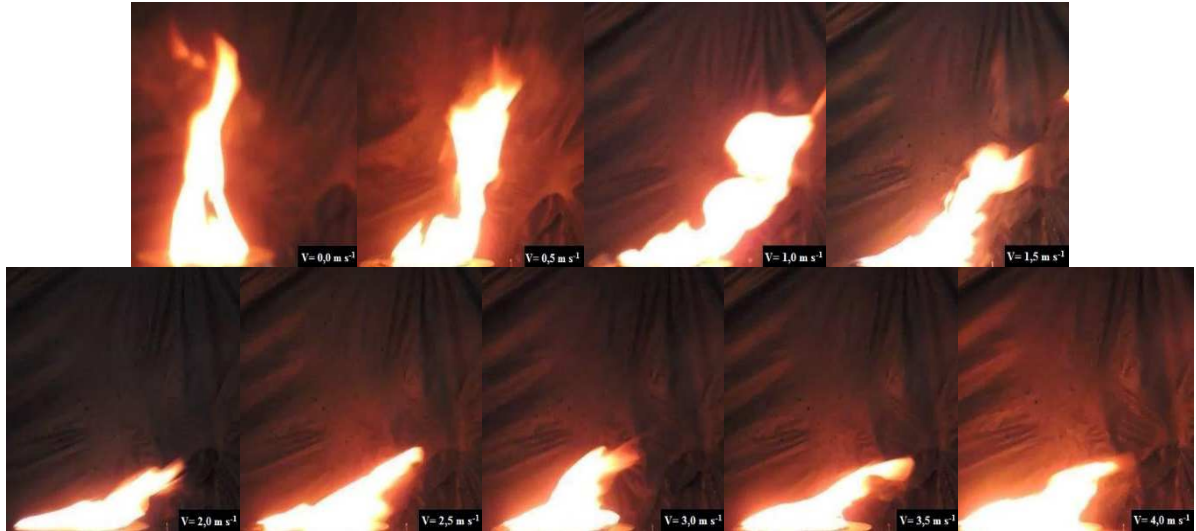


Figura 5.2 – Evolução da geometria da chama com biodiesel em função do aumento da velocidade do vento

É importante explicar que uma poça de incêndio pode possuir diversos modos de queima, que estão diretamente relacionados ao seu diâmetro. A queima em poça pode ser: laminar e convectiva, para diâmetros menores que 0,05 m; pode ser turbulenta e convectiva para diâmetros entre 0,05 e 0,2 m; radiante e visualmente tênue para diâmetros entre 0,2 e 1,0 m; e radiante e visualmente espessa para diâmetros maiores que 1,0 m. (BABRAUSKAS, 1983). Assim, para explicar os dados obtidos para a taxa de queima mássica, é importante explicar que o modo de queima em que a poça no presente trabalho está sujeita é dominado pelos fenômenos de trocas convectivas e turbulentas, conforme o seu diâmetro de construção.

Na Figura 5.3(a) e (b) está um resumo simplificado das trocas térmicas que ocorrem em uma poça, resumido de diversos autores em Truchot, Durussel e Duplantier (2010). Com a inserção de um escoamento de ar ocorrem mudanças nas trocas térmicas e, principalmente, na configuração de ganho e de perda de calor que induz a criação de um gradiente de temperatura dentro do líquido na poça.

Outro fator no processo são as trocas por radiação entre a chama e a superfície do líquido, que mudam a reação da superfície do combustível e a taxa de calor liberada que ocorre entre a face da chama e o ar circundante. Esta iteração altera as trocas convectivas no entorno e auxilia a entrada do ar que é conduzido para o interior da chama até o núcleo, rico em voláteis, logo acima da película líquida de combustível.

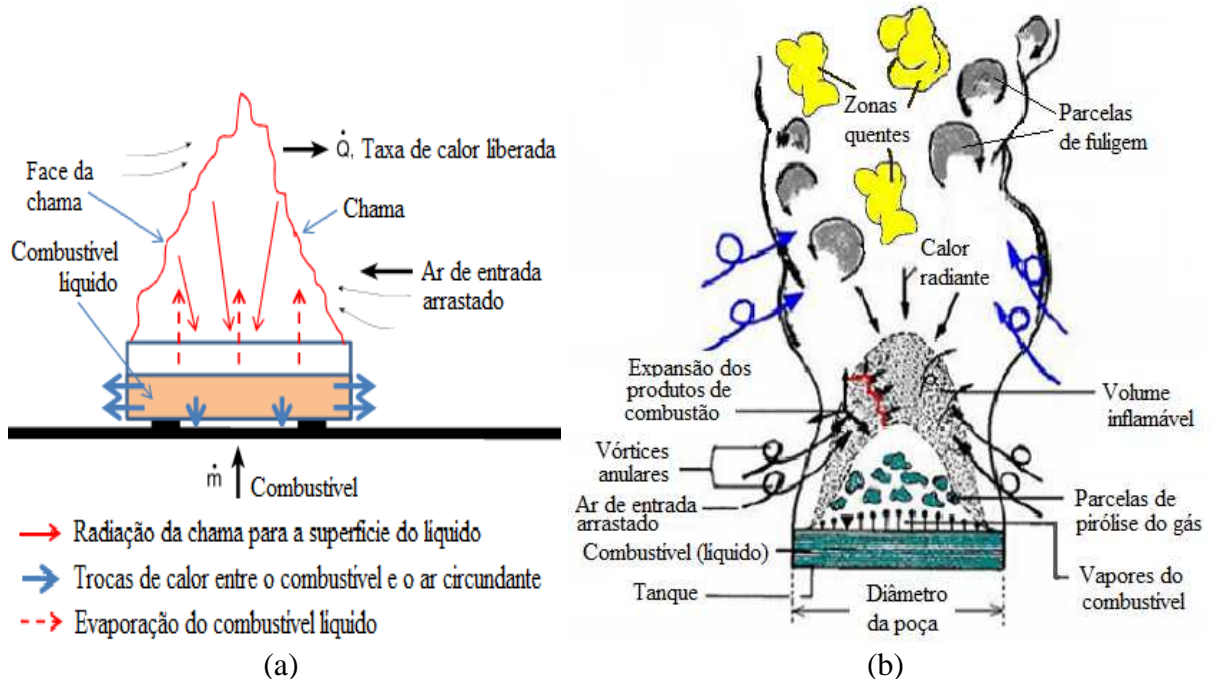


Figura 5.3 – Detalhe das trocas térmicas e esquema das componentes de uma poça de combustível aberta em queima livre

Adaptado de (a) Truchot, Durussel e Duplantier, 2010; (b) Schönbacher et al., 1985.

A Figura 5.4 mostra a taxa de queima mássica dos ensaios experimentais do óleo diesel e do biodiesel. Conforme pode ser observado, o biodiesel tem uma taxa de queima menor que o óleo diesel. A definição do modo de queima diz muito sobre as alterações da curva exposta na figura. As curvas da taxa de queima mássica apresentam uma boa concordância com os ensaios experimentais de diversos autores (Tran et al., 2014; Hu et al., 2011) onde ocorre um aumento da taxa de queima com o aumento da velocidade de escoamento. Cada trabalho utiliza tanques com tamanho e formas distintas, podendo ser cilíndricos, retangulares ou quadrados. Esta diferença de forma e dimensões tem influência nos resultados e no gradiente da curva de taxa de queima mássica.

Hu et al. (2009) utilizam metanol e gasolina, em uma poça quadrada. Há boa aproximação entre a curva do metanol com a do biodiesel do presente trabalho, o que demonstra as possibilidades de comparações para os complexos fenômenos envolvidos em uma queima em poça.

Nos estudos de Tran et al. (2014) é utilizado diesel e biodiesel, em Hu et al. (2011) é utilizado heptano, Jiang e Lu (2013) utilizam combustível de aviação, Hu et al. (2009) utilizam metanol e gasolina, Woods, Fleck e Kostiuk (2006) utilizam metanol e, em todos eles, as curvas de taxa de queima mássica são similares às do presente trabalho, tanto para o diesel como para o biodiesel.

Na poça de óleo diesel, a taxa de queima mássica primeiro aumenta e depois diminui com o aumento da velocidade do ar e, finalmente, aumenta novamente. Através de uma análise da geometria é possível verificar que, no primeiro aumento da taxa de queima mássica, entre as velocidades de 0 a  $1,0 \text{ m s}^{-1}$ , o comprimento da chama possui um alongamento nas velocidades mais baixas.

É possível verificar que, nos ensaios numéricos, a taxa de queima mássica não possui a mesma tendência que aquela apresentada para os dados experimentais, uma vez que, após a velocidade de  $1,0 \text{ m s}^{-1}$ , a taxa de queima permanece decrementando até o final dos ensaios, na velocidade de  $4,0 \text{ m s}^{-1}$ .

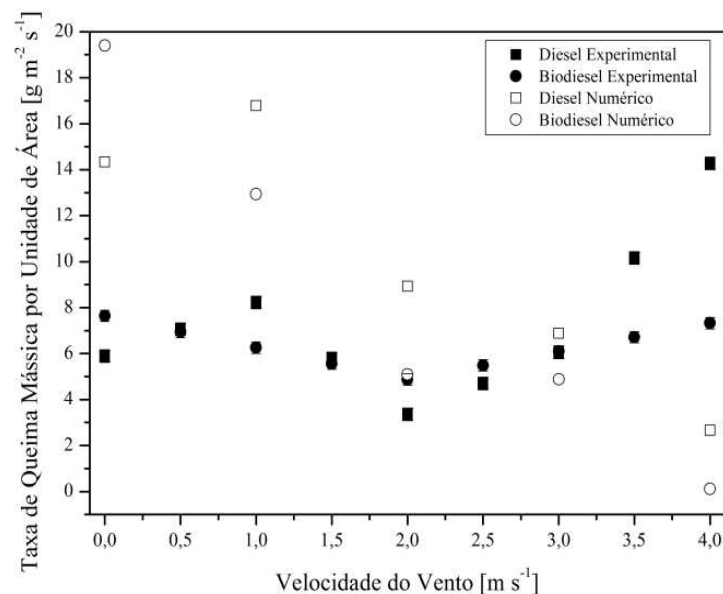


Figura 5.4 – Variação da taxa de queima mássica experimental e simulação versus velocidade do vento

Baseado em Jiang e Lu (2013), uma possibilidade para tal comportamento é porque, nas velocidades mais baixas de escoamento do ar, ocorre um aumento nas tensões de cisalhamento das partículas do fluido na pluma, o que significa que mais vórtices de pequenas escalas podem ser criados localmente na interface entre o ar e o escoamento da pluma devido à interação entre o ar e o escoamento dos gases na pluma, sob o controle do acoplamento entre a flutuabilidade térmica e a dinâmica dos gases. Isto facilita a interação do ar no limite da pluma e estimula a mistura de ar fresco e vapor de combustível e, portanto, a eficiência da combustão. Depois disso, a velocidade do ar continua incrementando e a quantidade de calor radiante que retorna para o combustível líquido na poça é menos significativa devido ao aumento do ângulo da chama. No decremento, as variações da temperatura e da geometria da chama fazem com que a quantidade de calor radiante que retorna para o combustível líquido



decreça rapidamente e o menor valor da taxa de queima mássica é encontrado. No incremento final, o ângulo da chama não aumenta tão rápido com o aumento da velocidade de escoamento do ar, então a geometria da chama altera menos e mais gradualmente. Ao mesmo tempo, o aumento da velocidade de escoamento do ar pode fazer aumentar a evaporação do combustível, assim o vapor do combustível próximo da superfície do líquido é soprado imediatamente para baixo conforme evapora da poça. Isto faz a taxa de queima mássica incrementar novamente conforme a velocidade do escoamento continua aumentando, conduzida pelo aumento de ar e aumento dos voláteis no núcleo da poça com o aumento da temperatura. (JIANG e LU, 2013).

A poça de óleo diesel apresentou um menor valor de taxa de queima mássica na velocidade de  $2 \text{ m s}^{-1}$ , e a maior taxa foi apresentada na velocidade de  $4 \text{ m s}^{-1}$ , mostrando uma diferença entre os valores, da maior e da menor taxa, de mais de 4 vezes.

O comportamento da combustão em poças com escoamento incidente é principalmente dominado pela flutuabilidade térmica, dinâmica dos gases e pelo cisalhamento do escoamento de ar horizontal. É possível deduzir pelas observações dos ensaios que o processo de variação da taxa de queima mássica possui forte relação com a entrada de ar, a mistura de ar fresco com o vapor do combustível, a temperatura da chama e a variação do ângulo de inclinação da chama.

Levando em conta as observações em Hu et al. (2009), uma hipótese plausível é que, com o incremento da velocidade do escoamento de ar, o tamanho dos vórtices da chama turbulenta foi reduzido. Isto aumenta a intensidade da combustão e também a temperatura da chama, o que leva a um maior fluxo de radiação da chama para o combustível. Quando a velocidade do escoamento de ar é alta, a chama também irá cobrir e aquecer fortemente a borda da poça no lado oposto ao lado do qual sopra o vento e irá estimular a transferência de calor convectiva entre a borda e o combustível. Então desta forma a taxa de queima mássica será levada a um aumento. Mas, em compensação, o escoamento de ar frio irá, simultaneamente, resfriar a superfície do combustível e a borda da poça atacada pelo vento. Este efeito de resfriamento irá aumentar com o aumento da velocidade do escoamento de ar.

Uma possibilidade para tal comportamento é que a borda da poça e a superfície do combustível foram principalmente resfriadas por convecção pelo escoamento de ar, que levou ao decréscimo da quantidade do calor recebido pelo combustível. Porém, quando a velocidade do escoamento de ar é relativamente alta, a radiação tem uma contribuição considerável porque a chama é turbulenta e o aquecimento da borda da poça pela chama defletida sobre ela também tem grande contribuição para o aumento do calor recebido pelo combustível. Então a

taxa de queima mássica do biodiesel primeiramente decrementa e então incrementa com o aumento da velocidade do escoamento de ar. (HU et al., 2009).

A tendência diferente na resposta da taxa de queima mássica entre o óleo diesel e o biodiesel pode ser devido a seus diferentes mecanismos de controle de transferência de calor da chama para o combustível, mas as propriedades do biodiesel, como temperatura de evaporação e temperatura de ignição, devem ser levadas em conta. Como estas temperaturas são mais altas do que as do diesel, fica evidente que o resfriamento provocado pelo escoamento de ar terá um efeito diferente.

Pode-se também observar que, na poça de biodiesel, em baixas velocidades do escoamento de ar, a transferência de calor da chama para a superfície do combustível é predominantemente convectiva. Neste caso ocorre a angulação da chama, mas não o suficiente para cobrir a borda da poça.

A tendência de redução da taxa de queima mássica do metanol e do n-heptano com o incremento da velocidade do escoamento de ar incidente, encontrado por Hu et al. (2009) e Roh et al. (2007), com faixas de velocidade de escoamento do ar de 0 a  $1,68 \text{ m s}^{-1}$  e 0 a  $3,5 \text{ m s}^{-1}$ , respectivamente, está de acordo com o que foi encontrado neste estudo.

Contudo, a transferência de calor convectiva da borda da poça para o combustível é a parcela dominante, ao invés daquela que provém diretamente da chama por convecção e radiação. Quando a chama é defletida pelo escoamento do ar, a borda da poça é fortemente aquecida pela chama com exceção da borda que recebe o ataque do vento. Este efeito é aprimorado mais ainda quando ocorre uma grande inclinação da chama com maiores velocidades do escoamento de ar. Então, a taxa de queima mássica para a poça de biodiesel, incrementa de forma constante com o aumento da velocidade do escoamento de ar, como revelam os experimentos, mas de forma menos acentuada em relação à poça de óleo diesel.

A taxa de queima mássica da poça de biodiesel, em comparação à poça de óleo diesel, caiu um pouco mais vagarosamente em velocidades menores, na faixa de 0 a  $2 \text{ m s}^{-1}$ , e incrementou relativamente um pouco mais devagar em velocidades mais altas do escoamento de ar, na faixa de 2 a  $4 \text{ m s}^{-1}$ . A taxa de queima mássica foi menor quando a velocidade do escoamento cruzado de ar foi de  $2 \text{ m s}^{-1}$  e a maior taxa foi apresentada na velocidade de  $0 \text{ m s}^{-1}$ , sendo que a razão entre a maior e a menor taxa de queima mássica foi de aproximadamente 60%, valores bem menores do que os encontrados nos ensaios com o óleo diesel.

Por último, e não menos importante, observa-se que a diferença das temperaturas de ebulição do biodiesel e do óleo diesel tem influência sobre a diferença nas curvas da taxa de

queima mássica, uma vez que o biodiesel, por necessitar de uma temperatura maior para a evaporação, mesmo com temperaturas maiores de combustão, possui uma dificuldade maior em vaporizar os voláteis e assim o efeito do resfriamento da superfície do combustível influencia na elevação mais suave da taxa de queima com o aumento da velocidade de escoamento do ar.

A Figura 5.5(a) e (b) mostra o consumo de massa de combustível em função do tempo para o diesel e biodiesel, respectivamente. As curvas de consumo apresentam boa concordância com Tang et al. (2015), Woods, Fleck e Kostiuk (2006), Jiang e Lu (2013) e Hu et al. (2016). Conforme o tempo evolui, a quantidade de massa consumida aumenta linearmente. Nas curvas do óleo diesel, Figura 5.5(a), fica evidente o maior consumo de combustível para a velocidade de  $4 \text{ m s}^{-1}$ , que foi a maior taxa de queima mássica apresentada entre todos os ensaios.

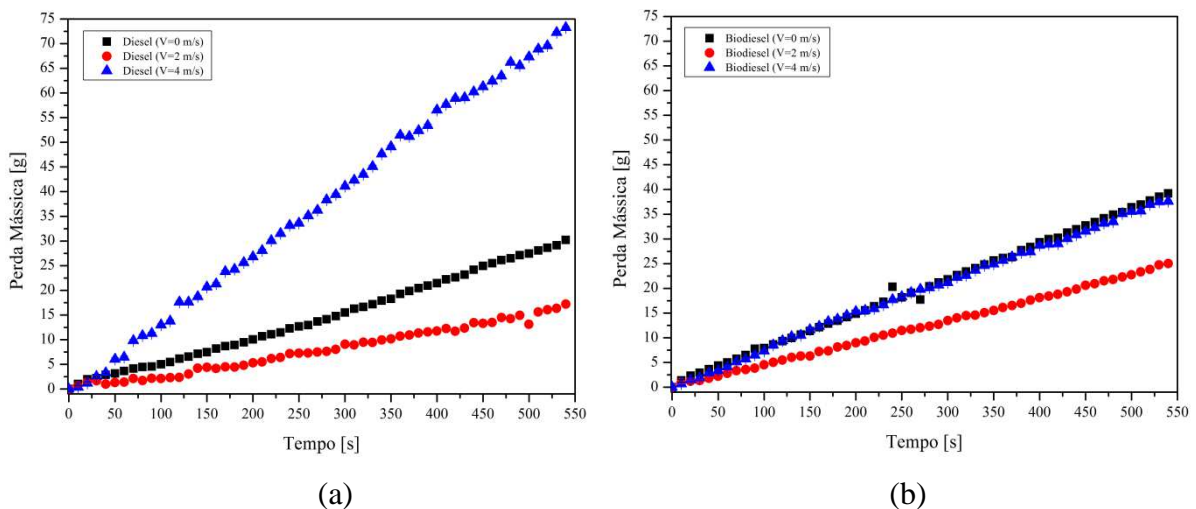


Figura 5.5 – Variação da perda de massa em função do tempo: (a) ensaios experimentais diesel e (b) ensaios experimentais biodiesel

Na Figura 5.5(b) as curvas do biodiesel mostram a pequena diferença comentada anteriormente entre as velocidades de  $0$  e  $4 \text{ m s}^{-1}$ , a proximidade das duas indica que os valores médios da taxa de queima mássica são evidentemente semelhantes também. A taxa de queima mássica para a maior velocidade do escoamento de ar do biodiesel é cerca de 4,1% mais elevada do que a taxa na menor velocidade de ar. Para o diesel esta elevação foi de 142,3%.

## 5.2 ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DA CHAMA

Na Figura 5.6 é mostrada a variação do ângulo de inclinação da chama em função da velocidade do vento, para as medições experimentais e simulação, para ambos os combustíveis, diesel e biodiesel. O aumento dos valores, observado na figura, significa que a chama e, conseqüentemente, a pluma se inclinam em direção ao plano horizontal, ou em direção ao solo, com o aumento da velocidade do vento.

Os valores do ângulo obtidos na análise numérica se mostraram maiores do que aqueles encontrados na análise experimental. Uma parte deste comportamento pode ser atribuído à construção do vento, uma vez que as simulações numéricas foram feitas com um perfil de velocidades constante na entrada do domínio no FDS, e no caso dos ensaios experimentais o valor médio das medições foi determinado com base na velocidade média do túnel. É importante salientar que a medição das velocidades médias do túnel mostrou que não existem significativas variações na velocidade, contudo, como o escoamento é turbulento, certamente existem flutuações, porém não foi possível a determinação destas flutuações com a instrumentação utilizada. Assim como foi visto que o escoamento do ar no túnel é em regime turbulento, as flutuações possivelmente contribuem para a diferenciação do ângulo entre os ensaios experimentais e numéricos. No caso dos ensaios numéricos, há variações do ângulo impostas pelas flutuações da própria combustão, mas, em geral, são menores do que aquelas que ocorrem na situação experimental, o que pode sinalizar uma debilidade do modelo de combustão aplicado ao FDS, onde foi utilizada a mistura de gases simples para o balanço químico.

Os valores experimentais encontrados neste estudo são similares aos encontrados na literatura, e. g., Lam e Weckman (2015a), Lautkatis (1992), Hu et al. (2013), Tang et al. (2015), Chen, Song e Lv (2012) e Hu et al. (2016). Estes autores conduziram experimentos com diversos tamanhos de poças e variados tipos de combustíveis e seus resultados experimentais concordam com os valores dos ensaios apresentados no presente trabalho. É possível observar que a curva para o biodiesel se comportou de forma mais próxima aos trabalhos dos autores mencionados anteriormente do que o diesel. A curva do diesel apresentou um declínio a partir do teste com velocidade de  $1,5 \text{ m s}^{-1}$  sendo que o ângulo voltou a crescer a partir da velocidade de  $3 \text{ m s}^{-1}$ . Uma possibilidade para tal comportamento pode estar associada ao aumento da temperatura da combustão, que provocou um aquecimento do ar circundante, fazendo com que a chama fosse novamente empurrada para cima devido às correntes ascendentes de ar quente.

Este último fenômeno mencionado não é observado nos trabalhos de Lam e Weckman (2015a), Hu et al. (2013), Tang et al. (2015), Chen, Song e Lv (2012) e Hu et al. (2016) já que em geral a superfície da poça em teste se encontrava alinhada ao solo. Já no caso de Lautkatis (1992), que observou o incêndio em grandes proporções de um tanque real, algo semelhante ocorreu.

Por fim, nos resultados das simulações, provavelmente um aumento de complexidade dos modelos e das malhas poderia levar a resultados melhores, entretanto para tal teríamos uma exigência computacional indisponível para o presente trabalho.

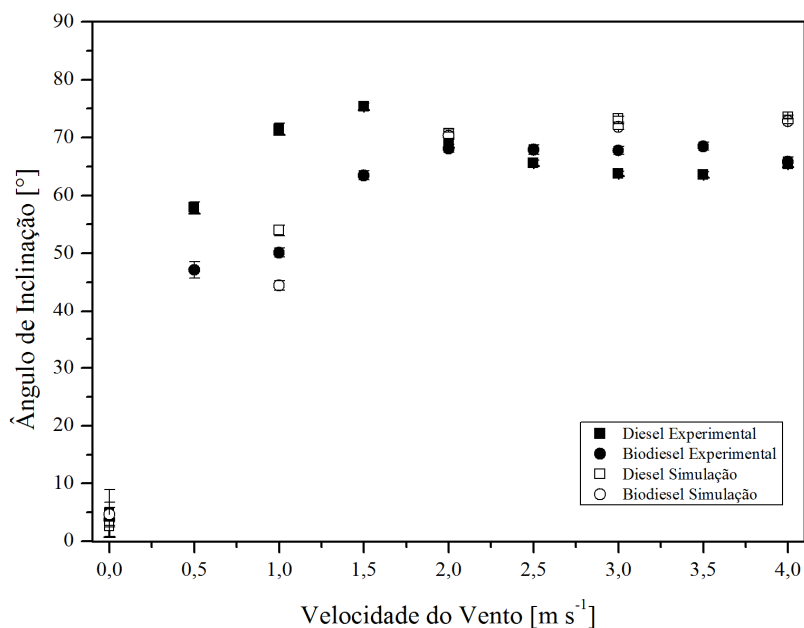


Figura 5.6 – Variação do ângulo de inclinação da chama experimental e simulação versus velocidade do vento

Ainda na Figura 5.6 pode ser observado que, na situação com escoamento nulo, o valor obtido para o ângulo na simulação é mais próximo de zero. Apesar desta diferença com o resultado experimental, este resultado se aproxima mais da literatura e também das correlações semi-empíricas que mostram que, em uma condição sem o vento incidente sobre a poça, o valor do ângulo deve ser zero. Outro dado interessante apresentado é a pequena diferença dos resultados das simulações entre os dois combustíveis que foi de aproximadamente 1,5% sobre o menor valor, obtido para o biodiesel. A diferença entre os dados experimentais e numéricos ficou em aproximadamente 18% sobre o menor valor, ou seja, o resultado de  $2,5 m s^{-1}$  para os casos acima de  $2,0 m s^{-1}$ , para o diesel e biodiesel, e em aproximadamente 50% sobre o maior valor para o caso do diesel em  $1,0 m s^{-1}$ .

Na Figura 5.7 são mostradas as variações do ângulo de inclinação da chama para a poça de diesel nos experimentos e correlações semi-empíricas em função da velocidade do vento.

Os resultados experimentais apresentam melhor concordância com a correlação da Eq. (2.8) para velocidades de até  $1,5 \text{ m s}^{-1}$ . Já para as velocidades entre  $2,0$  a  $4,0 \text{ m s}^{-1}$  as Eq. (2.5), (2.6) e (2.7) se mostraram muito próximas dos valores encontrados experimentalmente. As correlações apresentam uma curva ascendente em relação ao crescimento do ângulo de inclinação, pois dependem basicamente da taxa de queima mássica.

Mesmo com parâmetros experimentais bem diferentes entre si, variando dimensões de poças, faixas de velocidades de teste e combustíveis, é possível perceber que o perfil de inclinação das curvas se mantém semelhante para todas as correlações semi-empíricas.

Na Figura 5.7(b) é possível verificar que as curvas das correlações das Eq. (2.5), (2.6) e (2.7) ficaram com uma aproximação muito boa aos valores experimentais encontrados para o biodiesel. A Eq. (2.8), para os valores de até  $1,5 \text{ m s}^{-1}$ , com diesel, mostrou diferenças abaixo de 5,0%. A Eq. (2.7), nos valores entre  $2,5$  e  $4 \text{ m s}^{-1}$ , demonstra valores extremamente próximos dos valores experimentais tanto para o diesel quanto para o biodiesel. Esta equação foi ensaiada com diesel e gasolina como combustível em velocidades entre  $0$  e  $2,3 \text{ m s}^{-1}$ . Isto mostra que os valores são coerentes com valores empíricos observados por outros estudos e denota que o combustível tem mais influência nos fatores das correlações semi-empíricas do que propriamente o valor das velocidades do vento sobre a poça.

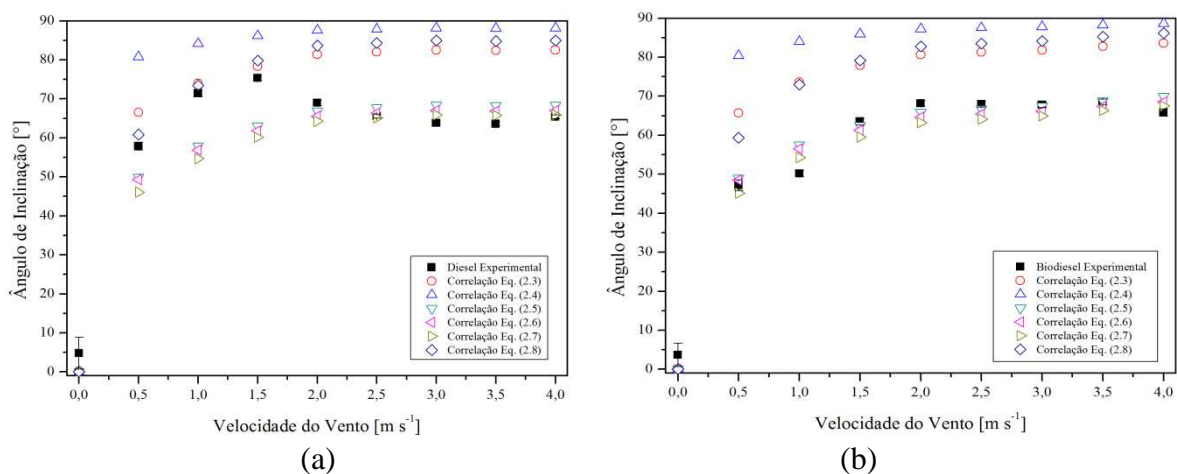


Figura 5.7 – Variação do ângulo de inclinação da chama: (a) correlações semi-empíricas e diesel experimental versus a velocidade do vento e (b) correlações semi-empíricas e biodiesel experimental versus a velocidade do vento

Também é possível verificar que o diâmetro da poça não tem uma influência direta nos valores, uma vez que foram utilizados diâmetros entre 1,5 e 6 m na determinação da correlação da Eq. (2.7), entre 14 e 55 vezes maior do que o tanque utilizado neste trabalho, mas mesmo assim a diferença ficou com valores abaixo de 5,8 e 6,2% sobre o menor valor, para o diesel e biodiesel, respectivamente.

O mesmo ocorre com Lam e Weckman (2015a), Hu et al. (2013) e Lautkatis (1992) que se utilizam de comparações com as mais diversas correlações, de variados modelos e autores, onde a predição dos valores tem boa concordância entre experimentos e correlações dependendo do caso aplicado; combustível, diâmetro da poça e velocidades do vento.

Os resultados experimentais apresentaram melhor concordância com as correlações para velocidades maiores. Aqui, vale lembrar que a influência dos combustíveis está apresentada na parcela de  $m''$  que é utilizada nos cálculos das correlações.

Nas Figuras D1 e D2 do apêndice D estão apresentadas, para o diesel e para o biodiesel, as curvas do ângulo de inclinação da chama obtidas com as correlações semi-empíricas para todas as velocidades ensaiadas.

### 5.3 COMPRIMENTO DA CHAMA

Na Figura 5.8 são mostradas as variações do comprimento da chama em função da velocidade do vento, para as medições experimentais e simulações, respectivamente, para as poças de diesel e biodiesel.

Pode ser observado que, conforme ocorre o aumento da velocidade do vento, o comprimento da chama diminui. Esse comportamento nos experimentos para as poças deste trabalho não foi semelhante aos trabalhos de Hu et al. (2013), Tang et al. (2015), Chen, Song e Lv (2012), Hu et al. (2016) e Lautkatis (1992) onde o comprimento característico da chama aumentou em função da velocidade do vento.

Já em Lam e Weckman (2015a) apresenta-se uma concordância para as velocidades ensaiadas, uma vez que, no trabalho mencionado, a velocidade máxima chegou a  $10 \text{ m s}^{-1}$  e entre 0 e  $7 \text{ m s}^{-1}$  a tendência dos resultados é similar aos deste trabalho.

Conforme análises dos experimentos o dado mais relevante que pode ser observado é a retração da chama devido a uma possível redução da concentração de voláteis pelo resfriamento do tanque e conseqüentemente do líquido. O tamanho da chama é impactado pelo tamanho da poça e possivelmente pela área de contato do vento sobre a mesma. Lautkatis (1992) fez observações em um tanque de tamanho real com mais de 52 m de diâmetro, Lam e

Weckman (2015a) fizeram experimentos em uma poça com 2 m, Hu et al. (2016) utilizaram diâmetros de 1,5, 3 e 4 m, Chen, Song e Lv (2012) utilizam uma poça com 80 m, Tang et al. (2015) utilizou poças retangulares de 0,205x0,205 até 0,579x0,072 m, e em todos os trabalhos o comprimento da chama aumentou com o aumento da velocidade do vento. Nos trabalhos citados foram utilizados isohexano ( $0,65 \text{ g cm}^{-3}$ ), Jet A ( $0,8086 \text{ g cm}^{-3}$ ), heptano ( $0,68 \text{ g cm}^{-3}$ ), óleo cru ( $0,89 \text{ g cm}^{-3}$ ) e acetona ( $0,7845 \text{ g cm}^{-3}$ ), respectivamente, como combustíveis de estudo.

Os valores de massa específica têm influência direta sobre o valor de volatilidade do combustível e uma hipótese plausível é que o tamanho da poça pode ter contribuído para que a quantidade de ar sobre a poça carregasse os voláteis antes de ocorrer a combustão, fazendo com que apenas a camada mais superficial da poça mantenha a queima ativa. Isso quer dizer que o incêndio ficaria cada vez mais próximo da poça até a sua extinção. O aumento da quantidade de ar, conforme aumentou a velocidade do vento, fez com que ocorresse um resfriamento na vizinhança do tanque, contribuindo também para esta redução do comprimento.

À medida que aumenta a vazão de ar na vizinhança da poça, ocorre um resfriamento do entorno e também da própria película de combustível, esta troca de calor entre o tanque e a poça com o ar circundante possivelmente foi responsável pela redução da quantidade de voláteis, propiciando assim a retração do comprimento da chama. Porém a chama obteve uma melhoria, uma vez que sua temperatura aumentou com o incremento da velocidade do escoamento de ar sobre a poça, pode-se então dizer que a combustão teve uma melhora com a entrada de mais ar no núcleo rico em voláteis, com a ocorrência de mais turbulência e de mais misturas.

Nos trabalhos de Tang et. al (2015) foi utilizado um tanque retangular de aço inoxidável com 3 mm de espessura e 15 mm de altura rente ao solo, em Lam e Weckman (2015a) um tanque cilíndrico de aço inoxidável de 4 mm de espessura colocado sob a linha do solo, em Hu et al. (2013) um tanque de aço inoxidável de 2,6 mm de espessura colocado sob a linha do solo, todos eles dificultam a troca de calor entre o vento incidente e a película de combustível no tanque, isso denota que esta condição possivelmente está tendo influência no resultado. No presente trabalho, sendo o tanque posicionado acima do solo, a troca térmica com o ambiente é favorecida, fazendo com que a volatilização do combustível seja menor e, conseqüentemente, a taxa de consumo de combustível também. Esta condição, associada ao maior aporte de ar, faz com que o comprimento da chama fique menor, retraindo a chama para mais próximo da película de combustível.



Nos resultados das simulações, o comprimento, para o diesel, se mostrou maior do que nos resultados experimentais até a velocidade de  $2,0 \text{ m s}^{-1}$ , acima deste valor ocorreu uma redução mais acentuada com uma diferença de 76% menor em relação ao experimento. Nos resultados numéricos do biodiesel, ocorreu sempre uma redução dos valores apresentados em relação aos resultados experimentais, com uma redução média de cerca de 142%. Novamente o modelo de resolução da combustão e o escoamento de ar imposto sobre a chama podem ter gerado estas diferenças maiores. Na resolução do programa foi verificado que ocorreu uma tendência, ao longo do tempo de simulação, para a extinção da chama. Isto pode ser atribuído ao modelo de equilíbrio químico informado ao programa, que não foi capaz de sustentar a combustão da mesma forma que ocorreu nos experimentos.

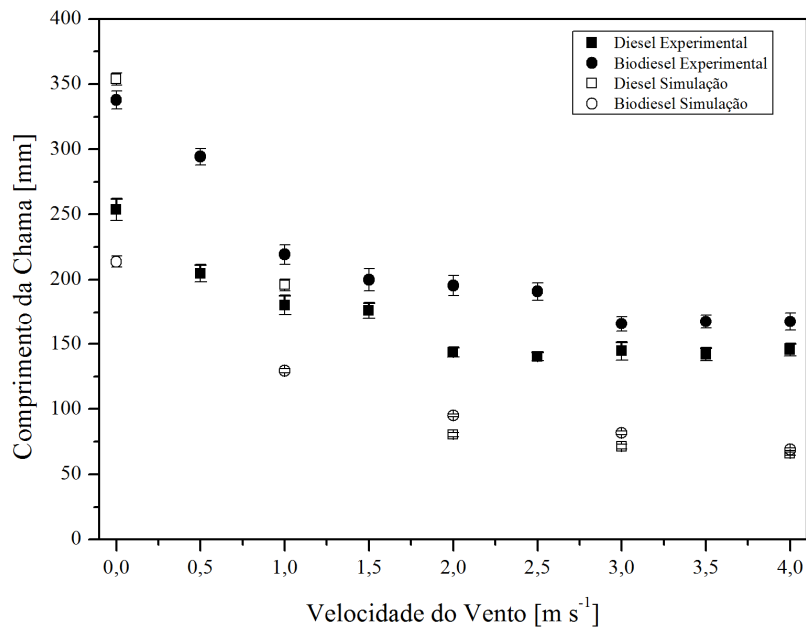


Figura 5.8 – Variação do comprimento da chama experimental e simulação versus velocidade do vento

Para o diesel, mesmo com valores cerca de 43% maiores do que os resultados numéricos para o mesmo combustível nas baixas velocidades e 80% menores para velocidades acima de  $2 \text{ m s}^{-1}$ , os resultados ainda foram coerentes, com a tendência de redução do comprimento em função do aumento da velocidade do escoamento. Porém, o comprimento inicial da chama do biodiesel foi inferior ao do óleo diesel diferindo entre simulação e experimental. Os valores das simulações, a partir de  $2,0 \text{ m s}^{-1}$  mostraram uma diferença dos resultados experimentais e numéricos menor do que 1% destes últimos. Isso pode demonstrar que as aproximações feitas pelo programa, para os dois combustíveis foi

semelhante, e o seu modelo de resolução não foi capaz de gerar diferenças significativas para os dois combustíveis.

Na Figura 5.9(a) é mostrada a variação do comprimento da chama para a poça de diesel nos experimentos e correlações semi-empíricas em função da velocidade do vento. É possível verificar que as correlações das Eq. (2.20) e (2.21) têm boa concordância com os resultados experimentais, mesmo considerando que, conforme mencionado anteriormente, os dados experimentais se mostraram discordantes em relação ao apresentado por outros autores mencionados.

Como as correlações se utilizam basicamente dos valores de taxa de queima mássica do combustível e diâmetro da poça, a curva característica fica semelhante à curva dos valores experimentais. A Eq. (2.21) foi obtida com diesel e gasolina em tanque cilíndrico e é a mais coerente e concordante com os dados experimentais.

A maior diferença, para o diesel, ficou na velocidade de  $0,5 \text{ m s}^{-1}$  onde foi encontrado um valor mais elevado, de 17,5%, entre os valores, experimental e da correlação Eq. (2.21), e para as demais medidas de velocidades, na mesma correlação, os valores ficaram com diferenças todas abaixo de 13,7%.

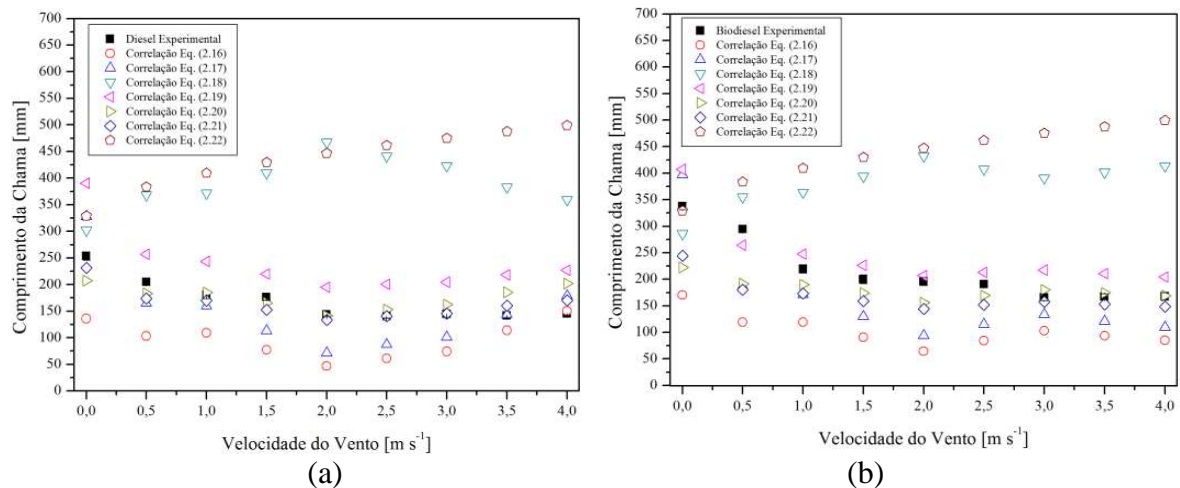


Figura 5.9 – Variação do comprimento da chama: (a) correlações semi-empíricas e diesel experimental versus a velocidade do vento e (b) correlações semi-empíricas e biodiesel experimental versus a velocidade do vento

Na Figura 5.9(b) é possível verificar as curvas para o biodiesel, nas quais a concordância foi maior com as curvas da Eq. (2.19), embora as diferenças tenham sido mais acentuadas do que para o diesel. Na velocidade de  $0 \text{ m s}^{-1}$  foi verificado um valor de 17% maior entre os dados, experimental e da correlação Eq. (2.19). Nas velocidades entre

0,5 e 2,5 m s<sup>-1</sup> os valores destas mesmas curvas foram inferiores a 11,8% e entre 3,0 e 4,0 m s<sup>-1</sup> as diferenças foram inferiores a 23,8%.

O comprimento da chama do biodiesel se mostrou em geral maior do que a apresentada pelo diesel. Uma hipótese adequada para explicar este resultado baseia-se na presença de O<sub>2</sub> na fórmula do biodiesel, que ajuda a aumentar a temperatura da chama, com um maior excesso de oxidante, ajudando na volatilização do combustível e por consequência carregando a chama para uma distância maior, ajudada pelos gases quentes da combustão.

Ainda na Figura 5.9(a) e (b) podemos observar que o comportamento dos valores experimentais obtidos neste trabalho é coerente com a maior parte das correlações, isso está associado ao fato de que as correlações são diretamente proporcionais à taxa de queima mássica, então desta forma sua concordância se explica pela própria utilização dos valores de queima mássica experimental nas equações das correlações semi-empíricas, que contribui para o comportamento da redução do comprimento, em função do aumento do escoamento de ar ser o mesmo.

A correlação da Eq. (2.22) foi a única que apresentou resultados que seguem a tendência de crescimento do comprimento da chama com o aumento da velocidade do escoamento, e está de acordo com os demais autores citados anteriormente. Esta equação é a única que utiliza o número de Froude para a sua determinação. Como o número de Froude depende apenas da velocidade e do diâmetro da poça, sendo a poça de diâmetro fixo, o valor então é plausível com esta tendência.

É importante fazer um adendo aqui, já que o motivo para tal fenômeno pode ser atribuído à baixa quantidade de movimento da chama em relação à quantidade de movimento do escoamento incidente, uma vez que é um incêndio conduzido essencialmente pelo fluatibilidade (empuxo). De acordo com outros estudos como (Mudan, 1984; Raj, 2010; Lautkaski, 1992; Tang et al., 2015) o comprimento da chama deveria aumentar com o aumento da velocidade porque ela é, de certa forma, “esticada” pelo escoamento de ar, mas isto não foi verificado no presente trabalho (somente para velocidades baixas, até 0,5 m/s, a chama se alongou, posteriormente ocorreu o encurtamento com o aumento da velocidade). Já de acordo com Lam e Weckman (2015a) o comportamento do comprimento da chama obteve uma tendência semelhante, até as velocidades de 7 m s<sup>-1</sup>, que foram utilizadas no citado trabalho.

É importante ressaltar que diferentes tipos de ensaios com características bem distintas (diâmetros, combustíveis, velocidades ensaiadas), podem apresentar geometrias bem variadas, sendo semelhantes ou muito discrepantes, isso corrobora com as explicações apresentadas

onde os mecanismos de trocas, a dinâmica dos gases e as características químico-físicas de cada combustível em queima em poça podem dar resultados inesperados para cada evento sob teste, o que só reforça mais a necessidade de estudos sobre este fenômeno que pode ser comum em complexos industriais petroquímicos.

Na Figura D3 do apêndice D é possível verificar as curvas do comprimento da chama para as correlações semi-empíricas para todas as velocidades ensaiadas para a observação de cada correlação em função da velocidade para o óleo diesel e na Figura D4 estão as curvas para o biodiesel.

#### 5.4 ALTURA DA CHAMA

Na Figura 5.10 são mostradas as variações da altura da chama em função da velocidade do vento, para as medições experimentais e simulações tanto para as poças de diesel como para biodiesel.

A altura da chama em geral não é um parâmetro observado nos estudos, Lam e Weckman (2015a), Hu et al. (2013) e Lautkatis (1992) desconsideraram este parâmetro da geometria em seus testes. Tang et al. (2015) e Chen, Song e Lv (2012) determinam a altura da chama em seus trabalhos. Devido ao fato de não ser unanimidade entre os pesquisadores foram incluídos no presente trabalho os dados relativos a este parâmetro para uma análise mais completa da geometria da chama.

De acordo com Tang et al. (2015) e Chen, Song e Lv (2012), os valores da altura da chama diminuem com o aumento da velocidade sobre a poça. Esta característica ficou de pleno acordo com os valores encontrados no experimento e simulação, conforme pode ser visto na Figura 5.10. Os valores para o biodiesel se mostraram mais constantes do que o diesel, que teve sua menor altura na velocidade de  $1,5 \text{ m s}^{-1}$ . Após esta velocidade a chama voltou a crescer de maneira discreta. Este comportamento pode ser explicado pelos mesmos fatores que levaram a uma leve mudança no ângulo conforme descrito anteriormente. Os valores da análise numérica se mostraram maiores do que aqueles encontrados na análise experimental.

É interessante notar que o gradiente de redução da altura da chama é mais acentuado do que o gradiente de comprimento, i.e., o ângulo de inclinação da chama aumenta mais rapidamente do que a redução do seu comprimento.

A diferença entre os valores encontrados na simulação e os experimentais ficou em cerca de 104% e 85% mais elevado para as velocidades de 0 e  $1 \text{ m s}^{-1}$ , respectivamente, para o

diesel. Para os valores experimentais versus simulados para as velocidades de  $2 \text{ m s}^{-1}$  a  $4 \text{ m s}^{-1}$  para o diesel, as diferenças encontradas nas simulações foram de cerca de 48% menores que os valores experimentais.

Para o biodiesel, as diferenças encontradas nas velocidades de  $1$  a  $3 \text{ m s}^{-1}$  para os valores, experimentais versus simulados, foram de cerca de 50% inferiores aos experimentais. As velocidades de  $0$  e  $4 \text{ m s}^{-1}$ , respectivamente, apresentaram diferenças de 81% e 28% inferiores aos dados experimentais. Esta diferença foi determinada, obviamente, pelas diferenças de comprimento e ângulo de inclinação da chama. Como o ângulo se mostrou maior e o comprimento menor, a altura da chama foi conduzida a uma maior proximidade da poça, ficando menor em relação aos resultados experimentais.

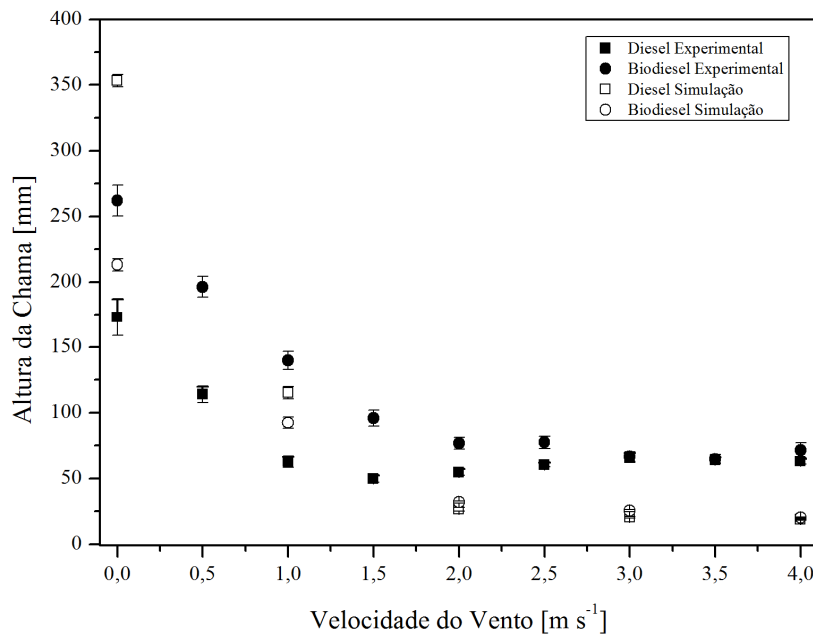


Figura 5.10 – Variação da altura da chama experimental e simulação versus velocidade do vento

Não foram encontradas, na literatura, correlações semi-empíricas próprias para a altura da chama, devido a isso não foi feita uma análise comparativa com os dados experimentais e correlações. Foi feita uma tentativa de ajuste através de relações trigonométricas que se mostrou pouco confiável e não será apresentada no trabalho.

## 5.5 TEMPERATURA NA REGIÃO DA CHAMA

A Figura 5.11 mostra as medições da temperatura adimensional ( $T^*$ ) da chama e da pluma através da termografia, e na Figura 5.12 são apresentados os campos de temperatura

adimensional ( $T^*$ ) obtidos com o FDS para comparação. A diferença principal é que o programa não possui a uma opção de colocação das caixas de medição (*Box 1* e *2*), então este dado é obtido através da exportação do plano de medição pelo programa adicional incorporado ao programa, *fds2ascii*, que faz a tradução do plano de medição para dados numéricos.

Na Figura 5.11, é possível observar a variação da posição das caixas de medição de acordo com o avanço da velocidade do vento. O *Box 1* foi movido ao longo dos testes para manter o afastamento de aproximadamente 30 mm da ponta da chama e fazer a medição da temperatura da pluma.

Cada caixa obtém as medidas máximas e mínimas de temperatura para a sua posição e os dados são tratados para obtenção dos valores médios conforme mostrado na Figura 5.13, para a temperatura da chama, e na Figura 5.14 para a temperatura da pluma, e identificadas, respectivamente, pelo *Box 2* e *Box 1*.

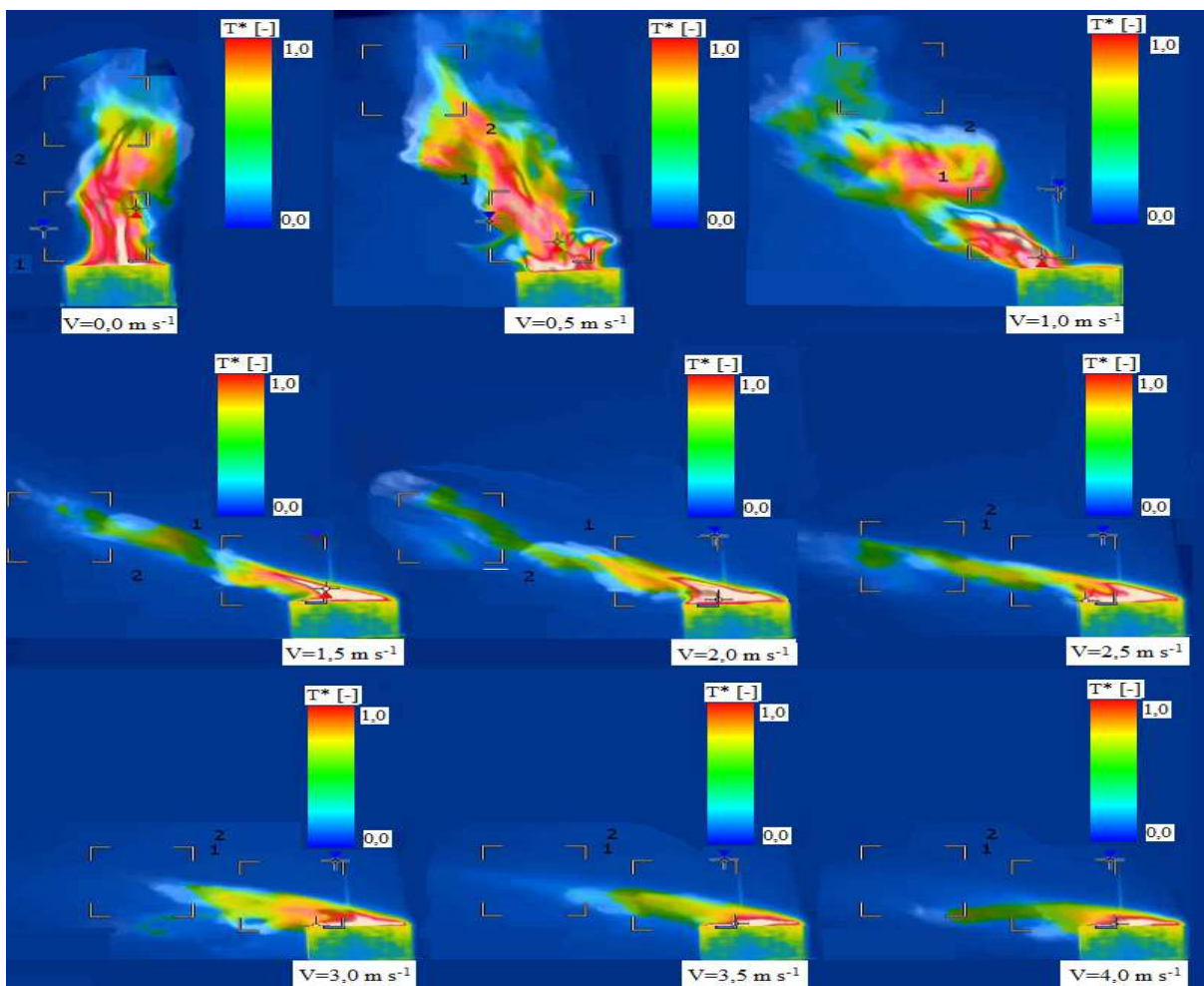


Figura 5.11 – Evolução das caixas de medição da temperatura adimensional ( $T^*$ ) da chama e da pluma em função da velocidade do vento para o ensaio experimental de diesel

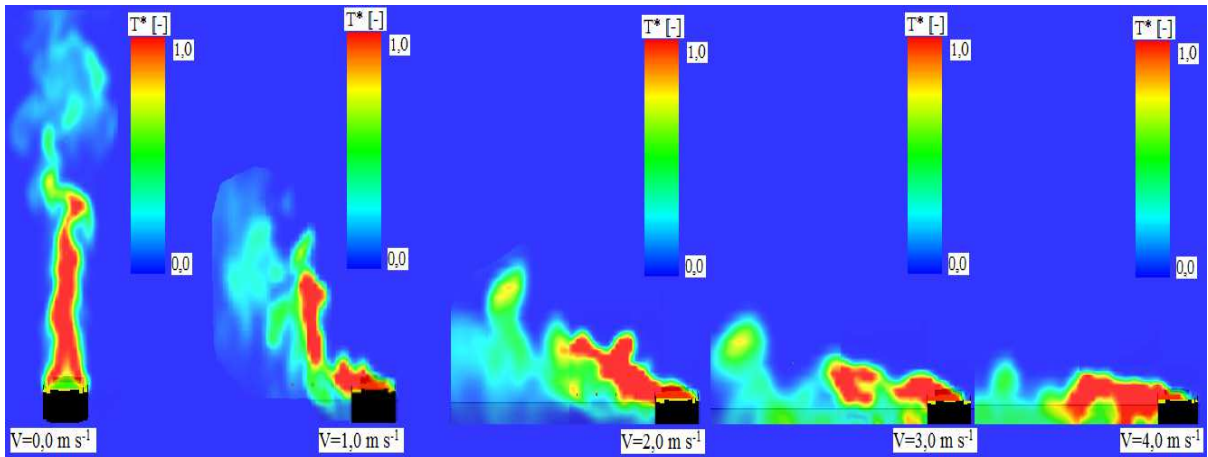


Figura 5.12 – Campos de temperatura adimensional ( $T^*$ ) da chama e da pluma em função da velocidade do vento para o ensaio numérico de diesel

Os valores da temperatura adimensional ( $T^*$ ) da chama foram analisados através do uso de termografia.

Os dados desta análise foram obtidos a partir das análises termográficas e os valores são aproximações, que possibilitam uma análise qualitativa. A análise foi feita de forma estatística em 300 amostras, conforme explicado na metodologia, que mostram a tendência da temperatura adimensional da chama. Foi utilizada uma incerteza de medição com grau de confiança de 95% para apresentar os erros das medidas associado ao erro de leitura do instrumento.

Foi observado que, à medida que a velocidade do vento aumenta, a temperatura aumenta também. O aumento da temperatura com a velocidade do vento é esperada, já que uma maior quantidade de oxidante (ar) é carregada até a chama (na direção do centro da poça), assim a localização onde a combustão ocorre é continuamente modificada à medida que a velocidade do vento muda também. Isto faz com que a borda da chama se aproxime mais do centro da poça e então a temperatura aumenta naquela posição.

Os valores de aumento da temperatura foram maiores para o biodiesel, isso é atribuído em geral à parcela de  $O_2$  presente no próprio combustível e que ajuda na sua oxidação, aumentando sua temperatura. Outro fator que pode ter contribuído para que as temperaturas do biodiesel apresentem valores maiores pode estar relacionado ao fato de que o biodiesel possui um ponto de fulgor bem maior do que o do óleo diesel, por isto, durante os ensaios experimentais foi necessário pré-aquecer os combustíveis, sendo que o óleo diesel foi pré-aquecido a cerca de 323 K enquanto o biodiesel necessitou de um pré-aquecimento de 393 K.

Observando a Figura 5.13 é possível perceber que a temperatura sem a incidência de vento, para o biodiesel, é bem maior, induzida pela temperatura inicial do combustível pré-

aquecido, e depois, quando entra o escoamento sobre a chama e temos a troca de calor convectiva incidindo na chama e nas paredes da poça, que ajudam a resfriar o líquido, a temperatura acaba por assumir uma tendência muito parecida com aquela apresentada pelo diesel, que foi igualmente pré-aquecido, mas com temperatura inferior. A diferença média entre os valores da temperatura do biodiesel foi 50% superior aos do diesel.

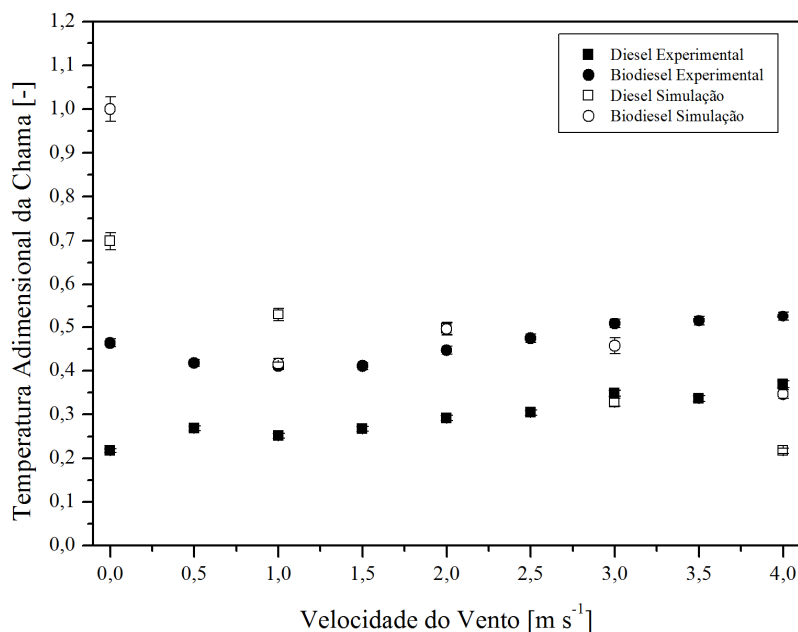


Figura 5.13 – Variação da temperatura adimensional da chama experimental e numérico versus a velocidade do vento

Os testes com diesel apresentaram temperatura máxima de 729,7 K na velocidade de 4 m s<sup>-1</sup> enquanto o biodiesel apresentou uma temperatura máxima de chama de 912,4 K na mesma velocidade, o que representa uma diferença de mais de 40% superior ao diesel.

Para os ensaios numéricos o comportamento encontrado não foi o mesmo, contudo os valores das temperaturas sem a presença de escoamento incidente foram maiores do que aqueles encontrados nos dados experimentais. Uma possível razão para esta diferença pode ser atribuída à temperatura inicial predita no programa e também a uma superestimação por parte do FDS para o processo.

Não foi possível fazer uma análise físico-química dos combustíveis, devido a isto uma grande parte dos parâmetros de entrada foi determinada com dados da bibliografia existente. Em geral os valores são resultados médios, o que pode justificar o aparecimento das diferenças entre simulações e experimentos.

Outro dado importante é que a temperatura inicial do óleo diesel necessitou ser maior na simulação do que no teste experimental, uma vez que o programa não conseguiu produzir a



queima do combustível com temperatura inicial inferior a 353 K. Além disso, como não foi determinado o perfil completo do túnel de vento, e não foi prevista uma taxa de vorticidade e um número de vórtices no escoamento de ar, solicitado no programa, é possível que a redução da turbulência tenha provocado um efeito diferente nos resultados numéricos.

A comparação dos resultados das duas simulações com velocidade nula, mostrou que as temperaturas adimensionais para o biodiesel foram cerca de 34% maiores do que para o diesel, de forma semelhante ao ensaio experimental. Nos valores a partir de  $2,0 \text{ m s}^{-1}$ , a diferença entre os valores, experimental e numérico, encontrados para as simulações ficaram inferiores aos valores dos resultados experimentais. O decremento dos valores, ao invés de incremento, tanto para o diesel quanto para o biodiesel, é inverso ao ocorrido com os experimentos e uma hipótese plausível que pode explicar esta diferença é o método de resolução de fenômenos de transporte conduzido pelo FDS onde este resfriamento do biodiesel pode ter sido produzido pela simplificação da fórmula química do combustível líquido. McGrattan et al. (2016) cita que, no FDS, não é considerada a convecção entre o líquido e a camada superficial. Além disso, pode se atribuir esta diferença às propriedades do combustível definidas inicialmente.

O fato mencionado anteriormente, de que foi observada uma tendência de extinção da chama ao longo do tempo de teste, mostra que o método de resolução do FDS provocou uma transferência de calor para o ar incidente maior do que aquela produzida pelo experimento, e a convecção forçada pelo escoamento incidente resfriou o combustível e também a chama a ponto de provocar sua extinção.

Os resultados das simulações apresentaram temperaturas menores em cerca de 42% em relação àquelas encontradas nos ensaios experimentais, para as velocidades a partir de  $2 \text{ m s}^{-1}$ , onde ocorre a inversão dos valores, já que anterior a esta velocidade ensaiada, as temperaturas são maiores em cerca de 130% se comparadas aos valores experimentais.

## 5.6 TEMPERATURA NA REGIÃO DA PLUMA

A Figura 5.14 mostra a temperatura na linha de centro na região da pluma, logo acima da ponta da chama, conforme indicado na Figura 3.11. Estes dados foram obtidos a partir da análise termográfica e os valores são aproximados, possibilitando uma análise qualitativa. De acordo com o procedimento mencionado na metodologia do trabalho, como a posição da chama muda com o tempo ao longo do teste, a posição de medição da pluma ficou sendo uma

posição média, e em alguns momentos a chama pode ter chegado bem próxima do *Box 1* de medição, alterando o valor da medida.

Conforme a velocidade do vento aumenta, e conseqüentemente a turbulência, a temperatura diminui rapidamente e se aproxima da temperatura ambiente, já que mais ar fresco é carregado para a chama. O aumento da quantidade de ar frio dilui mais rapidamente os gases quentes e isto faz a temperatura da pluma diminuir.

O valor da temperatura para a velocidade nula na curva do biodiesel apresenta o maior valor observado, pois a intermitência da chama propiciou que mais medidas fossem feitas com a ponta da chama quase no interior da caixa de medição, esta ocorrência foi uma decisão metodológica, já que, caso a caixa de medição fosse colocada mais acima, poderia ocorrer justamente o inverso, que seriam medições de áreas frias por estar muito acima da ponta da chama.

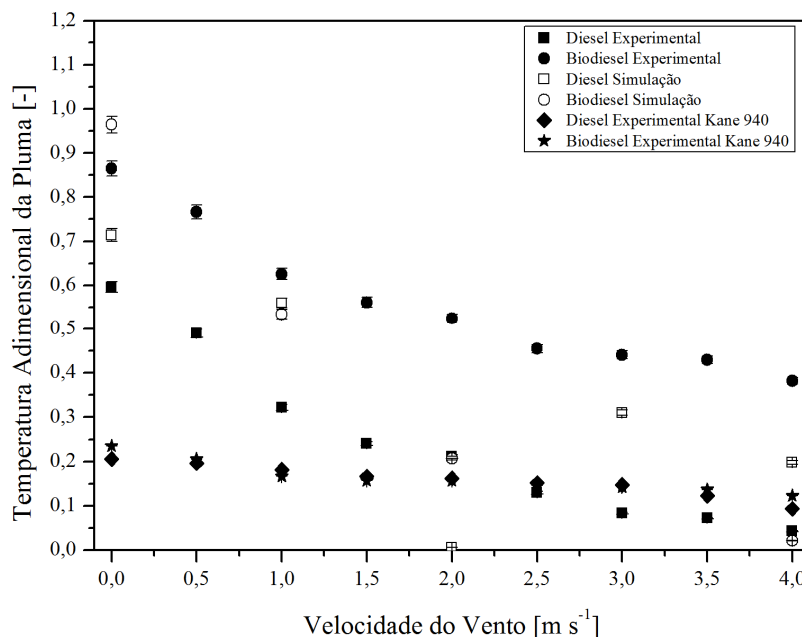


Figura 5.14 – Variação da temperatura adimensional da pluma para os ensaios experimentais e numéricos versus a velocidade do vento

As trocas térmicas com a vizinhança, que aumentam com o aumento da velocidade do vento, também concorrem para a redução da temperatura da pluma. O aumento da velocidade do vento também faz com que a pluma seja empurrada para longe, assim, o ponto de medição considerado, no início, está na pluma e, ao final, não está mais. Os dados encontrados para a temperatura da pluma corroboram com os de Johnson e Miyaniishi (2001), onde os valores seguem esta tendência de redução com o aumento da velocidade, levados pelos fenômenos de

trocas térmicas, basicamente de convecção. Em média, as temperaturas das plumas do biodiesel foram 50% superiores às do óleo diesel.

Na Figura 5.14 também é possível verificar duas análises adicionais, referentes aos dados coletados pelo analisador de gases no momento da medição das concentrações de poluentes. Note que estes valores são as temperaturas máximas encontradas na primeira medição, referentes à posição de 300 mm de distância em relação ao ponto central na altura da linha da borda superior do tanque (indicado conforme Figura 3.11), obtidos em cada velocidade ensaiada. É possível perceber a tendência de decremento tal qual aquela percebida nas medidas efetuadas pela câmera termográfica. As medidas são em geral menores, pois a distância de medição é diferente daquela utilizada pela termografia. A partir da velocidade de  $2,5 \text{ m s}^{-1}$ , as medidas foram levemente superiores no teste com o diesel e ficaram muito próximas dos valores encontrados para este combustível. Esta pequena diferença, para um valor superior, nas velocidades maiores, corrobora com a análise que será mostrada a seguir da temperatura periférica, onde o diesel mostra uma diferença mais acentuada nas temperaturas em função da distância radial da poça.

Os valores das simulações apresentaram uma tendência de redução mais acentuada se comparada aos dados experimentais, conduzida pelas diferenças trazidas pela temperatura da chama e aumento do ângulo de inclinação dos ensaios numéricos. As temperaturas foram um pouco superiores em todas as velocidades para o diesel em cerca de 12% em relação aos valores experimentais. Já para o biodiesel, nas velocidades até  $2 \text{ m s}^{-1}$ , foi verificado um valor maior em cerca de 3% e após estas velocidades ficaram com valores menores ao dos ensaios experimentais, com cerca de 16% de diferença.

## 5.7 TEMPERATURA NA REGIÃO PERIFÉRICA

A Figura 5.15 mostra as temperaturas experimentais e numéricas na região periférica do tanque, localizada na altura da linha da borda superior do tanque e a partir de 50 mm de distância da borda na direção radial, conforme detalhado na Figura 3.6, para o óleo diesel. Os termopares utilizados nas medições possuem junta exposta para reduzir a inércia térmica, aumentando a velocidade de medição.

O diâmetro da junta dos termopares é de 3 mm, para uma maior velocidade de resposta poderiam ser utilizadas juntas menores, de até 0,5 mm. No entanto, como a temperatura não era previamente conhecida, e utilizar juntas muito pequenas poderia causar danos ao

equipamento, já que cada diâmetro possui uma temperatura máxima de medição, as juntas selecionadas foram as de 3 mm.

Conforme pode ser observado na Figura 5.15, as temperaturas no termopar TP\_50mm foram as mais altas, o que já era esperado devido à proximidade da chama e também pela inclinação da chama com o aumento da velocidade do vento.

A diferença entre as temperaturas encontradas para uma mesma velocidade foi de cerca de 20% entre o TP\_50mm e o TP\_100mm tanto para os ensaios numéricos quanto experimentais. Para os termopares de TP\_100mm e TP\_150 mm a diferença foi de aproximadamente 10% para todos os ensaios. Por último, o TP\_200mm mostrou temperaturas cerca de 20% inferiores às do TP\_150mm.

Estas diferenças são muito coerentes, uma vez que no TP\_50mm a radiação e o fluxo de calor têm influência sobre a elevação da temperatura, mas com o aumento da distância o calor é carregado por convecção forçada pelo aumento da velocidade do vento, o que ajuda a reduzir a temperatura dos termopares intermediários TP\_100mm e TP\_150mm.

É importante chamar a atenção para a temperatura no termopar TP\_50mm com a velocidade nula, que possui uma diferença menor entre os resultados dos ensaios, experimental e numérico, e entre os termopares TP\_50mm até TP\_200mm. em relação às demais temperaturas e está mais próxima do valor da temperatura ambiente. Aqui é possível perceber que a convecção natural influencia na redução da temperatura da vizinhança da poça, e esta tendência tem boa concordância com, por exemplo, Tang et al. (2014), Sjöström et al. (2015) e Rebec, Plešec e Kolšek (2014). Além disso, como não ocorre a inclinação da chama como nas situações com vento incidente, a distância dos termopares em relação à chama é maior e, portanto, recebe menor influência da temperatura provocada pela radiação proveniente da chama.

Os maiores valores encontrados foram na velocidade de  $2,0 \text{ m s}^{-1}$ , isto é muito coerente com o valor do comprimento e do ângulo de inclinação da chama que foi maior nesta velocidade e, devido a isso, os termopares ficaram mais próximos da ponta da chama e nas regiões mais quentes da pluma.

Os dados da simulação, na Figura 5.15 apresentaram comportamento bem semelhante, mas com valores de temperaturas maiores. Uma provável resposta a isso é a sensibilidade com que o programa simula o termopar. A medida apresentada é instantânea no tempo simulado, enquanto os termopares experimentais possuem um tempo de inércia térmica que com certeza contribui para valores menores.

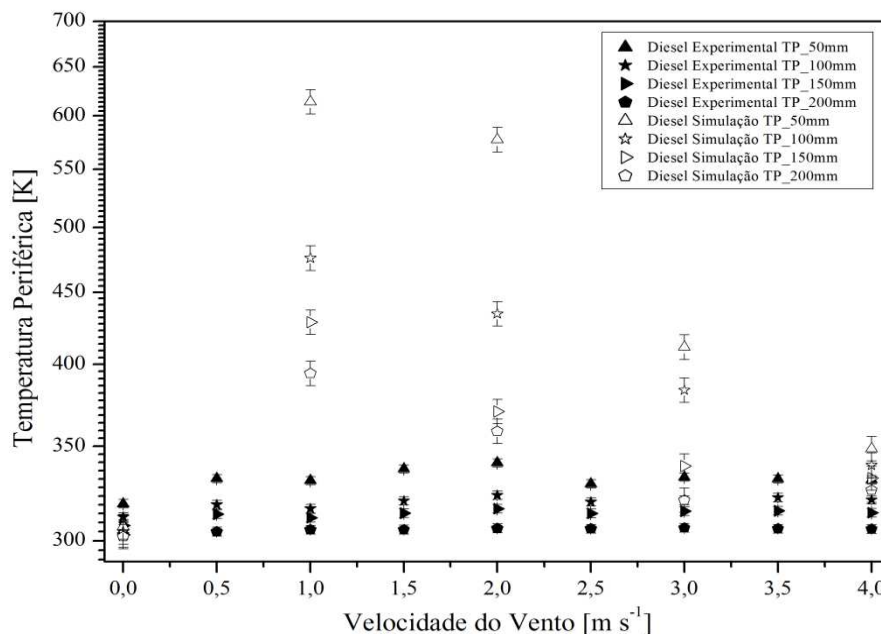


Figura 5.15 – Variação da temperatura periférica do diesel para ensaios experimentais versus a velocidade do vento e ensaios numéricos versus a velocidade do vento

O valor mais discrepante, referente à velocidade de  $1 \text{ m s}^{-1}$ , é condizente com um maior valor de comprimento e uma temperatura mais elevada da chama apresentada para esta velocidade ensaiada. O valor do termopar TP\_50mm na velocidade de  $1,0 \text{ m s}^{-1}$  apresentou um incremento de cerca de 184% em relação ao valor experimental.

Na Figura 5.16 são mostradas as curvas dos perfis de temperatura periférica para o biodiesel, experimental e numérico, respectivamente. É possível observar na Figura 5.16 que as temperaturas de maior valor se encontram na velocidade de  $0,5 \text{ m s}^{-1}$  onde o biodiesel apresentou também um ângulo e comprimento de chama maior na análise da geometria. O decremento nos valores da temperatura para o biodiesel segue a mesma tendência que o óleo diesel, porém diminui mais. Entretanto, as temperaturas apresentadas no termopar TP\_200mm são superiores às do diesel, em média, em cerca de 4%.

No termopar TP\_50mm ocorreu uma variação média de aproximadamente 20,3% maior no biodiesel se comparado ao diesel, contudo, a partir da velocidade de  $1,5 \text{ m s}^{-1}$  os valores se inverteram e o diesel mostrou valores maiores na temperatura, o que é condizente com a alteração nos parâmetros geométricos da chama.

Os dados mencionados são coerentes com as análises das temperaturas, que apresentaram valores superiores para a chama e a pluma do biodiesel em relação ao diesel. Porém, a diferença na relação do TP\_50mm, a partir da velocidade de  $1,5 \text{ m s}^{-1}$ , evidencia uma diferença do mecanismo de trocas térmicas, entre os dois combustíveis, já que o

decremento é maior e mais rápido em comparação ao caso com o óleo diesel. Observando os dados da geometria da poça com biodiesel é possível perceber também que este comportamento corrobora com o crescimento mais constante do ângulo e com a redução mais acentuada do comprimento da chama, se comparado à poça do diesel.

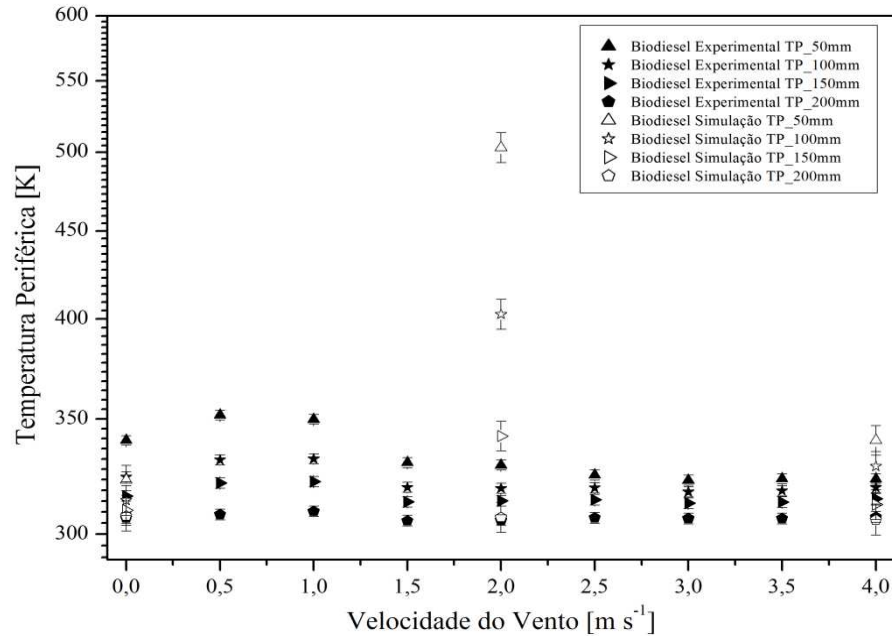


Figura 5.16 – Variação da temperatura periférica do biodiesel para ensaios experimentais versus a velocidade do vento e ensaios numéricos versus a velocidade do vento

Na Figura 5.16 é possível observar que o mesmo não ocorre para os dados das simulações do biodiesel, que, à exceção do ensaio com velocidade nula, que apresentou valores bem próximos dos experimentais, com cerca de 3% de diferença a mais, os demais valores apresentam valores bem superiores, mas com tendências semelhantes, e um aumento de cerca de 36% em relação ao valor experimental. A maior diferença, na temperatura de 2 m s<sup>-1</sup>, é coerente com o maior valor de temperatura e maior ângulo de inclinação apresentado pelos ensaios numéricos para o biodiesel.

Na Figura C1 do apêndice F é possível verificar as curvas comparativas entre os resultados, numérico e experimental, para o biodiesel em todas as velocidades ensaiadas para a observação da similaridade entre os valores. Na Figura C2 estão as curvas comparativas entre os resultados, numérico e experimental, para o óleo diesel. Na Figura C3 estão as curvas comparativas entre os resultados experimentais do biodiesel e do óleo diesel, onde é possível ver a evolução da temperatura periférica, tal é a elevação da temperatura da chama. Na Figura C4 estão as curvas comparativas entre os resultados numéricos do biodiesel e do óleo diesel, onde é possível perceber a diferença entre os resultados das simulações para os dois combustíveis.

## 5.8 DISPERSÃO DE POLUENTES

Os valores de dispersão dos poluentes são apresentados com os dados obtidos pelo analisador de gases portátil na saída dos gases de combustão da poça e nas medidas indicadas na metodologia experimental.

Como dado geral, é importante explicar que, para todas as medições, desde 300 mm até 1200 mm de distância da poça, os valores medidos de  $O_2$  ficaram entre 20,7 e 20,9%.

### 5.8.1 Dispersão de CO

Na Figura 5.17(a) e (b) são apresentados os valores das concentrações em função da distância das emissões de CO para diesel, experimental e numérico, respectivamente. A curva característica, de acordo com o apresentado, para os valores experimentais é condizente com o estudo de diversos autores como, Argyropoulos et al. (2010), Bohon et al. (2015), Havens (1992), Havens, Walker e Spicer (2001), Mannan (2001), Martins e Ferreira (2010) e Meroney (2012), onde o aumento da distância da fonte pontual faz com que as concentrações de poluentes reduzam o seu valor devido à diluição da espécie em função da entrada de ar ao longo do seu percurso na direção do escoamento.

O decaimento das curvas e sua tendência de crescimento do gradiente negativo em função da velocidade do escoamento tem ótima concordância com Argyropoulos et al. (2010), que faz o modelamento da dispersão em tanques de armazenamento com hidrocarbonetos. No trabalho citado, o aumento da velocidade do escoamento do ar faz aumentar a velocidade de trânsito das partículas, além de adicionar um maior volume de ar sobre a pluma da chama, fazendo com que ocorra a mistura das partículas com uma quantidade maior de ar proveniente deste escoamento e que, somado ao ar da vizinhança, faz o valor das emissões reduzirem em função desta diluição.

Como pode ser observado na Figura 5.17(b) os resultados das simulações numéricas foram um pouco menores. Os valores dos dados experimentais e numéricos apresentaram uma diferença de 44% entre si considerando os resultados de velocidade versus distância. Esse fato tem diversas explicações, como a possível superestimação dos parâmetros de taxa de formação de CO, taxa de formação de fuligem, temperatura de ebulição, entre outros que fazem parte das pressuposições dos dados de entrada da simulação. Como estes parâmetros foram retirados da literatura e são valores médios, possivelmente podem ter influenciado o resultado final, já que o FDS aplica ao modelo de resolução da combustão os valores inseridos

nos dados de entrada do código fonte. Não foi possível fazer uma análise físico-química dos combustíveis, o que poderia contribuir com melhores estatísticas para os dados de entrada.

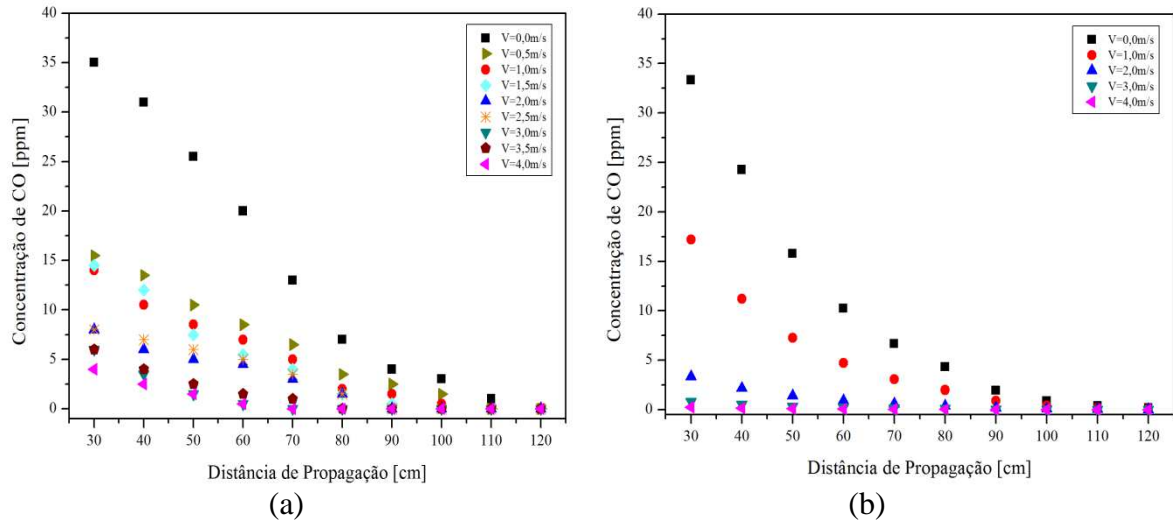


Figura 5.17 – Variação da concentração de CO para o diesel versus a distância de propagação da pluma: (a) dados experimentais e (b) resultados numéricos

Pode ser verificado também que, conforme aumenta a velocidade do escoamento de ar, a concentração fica menos acentuada, i. e., que a diluição já ocorre, com velocidades maiores, mais próxima da chama e a quantidade de ar que se mistura na pluma é cada vez maior, além disso, com o aumento do escoamento incidente, temos mais oxigênio entrando na região propícia à combustão, então temos uma combustão mais completa, ocorrendo a presença de menos CO e mais CO<sub>2</sub>.

Conforme pode ser observado na Figura 5.18(a) e (b) a concentração do CO no biodiesel, tanto para os ensaios experimentais como para os resultados numéricos, foi menor do que para o diesel, o que já era esperado e corrobora com outros autores como, Tran et al. (2014), Buyukkaya (2010), Ghorbani et al. (2011) e US EPA (2002), ficando com valores cerca de 150% menores, em outros trabalhos como Tran et al. (2014) com queima em poça a diferença ficou em 280%, US EPA (2002) para motores de combustão interna, indica cerca de 48% e Ghorbani et al. (2011) encontra cerca de 200% de diferença com aplicação em um aquecedor de passagem experimental, todos indicam um redução significativa entre a concentração de CO nos gases de combustão entre o óleo diesel e o biodiesel.



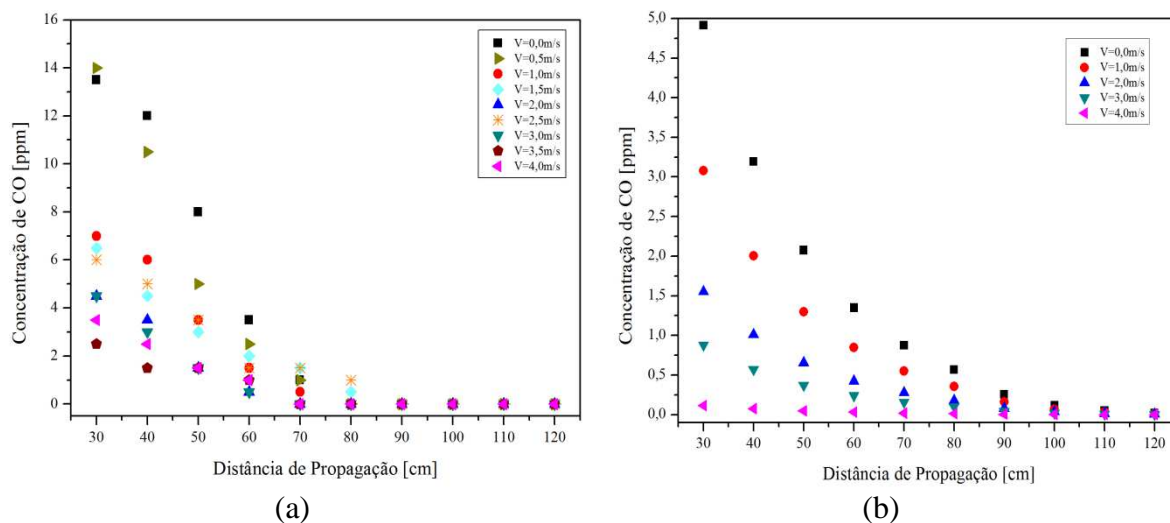


Figura 5.18 – Variação da dispersão de CO para o biodiesel versus a distância de propagação da pluma: (a) dados experimentais e (b) resultados numéricos

É possível verificar na Figura 5.18(b) que os valores das simulações, para o biodiesel, retornaram valores abaixo dos encontrados na análise experimental, com uma diferença de cerca de 81% inferior aos dados experimentais. Muito possivelmente é correto afirmar que o provável motivo, para estes valores menores, está englobado no mesmo caso explicado para a temperatura e provavelmente o modelo adotado para a resolução do biodiesel não foi bom o suficiente para conseguir resolver o processo de combustão completa deste combustível.

Na Figura E1 do apêndice E é possível verificar as curvas de cada distância com seu respectivo erro de medição para as concentrações de CO para o biodiesel e na Figura E2 estão as curvas de CO para o óleo diesel.

### 5.8.2 Dispersão de NO

Como pode ser visto na Figura 5.19(a) e (b), a concentração de NO para o diesel, nas simulações experimental e numérica, respectivamente, não foi significativa na maior parte das velocidades ensaiadas, tanto para os testes experimentais quanto nas simulações numéricas, onde os valores da concentração da espécie ficaram em zero. Considerando a incerteza do instrumento para medições de NO, conforme Tabela 3.1, os valores podem ser considerados bem pequenos. Os valores de NO encontrados nas velocidades maiores estão de acordo com o esperado uma vez que o aumento da velocidade do escoamento de ar incidente sobre a poça implica em um maior aporte de ar na região de combustão, disponibilizando mais ar para a oxidação do nitrogênio.

É verificado que apenas nas maiores velocidades e nas medições mais próximas da poça ocorre a presença de NO e, à medida que a distância de medição aumenta, ocorre o

incremento da quantidade de ar que se mistura com a pluma, proveniente da vizinhança e do próprio escoamento lateral do ar, e conseqüentemente ocorre uma maior diluição da concentração de NO. A presença de NO foi identificada até o limite de 80 cm de distância da poça. A ocorrência de NO nas maiores velocidades de escoamento está de acordo com vários trabalhos, como por exemplo, Martins e Ferreira (2010) e Bohon et al. (2015), onde o aumento da temperatura de combustão aumenta as reações do nitrogênio propiciando a formação de NO, já que ocorreu o aumento da temperatura com o aumento da velocidade do escoamento de ar, como já discutido anteriormente.

Este fato apresentado é exatamente o mecanismo de formação de NO térmico, onde é necessária uma alta temperatura e a presença de O<sub>2</sub>, simultaneamente, conforme apresentado no item 2.1.1.1.

De acordo com a Figura 5.19(b) a concentração de NO para a simulação numérica teve comportamento semelhante, o que indica que as interações numéricas resolveram o aporte de ar na poça com o aumento da temperatura, oxidando o nitrogênio e formando NO, da mesma forma que observado nos ensaios experimentais.

Contudo, nas medições experimentais não pode deixar de ser mencionado que, como o erro do instrumento é maior do que o valor medido, os resultados obtidos para as medições de NO não são significativos e, talvez, possam ser considerados falhas na medição.

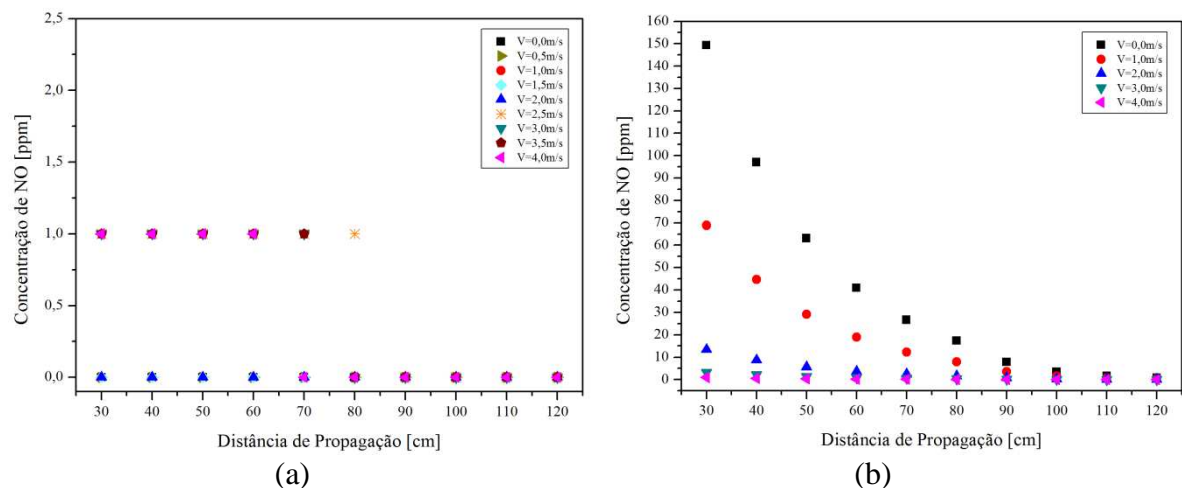


Figura 5.19 – Variação da dispersão de NO para o diesel versus a distância de propagação da pluma: (a) dados experimentais e (b) resultados numéricos. (escalas diferentes)

Os valores dos testes experimentais e dos ensaios numéricos apresentaram uma diferença significativa de cerca de 145 vezes maior para o ensaio numérico.

O FDS se utiliza das equações de transporte e de um modelo de combustão onde a reação ocorre assim que o combustível e o oxidante se encontram (*Infinitely Fast Reaction*)

A equação do transporte, Eq. (4.6), então é resolvida para cada espécie aglomerada (combustível, ar e produtos), e não para cada espécie ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $CO$ ,  $NO$  etc.) separadamente. Isso pode levar a diferenças nos resultados apresentados, já que, conforme visto anteriormente, no capítulo 2.1.1, os mecanismos de formação de  $NO$  podem ser bem mais complexos.

Na Figura 5.20(a) e (b) são apresentados os dados da dispersão do  $NO$  obtidos para os ensaios experimental e numérico, respectivamente, para o biodiesel.

Como pode ser observado na Figura 5.20(a) à semelhança com o ocorrido com o diesel, a dispersão do  $NO$  não foi significativa na maior parte das velocidades ensaiadas. Os valores foram semelhantes para todas as velocidades com exceção da medição da velocidade de  $0,5 \text{ m s}^{-1}$ , onde o valor medido foi maior para o biodiesel, o que concorda com diversos estudos e publicações como Tran et al. (2014) e Buyukkaya (2010).

No biodiesel a maior distância na qual foi identificado  $NO$  foi 70 cm. No biodiesel ocorreu uma pequena diferença em relação ao diesel, uma vez que, diferentemente deste, foram identificadas concentrações de  $NO$  nas velocidades baixas, o que mostra que o biodiesel possui uma maior formação de  $NO$ , que é provocada pela disponibilidade da molécula de  $O_2$  presente em sua composição e que não é encontrada no óleo diesel. Além disso, como as temperaturas do biodiesel se mostraram maiores, a oxidação do nitrogênio acaba sendo favorecida, já que quanto maior a temperatura maior é a taxa de formação de  $NO_x$ .

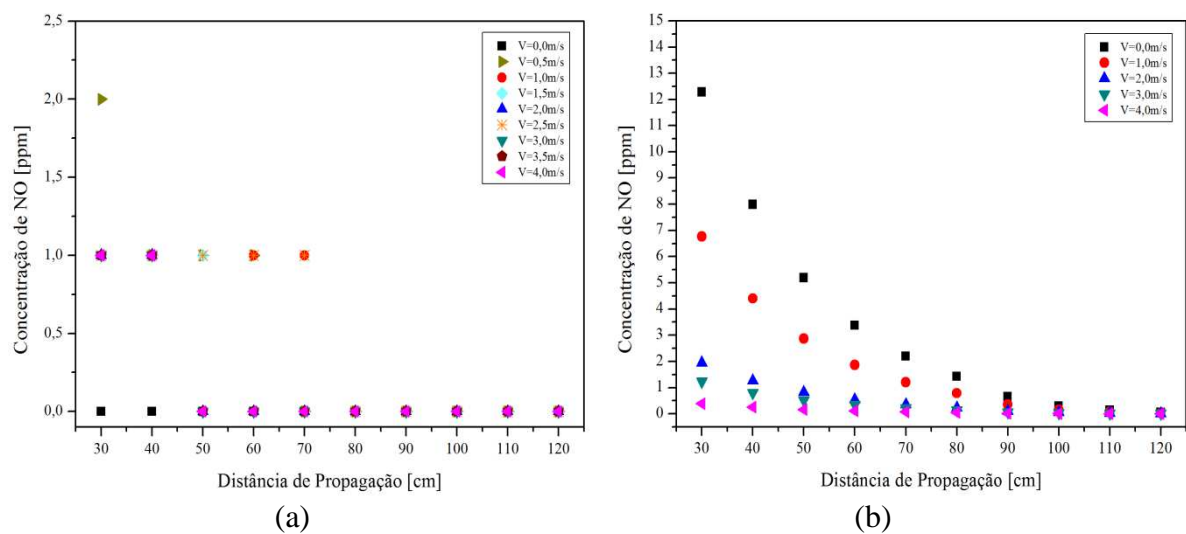


Figura 5.20 – Variação da dispersão de  $NO$  para o biodiesel versus a distância de propagação da pluma: (a) dados experimentais e (b) resultados numéricos

Os valores de concentração de NO para o presente estudo foram, em algumas medidas, 50% superiores em relação às medidas encontradas para o óleo diesel. Em Tran et al. (2014) é relatado uma diferença de até 41%, Buyukkaya (2010) apresenta uma diferença de cerca de 17% e US EPA (2002) relata um valor aproximadamente 10% maior.

Na Figura 5.20(b) os dados experimentais e os resultados numéricos, para a poça de biodiesel, mostraram diferenças de aproximadamente 837% entre si. Mas aqui, diferentemente do que se esperava, os valores das concentrações de NO ficaram abaixo dos valores encontrados na simulação para o diesel, o que não é coerente com a literatura nem com os dados experimentais. Como a formação de NO<sub>x</sub> possui um modelo muito complexo e pode ocorrer por três mecanismos diferentes, as simplificações do FDS e o processo de extinção da chama que ocorreu no biodiesel podem ter tido forte influência neste resultado, uma vez que a combustão do biodiesel não foi mantida ao longo do tempo de análise.

Novamente as simplificações do FDS e o próprio método de leitura do analisador podem ter influenciado na diferença, lembrando que o analisador se utiliza da tecnologia de sucção do gás com compensação por H<sub>2</sub>, talvez analisadores de infravermelho, que é uma tecnologia mais precisa, poderiam mostrar resultados melhores.

Na Figura E3 do apêndice E é possível verificar as curvas de cada distância com seu respectivo erro de medição para as concentrações de NO para o biodiesel e na Figura E4 estão as curvas de NO para o óleo diesel.

### 5.8.3 Dispersão de SO<sub>2</sub>

Na Figura 5.21(a) e (b) os níveis de concentração de SO<sub>2</sub> para o óleo diesel são apresentados, no ensaio experimental e na simulação numérica, respectivamente, onde foram encontradas concentrações superiores a 10 ppm. Isto mostra que uma fonte de queima livre em poça pode provocar uma quantidade significativa de poluentes em um caso de acidente. Os valores encontrados se apresentam significativamente maiores se comparados com outros estudos, como Ghorbani et al. (2011) onde aparecem concentrações de cerca de 300 ppm utilizando diesel em um aquecedor, utilizando a medição direto no duto de exaustão e em Argyropoulos et al. (2010) que foram encontrados valores de 1,1 ppm. Porém, no último caso, são feitas medições a 950 m da fonte, o que já proporciona uma grande diluição da espécie. É importante esclarecer que, nos trabalhos acima mencionados, não é relatada a concentração de O<sub>2</sub>, então pode ocorrer que, se corrigidos, os valores sejam maiores que os relatados.

No presente estudo foram encontradas até 11 ppm no experimento com diesel e 5,5 ppm para os experimentos com biodiesel. O excesso de ar provocado pelos ventos laterais

causou a diluição dos poluentes ajudando na redução dos valores encontrados. Na ausência de ventos incidentes sobre a poça, os valores foram bem maiores em função da presença apenas do ar da vizinhança para a diluição.

O comportamento das curvas está bem próximo de Argyropoulos et al. (2010), por exemplo, sendo que o aumento da velocidade provoca o aumento da quantidade de ar na pluma e consequentemente a redução das concentrações. Além disso, à medida que se distancia mais da chama, a pluma agrega uma quantidade cada vez maior do ar circundante, ajudando ainda mais a redução das concentrações pela diluição do  $\text{SO}_2$  pelo ar.

Os dados das simulações numéricas, observados na Figura 5.21 (b), possuem valores superiores aos experimentais. As concentrações ficaram cerca de 15 vezes superiores se comparadas ao experimento. Muito possivelmente aqui, como nos demais casos dos poluentes, os dados apresentam uma superestimação devido a dados de entrada menos precisos em relação à real composição química do combustível e pelo mecanismo de resolução da combustão e das espécies utilizado pelo programa.

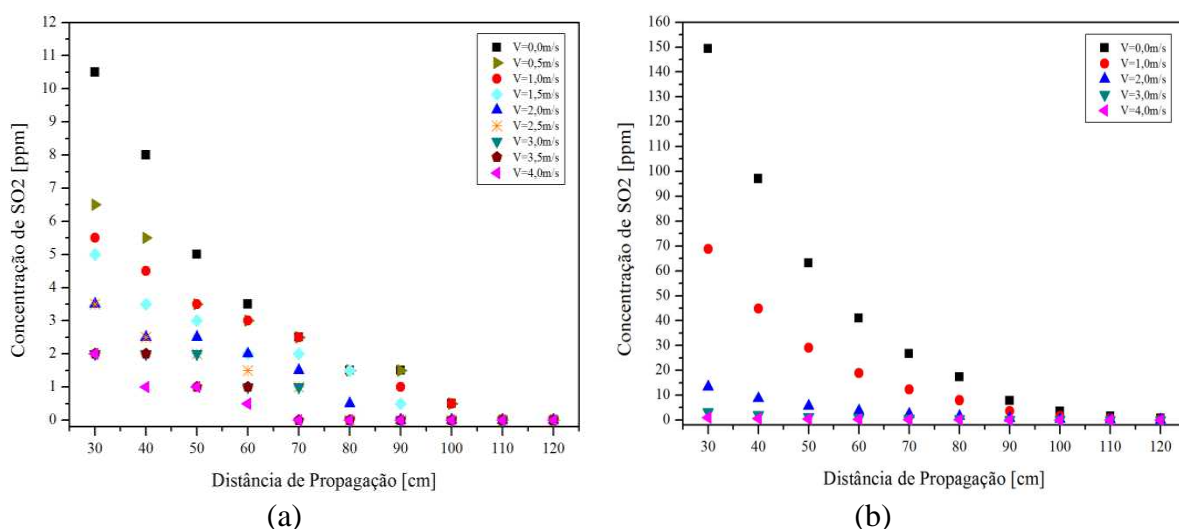


Figura 5.21 – Variação da dispersão de  $\text{SO}_2$  para o diesel versus a distância de propagação da pluma: (a) resultados experimentais, (b) resultados numéricos

Foram encontrados valores maiores de concentrações de  $\text{SO}_2$  para o diesel em relação ao biodiesel e isto já era esperado. Na Figura 5.22(a) e (b) os valores encontrados para o biodiesel são apresentados, para os ensaios experimental e numérico, respectivamente. Os valores são significativamente mais baixos se comparados com os do óleo diesel, com uma diferença de 186% inferior das concentrações de  $\text{SO}_2$  do biodiesel em relação ao diesel. Conforme Bazooyar, Ghorbani e Shariati (2011) as emissões de  $\text{SO}_x$  do óleo diesel foram até 90% maiores do que para o biodiesel na queima em um aquecedor industrial e Ghorbani et al.

(2011) encontraram diferenças de 55% menores nas emissões do biodiesel em relação ao diesel.

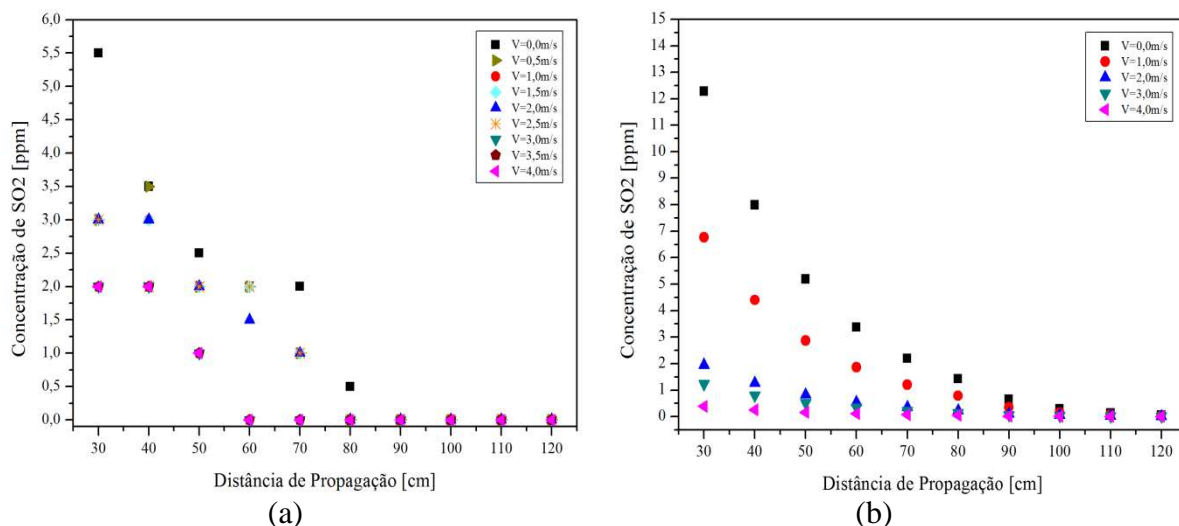


Figura 5.22 – Variação da dispersão de SO<sub>2</sub> para o biodiesel versus a distância de propagação da pluma: (a) resultados experimentais, (b) resultados numéricos

Os dados das simulações numéricas, observados na Figura 5.22(b), possuem valores superiores aos experimentais. As concentrações ficaram cerca de 232% maiores. Conforme já foi explicado para os demais poluentes, as simulações podem ter apresentado diferenças devido aos dados de entrada e ao método de resolução das espécies pelo FDS.

O SO<sub>2</sub> é um dos poluentes provenientes dos gases da combustão que mais preocupa, pois é o causador das chuvas ácidas em grandes centros urbanos quando suas concentrações se mostram em altos níveis. Uma nota importante é que, em combustíveis líquidos como o óleo diesel e o biodiesel, o limite da quantidade de enxofre presente na mistura é normatizado, sendo o percentual mássico admitido desta espécie muito pequeno, sendo centésimos da massa total.

Devido a isso, a quantidade de trabalhos sobre a formação de concentração e dispersão de SO<sub>2</sub> é muito menor do que em relação a formação de NO<sub>x</sub>, já que ela ocorre pela oxidação do N<sub>2</sub> presente no ar que é utilizado na combustão.

Na Figura E5 do apêndice E é possível verificar as curvas de cada distância com seu respectivo erro de medição para as concentrações de SO<sub>2</sub> para o biodiesel e na Figura E6 estão as curvas de SO<sub>2</sub> para o óleo diesel.

## 5.9 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Conforme já mencionado nos subcapítulos anteriores as simulações numéricas, executadas com o FDS, apresentaram diversos valores discrepantes, superestimados para alguns parâmetros e boas aproximações em outros casos. Muitas destas diferenças podem estar associadas aos dados de entrada que foram retirados da literatura, em sua grande maioria valores médios de combustíveis típicos. Na

Tabela 5.1 está um resumo das simulações e seus principais valores para o óleo diesel e na

Tabela 5.2 é apresentado um resumo das simulações e seus principais valores para o biodiesel.

Os tempos de simulação, conforme mencionado no Capítulo 4, foram extremamente grandes, mesmo com uma malha com refinamento moderado.

Tabela 5.1 – Resumo das medições dos testes com óleo diesel das simulações numéricas

| Teste                                 | V = 0 m s <sup>-1</sup> | V = 1 m s <sup>-1</sup>        | V = 2 m s <sup>-1</sup> | V = 3 m s <sup>-1</sup>        | V = 4 m s <sup>-1</sup> |
|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| <b>Número de Células</b>              | 533.700                 | 533.700                        | 533.700                 | 533.700                        | 533.700                 |
| <b>Tempo Total de Simulação [s]</b>   | 2,622·10 <sup>6</sup>   | 1,130·10 <sup>6</sup>          | 3,178·10 <sup>6</sup>   | 3,816·10 <sup>6</sup>          | 4,160·10 <sup>6</sup>   |
| <b>Tempo por Segundo Simulado [s]</b> | 4370                    | 1883,3                         | 5296,7                  | 6360                           | 6933,3                  |
| <b>Configuração CPU</b>               | i7@2,8GHz<br>4 núcleos  | 4xXeon@2,4<br>GHz<br>4 núcleos | i7@2,8GHz<br>4 núcleos  | 4xXeon@2,4<br>GHz<br>4 núcleos | i7@2,8GHz<br>4 núcleos  |
| <b>Memória RAM</b>                    | 8 GB                    | 32 GB                          | 8 GB                    | 32 GB                          | 8 GB                    |

1 valor refere-se à malha principal, identificada como malha do centro, sobre a região da poça.

2 valor refere-se à x e z, o valor entre o parênteses refere-se a y.

Tabela 5.2 – Resumo das medições dos testes com biodiesel das simulações numéricas

| Teste                                 | V = 0 m s <sup>-1</sup> | V = 1 m s <sup>-1</sup>        | V = 2 m s <sup>-1</sup>        | V = 3 m s <sup>-1</sup>        | V = 4 m s <sup>-1</sup>        |
|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <b>Número de Células</b>              | 533.700                 | 533.700                        | 533.700                        | 533.700                        | 533.700                        |
| <b>Tempo Total de Simulação [s]</b>   | 3,433·10 <sup>5</sup>   |                                | 9,803·10 <sup>5</sup>          | -                              | 2,469·10 <sup>6</sup>          |
| <b>Tempo por Segundo Simulado [s]</b> | 572,2                   | -                              | 1.633,8                        | -                              | 4.115                          |
| <b>Configuração CPU</b>               | i7@3,6GHz<br>4 núcleos  | 4xXeon@2,4<br>GHz<br>4 núcleos | 4xXeon@2,4<br>GHz<br>4 núcleos | 4xXeon@2,4<br>GHz<br>4 núcleos | 4xXeon@2,4<br>GHz<br>6 núcleos |

| Memória RAM | 16 GB | 32 GB | 32 GB | 32 GB | 32 GB |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|

1 valor refere-se à malha principal, identificada como malha do centro, sobre a região da poça.

2 valor refere-se à x e z, o valor entre o parênteses refere-se a y.

## 5.10 ANÁLISE GLOBAL DAS PROPRIEDADES DA CHAMA

De maneira geral, é possível verificar que o escoamento sobre uma poça altera significativamente o seu modelo de queima. A taxa de queima mássica, juntamente com a geometria, são os principais dados que podem caracterizar a queima em poça. Foi possível perceber que a taxa de queima mássica possui duas tendências diferentes para o diesel e o biodiesel.

Os experimentos foram conduzidos em um túnel de vento em velocidades entre 0 e 4 m s<sup>-1</sup>, com o auxílio de diversos instrumentos, como termopares, balança, *datalogger*, câmera infravermelha, analisador de gases, entre outros. Com a ajuda deste aparato foi possível a obtenção de vários dados de diversas grandezas que possibilitaram as análises experimentais dos parâmetros expostos no trabalho. Foi utilizado o programa FDS para a criação de um modelo numérico que reproduz em escala de mesma grandeza as condições dos ensaios experimentais a fim de produzir uma comparação e assim validar o modelo numérico proposto.

Foi verificado que o comprimento do túnel utilizado foi adequado, uma vez que as curvas das velocidades foram bem próximas em todas as alturas verificadas, e, considerando os desvios pelos erros da instrumentação, a velocidade média utilizada foi uma boa alternativa de predição dos valores do escoamento do ar com um erro menor que  $\pm 8\%$  em qualquer velocidade.

O ângulo de inclinação da chama é um dos parâmetros mais importantes da análise geométrica em poça, uma vez que, juntamente com a inclinação da chama pela incidência de ventos sobre a mesma, são conduzidos fenômenos termofísicos que alteram as características de queima e transferência de calor da chama, influenciando suas propriedades.

A tendência do ângulo de inclinação da chama mostrou-se em concordância em relação a vários trabalhos, tanto para o diesel quanto para o biodiesel, sendo que os valores do biodiesel foram plenamente concordantes com a literatura, aumentando a inclinação da chama com o aumento da velocidade do vento até o valor máximo de  $68,5 \pm 0,7^\circ$  na velocidade de 3,5 m s<sup>-1</sup>. Enquanto isso, para o diesel, o ângulo de inclinação se elevou rapidamente, até um valor máximo de  $75,3 \pm 0,6^\circ$  na velocidade de 1,5 m s<sup>-1</sup>, e após, sofreu um decréscimo gradual e suave até 3 m s<sup>-1</sup> voltando a crescer até a velocidade de 4 m s<sup>-1</sup>. O comportamento da



angulação no diesel muito provavelmente foi determinado pelas trocas térmicas entre a poça, a chama e o escoamento cruzado de ar. A angulação atingiu, com o diesel, um erro máximo de 9,5% e, para o biodiesel, foi de 9,9%. As correlações semi-empíricas mostram uma concordância muito boa com os valores experimentais, a melhor correlação que manteve uma proporção de valores e curvatura foi a correlação da Eq. (2.7), que foi feita em experimentos com diesel, onde temos uma diferença máxima abaixo de 5,8 e 6,2%, para o diesel e biodiesel, respectivamente. As simulações numéricas também apresentaram uma boa proximidade dos resultados do ângulo de inclinação com os valores experimentais reportando uma diferença máxima de 18%.

O comprimento da chama apresentou um comportamento de encurtamento com o aumento da velocidade de escoamento do ar, concordando com Lam e Weckman (2015a) que mostraram a mesma tendência na condução de seus experimentos, até velocidades de  $7 \text{ m s}^{-1}$ .

Foram encontrados erros máximos, obtidos através do desvio padrão do conjunto de imagens analisadas, para os valores do comprimento da chama de 4,5% e 4,4%, para o diesel e para o biodiesel, respectivamente. As correlações semi-empíricas, para os comprimentos, não foram tão semelhantes quanto as correlações do ângulo, a correlação da Eq. (2.21) foi a que apresentou melhor proximidade tendo diferenças de até 25,4% em uma velocidade e 9% em geral. As simulações numéricas, para os comprimentos, não apresentaram uma boa concordância com os resultados experimentais reportando uma diferença de 80% inferiores aos valores experimentais para o diesel e 142% inferiores para o biodiesel. Boa parte deste comportamento pode ser atribuído ao modelo de combustão proposto e também ao modelo de resolução aplicado pelo FDS.

A altura da chama não é um parâmetro frequentemente analisado na condução das pesquisas de outros autores, porém foi feita a análise deste parâmetro onde ficou evidente a tendência de redução da altura da chama com o aumento do ângulo o que é muito coerente com a observação experimental. Os valores da altura da chama reduziram de 172,8 mm para 62,8 mm e de 261,9 mm para 71,4 mm, para diesel e biodiesel, respectivamente. A altura da chama para o biodiesel foi maior do que a do diesel. Este fato se deve, bem provavelmente, ao valor maior da temperatura da chama do biodiesel que, com os efeitos do empuxo, juntamente com os gases mais quentes, empurram a chama e provocam o alongamento, que foi menos percebido com a incidência do vento. A análise experimental da altura da chama apresentou um erro máximo, obtido através do desvio padrão do conjunto de imagens analisadas, de 8,1% e 7,0%, para o diesel e o para o biodiesel, respectivamente. Não há correlações semi-

empíricas para a altura da chama, então não foi feita uma análise comparativa entre os dados experimentais e correlações.

A temperatura adimensional da chama apresentou ótimos resultados que corroboram com a literatura, sendo que nos dois casos, do diesel e do biodiesel, foi verificado o aumento da temperatura com o aumento da velocidade de escoamento do ar. O único valor discrepante ocorreu na velocidade nula do biodiesel onde ocorre um salto na temperatura, que pode ser justificado pelo pré-aquecimento a 393 K, necessário para que fosse possível iniciar a combustão na poça. Já a análise numérica apresentou um comportamento inverso, mostrando redução da temperatura com o aumento da velocidade do escoamento de ar sobre a poça. Além disso, os ensaios numéricos mostraram aproximadamente 130% de diferença a mais nos resultados iniciais até  $2 \text{ m s}^{-1}$  e, depois que ocorreu o cruzamento de valor com a inversão da tendência, apresentou valores 42% inferiores aos experimentais. Dentre os possíveis motivos estão as simplificações das equações e o processo de transferência de calor da superfície da poça utilizadas pelo FDS e também os dados de emissividade, calor de reação e condutividade térmica que foram declarados valores médios obtidos da literatura, sendo que todos têm influência na taxa de calor radiante produzido pela chama. Além disso, o fato do FDS conduzir a combustão à extinção com a evolução do tempo de simulação também mostra a dificuldade enfrentada na resolução do modelo de combustão com os dados de entrada fornecidos para a simulação.

A temperatura adimensional da pluma apresentou dados que concordam com os resultados de outros autores em que, com o aumento da velocidade de escoamento do ar, ocorre a redução da temperatura da pluma. Esta redução é facilmente explicada pela entrada de ar fresco no contorno da chama, carregando a pluma mais rapidamente para longe e reduzindo a temperatura pela diluição dos gases. Já a análise numérica mostrou valores, para ambos combustíveis, com uma aproximação de 16% de diferença a mais nos resultados, neste caso a diferença é justificada pela diferença na tendência da temperatura da chama que consequentemente aumentou a temperatura dos gases de combustão, mesmo na região em que as temperaturas apresentadas foram menores.

A temperatura periférica medida com os termopares de junta exposta é facilmente comparada com outros autores e mostra a tendência de decremento da temperatura em função do afastamento dos termopares da borda da poça, decremento este provocado pela convecção do escoamento de ar sobre a poça e consequentemente sobre os termopares que provocam uma redução da temperatura em função da distância. Conforme aumenta a inclinação e o comprimento da chama sobre a borda do tanque, os termopares mais próximos indicam um

aumento da temperatura, uma vez que são afetados pela radiação e pela convecção provocadas pela maior proximidade com a chama. Estes resultados são concordantes com outros estudos que se referem a temperatura local de chamas em tanque e fluxo de radiação da chama. A análise numérica mostrou valores, para o óleo diesel e para o biodiesel, com 184% e 36% de diferença a mais nos resultados, sendo a diferença mais significativa determinada pelos maiores valores das temperaturas nas velocidades até  $2 \text{ m s}^{-1}$  e pelo aumento do ângulo da chama o qual determinou um aumento da proximidade da ponta da chama em relação aos termopares, com isso provocando leituras de temperaturas bem maiores principalmente na velocidade de  $2 \text{ m s}^{-1}$ .

As taxas de queima mássica foram obtida para uso nas correlações semi-empíricas e apresentaram curvas muito semelhantes à literatura para diversos autores. Para o diesel foi observado um incremento rápido nas velocidades baixas, até  $1 \text{ m s}^{-1}$ , logo depois ocorreu um decremento até a velocidade de  $2 \text{ m s}^{-1}$  e após um novo incremento até a velocidade de  $4 \text{ m s}^{-1}$ . A poça de biodiesel apresentou um decremento constante e suave da taxa de queima mássica até a velocidade de  $2 \text{ m s}^{-1}$  e após incrementou até o valor máximo da velocidade.

A dispersão de poluentes é em geral um item muito importante, devido ao impacto que representa sobre a sociedade. No presente trabalho foram investigadas as dispersões de CO, NO e SO<sub>2</sub>, provenientes da queima em poça de óleo diesel e biodiesel.

Foi verificado que o aumento da distância da fonte pontual faz com que as concentrações de poluentes reduzam o seu valor devido à diluição da espécie em função da entrada de ar ao longo do seu percurso na direção do escoamento. O aumento da velocidade do escoamento do ar aumenta a velocidade de trânsito das partículas, além de adicionar um maior volume de ar sobre a pluma da chama, fazendo com que ocorra a mistura das partículas com uma quantidade maior de ar proveniente deste escoamento e que, somado ao ar da vizinhança, faz o valor das emissões reduzirem em função desta diluição, esta tendência se repetiu na análise de todas as espécies investigadas.

A dispersão do CO no biodiesel foi menor, o que já era esperado e corrobora com outros autores. O valor da concentração foi de 13,5 ppm. Isto representa uma diferença de 150% na redução de CO em relação ao diesel. Os dados das simulações para as dispersões se mostraram superestimados mas apresentaram a mesma tendência de redução ao longo da distância. As diferenças entre os dados experimentais e numéricos foram de cerca de 47% e 81% a mais em relação aos dados numéricos, para o diesel e o biodiesel, respectivamente.

As concentrações de NO apresentaram a mesma tendência de redução que o CO, porém obtiveram leituras bem menores, o que é coerente com a literatura, outro dado

importante é que apresentaram valores maiores para o biodiesel em relação ao diesel. Isto é coerente com os estudos de diversos autores. A produção de NO, no caso do biodiesel, ocorreu em velocidades menores, isso se deve ao fato de que a temperatura foi maior para o biodiesel em relação ao diesel. Os resultados numéricos apresentaram valores maiores de NO para o óleo diesel e ficaram cerca de 1450% maiores. Para o biodiesel a diferença foi de 837% a mais em relação aos valores experimentais, contudo a diferença entre os dados simulados de diesel e biodiesel ficou em cerca de 900% menor do biodiesel em relação ao diesel, o que não é coerente com os dados da literatura e com os dados experimentais.

As concentrações de SO<sub>2</sub> apresentaram uma diminuição nos testes experimentais do biodiesel em relação ao diesel, devido à normativa nacional de redução da presença de enxofre já na formulação do combustível, o valor é totalmente coerente. Foram encontrados até 10,5 ppm no experimento com diesel e 5,5 ppm para os experimentos com biodiesel, uma diferença de aproximadamente 84% em relação ao biodiesel, o que é pertinente em virtude do exposto. Com a análise dos dados numéricos foi verificado que a tendência de redução permaneceu, porém ocorreram valores maiores de SO<sub>2</sub>, que ficaram cerca de 1600% e 232% maiores, para o diesel e o biodiesel, respectivamente, em relação aos experimentos.

Os dados experimentais das concentrações poderiam ter apresentado resultados melhores caso o instrumento utilizado na análise apresentasse um menor valor de incertezas para os gases analisados, pois, conforme visto, alguns valores medidos estavam compreendidos totalmente dentro da margem de incertezas.

Por fim, os resultados das simulações, para a geometria da chama, se mostraram razoáveis. A temperatura da pluma e a temperatura periférica apresentaram resultados com valores superiores, mas mostram a mesma tendência que os ensaios experimentais. Porém ocorreu uma discrepância muito grande dos dados referentes às temperaturas da chama, que mostrou uma tendência inversa aos resultados experimentais, e às concentrações de poluentes, NO, CO e SO<sub>2</sub>, levados possivelmente por dados pouco precisos sobre formulação química e propriedades físicas dos combustíveis, assim como devido aos modelos de combustão e de cinética química empregados pelo programa. A resolução dos fenômenos de transporte e as simplificações efetuados pelo FDS para a resolução dos problemas de combustão e transporte de gases podem ter criado as diferenças apresentadas. O FDS se mostrou uma ferramenta interessante na modelagem numérica de testes com incêndios em poça, com vários recursos que podem ser aprimorados e uma grande gama de opções disponíveis para implementação de uma diversidade de testes. Como empecilho, o tempo de simulação médio para os testes se mostrou muito alto, sendo cerca de  $2,55 \cdot 10^6$  s, o que dá cerca de 709,5 h (29,6 dias) por

simulação, mostrando a necessidade de recursos computacionais mais robustos para a execução de grandes simulações em escala real usando o FDS, que mostra capacidade de criar um modelo semelhante ao real.

## 6 CONCLUSÕES

O presente trabalho fez a análise numérica e experimental de uma poça em queima aberta na condição de um escoamento de ar incidente sobre a chama, que pode ser muito parecido com um acidente em campo aberto em que o fogo pode ser representado por uma poça em chamas. A problemática para esta análise veio da necessidade constante de aprimorar os conhecimentos envolvidos neste tipo de situação, que pode ocorrer em complexos industriais de petróleo, químicas e depósitos de produtos inflamáveis, com ou sem a liberação de fluidos tóxicos.

No presente trabalho foi focada a análise da dispersão de poluentes, da geometria da chama, e.g., altura, ângulo e comprimento, das temperaturas da chama e da pluma e da taxa de queima mássica envolvida na queima livre de hidrocarbonetos, derivados do petróleo (óleo diesel S-500) e biocombustíveis (biodiesel B-100).

O objetivo proposto, de desenvolver e validar, por comparação com a literatura, a metodologia experimental para análises de incêndios em tanques de combustível, foi atingido, com a definição de um modelo em escala aplicado em um túnel de vento para obtenção de dados de queima em poça aberta. A análise dos dados obtidos possibilitou a criação de uma visão geral da geometria de uma poça de incêndio exposta a um escoamento de ar incidindo paralelamente à sua superfície. O ângulo, o comprimento e a altura da chama apresentaram semelhanças com diversos trabalhos da literatura onde o ângulo cresce com o aumento do escoamento enquanto o comprimento e a altura diminuem com a mesma relação. Isto mostra que um modelo em escala reduzida pode apresentar dados que ajudam a compreender e a identificar as características de um incêndio em poça, o que permite o aprimoramento de procedimentos de segurança como, por exemplo, o distanciamento entre tanques em uma planta industrial.

O desenvolvimento e validação, por comparação com os resultados experimentais, da modelagem numérica para análise de incêndios em tanques de combustível com a utilização do FDS se mostrou interessante nos quesitos de geometria, apresentando uma diferença máxima de cerca de 18%. Quando comparados com as análises dos dados de temperaturas (temperatura adimensional de chama e pluma e temperaturas periféricas), taxa de queima mássica e de dispersão de poluentes, os dados numéricos apresentaram diferenças de 42%, 300% e até 1600%, respectivamente. A modelagem numérica proposta no FDS utilizou o modelo de mistura de gases simples com espécies aglomeradas que são, na verdade, grupos de espécies primitivas que apenas existem em um escoamento em certas proporções. Este

modelo é uma simplificação do modelo de Deardoff para o escoamento de partículas Lagrangeanas. Conforme foi apresentado anteriormente, este modelo simplificado não apresentou resultados similares aos experimentais para as espécies químicas.

Desta forma, os resultados numéricos apresentaram divergência para os parâmetros com dependência da temperatura e boa aproximação para resultados geométricos, isto denota a boa capacidade que o FDS tem para simular geometrias complexas de propagação de incêndios. O software, neste trabalho, assim como em outros apresentados na literatura científica, mostra ótima capacidade para simulação de situações de incêndio, com a ressalva de ser necessária a utilização de um modelo de resolução não simplificado para a obtenção de resultados mais robustos para as espécies químicas.

A comparação dos resultados dos modelos, numérico e experimental, com os dados da literatura se mostrou interessante ao apresentar neste trabalho dados concordantes com os dados de geometrias de diversos trabalhos. Os resultados das comparações com equações semi-empíricas também se mostraram interessantes, apresentando diferenças com valores abaixo de 5,8 e 6,2%, para o diesel e biodiesel, respectivamente. Os dados de dispersão apresentaram alguns valores que mostram o potencial de poluição causado por um queima em poça aberta, na ocorrência de um acidente, por exemplo, e ajudam a demonstrar o aprimoramento na redução do impacto causado pelos biocombustíveis.

Apenas uma pequena quantidade de dados e estudos com biocombustíveis é apresentada atualmente na literatura. Com o crescimento da produção e, conseqüentemente, a necessidade de estocagem em grandes tanques, o estudo de queima de biocombustíveis a fim de caracterizar suas características geométricas e térmicas em queima em poça aberta é muito importante.

Conforme apresentado neste trabalho, o biodiesel possui características diferentes daquelas do diesel, apresentando algumas diferenças em seu regime de queima e geometria característica em uma poça aberta. O diesel se mostrou mais difícil para iniciar a combustão, mas após a queima iniciada, o combustível apresentou valores maiores de propagação geométrica e, qualitativamente, temperaturas mais elevadas. Isto apresenta uma maior dificuldade no combate a um incêndio em poça para este combustível.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como prosseguimento deste trabalho, sugere-se, a título de trabalhos futuros:

- a) Analisar as propriedades físico-químicas dos combustíveis, óleo diesel (S-500) e biodiesel (B-100) a fim de realizar um teste numérico comparativo para determinação da aproximação dos resultados;
- b) Analisar a diferença nas concentrações de poluentes em função do diâmetro da poça e utilizando um analisador de gases com menores incertezas de medição e/ou com outros métodos de medição;
- c) Executar testes com outros biocombustíveis como etanol e óleo de cozinha reciclado para determinação de sua caracterização e comportamento em combustão em poça;
- d) Executar simulações numéricas utilizando outros softwares e modelos de combustão;
- e) Executar testes numéricos em escala real com tanques de armazenamento para determinação da semelhança de parâmetros geométricos da chama e dispersão de poluentes em caso de acidentes reais.



## REFERÊNCIAS

- ALLERMAN, Teresa L.; MCCORMICK, Robert L. **Biodiesel handling and use guide**. 5th. ed. National Renewable Energy Laboratory (NREL), U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Clean Cities, 2016. 63 p.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). **API Publication 4261**: Alcohols and ethers: a technical assessment of their application as fuel and fuel components. 2nd ed. Washington: API, 1988. 89 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Site da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Página dados estatísticos - Vendas. Disponível em: < [http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/DADOS\\_ESTADISTICOS/Vendas/Vendas\\_de\\_Combustiveis\\_m3.xls](http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/DADOS_ESTADISTICOS/Vendas/Vendas_de_Combustiveis_m3.xls)>. Acesso em: 05 jan. 2017.
- ARGYROPOULOS, C.D.; SIDERIS, G.M.; CHRISTOLIS, M.N.; NIVOLIANITOU, Z.; MARKATOS, N.C. Modelling pollutants dispersion and plume rise from large hydrocarbon tank fires in neutrally stratified atmosphere. **Atmospheric Environment**, n. 44, 2010. p. 803-813
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 17505-1**: Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis - Parte 1: Disposições gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7821**: Tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados. Rio de Janeiro, 1983.
- BABRAUSKAS, Vytenis. Estimating large pool fire burning rates. **Fire Technology**, n. 19, 1983. p. 251-261
- BARLOW, B. J.; POPE, A; RAE, W. H. **Low speed wind tunnel testing**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1999. 728 p.
- BARROS, Stenio Monteiro de. **Tanques de armazenamento**. Rio de Janeiro: PETROBRAS. Recursos Humanos. Universidade Petrobras, 1998. 486 p.
- BAZOOYAR, Bahamin; GHORBANI, Afshin; SHARIATI, Ahmad. Combustion performance and emissions of petrodiesel and biodiesels based on various vegetable oils in a semi-industrial boiler. **Fuel**, n. 90, 2011. p. 3078-3092
- BELLASIO, Roberto; BIANCONI, Ricardo. On line simulation system for industrial accidents. **Environmental Modelling & Software**, n. 20, 2005. p. 329-342
- BOHON, Myles D.; AL RASHIDI, Mariam J.; SARATHY, S. Mani; ROBERTS, William L. Experiments and simulations of NOx formation in the combustion of hydroxylated fuels. **Combustion and Flame**, n. 162, 2015. p. 2322-2336
- BRIGGS, Gary A. A plume rise model compared with observations. **Journal of the Air Pollution Control Association**, vol. 15, n. 9, 1965. p. 433-438
- BRITTER, Rex E. **Recent GASTAR 3.2 user manual**. Cambridge: CERC, 2009. 129 p.

- BRITTER, R. E.; MCQUAID, J. **Workbook on the dispersion of dense gas**. HSE Contract Research Report n. 17, 1988. p. 129-134
- BUYUKKAYA, Ekrem. Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics. **Fuel**, n. 89, 2010. p. 3099-3105
- CARVALHO JR., João Andrade de; LACAVA, Pedro Teixeira. **Emissões em processos de combustão**. 1. ed. São Paulo: UNESP, 2003. 135 p.
- CARVALHO JR., João Andrade de; MCQUAY, Mardson Queiroz. **Princípios de combustão aplicada**. 1. ed. Florianópolis: UFSC, 2007. 176 p.
- ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2007. 980 p.
- ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Thermodynamics: an engineering approach**. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2006. 963 p.
- CHEN, Zhen; SONG, Wen-hua; LV, Ling-yue. Analysis for combustion characteristics of large-scale pool fire with wind. **Fourth International Conference on Multimedia Information Networking and Security**, 2012. p. 505-508
- COELHO, Pedro; COSTA, Mário. **Combustão**. 1. ed. Amadora: Órion, 2007. 714 p.
- COMISSÃO DE NORMALIZAÇÃO TÉCNICA (CONTEC). **N-270: Projeto de tanque de armazenamento atmosférico**. Rev. F. PETROBRAS. 2014. 64 p.
- COSTA, Regiane A. B. **Estudo das eficiências de operação e consumo de energia em plantas de produção de biodiesel**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Mestrado em Engenharia Química. USP, 2009. 104 p.
- CRESESB. **Site do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito**. Página potencial eólico - Atlas do potencial eólico brasileiro. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 20 jun. 2016.
- DEARDORFF, James W. Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layer. **Journal of the Atmospheric Sciences**, vol. 29, 1972. p. 91-115
- DEGRAZIA, Gervásio A.; GOULART, Antônio G. O. Turbulência e dispersão de contaminantes na camada limite planetária. **ETT 2004 - IV Escola de Primavera de Transição e Turbulência**. Porto Alegre: ABCM, 2004. cap. 3, 35 p.
- DEGRAZIA, Gervásio A.; MORAES, Osvaldo L. L. Simulação numérica da dispersão de poluentes em camadas limites planetárias convectiva e estável. **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol. 4, n. 1. São Paulo: SBMET, 1989. p. 275-287
- DRYSDALE, Dougal. **An introduction to fire dynamics**. 3. ed. Chennai: John Wiley & Sons, 2011. 564 p.
- ERMAK, Donald L. **User's manual for SLAB: an atmospheric dispersion model for denser-than-air releases**. Lawrence Livermore National Laboratory. Califórnia: UCRL-94071, 1990. 150 p.

ERMAK, Donald L.; CHAN, S.T. **Recent developments on the FEM3 and SLAB atmospheric dispersion models**. Lawrence Livermore National Laboratory. California: UCRL-MA, 1986.

FENIMORE, C. P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. **13th Symposium (International) on Combustion**, 1970. Salt Lake City, Utah. Combustion Institute. Pittsburgh, Pa, 1971. p. 373-380

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 884 p.

G1. Incêndio em contêineres no Porto de Santos é controlado pelos bombeiros. **Site G1 Jornal Hoje**, São Paulo, 16 jan. 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/jornal-hoje/noticia/2016/01/incendio-em-containeres-no-porto-de-santos-e-controlado-pelos-bombeiros.html>>. Acesso em: 14 jun. 2016.

G1. Incêndio provoca explosões em área industrial de Santos, SP. **Site G1 Santos**, São Paulo, 02 abr. 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sp/santos-regiao/noticia/2015/04/incendio-atinge-industria-no-bairro-alemoa-em-santos-litoral-de-sp.html>>. Acesso em: 14 jun. 2016.

GEOFRAFOS. **Site de Informações Geográficas Grátis**. Disponível em: <<http://www.geografos.com.br/cidades-rio-grande-do-sul/sao-leopoldo.php>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

GHORBANI, Afshin; BAZOOYAR, Bahamin; SHARIATI, Ahmad; JOKAR, Seyyed Mohammad; AJAMI, Hadi; NADERI, Ali. A comparative study of combustion performance and emission of biodiesel blends and diesel in an experimental boiler. **Applied Energy**, n. 88, 2011. p. 4725-4732

GLASSMAN, Irvin; YETTER, Richard A. **Combustion**. 4. ed. Amsterdam: Academic Press, 2008. 794 p.

HAMINS, Anthony; YANG, Jiann C.; KASHIWAGI, Takashi. **A global model for predicting the burning rates of liquid pool fires**. National Institute of Standards and Technology. Building and Fire Research Laboratory. Special Publication NISTIR 6381: Maryland, 1999. 31 p.

HAVENS, Jerry A. **A Dispersion model for elevated dense gas jet chemical releases**. Research Triangle Park, N.C.: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air and Radiation, Office of Air Quality Planning and Standards. Springfield: National Technical Information Service distributor, 1988. 140 p.

HAVENS, Jerry A. Review of dense gas dispersion field experiments. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, vol. 5, n. 1, 1992. p. 28-41

HAVENS, Jerry; WALKER, Heather; SPICER, Thomas O. Wind tunnel study of air entrainment into two-dimensional dense gas plumes at the Chemical Hazards Research Center. **Atmospheric Environment**, n. 35, 2001. p. 2305-2317

HAYHURST, A. N.; VINCE, I.M. Nitric oxide formation from N<sub>2</sub> in flames: the importance of prompt NO. **Progress in Energy and Combustion Science**, n. 6, 1980. p. 35-51

HU, Longhua; HU, Junjun; LIU, Shuai; TANG, Wei; ZHANG, Xiaozheng. Evolution of heat feedback in medium pool fires with cross air flow and scaling of mass burning flux by a stagnant layer theory solution. **Proceedings of the Combustion Institute**, n. 35, 2015. p. 2511-2518

HU, Longhua; KUANG, Chen; ZHONG, Xinpeng; REN, Fei; ZHANG, Xiaolei; DING, Hang. An experimental study on burning rate and flame tilt of optical-thin heptane pool fires in crossflows. **Proceedings of the Combustion Institute** 000, 2016. p. 1-8

HU, Longhua; LIU, S.; PENG, W.; HUO, R. Experimental study on burning rates of square and rectangular gasoline and methanol pool fires under longitudinal air flow in a wind tunnel. **Journal of Hazardous Materials**, n. 169, 2009. p. 972-979

HU, Longhua; LIU, Shuai; RIS, John L. de; WU, Long. A new mathematical quantification of wind-blown flame tilt angle of hydrocarbon pool fires with a new global correlation model. **Fuel**, n. 106, 2013. p. 730-736

HU, Longhua; LIU, Shuai; XU, Yong; LI, Dong. A wind tunnel experimental study on burning rate enhancement behavior of gasoline pool fires by cross air flow. **Combustion and Flame**, n. 158, 2011. p. 586-591

HURLEY, Morgan J. **SFPE Handbook of fire protection engineering**. 5. ed. New York: Springer, Society of Fire Protection Engineers, 2016. 3512 p.

INSTRUTEMP. Página de Produtos: análise de gases de combustão. **Site Instrutemp**. Disponível em: <<http://www.instrutemp.com.br/instrutemp/produto/53/analizador+de+gas+de+combustao+it905>>. Acesso em: 28 jun. 2016.

MILLS, Ian; CVITAŠ, Tomislav; HOMANN, Klaus; KALLAY, Nikola; KUCHITSU, Kozo. **IUPAC - International Union of Pure and Applied Chemistry: Quantities, units and symbols in physical chemistry**. 2nd ed. Oxford: Blackwell Science Ltd, 1993. 165 p.

JIANG, F.H. A simple method for prediction of mass burning rates in compartment fires. Association for Fire Safety Science. **AOFS Symposium 1**, 1992. p. 404-409

JIANG, Ping; LU, Shouxiang. Effects of cross air flow on mass loss rates of circular aviation fuel pool fires in large open space. **Procedia Engineering**, n. 62, 2013. p. 309-316

JAGANNATHA, D.; CHANDRATILLEKE, T.T.; NARAYANASWAMY, R. Heat transfer enhancement in microchannels with cross-flow synthetic jets. **International Journal of Thermal Sciences**, vol. 49, 2010. p. 504-513

JOHNSON, Edward A.; MIYANISHI, Kiyoko. **Forest fires: behavior and ecological effects**. San Diego: Academic Press, 2001. 598 p.

KAISER, G.D.; WALKER, B.C. Releases of anhydrous ammonia from pressurized containers - the importance of denser than air mixtures. **Journal of Atmospheric Environment**, vol. 12, 1978. p. 2289-2300

KLETZ, Trevor A. **What went wrong: case histories of process plant disasters**. 4. ed. Massachusetts: Gulf Publishing Company, 1999. 425 p.

LAM, Cecilia S.; WECKMAN, Elizabeth J. Wind-blown pool fire, part I: experimental characterization of the thermal field. **Fire Safety Journal**, n. 75, 2015a. p. 1-13

LAM, Cecilia S.; WECKMAN, Elizabeth J. Wind-blown pool fire, part II: comparison of measured flame geometry with semi-empirical correlations. **Fire Safety Journal**, n. 78, 2015b. p. 130-141

LAUTKASKI, Risto. Validation of flame drag correlations with data from large pool fires. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, n. 5, 1992. p. 175-180

LI, Yue; CHEN, Dongsheng; CHENG, Shuiyuan; XU, Tingting; HUANG, Qing; GUO, Xiurui; MA, Xin; YANG, Nan; LIU, Xiangxue. An improved model for heavy gas dispersion using time-varying wind data: mathematical basis, physical assumptions, and case studies. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, n. 36, 2015. p. 20-29

LINES, I. G.; DEAVES D. M.; ATKINS, W. S. Practical modeling of gas dispersion in low wind speed conditions, for application in risk assessment. **Journal of Hazardous Materials**, n. 54, 1997. p. 201–206

MAHDAVIMANESH, M.; NOGHREHABADI, A.R.; BEHBAHANINEJAD, M.; AHMADI, G.; DEHGHANIAN, M. Lagrangian particle tracking: model development. **Life Science Journal**, vol. 10, n. 8, 2013. p. 34-41

MANNAN, Sam. **Lees' loss prevention in the process industries volume 1: hazard identification, assessment and control**. 3rd ed. Burlington, Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 2005. 3708 p.

MARTINS, Cristiane Aparecida; FERREIRA, Marco Aurélio. Considerações sobre a formação de NO<sub>x</sub> na combustão. **VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, ABCM: Campina Grande, Paraíba, 18 a 21 de Agosto 2010. 11 p.

MATBASE. **Site Matbase: the free and independent online materials properties resource**. Link fuels em other materials. Disponível em: <<https://www.matbase.com/material-categories/other-materials/fuels/material-properties-of-diesel.html#manufacturing-properties>>. Acesso em: 02 jan. 2017.

MCGRATTAN, K.; HOSTIKKA, S.; FLOYD, J.; BAUM, H.; REHM, R. **Fire dynamics simulator (version 5) technical reference guide**. NIST Special Publication 1018-5, 2007. 100 p.

MCGRATTAN, Kevin; HOSTIKKA, Simo; MCDERMOTT, Randall; FLOYD, Jason; WEINSCHENK, Craig; OVERHOLT, Kristopher. **Fire dynamics simulator technical reference guide volume 1: mathematical model**. National Institute of Standards and Technology Special Publication 1018-1, 2016. 171 p.

MEHTA, R. D.; BRADSHAW, P. Technical notes: design rules for small low speed wind tunnels. **The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society**, November, 1979. p. 443-449

MENEZES, Eliana W. de; CATALUÑA, Renato. Amostragem do material particulado e fração orgânica volátil das emissões em motor ciclo diesel sem a utilização de túnel de diluição. **Química Nova**, vol. 31, n. 8, 2008. p. 2027-2030

MERONEY, Robert N. CFD modeling of dense gas cloud dispersion over irregular terrain. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, n. 104-106, 2012. p. 500-508

MILLER, J. A.; BOWMAN, C. T. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion. **Progress in Energy and Combustion Science**, n. 15, 1989. p. 287-338

MOUILLEAU, Yvon; CHAMPASSITH, Anousone. CFD simulations of atmospheric gas dispersion using the fire dynamics simulator (FDS). **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, n. 22, 2009. p. 316-323

MUZIO, L. J.; QUARTUCY, G. C. Implementing NO<sub>x</sub> control: research to application. **Progress in Energy and Combustion Science**, n. 23, 1997. p. 266-233

NIST. **Site do The National Institute of Standards and Technology**. Disponível em: <[http://www.nist.gov/el/fire\\_research/fds\\_smokeyview.cfm](http://www.nist.gov/el/fire_research/fds_smokeyview.cfm)>. Acesso em: 20 mai. 2016.

OLEOPLAN – Óleos Vegetais Planalto S. A. **Fichas de informação de segurança de produto químico – FISPQ – Biodiesel (B-100)**. Veranópolis: Oleoplan S.A., 2016. 7 p.

OVERHOLT, Kristopher. **Site FDS mesh size calculator**. Disponível em: <<http://www.koverholt.com/fds-mesh-size-calc/>>. Acesso em: 20 fev. 2017.

PETROBRAS - Petróleo Brasileiro S. A. (BR). **Fichas de informação de segurança de produto químico – FISPQ – Biodiesel (B-100)**. Rio de Janeiro: Petróleo Brasileiro S. A., 2015. 11 p.

QUINTIERE, James G. **Fundamentals of fire phenomena**. 1. ed. Wiltshire: John Wiley & Sons Ltd, 2006. 450 p.

REBEC, A.; PLEŠEC, P.; KOLŠEK, J. Pool fire accident in an aboveground LFO tank storage: thermal analysis. **Fire Safety Journal**, n. 67, 2014. p. 135-150

RAJ, P. A physical model and improved experimental data correlation for wind induced flame drag in pool fires. **Fire Technology**, n. 46, 2010. p. 579-609

ROH, Jae Seong; RYOU, Hong Sun; KIM, Dong Hyeon; JUNG, Woo Sung; JANG, Yong Jun. Critical velocity and burning rate in pool fire during longitudinal ventilation. **Tunnelling and Underground Space Technology**, n. 22, 2007. p. 262-271

RYDER, N. L.; SUTULA, J. A.; SCHEMEL, C. F.; HAMER, A. J.; BRUNT, V. V. Consequence modeling using the fire dynamics simulator. **Journal of Hazardous Materials**, n. 115, 2004. p. 149-154

SALLEY, M. H.; LINDEMAN, A. **Verification and validation of selected fire models for nuclear power plant applications**. NUREG-1824, Supplement 1, United States Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 2016. 718 p.

SCHÖNBUCHER, A.; BRÖTZ, W.; BALLUF, C.; GÖCK, D.; SCHIEß, N. Erforschung von Schaden-feuern flssiger Kohlenwasserstoffe als Beitrag zur Sicherheit von Chemieanlagen. "Investigação sobre os danos com incêndio de hidrocarbonetos líquidos como uma contribuição para a segurança de instalações químicas". **Chemie Ingenieur Technik** 57, n. 10, 1985. p. 823-834

SHEN, Tzu-Sheng; HUANG, Yu-Hsiang; CHIEN, Shen-Wen. Using fire dynamic simulation (FDS) to reconstruct an arson fire scene. **Building and Environment**, n. 43, 2008. p. 1036-1045

SIMÕES, J. B.; MIRANDA, P. C. M. L.; ROCHA, A.; MACHADO, F. A. L.; CASTRO, M. P. P.; SILVA, E. C. Caracterização térmica de biodieseis e seus precursores através de técnicas fototérmicas. **32ª RASBQ – Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química**, Sociedade Brasileira de Química, 2009. 1 p.

SJÖSTRÖM, Johan; AMON, Francine; APPEL, Glenn; PERSSON, Henry. Thermal exposure from large scale ethanol fuel pool fires. **Fire Safety Journal**, n. 78, 2015. p. 229-237

SMAGORINSKY, Joseph. General circulation experiments with the primitive equations. **Monthly Weather Review**, vol. 91, n. 3, 1963. p. 99-164

STROUP, D.; LINDEMAN, A. **Verification and validation of selected fire models for nuclear power plant applications**. NUREG-1824, Supplement 1, United States Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 2013.

STROUP, D.; TAYLOR, G.; HAUSMAN, G. **Estimating burning characteristics of liquids pool fire, heat release, burning duration and flame height**. NUREG-1805, Supplement 1, vol. 1, chapter 3, United States Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC: 2013. 131 p.

TANG, Fei; HU, Longhua; QIU, Zengwei; WANG, Qiang. A global model of plume axial temperature profile transition from axisymmetric to line-source pool fires in normal and reduced pressures. **Fuel**, n. 130, 2014. p. 211-214

TANG, Fei; HU, Longhua; ZHANG, Xiaochun; ZHANG, Xiaolei; DONG, Mansheng. Burning rate and flame tilt characteristics of radiation-controlled rectangular hydrocarbon pool fires with cross air flows in a reduced pressure. **Fuel**, n. 139, 2015. p. 18-25

TAUSEEF, S. M.; RASHTCHIAN, D.; ABBASI, S.A. CFD-based simulation of dense gas dispersion in presence of obstacles. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, n. 24, 2011. p. 371-376

THOMAS, P. H.; PICKARD, R. W.; WRAIGHT, H. G. H. On the size and orientation of buoyant diffusion flames and the effect of wind. Department of Scientific and Industrial Research and Fire Offices' Committee, **Joint Fire Research Organization**, Fire Research Note n. 516, Fire Research Station, Boreham Wood, UK, 1963. 26 p.

TRAN, Victor; MORTON, Cory; PARTHASARATHY, Ramkumar N.; GOLLAHALLI, Subramanyam R. Pool fires of biofuels and their blends with petroleum diesel. **International Journal of Green Energy**, n. 11, 2014. p. 595-610

TRUCHOT, Benjamin; DURUSSEL, Thierry; DUPLANTIER, Stephane. Combustion rate of medium scale pool fire, an unsteady parameter. **International Symposium on Safety Science and Technology 2010**. Beijing: Science Press, 2010. p.575-585

URNS, Stephen R. **An introduction to combustion: concepts and applications**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2000. 700 p.

- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). **A Comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions**: draft technical report. EPA420-P-02-001 Report. Assessment and Standards Division, Office of Transportation and Air Quality: Air and Radiation. Washington DC: EPA, October 2002. 126 p.
- VAN DER LANS, R. P.; GLARBORG, P.; DAM-JOHANSEN, K. Influence of process parameters on nitrogen oxide formation in pulverized coal burners. **Progress in Energy and Combustion Science**, n. 23, 1997. p. 349-377
- VERTÈS, Alain A.; QURESHI, Nasib; BLASCHEK, Hans P.; YUKAWA, Hideaki. **Biomass to biofuels**: strategies for global industries. 1. ed. Wiltshire: John Wiley & Sons Ltd, 2010. 584 p.
- WAHLQVIST, Jonathan; van HEES, Patric. Validation of FDS for large-scale well-confined mechanically ventilated fire scenarios with emphasis on predicting ventilation system behavior. **Fire Safety Journal**, vol. 62, 2013. p. 102-114
- WARK, Kenneth; WARNER, Cecil F.; DAVIS, Wayne T. **Air Pollution**: its origin and control. 3. ed. Michigan: Prentice Hall, 1997. 560 p.
- WEN, J.X.; KANG, K.; DONCHEV, T.; KARWATZKI, J.M. Validation of FDS for the prediction of medium-scale pool fires. **Fire Safety Journal**, n. 42, 2007. p. 127-138
- WHITE, Frank M. **Fluid mechanics**. 5. ed. Boston: McGraw-Hill, 2009. 826 p.
- WOODS, Joshua A.R.; FLECK, Brian A.; KOSTIUK, Larry W. Effects of transverse air flow on burning rates of rectangular methanol pool fires. **Combustion and Flame**, n. 146, 2006. p. 379-390
- ZAITSAU, Dzmitry H.; VEREVKIN, Sergey P. Thermodynamics of biodiesel: combustion experiments in the standard conditions and adjusting of calorific values for the practically relevant range (273 to 373) K and (1 to 200) bar. **Journal of Brazilian Chemical Society**, vol. 24, n. 12, 2013. p. 1920-1925
- ZHANG, Z.; CHEN, Q. Comparison of the Eulerian and Lagrangian methods for predicting particle transport in enclosed spaces. **Atmospheric Environment**, vol. 41, n. 25, 2007. p. 5236-5248



**APÊNDICE A - PROGRAMA PARA OBTENÇÃO DOS RESULTADOS DO ÓLEO  
DIESEL**

&HEAD CHID = 'TESTE3DS', TITLE = 'POCA DE DIESEL EM 1,0 M/S' /  
!Exemplo para teste com diesel e velocidade do vento de 1 m/s.

! Os valores após IJK são as células da malha, ou tamanho da malha de simulação, onde o valor de XB é dividido pelo valor de IJK e entrega a malha. Os valores de XB são dados em metros. X = 1,75 m, Y = 0,3 m e Z = 1,5 m.

&MESH IJK = 18,30,90, XB = -0.525,-0.225,-0.15,0.15,0.0,1.5, COLOR = 'ORANGE' /  
Malha traseira 0,3 x 0,3 x 1,5 (0,017x0,01x0,017)

&MESH IJK = 30,9,90, XB = -0.225,0.275,-0.15,-0.06,0.0,1.5, COLOR = 'RED' /  
Malha topo 0,5 x 0,09 x 1,5 (0,017x0,01x0,017)

&MESH IJK = 50,24,150, XB = -0.225,0.275,-0.06,0.06,0.0,1.5, COLOR = 'GREEN' /  
Malha centro 0,5 x 0,12 x 1,5 (0,01x0,005x0,01)

&MESH IJK = 30,9,90, XB = -0.225,0.275,0.06,0.15,0.0,1.5, COLOR = 'BLUE' /  
Malha base 0,5 x 0,09 x 1,5 (0,017x0,01x0,017)

&MESH IJK = 95,30,90, XB = 0.275,1.225,-0.15,0.15,0.0,1.5, COLOR = 'VIOLET' /  
Malha frontal 0,95 x 0,3 x 1,5 (0,01x0,01x0,017)

!mesh1 = 48600

!mesh2 = 24300

!mesh3 = 180000

!mesh4 = 24300

!mesh5 = 256600

!Número total de células é de 533700

&TIME T\_END = 600. / Tempo de simulação em segundos

&DUMP DT\_RESTART = 3 / Tempo em segundos para salvar a análise e reiniciar caso ocorra problemas

!&MISC RESTART = .TRUE. / Reinicia no caso de bug

&MISC TMPA = 28. / Opções de condições do ensaio. Temperatura ambiente em °C

&SURF ID = 'SUPPLY', VEL = -1.0, COLOR = 'CYAN' /

&VENT XB = -0.52,-0.52,-0.14,0.14,0.01,0.26, SURF\_ID = 'SUPPLY' /

! Vento simulado como um ventilador em um plano de 0,28x0,25 m

-----Medidas que determinam o contorno do túnel de vento-----

&OBST XB = -0.525,-0.225,-0.15,-0.14,0.01,0.26, SURF\_ID = 'PLASTIC PLATE' / 1

&OBST XB = -0.525,-0.225,-0.15,0.15,0.0,0.01, SURF\_ID = 'PLASTIC PLATE' / 2

&OBST XB = -0.525,-0.225,0.14,0.15,0.01,0.26, SURF\_ID = 'PLASTIC PLATE' / 3

&OBST XB = -0.525,-0.225,-0.15,0.15,0.26,0.27, SURF\_ID = 'PLASTIC PLATE' / 4

&OBST XB = -0.525,-0.520,-0.15,0.15,0,0.27, SURF\_ID = 'PLASTIC PLATE' / 5

Espécies químicas dos componentes da mistura, da reação e da combustão

&SPEC ID = 'DIESEL',

FORMULA = 'C13H29S1N1' / !Menezes e Cataluña (2008) (valor médio)

```

&SPEC ID = 'OXYGEN', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'NITROGEN', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'WATER VAPOR', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'CARBON MONOXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'CARBON DIOXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'SULFUR DIOXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'SOOT', FORMULA = 'C', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'NITRIC OXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /

```

Espécies químicas da mistura de ar ambiente

```

&SPEC ID = 'AIR',
  SPEC_ID(1) = 'OXYGEN', VOLUME_FRACTION(1) = 20.725,
  SPEC_ID(2) = 'NITROGEN', VOLUME_FRACTION(2) = 154.85,
  BACKGROUND = .TRUE. /

```

Espécies químicas do produto da combustão

```

&SPEC ID = 'PRODUCTS',
  SPEC_ID(1) = 'CARBON DIOXIDE', VOLUME_FRACTION(1) = 11.85,
  SPEC_ID(2) = 'CARBON MONOXIDE', VOLUME_FRACTION(2) = 0.25,
  SPEC_ID(3) = 'WATER VAPOR', VOLUME_FRACTION(3) = 14.5,
  SPEC_ID(4) = 'SOOT', VOLUME_FRACTION(4) = 0.9,
  SPEC_ID(5) = 'NITROGEN', VOLUME_FRACTION(5) = 154.85,
  SPEC_ID(6) = 'NITRIC OXIDE', VOLUME_FRACTION(6) = 1,
  SPEC_ID(7) = 'SULFUR DIOXIDE', VOLUME_FRACTION(7) = 1 /

```

!A fuligem é considerada como uma componente de C<sub>0</sub>9H<sub>0</sub>1, devido a isso a mesma é declarada como 0.9

Propriedades químicas e reação de combustão do combustível

```

&REAC ID = 'DIESEL',
  FUEL = 'DIESEL',
  CO_YIELD = 0.019 !Tabela A.40 - pag. 3475 – SFPE, Hurley (2016)
  SOOT_YIELD = 0.054 !Tabela A.40 - pag. 3475 – SFPE, Hurley (2016)
  HEAT_OF_COMBUSTION = 45253 !Análise no calorímetro - Unisinos
  RADIATIVE_FRACTION = 0.0 !Program set default
  SPEC_ID_NU = 'DIESEL', 'AIR', 'PRODUCTS' !Combustível + ar = Produtos da
combustão
  NU = -1, -1, 1 /

```

Propriedades termodinâmicas do combustível

```

&MATL ID = 'DIESEL'
  EMISSIVITY = 0.95 !Program set default
  NU_SPEC = 0.97 !Program set default
  SPEC_ID = 'DIESEL'
  HEAT_OF_REACTION = 234.25 !Segundo Tabela API pag. 80. - API PUB 4261 (1988)

```



CONDUCTIVITY = 0.201 !Segundo Belmetal Plásticos (Fabricante)  
 SPECIFIC\_HEAT = 1.465 / !Segundo Macedo Acrílicos (Fabricante)

Propriedades do túnel de vento  
 &SURF ID = 'PLASTIC PLATE'  
 COLOR = 'GRAY'  
 TRANSPARENCY = 0.7  
 MATL\_ID = 'PLASTIC'  
 THICKNESS = 0.01 /

-----Medidas de que determinam o ambiente aberto nas redondezas da poça-----

&VENT MB = 'XMIN', SURF\_ID = 'OPEN' / Ambiente aberto -X  
 &VENT MB = 'YMIN', SURF\_ID = 'OPEN' / Ambiente aberto +X  
 &VENT MB = 'XMAX', SURF\_ID = 'OPEN' / Ambiente aberto -Y  
 &VENT MB = 'YMAX', SURF\_ID = 'OPEN' / Ambiente aberto +Y  
 &VENT MB = 'ZMAX', SURF\_ID = 'OPEN' / Ambiente aberto +Z

-----Medidas de que determinam o contorno do combustível-----

&OBST XB = -0.005,0.005,-0.055,-0.053,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 1  
 &OBST XB = -0.015,0.015,-0.053,-0.051,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 2  
 &OBST XB = -0.02,0.02,-0.051,-0.049,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 3  
 &OBST XB = -0.025,0.025,-0.049,-0.047,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 4  
 &OBST XB = -0.0285,0.0285,-0.047,-0.045,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 5  
 &OBST XB = -0.0315,0.0315,-0.045,-0.043,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 6  
 &OBST XB = -0.0345,0.0345,-0.043,-0.041,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 7  
 &OBST XB = -0.0365,0.0365,-0.041,-0.039,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 8  
 &OBST XB = -0.039,0.039,-0.039,-0.037,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 9  
 &OBST XB = -0.0405,0.0405,-0.037,-0.035,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 10  
 &OBST XB = -0.0425,0.0425,-0.035,-0.033,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 11  
 &OBST XB = -0.044,0.044,-0.033,-0.031,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 12  
 &OBST XB = -0.0455,0.0455,-0.031,-0.029,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 13  
 &OBST XB = -0.047,0.047,-0.029,-0.027,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 14

&OBST XB = -0.048,0.048,-0.027,-0.025,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 15  
&OBST XB = -0.049,0.049,-0.025,-0.023,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 16  
&OBST XB = -0.05,0.05,-0.023,-0.021,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 17  
&OBST XB = -0.051,0.051,-0.021,-0.019,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 18  
&OBST XB = -0.0515,0.0515,-0.019,-0.017,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 19  
&OBST XB = -0.0525,0.0525,-0.017,-0.015,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 20  
&OBST XB = -0.053,0.053,-0.015,-0.013,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 21  
&OBST XB = -0.0535,0.0535,-0.013,-0.011,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 22  
&OBST XB = -0.054,0.054,-0.011,-0.009,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 23  
&OBST XB = -0.0545,0.0545,-0.009,-0.007,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 24  
&OBST XB = -0.0545,0.0545,-0.007,-0.005,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 25  
&OBST XB = -0.055,0.055,-0.005,-0.003,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 26  
&OBST XB = -0.055,0.055,-0.003,-0.001,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 27  
&OBST XB = -0.055,0.055,-0.001,0.001,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 28  
&OBST XB = -0.055,0.055,0.001,0.003,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 29  
&OBST XB = -0.055,0.055,0.003,0.005,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 30  
&OBST XB = -0.055,0.0545,0.005,0.007,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 31  
&OBST XB = -0.0545,0.0545,0.007,0.009,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 32  
&OBST XB = -0.054,0.054,0.009,0.011,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 33  
&OBST XB = -0.0535,0.0535,0.011,0.013,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 34  
&OBST XB = -0.053,0.053,0.013,0.015,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 35  
&OBST XB = -0.0525,0.0525,0.015,0.017,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 36  
&OBST XB = -0.0515,0.0515,0.017,0.019,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 37

&OBST XB = -0.051,0.051,0.019,0.021,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 38  
 &OBST XB = -0.05,0.05,0.021,0.023,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 39  
 &OBST XB = -0.049,0.049,0.023,0.025,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 40  
 &OBST XB = -0.048,0.048,0.025,0.027,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 41  
 &OBST XB = -0.047,0.047,0.027,0.029,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 42  
 &OBST XB = -0.0455,0.0455,0.029,0.031,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 43  
 &OBST XB = -0.044,0.044,0.031,0.033,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 44  
 &OBST XB = -0.0425,0.0425,0.033,0.035,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 45  
 &OBST XB = -0.041,0.041,0.035,0.037,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 46  
 &OBST XB = -0.039,0.039,0.037,0.039,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 47  
 &OBST XB = -0.0365,0.0365,0.039,0.041,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 48  
 &OBST XB = -0.0345,0.0345,0.041,0.043,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 49  
 &OBST XB = -0.0315,0.0315,0.043,0.045,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 50  
 &OBST XB = -0.0285,0.0285,0.045,0.047,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 51  
 &OBST XB = -0.025,0.025,0.047,0.049,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 52  
 &OBST XB = -0.02,0.02,0.049,0.051,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 53  
 &OBST XB = -0.015,0.015,0.051,0.053,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 54  
 &OBST XB = -0.005,0.005,0.053,0.055,0.0019,0.0457, SURF\_IDS='DIESEL','STEEL SHEET','STEEL SHEET' / 55

-----Medidas de que determinam o contorno do tanque-----

&OBST XB = -0.005,-0.005,-0.055,-0.053,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 1  
 &OBST XB = -0.005,-0.015,-0.053,-0.053,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 2  
 &OBST XB = -0.015,-0.015,-0.053,-0.051,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 3  
 &OBST XB = -0.015,-0.02,-0.051,-0.051,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 4  
 &OBST XB = -0.02,-0.02,-0.051,-0.049,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 5  
 &OBST XB = -0.02,-0.025,-0.049,-0.049,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 6  
 &OBST XB = -0.025,-0.025,-0.049,-0.047,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 7

&OBST XB = -0.025,-0.0285,-0.047,-0.047,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 8  
&OBST XB = -0.0285,-0.0285,-0.047,-0.045,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 9  
&OBST XB = -0.0285,-0.0315,-0.045,-0.045,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 10  
&OBST XB = -0.0315,-0.0315,-0.045,-0.043,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 11  
&OBST XB = -0.0315,-0.0345,-0.043,-0.043,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 12  
&OBST XB = -0.0345,-0.0345,-0.043,-0.041,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 13  
&OBST XB = -0.0345,-0.0365,-0.041,-0.041,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 14  
&OBST XB = -0.0365,-0.0365,-0.041,-0.039,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 15  
&OBST XB = -0.0365,-0.039,-0.039,-0.039,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 16  
&OBST XB = -0.039,-0.039,-0.039,-0.037,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 17  
&OBST XB = -0.039,-0.0405,-0.037,-0.037,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 18  
&OBST XB = -0.0405,-0.0405,-0.037,-0.035,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 19  
&OBST XB = -0.0405,-0.0425,-0.035,-0.035,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 20  
&OBST XB = -0.0425,-0.0425,-0.035,-0.033,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 21  
&OBST XB = -0.0425,-0.044,-0.033,-0.033,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 22  
&OBST XB = -0.044,-0.044,-0.033,-0.031,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 23  
&OBST XB = -0.044,-0.0455,-0.031,-0.031,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 24  
&OBST XB = -0.0455,-0.0455,-0.031,-0.029,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 25  
&OBST XB = -0.0455,-0.047,-0.029,-0.029,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 26  
&OBST XB = -0.047,-0.047,-0.029,-0.027,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 27  
&OBST XB = -0.047,-0.048,-0.027,-0.027,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 28  
&OBST XB = -0.048,-0.048,-0.027,-0.025,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 29  
&OBST XB = -0.048,-0.049,-0.025,-0.025,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 30  
&OBST XB = -0.049,-0.049,-0.025,-0.023,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 31  
&OBST XB = -0.049,-0.05,-0.023,-0.023,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 32  
&OBST XB = -0.05,-0.05,-0.023,-0.021,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 33  
&OBST XB = -0.05,-0.051,-0.021,-0.021,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 34  
&OBST XB = -0.051,-0.051,-0.021,-0.019,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 35  
&OBST XB = -0.051,-0.0515,-0.019,-0.019,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 36  
&OBST XB = -0.0515,-0.0515,-0.019,-0.017,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 37  
&OBST XB = -0.0515,-0.0525,-0.017,-0.017,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 38  
&OBST XB = -0.0525,-0.0525,-0.017,-0.015,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 39  
&OBST XB = -0.0525,-0.053,-0.015,-0.015,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 40  
&OBST XB = -0.053,-0.053,-0.015,-0.013,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 41  
&OBST XB = -0.053,-0.0535,-0.013,-0.013,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 42  
&OBST XB = -0.0535,-0.0535,-0.013,-0.011,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 43  
&OBST XB = -0.0535,-0.054,-0.011,-0.011,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 44  
&OBST XB = -0.054,-0.054,-0.011,-0.009,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 45  
&OBST XB = -0.054,-0.0545,-0.009,-0.009,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 46  
&OBST XB = -0.0545,-0.0545,-0.009,-0.007,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 47  
&OBST XB = -0.0545,-0.0545,-0.007,-0.005,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 48  
&OBST XB = -0.0545,-0.055,-0.005,-0.005,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 49  
&OBST XB = -0.055,-0.055,-0.005,-0.003,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 50  
&OBST XB = -0.055,-0.055,-0.003,-0.001,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 51



&OBST XB = -0.055,-0.055,-0.001,0.001,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 52  
&OBST XB = -0.055,-0.055,0.001,0.003,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 53  
&OBST XB = -0.055,-0.055,0.003,0.005,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 54  
&OBST XB = -0.055,-0.0545,0.005,0.005,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 55  
&OBST XB = -0.0545,-0.0545,0.005,0.007,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 56  
&OBST XB = -0.0545,-0.0545,0.007,0.009,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 57  
&OBST XB = -0.0545,-0.054,0.009,0.009,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 58  
&OBST XB = -0.054,-0.054,0.009,0.011,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 59  
&OBST XB = -0.054,-0.0535,0.011,0.011,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 60  
&OBST XB = -0.0535,-0.0535,0.011,0.013,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 61  
&OBST XB = -0.0535,-0.053,0.013,0.013,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 62  
&OBST XB = -0.053,-0.053,0.013,0.015,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 63  
&OBST XB = -0.053,-0.0525,0.015,0.015,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 64  
&OBST XB = -0.0525,-0.0525,0.015,0.017,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 65  
&OBST XB = -0.0525,-0.0515,0.017,0.017,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 66  
&OBST XB = -0.0515,-0.0515,0.017,0.019,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 67  
&OBST XB = -0.0515,-0.051,0.019,0.019,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 68  
&OBST XB = -0.051,-0.051,0.019,0.021,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 69  
&OBST XB = -0.051,-0.05,0.021,0.021,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 70  
&OBST XB = -0.05,-0.05,0.021,0.023,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 71  
&OBST XB = -0.05,-0.049,0.023,0.023,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 72  
&OBST XB = -0.049,-0.049,0.023,0.025,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 73  
&OBST XB = -0.049,-0.048,0.025,0.025,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 74  
&OBST XB = -0.048,-0.048,0.025,0.027,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 75  
&OBST XB = -0.048,-0.047,0.027,0.027,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 76  
&OBST XB = -0.047,-0.047,0.027,0.029,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 77  
&OBST XB = -0.047,-0.0455,0.029,0.029,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 78  
&OBST XB = -0.0455,-0.0455,0.029,0.031,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 79  
&OBST XB = -0.0455,-0.044,0.031,0.031,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 80  
&OBST XB = -0.044,-0.044,0.031,0.033,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 81  
&OBST XB = -0.044,-0.0425,0.033,0.033,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 82  
&OBST XB = -0.0425,-0.0425,0.033,0.035,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 83  
&OBST XB = -0.0425,-0.041,0.035,0.035,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 84  
&OBST XB = -0.041,-0.041,0.035,0.037,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 85  
&OBST XB = -0.041,-0.039,0.037,0.037,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 86  
&OBST XB = -0.039,-0.039,0.037,0.039,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 87  
&OBST XB = -0.039,-0.0365,0.039,0.039,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 88  
&OBST XB = -0.0365,-0.0365,0.039,0.041,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 89  
&OBST XB = -0.0365,-0.0345,0.041,0.041,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 90  
&OBST XB = -0.0345,-0.0345,0.041,0.043,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 91  
&OBST XB = -0.0345,-0.0315,0.043,0.043,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 92  
&OBST XB = -0.0315,-0.0315,0.043,0.045,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 93  
&OBST XB = -0.0315,-0.0285,0.045,0.045,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 94  
&OBST XB = -0.0285,-0.0285,0.045,0.047,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 95

&OBST XB = -0.0285,-0.025,0.047,0.047,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 96  
&OBST XB = -0.025,-0.025,0.047,0.049,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 97  
&OBST XB = -0.025,-0.02,0.049,0.049,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 98  
&OBST XB = -0.02,-0.02,0.049,0.051,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 99  
&OBST XB = -0.02,-0.015,0.051,0.051,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 100  
&OBST XB = -0.015,-0.015,0.051,0.053,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 101  
&OBST XB = -0.015,-0.005,0.053,0.053,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 102  
&OBST XB = -0.005,-0.005,0.053,0.055,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 103  
&OBST XB = -0.005,0.005,0.055,0.055,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 104  
&OBST XB = 0.005,0.005,0.055,0.053,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 105  
&OBST XB = 0.005,0.015,0.053,0.053,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 106  
&OBST XB = 0.015,0.015,0.053,0.051,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 107  
&OBST XB = 0.015,0.02,0.051,0.051,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 108  
&OBST XB = 0.02,0.02,0.051,0.049,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 109  
&OBST XB = 0.02,0.025,0.049,0.049,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 110  
&OBST XB = 0.025,0.025,0.049,0.047,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 111  
&OBST XB = 0.025,0.0285,0.047,0.047,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 112  
&OBST XB = 0.0285,0.0285,0.047,0.045,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 113  
&OBST XB = 0.0285,0.0315,0.045,0.045,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 114  
&OBST XB = 0.0315,0.0315,0.045,0.043,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 115  
&OBST XB = 0.0315,0.0345,0.043,0.043,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 116  
&OBST XB = 0.0345,0.0345,0.043,0.041,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 117  
&OBST XB = 0.0345,0.0365,0.041,0.041,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 118  
&OBST XB = 0.0365,0.0365,0.041,0.039,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 119  
&OBST XB = 0.0365,0.039,0.039,0.039,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 120  
&OBST XB = 0.039,0.039,0.039,0.037,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 121  
&OBST XB = 0.039,0.041,0.037,0.037,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 122  
&OBST XB = 0.041,0.041,0.037,0.035,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 123  
&OBST XB = 0.041,0.0425,0.035,0.035,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 124  
&OBST XB = 0.0425,0.0425,0.035,0.033,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 125  
&OBST XB = 0.0425,0.044,0.033,0.033,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 126  
&OBST XB = 0.044,0.044,0.033,0.031,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 127  
&OBST XB = 0.044,0.0455,0.031,0.031,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 128  
&OBST XB = 0.0455,0.0455,0.031,0.029,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 129  
&OBST XB = 0.0455,0.047,0.029,0.029,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 130  
&OBST XB = 0.047,0.047,0.029,0.027,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 131  
&OBST XB = 0.047,0.048,0.027,0.027,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 132  
&OBST XB = 0.048,0.048,0.027,0.025,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 133  
&OBST XB = 0.048,0.049,0.025,0.025,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 134  
&OBST XB = 0.049,0.049,0.025,0.023,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 135  
&OBST XB = 0.049,0.05,0.023,0.023,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 136  
&OBST XB = 0.05,0.05,0.023,0.021,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 137  
&OBST XB = 0.05,0.051,0.021,0.021,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 138  
&OBST XB = 0.051,0.051,0.021,0.019,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 139

&OBST XB = 0.051,0.0515,0.019,0.019,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 140  
&OBST XB = 0.0515,0.0515,0.019,0.017,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 141  
&OBST XB = 0.0515,0.0525,0.017,0.017,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 142  
&OBST XB = 0.0525,0.0525,0.017,0.015,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 143  
&OBST XB = 0.0525,0.053,0.015,0.015,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 144  
&OBST XB = 0.053,0.053,0.015,0.013,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 145  
&OBST XB = 0.053,0.0535,0.013,0.013,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 146  
&OBST XB = 0.0535,0.0535,0.013,0.011,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 147  
&OBST XB = 0.0535,0.054,0.011,0.011,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 148  
&OBST XB = 0.054,0.054,0.011,0.009,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 149  
&OBST XB = 0.054,0.0545,0.009,0.009,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 150  
&OBST XB = 0.0545,0.0545,0.009,0.007,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 151  
&OBST XB = 0.0545,0.0545,0.007,0.005,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 152  
&OBST XB = 0.0545,0.055,0.005,0.005,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 153  
&OBST XB = 0.055,0.055,0.005,0.003,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 154  
&OBST XB = 0.055,0.055,0.003,0.001,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 155  
&OBST XB = 0.055,0.055,0.001,-0.001,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 156  
&OBST XB = 0.055,0.055,-0.001,-0.003,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 157  
&OBST XB = 0.055,0.055,-0.003,-0.005,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 158  
&OBST XB = 0.055,0.0545,-0.005,-0.005,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 159  
&OBST XB = 0.0545,0.0545,-0.005,-0.007,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 160  
&OBST XB = 0.0545,0.0545,-0.007,-0.009,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 161  
&OBST XB = 0.0545,0.054,-0.009,-0.009,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 162  
&OBST XB = 0.054,0.054,-0.009,-0.011,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 163  
&OBST XB = 0.054,0.0535,-0.011,-0.011,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 164  
&OBST XB = 0.0535,0.0535,-0.011,-0.013,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 165  
&OBST XB = 0.0535,0.053,-0.013,-0.013,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 166  
&OBST XB = 0.053,0.053,-0.013,-0.015,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 167  
&OBST XB = 0.053,0.0525,-0.015,-0.015,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 168  
&OBST XB = 0.0525,0.0525,-0.015,-0.017,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 169  
&OBST XB = 0.0525,0.0515,-0.017,-0.017,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 170  
&OBST XB = 0.0515,0.0515,-0.017,-0.019,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 171  
&OBST XB = 0.0515,0.051,-0.019,-0.019,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 172  
&OBST XB = 0.051,0.051,-0.019,-0.021,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 173  
&OBST XB = 0.051,0.05,-0.021,-0.021,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 174  
&OBST XB = 0.05,0.05,-0.021,-0.023,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 175  
&OBST XB = 0.05,0.049,-0.023,-0.023,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 176  
&OBST XB = 0.049,0.049,-0.023,-0.025,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 177  
&OBST XB = 0.049,0.048,-0.025,-0.025,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 178  
&OBST XB = 0.048,0.048,-0.025,-0.027,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 179  
&OBST XB = 0.048,0.047,-0.027,-0.027,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 180  
&OBST XB = 0.047,0.047,-0.027,-0.029,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 181  
&OBST XB = 0.047,0.0455,-0.029,-0.029,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 182  
&OBST XB = 0.0455,0.0455,-0.029,-0.031,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 183

&OBST XB = 0.0455,0.044,-0.031,-0.031,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 184  
 &OBST XB = 0.044,0.044,-0.031,-0.033,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 185  
 &OBST XB = 0.044,0.0425,-0.033,-0.033,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 186  
 &OBST XB = 0.0425,0.0425,-0.033,-0.035,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 187  
 &OBST XB = 0.0425,0.0405,-0.035,-0.035,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 188  
 &OBST XB = 0.0405,0.0405,-0.035,-0.037,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 189  
 &OBST XB = 0.0405,0.039,-0.037,-0.037,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 190  
 &OBST XB = 0.039,0.039,-0.037,-0.039,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 191  
 &OBST XB = 0.039,0.0365,-0.039,-0.039,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 192  
 &OBST XB = 0.0365,0.0365,-0.039,-0.041,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 193  
 &OBST XB = 0.0365,0.0345,-0.041,-0.041,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 194  
 &OBST XB = 0.0345,0.0345,-0.041,-0.043,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 195  
 &OBST XB = 0.0345,0.0315,-0.043,-0.043,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 196  
 &OBST XB = 0.0315,0.0315,-0.043,-0.045,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 197  
 &OBST XB = 0.0315,0.0285,-0.045,-0.045,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 198  
 &OBST XB = 0.0285,0.0285,-0.045,-0.047,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 199  
 &OBST XB = 0.0285,0.025,-0.047,-0.047,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 200  
 &OBST XB = 0.025,0.025,-0.047,-0.049,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 201  
 &OBST XB = 0.025,0.02,-0.049,-0.049,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 202  
 &OBST XB = 0.02,0.02,-0.049,-0.051,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 203  
 &OBST XB = 0.02,0.015,-0.051,-0.051,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 204  
 &OBST XB = 0.015,0.015,-0.051,-0.053,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 205  
 &OBST XB = 0.015,0.005,-0.053,-0.053,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 206  
 &OBST XB = 0.005,0.005,-0.053,-0.055,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 207  
 &OBST XB = 0.005,-0.005,-0.055,-0.055,0,0.0576, SURF\_ID='STEEL SHEET' / 208

-----Arquivos de saída - Slices - Geram os contornos coloridos para análise-----

&SLCF PBX = 0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /  
 &SLCF PBY = 0, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE. /  
 &SLCF PBZ = 0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /

-----Arquivos de saída - Devices - Geram os valores numéricos-----

&PROP ID='bola', SMOKEVIEW\_ID='ball',  
 SMOKEVIEW\_PARAMETERS(1:6)= 'R=255', 'G=0', 'B=0', 'DX=0.0036', 'DY=0.0036',  
 'DZ=0.0036' /

-----Termopares-----

&DEVC ID='T1', XYZ=0.105,0,0.0576, QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
 PROP\_ID='bola' /  
 &DEVC ID='T2', XYZ=0.155,0,0.0576, QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
 PROP\_ID='bola' /  
 &DEVC ID='T3', XYZ=0.205,0,0.0576, QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
 PROP\_ID='bola' /  
 &DEVC ID='T4', XYZ=0.255,0,0.0576, QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
 PROP\_ID='bola' /

-----Medidores de espécies - Fração volumétrica (molar)-----

&DEVC XYZ=0.113,0.0,0.335, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'CARBON DIOXIDE' ID = 'CO2 - 30cm',  
 CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /  
 &DEVC XYZ=0.151,0.0,0.428, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'CARBON DIOXIDE' ID = 'CO2 - 40cm',  
 CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /  
 &DEVC XYZ=0.189,0.0,0.520, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'CARBON DIOXIDE' ID = 'CO2 - 50cm',  
 CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /  
 &DEVC XYZ=0.227,0.0,0.613, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'CARBON DIOXIDE' ID = 'CO2 - 60cm',  
 CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /  
 &DEVC XYZ=0.264,0.0,0.706, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'CARBON DIOXIDE' ID = 'CO2 - 70cm',  
 CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /  
 &DEVC XYZ=0.302,0.0,0.798, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'CARBON DIOXIDE' ID = 'CO2 - 80cm',  
 CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /  
 &DEVC XYZ=0.340,0.0,0.891, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'CARBON DIOXIDE' ID = 'CO2 - 90cm',  
 CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /  
 &DEVC XYZ=0.378,0.0,0.983, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'CARBON DIOXIDE' ID = 'CO2 - 100cm',  
 CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /  
 &DEVC XYZ=0.416,0.0,0.1076, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'CARBON DIOXIDE' ID = 'CO2 - 110cm',  
 CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /  
 &DEVC XYZ=0.453,0.0,0.1168, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'CARBON DIOXIDE' ID = 'CO2 - 120cm',  
 CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.113,0.0,0.335, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'CARBON MONOXIDE' ID = 'CO - 30cm',  
 CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /  
 &DEVC XYZ=0.151,0.0,0.428, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'CARBON MONOXIDE' ID = 'CO - 40cm',  
 CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /  
 &DEVC XYZ=0.189,0.0,0.520, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'CARBON MONOXIDE' ID = 'CO - 50cm',  
 CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /  
 &DEVC XYZ=0.227,0.0,0.613, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'CARBON MONOXIDE' ID = 'CO - 60cm',  
 CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /  
 &DEVC XYZ=0.264,0.0,0.706, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'CARBON MONOXIDE' ID = 'CO - 70cm',  
 CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.302,0.0,0.798, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS = 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'CARBON MONOXIDE' ID = 'CO - 80cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.340,0.0,0.891, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS = 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'CARBON MONOXIDE' ID = 'CO - 90cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.378,0.0,0.983, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS = 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'CARBON MONOXIDE' ID = 'CO - 100cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.416,0.0,0.1076, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS = 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'CARBON MONOXIDE' ID = 'CO - 110cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.453,0.0,0.1168, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS = 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'CARBON MONOXIDE' ID = 'CO - 120cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.113,0.0,0.335, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS = 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'SULFUR DIOXIDE' ID = 'SO2 - 30cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.151,0.0,0.428, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS = 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'SULFUR DIOXIDE' ID = 'SO2 - 40cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.189,0.0,0.520, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS = 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'SULFUR DIOXIDE' ID = 'SO2 - 50cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.227,0.0,0.613, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS = 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'SULFUR DIOXIDE' ID = 'SO2 - 60cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.264,0.0,0.706, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS = 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'SULFUR DIOXIDE' ID = 'SO2 - 70cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.302,0.0,0.798, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS = 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'SULFUR DIOXIDE' ID = 'SO2 - 80cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.340,0.0,0.891, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS = 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'SULFUR DIOXIDE' ID = 'SO2 - 90cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.378,0.0,0.983, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS = 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'SULFUR DIOXIDE' ID = 'SO2 - 100cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.416,0.0,0.1076, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS = 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'SULFUR DIOXIDE' ID = 'SO2 - 110cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.453,0.0,0.1168, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS = 'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'SULFUR DIOXIDE' ID = 'SO2 - 120cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.113,0.0,0.335, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'NITRIC OXIDE' ID = 'NO - 30cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.151,0.0,0.428, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'NITRIC OXIDE' ID = 'NO - 40cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.189,0.0,0.520, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'NITRIC OXIDE' ID = 'NO - 50cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.227,0.0,0.613, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'NITRIC OXIDE' ID = 'NO - 60cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.264,0.0,0.706, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'NITRIC OXIDE' ID = 'NO - 70cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.302,0.0,0.798, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'NITRIC OXIDE' ID = 'NO - 80cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.340,0.0,0.891, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'NITRIC OXIDE' ID = 'NO - 90cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.378,0.0,0.983, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'NITRIC OXIDE' ID = 'NO - 100cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.416,0.0,0.1076, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'NITRIC OXIDE' ID = 'NO - 110cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&DEVC XYZ=0.453,0.0,0.1168, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', STATISTICS =  
'VOLUME MEAN', SPEC\_ID = 'NITRIC OXIDE' ID = 'NO - 120cm',  
CONVERSION\_FACTOR = 1E+6, UNITS = ppm /

&TAIL / Final do arquivo de configuração

**APÊNDICE B - PROGRAMA PARA OBTENÇÃO DOS RESULTADOS DO  
BIODIESEL**



&HEAD CHID = 'TESTE3BD', TITLE = 'POCA DE BIODIESEL EM 1 M/S' /  
 !Exemplo para teste com biodiesel e velocidade do vento de 1 m/s.

! Os valores após IJK são as células da malha, ou tamanho da malha de simulação, onde o valor de XB é dividido pelo valor de IJK e entrega a malha. Os valores de XB é dado em metros. X = 1,75 m, Y = 0,3 m e Z = 1,5 m.

&MESH IJK = 18,30,90, XB = -0.525,-0.225,-0.15,0.15,0.0,1.5, COLOR = 'ORANGE' /  
 Malha traseira 0,3 x 0,3 x 1,5 (0,017x0,01x0,017)

&MESH IJK = 30,9,90, XB = -0.225,0.275,-0.15,-0.06,0.0,1.5, COLOR = 'RED' /  
 Malha topo 0,5 x 0,09 x 1,5 (0,017x0,01x0,017)

&MESH IJK = 50,24,150, XB = -0.225,0.275,-0.06,0.06,0.0,1.5, COLOR = 'GREEN' /  
 Malha centro 0,5 x 0,12 x 1,5 (0,01x0,005x0,01)

&MESH IJK = 30,9,90, XB = -0.225,0.275,0.06,0.15,0.0,1.5, COLOR = 'BLUE' /  
 Malha base 0,5 x 0,09 x 1,5 (0,017x0,01x0,017)

&MESH IJK = 95,30,90, XB = 0.275,1.225,-0.15,0.15,0.0,1.5, COLOR = 'VIOLET' /  
 Malha frontal 0,95 x 0,3 x 1,5 (0,01x0,01x0,017)

!mesh1 = 48600

!mesh2 = 24300

!mesh3 = 180000

!mesh4 = 24300

!mesh5 = 256600

!Número total de células é de 533700

&TIME T\_END = 600. / Tempo de simulação em segundos

&DUMP DT\_RESTART = 3 / Tempo em segundos para salvar a análise e reiniciar caso ocorra problemas

!&MISC RESTART = .TRUE. / Reinicia no caso de bug

&MISC TMPA = 28. / Opções de condições do ensaio. Temperatura ambiente em °C

&SURF ID = 'SUPPLY', VEL = -1.0, COLOR = 'CYAN' /

&VENT XB = -0.52,-0.52,-0.14,0.14,0.01,0.26, SURF\_ID = 'SUPPLY' /

! Vento simulado como um ventilador em um plano de 0,28x0,25 m

-----Medidas que determinam o contorno do túnel de vento-----

&OBST XB = -0.525,-0.225,-0.15,-0.14,0.01,0.26, SURF\_ID = 'PLASTIC PLATE' / 1

&OBST XB = -0.525,-0.225,-0.15,0.15,0.0,0.01, SURF\_ID = 'PLASTIC PLATE' / 2

&OBST XB = -0.525,-0.225,0.14,0.15,0.01,0.26, SURF\_ID = 'PLASTIC PLATE' / 3

&OBST XB = -0.525,-0.225,-0.15,0.15,0.26,0.27, SURF\_ID = 'PLASTIC PLATE' / 4

&OBST XB = -0.525,-0.520,-0.15,0.15,0,0.27, SURF\_ID = 'PLASTIC PLATE' / 5

Espécies químicas dos componentes da mistura, da reação e da combustão

&SPEC ID = 'BIODIESEL',

FORMULA = 'C18H34O2S1N1' / !Costa (2009) (valor médio)

```

&SPEC ID = 'OXYGEN', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'NITROGEN', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'WATER VAPOR', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'CARBON MONOXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'CARBON DIOXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'SULFUR DIOXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'SOOT', FORMULA = 'C', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'NITRIC OXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /

```

Espécies químicas da mistura de ar ambiente

```

&SPEC ID = 'AIR',
  SPEC_ID(1) = 'OXYGEN', VOLUME_FRACTION(1) = 26.08,
  SPEC_ID(2) = 'NITROGEN', VOLUME_FRACTION(2) = 98.061,
  BACKGROUND = .TRUE. /

```

Espécies químicas do produto da combustão

```

&SPEC ID = 'PRODUCTS',
  SPEC_ID(1) = 'CARBON DIOXIDE', VOLUME_FRACTION(1) = 17.06,
  SPEC_ID(2) = 'CARBON MONOXIDE', VOLUME_FRACTION(2) = 0.04,
  SPEC_ID(3) = 'WATER VAPOR', VOLUME_FRACTION(3) = 17,
  SPEC_ID(4) = 'SOOT', VOLUME_FRACTION(4) = 0.9,
  SPEC_ID(5) = 'NITROGEN', VOLUME_FRACTION(5) = 98.061,
  SPEC_ID(6) = 'NITRIC OXIDE', VOLUME_FRACTION(6) = 1,
  SPEC_ID(7) = 'SULFUR DIOXIDE', VOLUME_FRACTION(7) = 1 /

```

Propriedades químicas e reação de combustão do combustível

```

&REAC ID = 'BIODIESEL',
  FUEL = 'BIODIESEL',
  CO_YIELD = 0.002 !Tabela A.40 - pag. 3474 – SFPE, Hurley (2016)
  SOOT_YIELD = 0.004 !Tabela A.40 - pag. 3474 – SFPE, Hurley (2016)
  HEAT_OF_COMBUSTION = 39934 !Análise no calorímetro - Unisinos
  RADIATIVE_FRACTION = 0.0 !Program set default
  SPEC_ID_NU = 'BIODIESEL', 'AIR', 'PRODUCTS' !Combustível + ar = Produtos
da combustão
  NU = -1, -1, 1 /

```

Propriedades termodinâmicas do combustível

```

&MATL ID = 'BIODIESEL'
  EMISSIVITY = 0.95 !Program set default
  NU_SPEC = 0.97 !Program set default
  SPEC_ID = 'BIODIESEL'
  HEAT_OF_REACTION = 320 !Tab 1.1, Vertes et al. (2010)
  CONDUCTIVITY = 0.165 !Simões et al. (2009)
  SPECIFIC_HEAT = 1.67 !Zaitsau e Verevkin (2013)

```

BOILING\_TEMPERATURE = 200           !PETROBRAS - FISPQ (2015)  
 DENSITY = 879                           !Oleoplan (2016) (valor médio)  
 ABSORPTION\_COEFFICIENT = 1200. /       !Segundo literatura varia de acordo com  
 o comprimento de onda (valor arbitrário) (Foram feitos testes com valores entre 500 e 5000, e  
 não foram percebidas alterações nos valores numéricos)

Propriedades termodinâmicas do combustível: Significado e Unidades

!Heat of Combustion is the energy release per mass (kJ/kg)

!Heat of Reaction is the latent heat of vaporization (kJ/kg)

!Conductivity (W/(m K))

!Density (kg/m<sup>3</sup>)

!Specific Heat (kJ/(kg K))

!Emissivity (-)

Propriedades do material da poça (aço)

&MATL ID = 'STEEL'

EMISSIVITY = 1.0

DENSITY = 7850.

CONDUCTIVITY = 45.8

SPECIFIC\_HEAT = 0.46 /

Propriedades da película de combustível (altura total 57,6mm - 1,9mm parede - 10mm do topo)

&SURF ID = 'BIODIESEL'

COLOR = 'YELLOW'

TMP\_INNER = 120 !(Temperatura medida com termopar, através do aquecimento do líquido em forno. Com temperaturas inferiores não foi possível iniciar a queima no tanque)

MATL\_ID = 'BIODIESEL'

THICKNESS = 0.0457 /

!A partir deste ponto as linhas de comando se repetem e são idênticas ao programa do apêndice A.

**APÊNDICE C - GRÁFICOS COMPLEMENTARES DAS MEDIÇÕES DE  
TEMPERATURA PERIFÉRICA DA CHAMA**

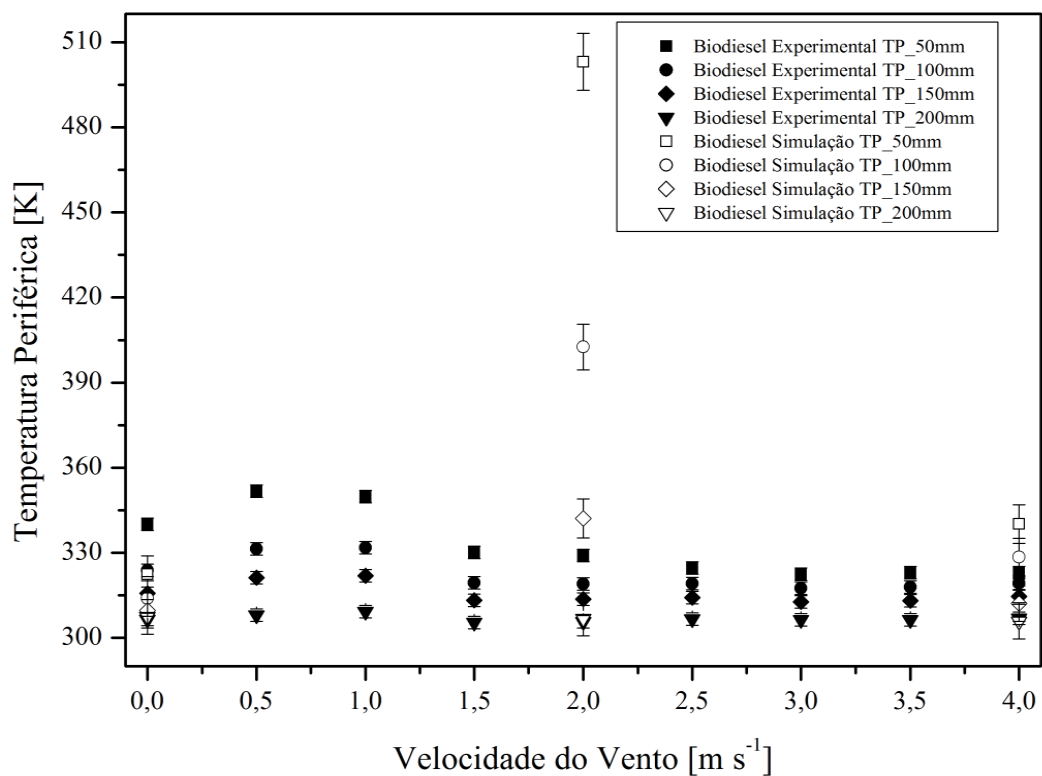


Figura C1 – Comparativo entre os resultados experimentais e simulação para os termopares de temperatura periférica do biodiesel

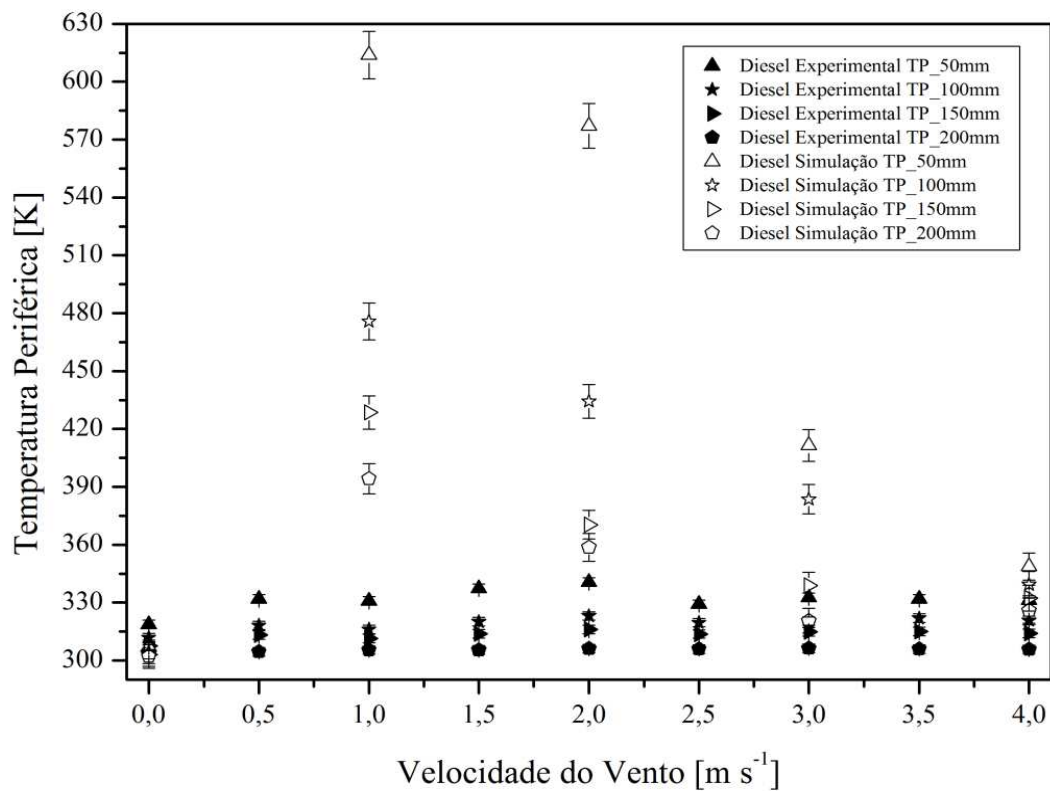


Figura C2 – Comparativo entre os resultados experimentais e simulação para os termopares de temperatura periférica do óleo diesel

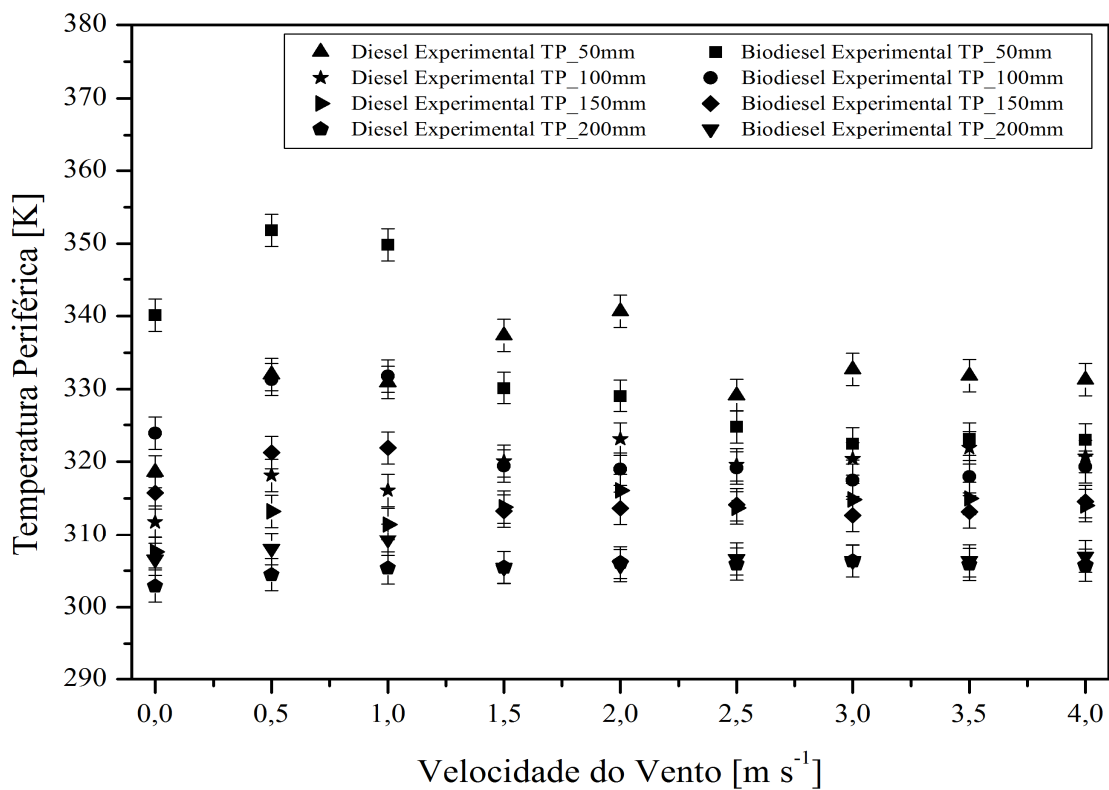


Figura C3 – Comparativo entre os resultados experimentais para os termopares de temperatura periférica do óleo diesel versus o biodiesel

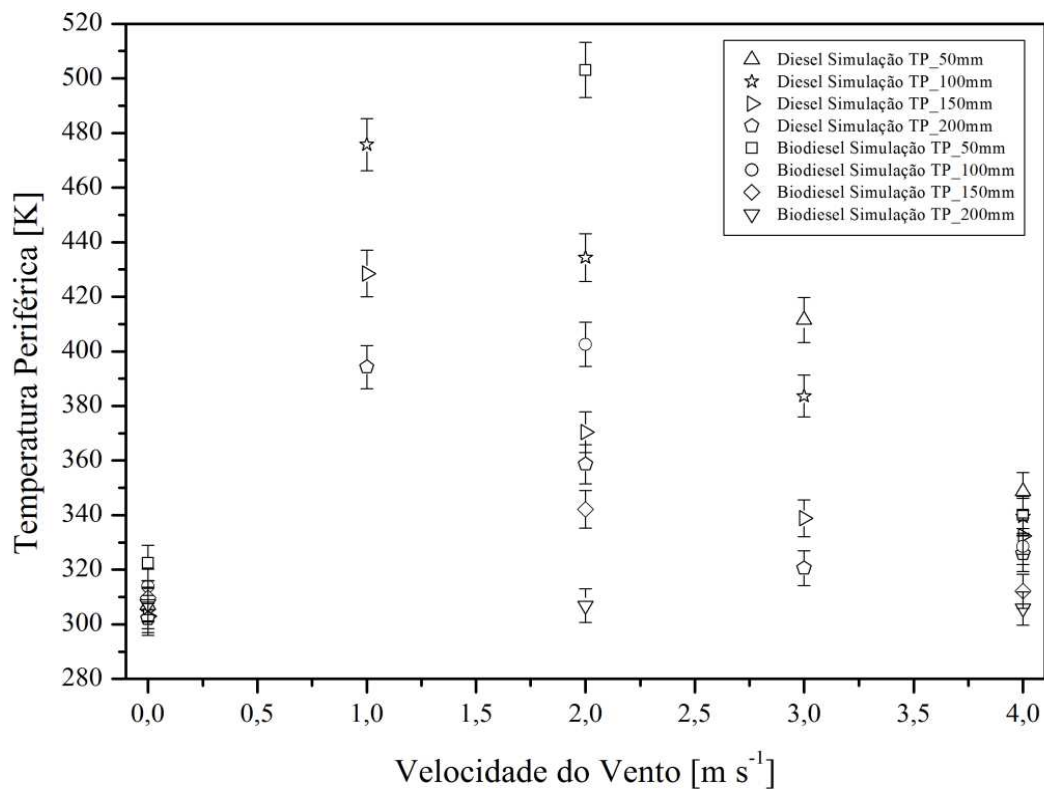


Figura C4 – Comparativo entre os resultados numéricos para os termopares de temperatura periférica do óleo diesel versus o biodiesel

**APÊNDICE D - GRÁFICOS COMPLEMENTARES DAS CORRELAÇÕES DE  
GEOMETRIA DA CHAMA**

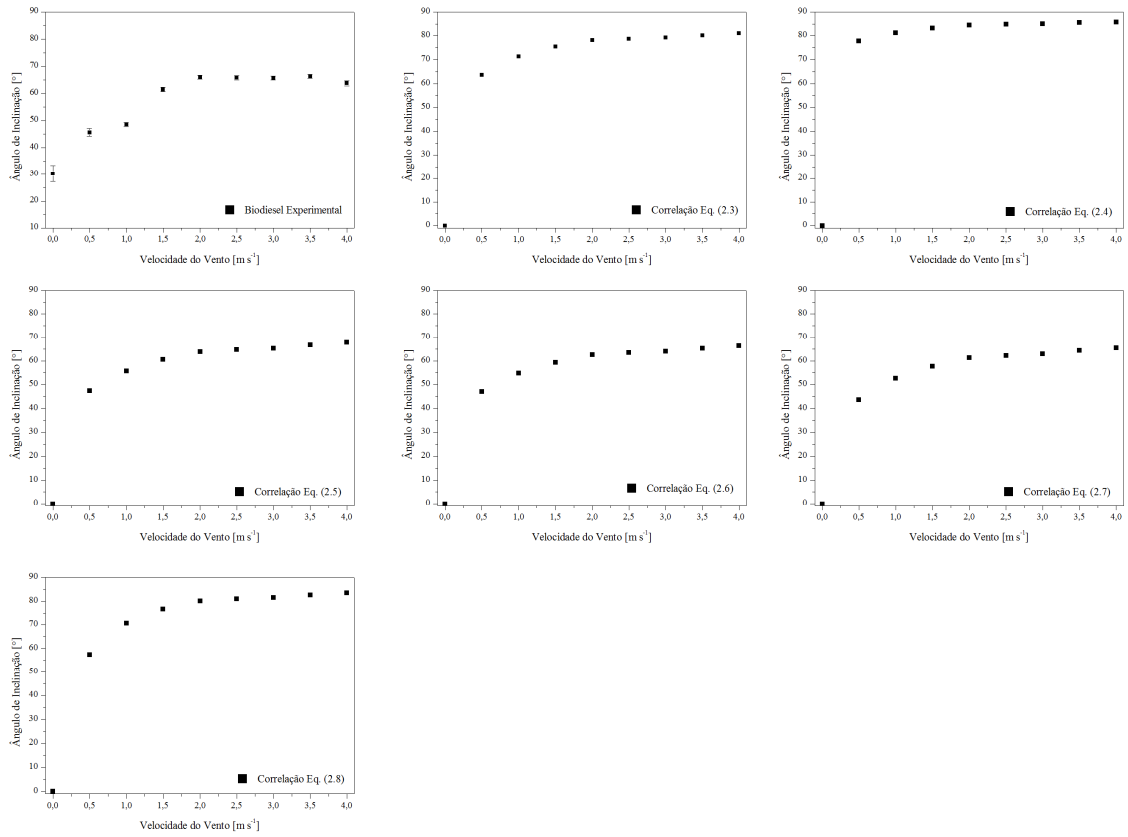


Figura D1 – Comparativo das correlações do ângulo de inclinação da chama do biodiesel

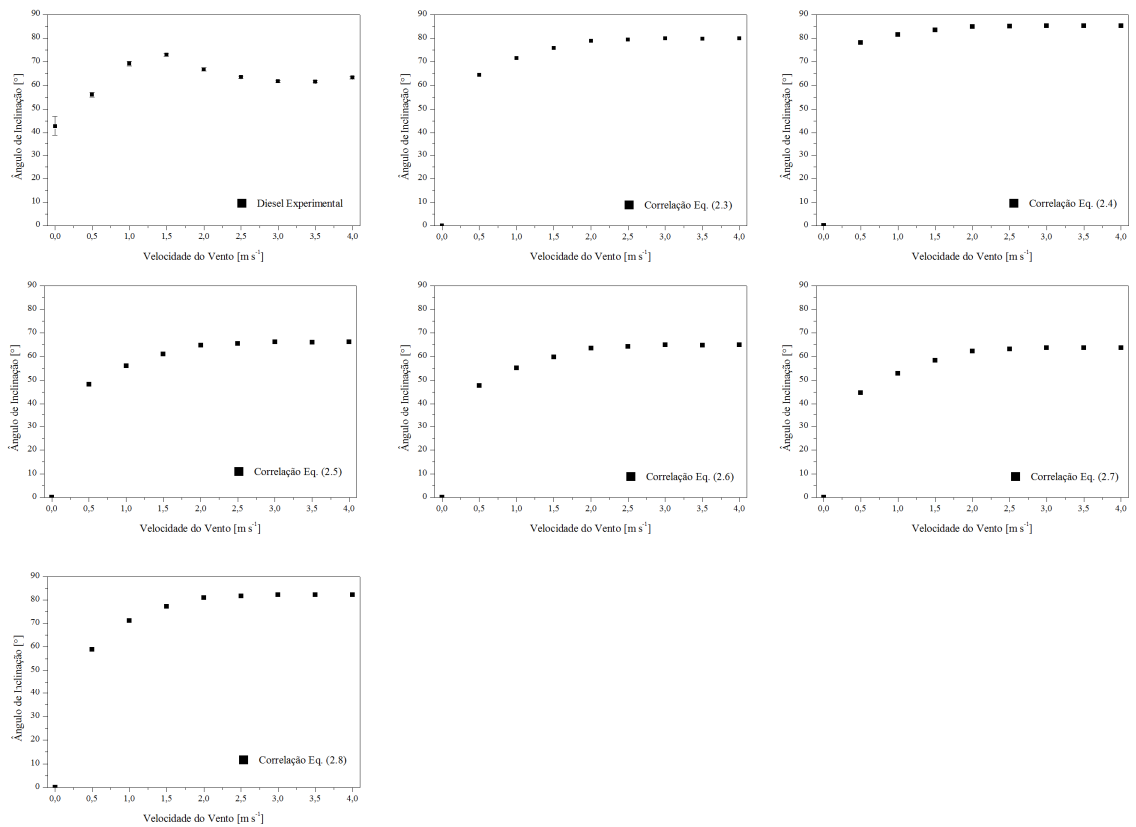


Figura D2 – Comparativo das correlações do ângulo de inclinação da chama do diesel



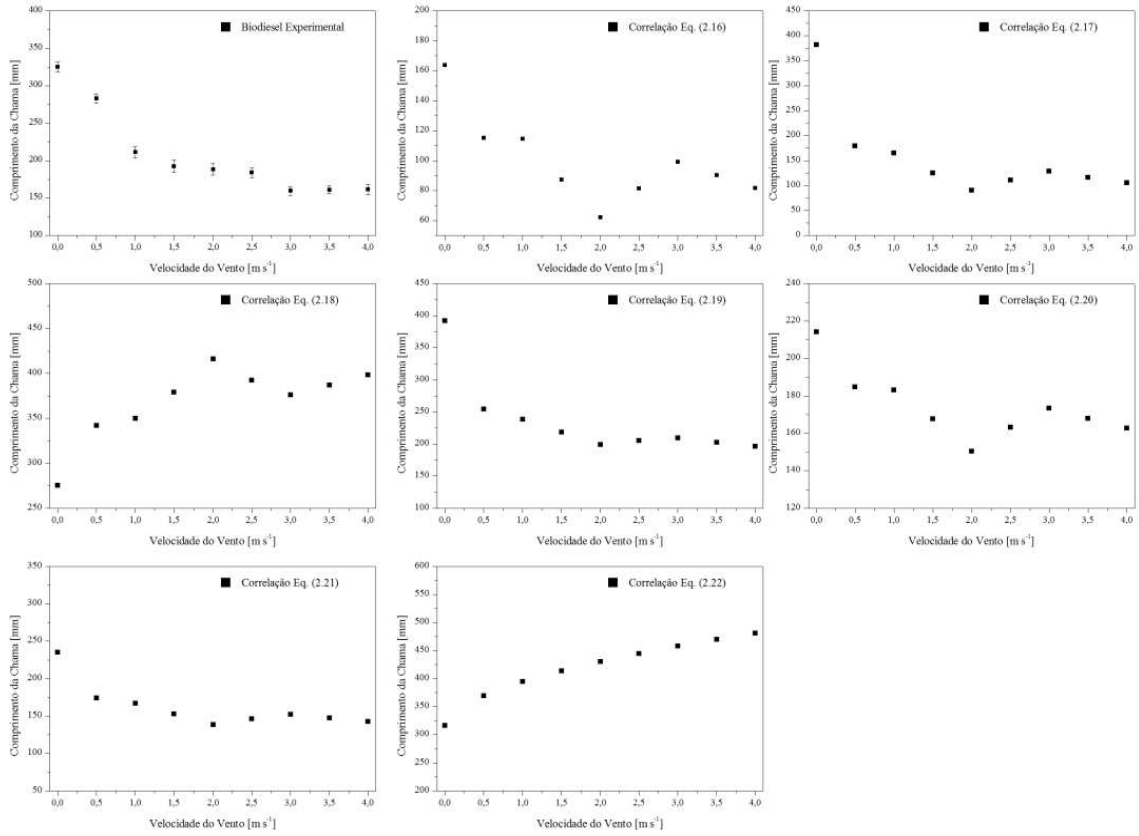


Figura D3 – Comparativo das correlações do comprimento da chama do biodiesel

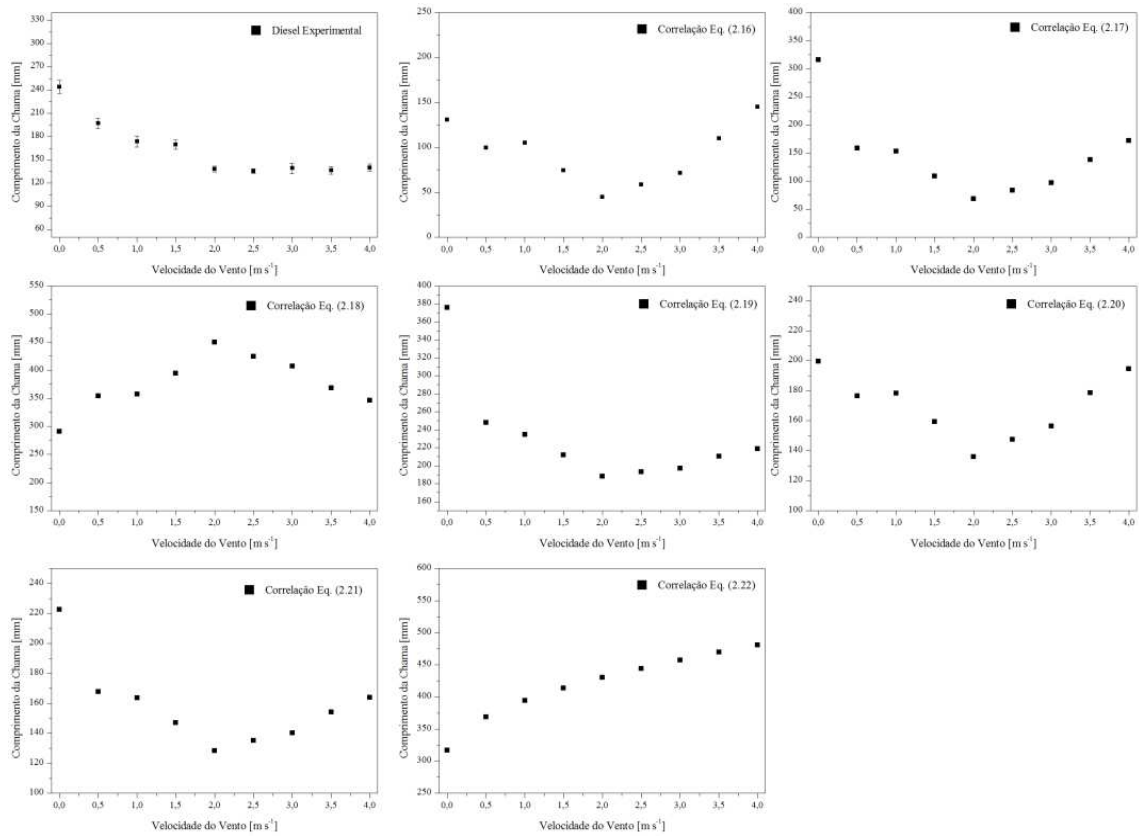


Figura D4 – Comparativo das correlações do comprimento da chama do diesel

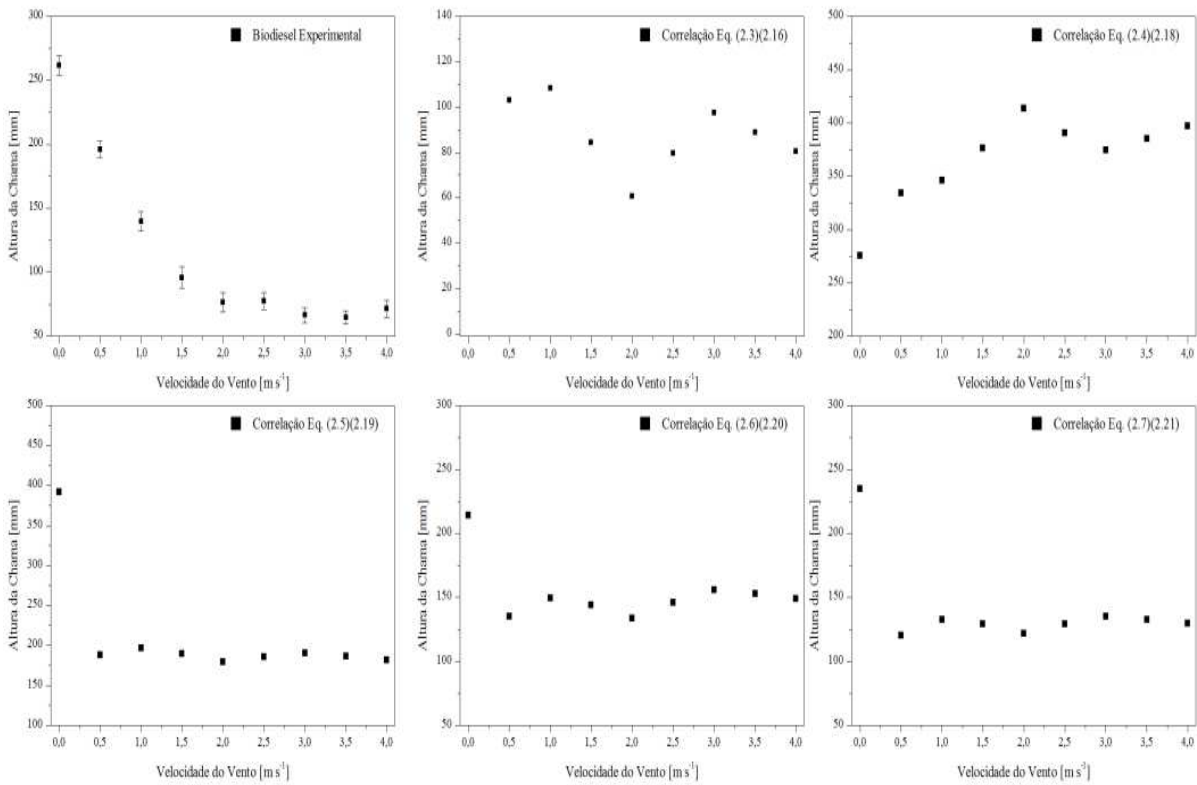


Figura D5 – Comparativo das correlações da altura da chama do biodiesel

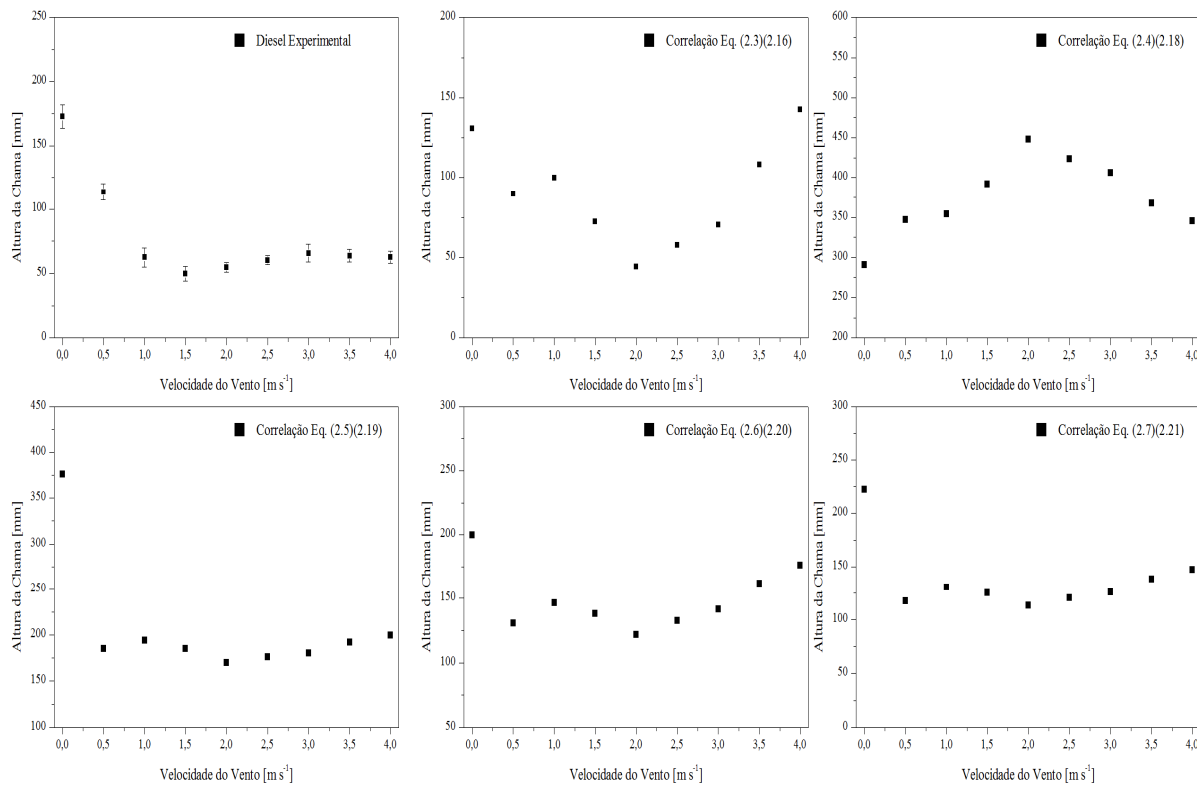


Figura D6 – Comparativo das correlações da altura da chama do diesel

**APÊNDICE E - GRÁFICOS COMPLEMENTARES DAS MEDIÇÕES DE  
DISPERSÃO DE POLUENTES**

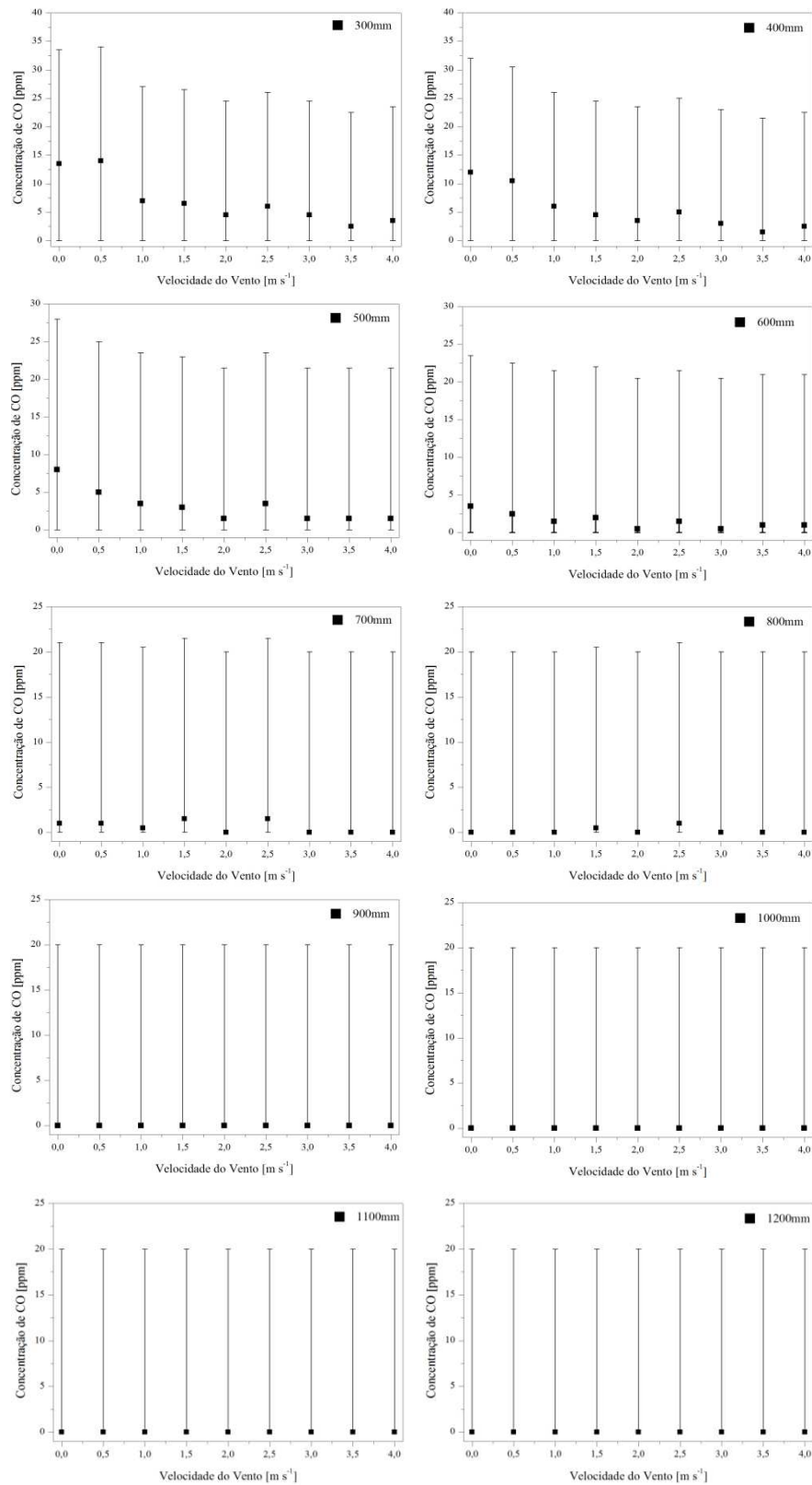


Figura E1 – Concentrações de CO para o biodiesel – curvas locais para cada distância de medição

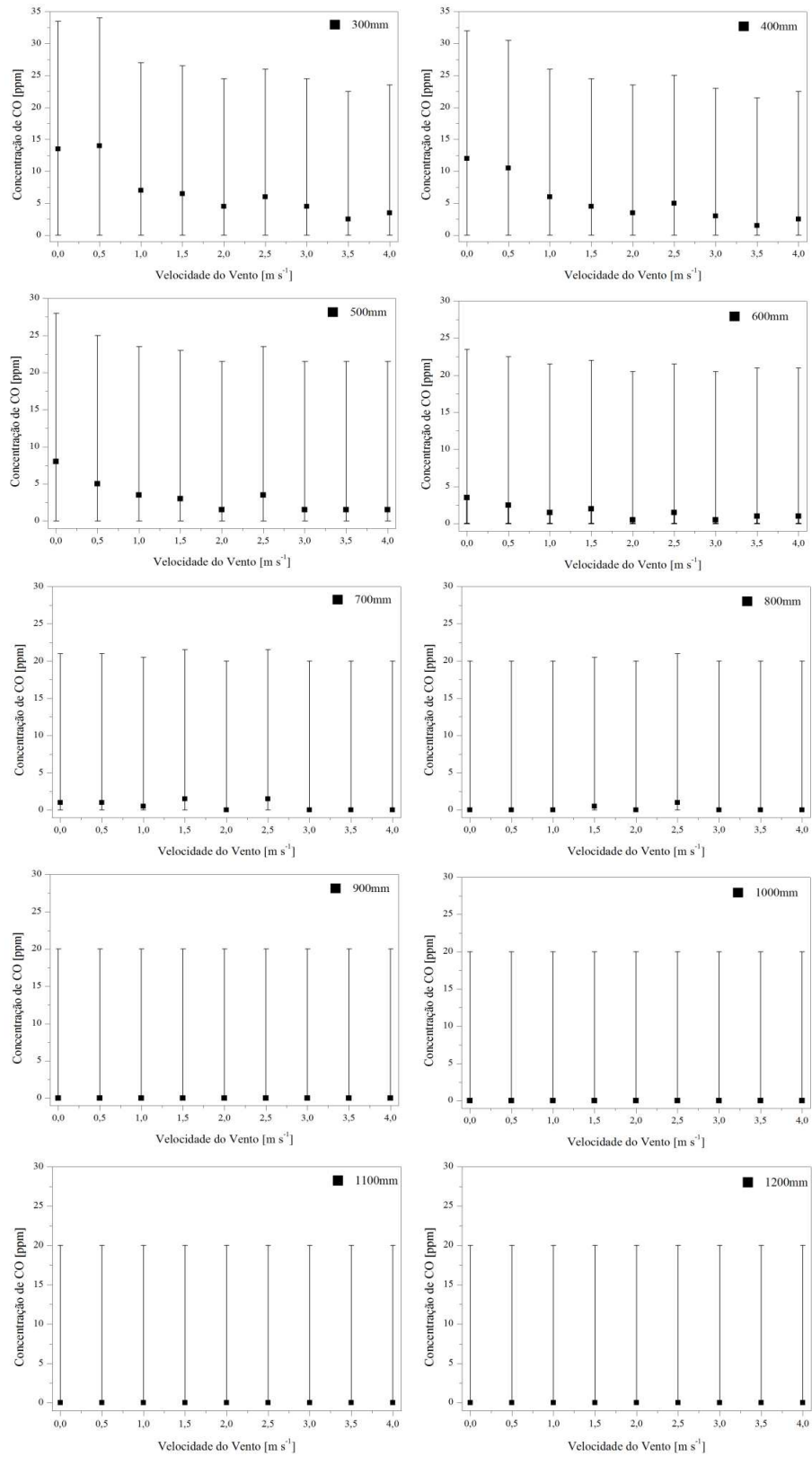


Figura E2 – Concentrações de CO para o óleo diesel – curvas locais para cada distância de medição

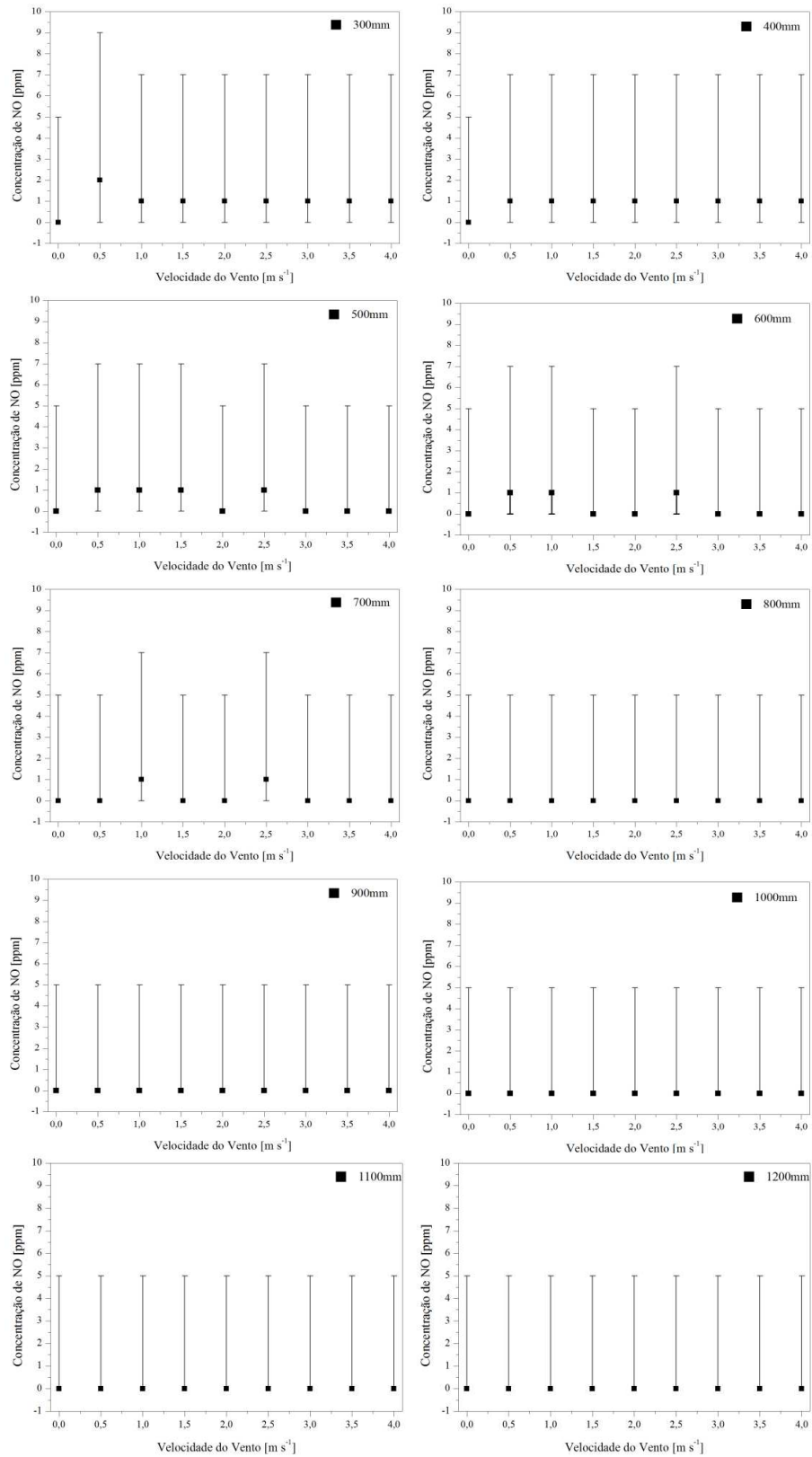


Figura E3 – Concentrações de NO para o biodiesel – curvas locais para cada distância de medição

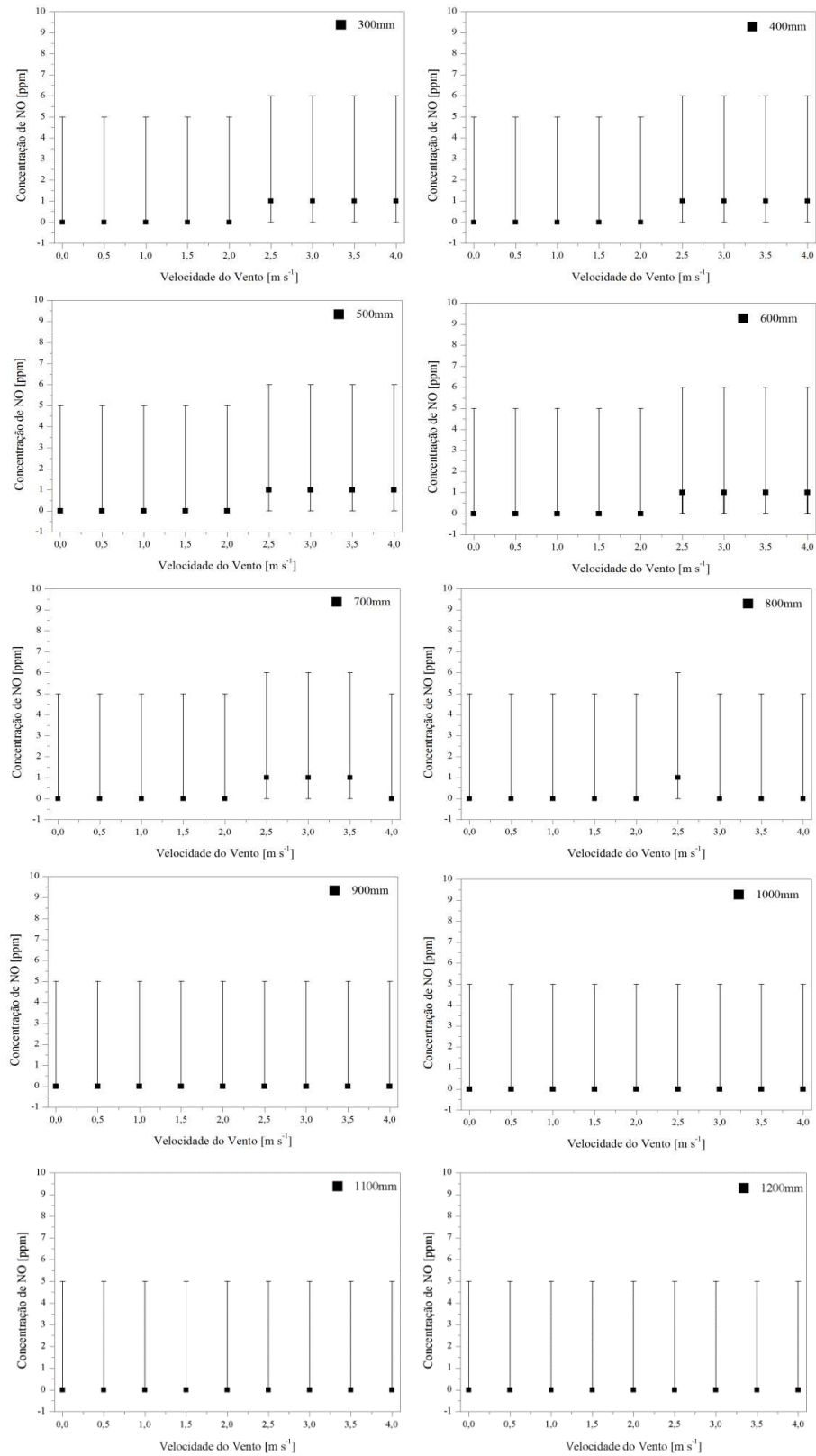


Figura E4 – Concentrações de NO para o óleo diesel – curvas locais para cada distância de medição

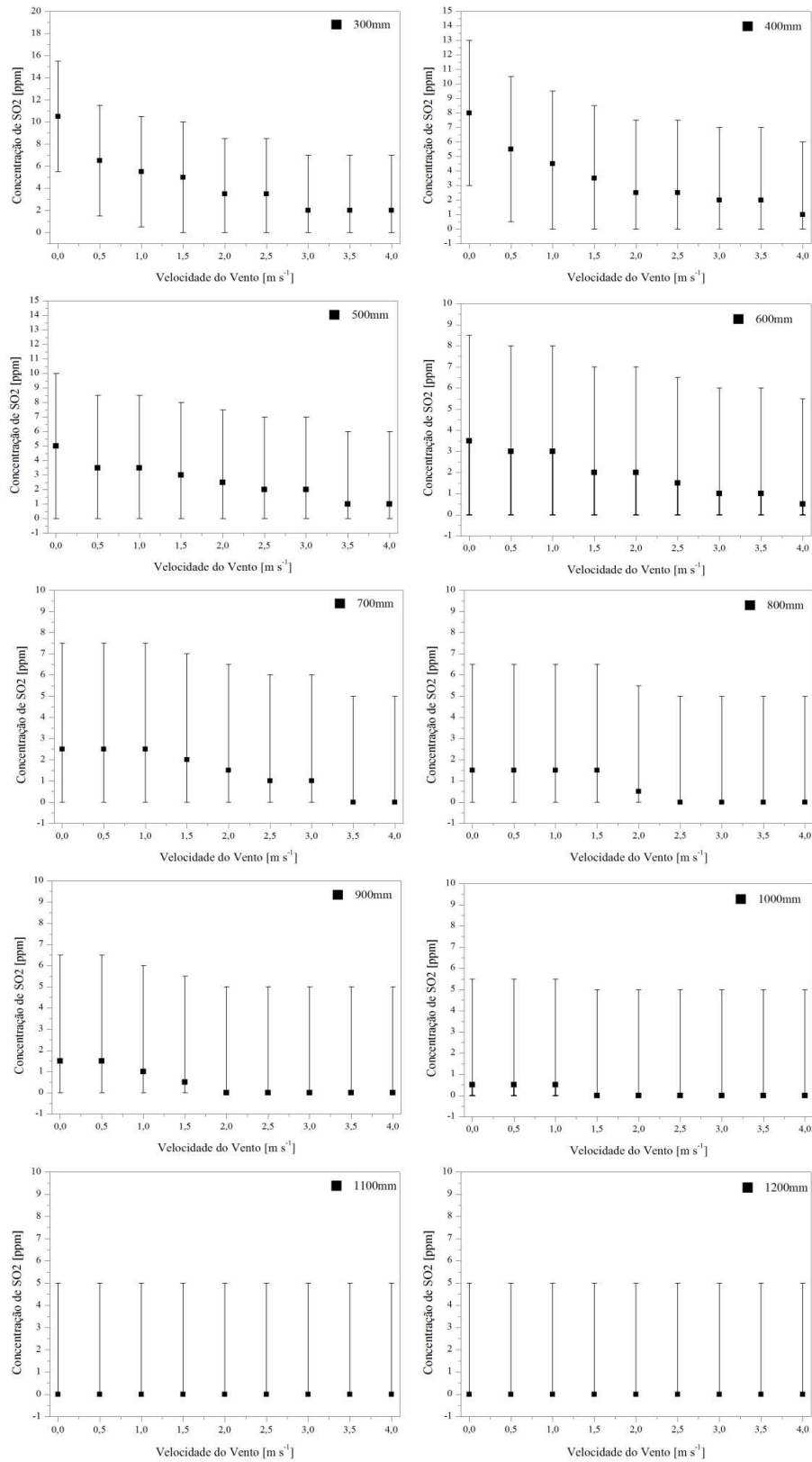


Figura E5 – Concentrações de  $\text{SO}_2$  para o biodiesel – curvas locais para cada distância de medição



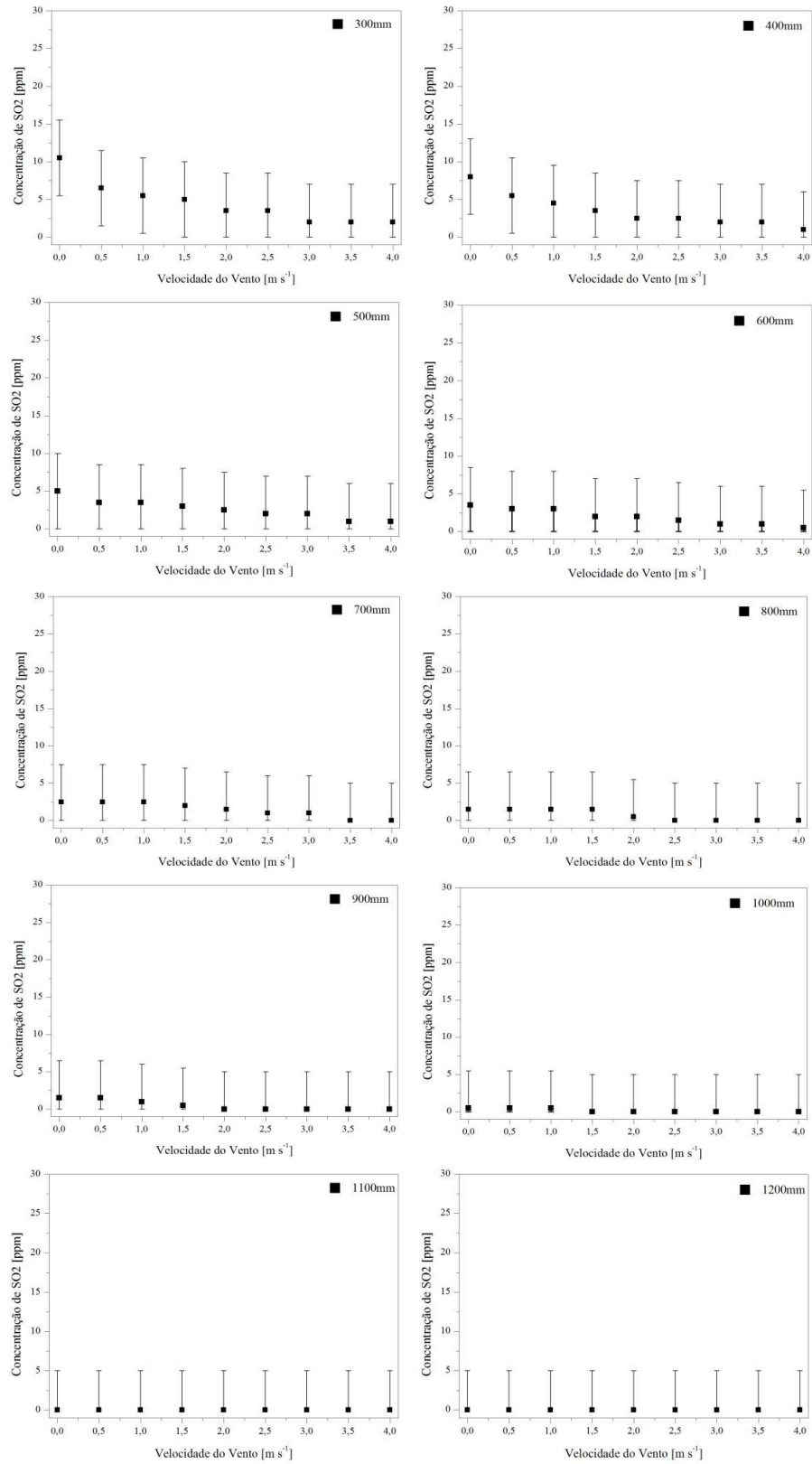


Figura E6 – Concentrações de SO<sub>2</sub> para o óleo diesel – curvas locais para cada distância de medição

**ANEXO A - CÓDIGO FONTE DO MATLAB PARA OBTENÇÃO DO ÂNGULO DE  
INCLINAÇÃO, COMPRIMENTO E ALTURA DA CHAMA**

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      EXPERIMENTAL FLAME ANALYSIS CODE                               %
%      BERNARDO KNACKFUSS 2016                                       %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%%
%% 1) ALL IMAGES MUST HAVE THE SAME DIMENSIONS                       %%% %%% %%% %%% %%%
%% 2) THE BURNER POSITION MUST NOT CHANGE SIGNIFICANTLY              %%% %%% %%%
%% AS IT IS FIXED BY THE USER                                       %%% %%% %%% %%% %%%
%% 3) PAY ATTENTION TO THE USER INPUTS BELOW                       %%% %%% %%% %%% %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc;clear all
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%%
bWidth = 8;                    %discretization cell width in pixels
bHeight = 8;                   %discretization cell height in pixels
grau = 3;                      %degree of interpolation
imgn = 2;                      %number of images to process
imgPrefix = 'frame';          %image Prefix
firstindex = 0;               %First image index
imgFormat = 'jpeg';           %image Format
burnerXpos = 62;              %X position of the burner in EVERY frame
burnerYpos = 1033;           %Y position of the burner in EVERY frame
doplot = 1;                   %If you want to plot each image set to 1
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%%
%Initial setups (dont change)%%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%%
if firstindex >10 && firstindex < 100
imgMiddle = '0';
img=imread(strcat(imgPrefix, imgMiddle,num2str(firstindex),'',imgFormat));
elseif firstindex >=100
img=imread(strcat(imgPrefix,num2str(firstindex),'',imgFormat));
elseif firstindex<10
imgMiddle = '00';
img=imread(strcat(imgPrefix, imgMiddle,num2str(firstindex),'',imgFormat));
end
imgWidth = size(img,2);
imgHeight = size(img,1);
x1 = burnerXpos+1:1:imgWidth;
countX = zeros(imgWidth-burnerXpos);
EveryY = zeros(imgn,imgWidth-burnerXpos);    %Pre-allocate the matrix which contains
all Y positions of the flame behaviour curve
EveryPV = zeros(imgn,4);
centroidsX(1) = burnerXpos;
centroidsY(1) = burnerYpos;
imgNames = zeros(300);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%%
%Image Processing%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%% %%%
for i = firstindex:firstindex+imgn-1
centYcount = 1;
centXcount = 1;
if i >10 && i < 100
imgMiddle = '0';
img=imread(strcat(imgPrefix, imgMiddle,num2str(i),'',imgFormat));
elseif i >=100
img=imread(strcat(imgPrefix,num2str(i),'',imgFormat));

```

```

elseif i<10
imgMiddle = '00';
img=imread(strcat(imgPrefix, imgMiddle,num2str(i),'',imgFormat));
end
gray=rgb2gray(img);           %to convert to gray scale picture
umbral=0.2;                   %%!!!!!!!!!!!!!!value to cut of picture!!!!!!!!!!!!!!
binaria=im2bw(gray,umbral);   %to convert to binary picture
binaria=bwareaopen(binaria,500); %to eliminate noise
if doplot == 1
axis([0, imgWidth, 0, imgHeight]);
subplot(imgn+1,1,i-firstindex+1);
title(strcat(imgPrefix, num2str(i),'',imgFormat));
imshow(binaria);
end
L=bwlabel(binaria);           %to tag connected elements
props=regionprops(L,'all');
    for n=1:size(props,1)       %to graficate box for every region
        %rectangle('position',props(n).BoundingBox,'Edgecolor','g','LineWidth',2); %graficate
box
        %%% Get region coordinates %%%
        regionWidth = props(n).BoundingBox(3);
        regionHeight = props(n).BoundingBox(4);
        regionX1 = floor(props(n).BoundingBox(1)) +1;
        regionY1 = floor(props(n).BoundingBox(2)) +1; %upper left corner of bounding box
        regionX2 = regionX1 + regionWidth;
        regionY2 = regionY1 + regionHeight;
        Bx(1) = regionX1;
        By(1) = regionY1;
        %%% Compare region width and height to determine whether to fix
        %%% internal boxes width or height
        imgHeight = size(binaria,1);
        imgWidth = size(binaria,2);
        if regionWidth > regionHeight || regionWidth == regionHeight %fixes width
            bn = ceil(regionWidth / bWidth); %calculates the amount of boxes that fit inside
the region and rounds up
            restbn = (bn - regionWidth / bWidth) * bWidth +1; %calculates what is left over
from division, it will be subtracted from last box coordinates so it fits inside the region
            for j=1:bn+1 %scan through all the inner regions
                cc = 0; %set initial search for white pixels
                if j < bn+1 %the last position (bn+1) have a special X coordinate as defined above
                    Bx(j+1) = Bx(1) + bWidth*j; %Set X coordinates to be scanned (those are the
inner boxes x coordinates)
                else
                    Bx(bn+1) = Bx(bn+1) - restbn; %Forces the last rightmost box X coordinate to
fit inside the region
                end
                for scan=regionY1:regionY2 %scan vertically (up to down) the image from
the boundingBox Y1 position to the Y2 position
                    if binaria(scan,Bx(j)) == 1 && cc == 0 %Checks if the current pixel is white
                        By(1,j) = scan; %Save the pixel yposition as a lower ylimit to the inner box

```

```

cc = 1;          %triggers the search for a black pixel (end of white sequence)

elseif binaria(scan,Bx(j)) == 0 && cc == 1    %Checks if the scan reached a black
pixel after already reaching a white one
    if binaria(scan-1,Bx(j)) == 1
        By(2,j) = scan-1;    %save the last position as the last white pixel Yposition
    end
elseif scan == regionY2 && cc == 1 && binaria(scan,Bx(j)) == 1    %checks
if the inner box region (column) ends in a white pixel
    By(2,j) = scan;    %saves the current position as the upper Ylimit of the inner box
    break;            %END the scan for that column

elseif scan == regionY2 && cc == 0    %this will be true if there is no white
pixels in the column at all
    By(1,j) = regionY1;    %in that case, the inner box Y positions will
be defined as the boundary box Y positions
    By(2,j) = regionY2;
    disp('yeah');
    break;
end
end

if j > 1    %This will compare the height of two columns and
choose the biggest square possible to calculate the centroid of the inner box
    centYcount = centYcount + 1;    %Counts how many cells we already found
the centroids
    centXcount = centXcount + 1;
    if By(1,j) < By(1,j-1)    %We give preference for larger cells, so we
choose the lower value Y position between two rows to be the cell corner (the origin is
located at the upper-left corner)
        lclCnt1 = By(1,j);
    else
        lclCnt1 = By(1,j-1);
    end
    if By(2,j) > By(2,j-1)    %Now we want the higher value (closer to the bottom)
        lclCnt2 = By(2,j);
    else
        lclCnt2 = By(2,j-1);
    end
    centroidsY(centYcount) = (lclCnt2 - lclCnt1)/2 + lclCnt1;
    centroidsX(centXcount) = (Bx(j)-Bx(j-1))/2 + Bx(j-1);
    if doplot == 1
        rectangle('position',[Bx(j-1) lclCnt1 (Bx(j) - Bx(j-1)) (lclCnt2 -
lclCnt1)], 'Edgecolor','g','LineWidth',1);
    end
end
end
end

```

```

elseif regionHeight > regionWidth %fixes height
    bn = ceil(regionHeight / bHeight); %calculates the amount of boxes that fit inside
the region and rounds up
    restbn = (bn - regionHeight / bHeight) * bHeight + 1; %calculates what is left over
from division, it will be subtracted from last box coordinates so it fits inside the region
    for j=1:bn+1 %scan through all the inner regions
        cc = 0; %set initial search for white pixels
        if j < bn+1 %the last position (bn+1) have a special X coordinate as defined above
            By(j+1) = By(1) + bHeight*j; %Set Y coordinates to be scanned (those are the
inner boxes y coordinates)
        else
            By(bn+1) = By(bn+1) - restbn; %Forces the last rightmost box Y coordinate to
fit inside the region
        end
        for scan=regionX1:regionX2 %scan horizontally (left to right) the image
from the boundingBox X1 position to the X2 position
            if binaria(By(j),scan) == 1 && cc == 0 %Checks if the current pixel is white
                Bx(j,1) = scan; %Save the pixel yposition as a lower ylimit to the inner box
                cc = 1; %triggers the search for a black pixel (end of white sequence)

                elseif binaria(By(j),scan) == 0 && cc == 1 %Checks if the scan reached a black
pixel after already reaching a white one
                    if binaria(By(j),scan-1) == 1
                        Bx(j,2) = scan-1; %save the last position as the last white pixel Yposition
                        break;
                    end
                    elseif scan == regionX2 && cc == 1 && binaria(By(j),scan) == 1 %checks
if the inner box region (column) ends in a white pixel
                        Bx(j,2) = scan; %saves the current position as the upper Ylimit of the inner box
                        break; %END the scan for that column

                elseif scan == regionX2 && cc == 0 %this will be true if there is no white
pixels in the column at all
                    Bx(j,1) = regionX1; %in that case, the inner box Y positions will
be defined as the boundary box Y positions
                    Bx(j,2) = regionX2;
                    break;
                end
            end
        end

        if j > 1 %This will compare the height of two columns and
choose the biggest square possible to calculate the centroid of the inner box
            centYcount = centYcount + 1; %Counts how many cells we already found
the centroids
            centXcount = centXcount + 1;
            if Bx(j,1) < Bx(j-1,1) %We give preference for larger cells, so we
choose the lower value X position between two rows to be the cell corner (the origin is
located at the upper-left corner)
                lclCnt1 = Bx(j,1);
            else

```

```

    lclCnt1 = Bx(j-1,1);
    end
    if Bx(j,2) > Bx(j-1,2)    %Now we want the higher value (closer to the the right)
        lclCnt2 = Bx(j,2);
    else
        lclCnt2 = Bx(j-1,2);
    end
    centroidsX(centXcount) = (lclCnt2 - lclCnt1)/2 + lclCnt1;
    centroidsY(centYcount) = (By(j)-By(j-1))/2 + By(j-1);
    if doplot == 1
        rectangle('position',[lclCnt1 By(j-1) (lclCnt2 - lclCnt1) (By(j) - By(j-
1))], 'Edgecolor','g', 'LineWidth',1);
    end
end
end

end
end

hold on;
%CENTROIDS PLOT
[minCentroidX,minXi] = min(centroidsX(centroidsX > 0));    %Calculates minimum
and maximum positions (X and Y) of centroids
maxCentroidX = max(centroidsX);
minCentroidY = min(centroidsY(centroidsY > 0));
maxCentroidY = max(centroidsY);
if doplot == 1
    plot(centroidsX,centroidsY,'*');
end

%POLYNOMIAL PLOT
centroidsXsize = centroidsX(max(find(centroidsX~=0)));
x3 = burnerXpos+1:1:burnerXpos+centroidsXsize;
[p,s,mu] = polyfit(centroidsX(centroidsX>0),centroidsY(centroidsY>0),grau);
%Returns the coefficients [p] of the polynomial curve of degree 'grau' that interpolates the set
of points given
[f1,delta] = polyval(p,x3,s,mu);    %Evaluates the polynome
if doplot == 1
    plot(x3,f1,'r--','linewidth',2);
end

%POSITION VECTOR PLOT
pvHeight = burnerYpos - minCentroidY;
pvWidth = burnerXpos + maxCentroidX;
pvLength = hypot(pvHeight,pvWidth);
pvAngle = atan((pvHeight)/(pvWidth));
pvAngleD = pvAngle * 180/pi;
if doplot == 1
    plot([burnerXpos, maxCentroidX],[burnerYpos,minCentroidY],'b','linewidth',1);    %plot
position vector

```

```

end

%PROPERTIES EVALUATION
% CFL = hypot(diff(x1), diff(f1)); % Calculate integrand from x,y derivatives
% FL = trapz(CFL); % Integrate to calculate arc length
%ErroPercentualDoComprimento = (FL/pvLength -1)*100;

%MEAN CURVE CALCULE
for kk=1:centroidsXsize
    EveryY(i-firstindex+1,kk) = f1(kk); %Stores the Y values of the image
centroids from the burner position onwards inside a matrix for mean value calculation
    countX(kk) = countX(kk) +1;
end
EveryPV(i-firstindex+1,1) = maxCentroidX;
EveryPV(i-firstindex+1,2) = minCentroidY;
EveryPV(i-firstindex+1,3) = minCentroidX;
EveryPV(i-firstindex+1,4) = centroidsY(minXi+1);

for eraser=1:centXcount
    centroidsX(eraser)=0;
end
for eraser=1:centYcount
    centroidsY(eraser)=0;
end

end

%% BACKGROUND SETTINGS%%
%figure('name','Curva Midia');
imgBack = imread('bg.jpg');
imshow(imgBack);
hold on;

%% MEAN POSITION VECTOR AND PROPRIERTIES CALCULATION%%
MeanPV = sum(EveryPV)/imgn;
MeanAngle1 = atan((MeanPV(1)-burnerXpos)/(burnerYpos-MeanPV(2))) *180/pi % Angle
from burner
MeanAngle2 = atan((MeanPV(4)-MeanPV(2))/(MeanPV(1)-MeanPV(3))) *180/pi % Angle
from flame
MeanHeight = imgHeight-MeanPV(2)
MeanWidth = MeanPV(1) - burnerXpos;
plot([MeanPV(3),MeanPV(1)],[MeanPV(4),MeanPV(2)],'y--','linewidth',1);
plot([burnerXpos, MeanPV(1)],[burnerYpos,MeanPV(2)],'b--','linewidth',1);

%% MEAN POLYNOMIAL CURVE CALCULATION%%
MeanY = sum(EveryY);
for jj=1:imgWidth-burnerXpos
    if countX(jj) ~= 0
        MeanY(jj)=MeanY(jj)./countX(jj); %Calculates the mean Y values
    end
end

```



```
end

for copy=1:MeanWidth
MeanYc(copy) = MeanY(copy);
end;
xm = burnerXpos+1:1:burnerXpos+MeanWidth;
[pmean,s2,mu2] = polyfit(xm,MeanYc,grau); %Generates the interpolation function
coefficients
[fmean,delta2] = polyval(pmean,xm,s2,mu2); %Generates the function results
liftOff = burnerYpos - fmean(1)
axis([0, imgWidth, 0, imgHeight]);
plot([burnerXpos burnerXpos],[burnerYpos fmean(1)],'r','linewidth',2);
plot(xm,fmean,'g','linewidth',2);
```