PAULO ROBERTO BUFACCHI MENDES

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE INCÊNDIOS DE SUPERFÍCIE NA REGIÃO AMAZÔNICA COM MODELO DE TURBULÊNCIA DE GRANDES ESTRUTURAS

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de
Doutor em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Guenther Carlos Krieger Filho

SÃO PAULO
2014

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 16 de janeiro de 2014.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Mendes, Paulo Roberto Bufacchi
Simulação numérica de incêndios de superfície na Região Amazônica com modelo de turbulência de grandes estruturas / P.R.B. Mendes. -- versão corr. -- São Paulo, 2014.
220 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Incêndios florestais (Simulação numérica) – Amazônia 2.Turbulência atmosférica 3.Combustão I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

DEDICATÓRIA

Para Nelza e nossos filhos Daniela e Rafael.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Nelza, que sempre me apoiou incondicionalmente em todos os meus projetos de vida.

À minha mãe Regina, a quem muito devo, pela educação, cuidado e estímulo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Guenther Carlos Krieger Filho da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pela acolhida no grupo de Engenharia Térmica e Ambiental, pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo o trabalho.

Ao Prof. Dr. William Mell do U.S. Forest Service Pacific Northwest Research Station, Pacific Wildland Fire Science Lab, Seattle, WA, pelo apoio no entendimento do simulador numérico de incêndios WFDS.

Ao Prof. Dr. Ernesto Alvarado do Pacific Wildland Fire Sciences Laboratory, School of Forest Resources, University of Washington, Seattle, WA, pelas discussões durante o encontro no INPE do projeto FAPESP sobre Combustão de Biomassa da Floresta Amazônica.

Ao Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Júnior da UNESP - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, pelas discussões sobre os experimentos de campo e simulação numérica.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Gurgel Veras da UnB - Universidade de Brasília, Brasília, DF, pelas discussões durante o encontro no INPE do projeto FAPESP sobre Combustão de Biomassa da Floresta Amazônica.

Ao Sr. José Carlos dos Santos do LCP/INPE, Cachoeira Paulista, SP, pela execução dos experimentos de campo em Cruzeiro do Sul (AC) e em Alta Floresta (MT), os quais foram importantes para a comparação de resultados com o modelo numérico utilizado neste trabalho.

À FAPESP, através dos programas 2008/04490-4 e 2011/20679-2, os quais permitiram a obtenção dos dados de campo em Cruzeiro do Sul (AC) e Alta Floresta (MT).

A todos que me apoiaram e ajudaram na realização deste trabalho.

RESUMO

O incêndio florestal é uma complexa combinação da energia liberada na forma de calor devido à combustão dos produtos oriundos da pirólise da vegetação e o transporte dessa energia para o ar e para a vegetação à sua volta. O primeiro é o domínio da química e ocorre na escala de moléculas e o segundo é o domínio da física e ocorre em escalas de até quilômetros. É a interação desses processos sobre uma ampla gama de escalas temporais e espaciais envolvidas no incêndio florestal que faz a modelagem do seu comportamento uma tarefa tão difícil.

A propagação do incêndio através de vegetação rasteira e folhas mortas foi simulada numericamente usando a formulação física do WFDS. A abordagem utilizada foi tridimensional e transiente, e baseada em uma descrição dos fenômenos físicos que contribuem para a propagação de um incêndio de superfície através de uma camada de combustível. Neste cenário de incêndio, existem duas regiões: vegetação e ar, cada uma com suas propriedades físicas e químicas e, embora elas precisem ser integradas no mecanismo de solução, há diferentes fenômenos que ocorrem em cada uma. Na região de vegetação, a abordagem é representá-la como partículas submalha cercadas de ar. O caráter heterogêneo da vegetação, como sua natureza, folhagens, pequenos galhos, etc. foi levado em conta usando propriedades físicas médias características da floresta amazônica. Os fenômenos na região de vegetação são a evaporação da sua umidade, a pirólise e a transferência de calor por radiação e por convecção. Na região do ar, a combustão com chama ocorre em um ambiente turbulento, onde as transferências de calor por radiação e por convecção desempenham um papel significativo. Para incorporar a radiação dos gases de combustão, o modelo físico emprega o método de volumes finitos, que resolve a equação de transferência de calor por radiação como uma equação de transporte para um número finito de discretos ângulos sólidos, e que pode ser usado em uma ampla faixa de espessuras óticas e meios participantes. A combustão turbulenta para a fase gasosa é modelada com base no modelo “Eddy

Dissipation Concept” (EDC). O modelo de combustão turbulenta adota a hipótese de reação química infinitamente rápida entre o combustível e o ar e é controlado apenas pela velocidade de mistura desses reagentes. Esse modelo representa bem a física de incêndios em ambientes ventilados, como é o caso dos incêndios florestais. Para incluir os efeitos do transporte turbulento é utilizado o método “Large Eddy Simulation” (LES), que calcula explicitamente as grandes estruturas turbulentas, mas trata a dissipação e a cascata inercial em escalas menores usando aproximações na escala submalha. As regiões de vegetação e ar trocam massa e energia. O comportamento da mistura gasosa resultante da degradação térmica da vegetação e das reações de combustão é regido pelas equações de Navier-Stokes. As equações que regem os modelos físicos são formuladas como equações diferenciais parciais que são resolvidas por métodos numéricos. O método utilizado para discretização das equações é o método de diferenças finitas em malha deslocada. O modelo numérico utilizado resolve as equações de Navier-Stokes para fluidos compressíveis usando o filtro de Favre. A dissipação de energia cinética é obtida através de um fechamento simples para a tensão turbulenta: o modelo de coeficiente constante de Deardorff. O transporte turbulento de energia e massa é contabilizado pelo uso, respectivamente, de números de Prandtl e de Schmidt turbulentos constantes.

Os resultados das simulações do modelo físico descrito foram comparados aos dados experimentais obtidos em campo para a propagação do incêndio na floresta amazônica. Apesar da idealização das condições de combustível, vento e as incertezas dos dados experimentais, as previsões do modelo estão na mesma ordem de grandeza dos experimentos. As taxas de propagação do incêndio experimentais variam de 0,12 +/-0,06 a 0,35+/-0,07 m/min. Mesmo considerando-se o desvio padrão da taxa de propagação do incêndio experimental, os valores das taxas simuladas ficaram dentro do erro experimental somente em dois de sete casos. As simulações mostraram que os parâmetros importantes para o modelo são a área superficial por volume da vegetação, sua massa específica aparente e sua umidade. Como o coeficiente de absorção por radiação é função direta da massa específica aparente e da área superficial por volume da vegetação, esses parâmetros afetam o comportamento numérico do incêndio de superfície. De acordo com

os resultados das simulações numéricas, a umidade da vegetação também tem importância no incêndio de superfície. A temperatura inicial da vegetação e a umidade do ar na faixa de variação analisada não influenciam a taxa de propagação do incêndio. As simulações também mostraram que o processo de radiação é muito importante, e afeta diretamente todos os demais processos e a taxa de propagação do incêndio. A convecção tem importância muito menor que a radiação na condição de ausência de vento externo. A coerência das taxas de propagação do incêndio experimental e numérica em função da massa específica aparente de material combustível e da umidade da vegetação foi investigada. O modelo numérico é coerente em todas as nove combinações de casos. Já o experimento é coerente em quatro combinações. Com base nas comparações entre cada dois casos experimentais e as respectivas simulações numéricas, nota-se que as taxas de propagação a partir das simulações numéricas foram mais coerentes que as experimentais.

Palavras-chave: Incêndios florestais (Simulação numérica) – Amazônia; Turbulência atmosférica; Combustão.

ABSTRACT

Forest fire is a complex combination of energy released as heat due to the combustion of the products from the vegetation pyrolysis and the transport of this energy to the surrounding air and vegetation. The first is the domain of chemistry and occurs on the molecular scale, and the second is the domain of physics and occurs at scales up to kilometers. It is the interaction of these processes on a wide range of temporal and spatial scales involved in forest fires that makes modeling its behavior such a challenging task.

The spread of fire through small plants and dead leaves was simulated numerically using WFDS physical formulation. The approach used was three-dimensional and transient, based on a description of the physical phenomena that contribute to the spread of a surface fire through a layer of fuel. In this fire scenario, there are two regions: vegetation and air, each one with its physical and chemical properties and, although they need to be integrated into the solution mechanism, there are different phenomena that occur in each one. In the vegetation region, the approach is to represent it as subgrid particles surrounded by air. The heterogeneity of the vegetation, such as its nature, leaves, twigs, etc. was taken into account by using average physical properties that are representative of the Amazon forest. The phenomena in the vegetation region are the evaporation of its moisture, pyrolysis, heat transfer by radiation and convection. In the air region, the flaming combustion occurs in a turbulent environment, and heat transfer by radiation and convection play a significant role. To incorporate the radiation from the combustion gases, the physical model employs the finite volumes method, solving the radiation transfer equation as a transport equation for a finite number of discrete solid angles, which can be used in a wide range of optical thicknesses and participating media. Turbulent combustion for the gaseous phase is modeled using the Eddy Dissipation Concept (EDC) model. The mixing controlled turbulent combustion model adopts the assumption of infinitely fast chemical reaction between the fuel and air. This model represents well the fire physics in ventilated areas, as is the case of forest fires. To include the turbulent flow

effects, it is used the Large Eddy Simulation (LES) method, which explicitly calculates the large turbulent structures, but models the dissipation and inertial cascade using approximations in the sub-grid scale. The vegetation and air regions exchange mass and energy. The behavior of the gas mixture resulting from the vegetation thermal degradation and combustion reactions is governed by the Navier-Stokes equations. The equations governing the physical model are formulated as partial differential equations, which are solved by numerical methods. The method used for discretization of the equations is the finite difference method on a staggered grid. The numerical model solves the Navier-Stokes equations for compressible fluids using the Favre filter. Dissipation of kinetic energy is achieved through a simple closure for the turbulent stress: the constant coefficient Deardorff model. The turbulent transport of heat and mass is accounted for by use of constant turbulent Prandtl and Schmidt numbers, respectively.

The physical model simulation results were compared to experimental data obtained in the field for the spread of fire in the Amazon forest. Despite of the idealized conditions of fuel, wind and the uncertainties of the experimental data, the model predictions and the experiments are in the same order of magnitude. Experimental rate of spread range from 0.12 +/- 0.06 to 0.35 +/- 0.07 m/min. Even considering rate of spread experimental standard deviation, simulated rate values were within experimental error only in two of seven cases. The simulations showed that the important parameters for the model are the vegetation surface area to volume ratio, its bulk density and moisture. As the radiation absorption coefficient is a direct function of vegetation bulk density and surface area to volume ratio, these parameters affect the numeric behavior of the surface fire. According to the numerical simulations results, vegetation moisture is also important in the surface fire scenario. Vegetation initial temperature and air humidity in the range analyzed does not influence the rate of spread. The simulations also showed that the radiation process is very important and directly affects all other processes and rate of spread. Convection heat transfer has much less significance than radiation heat transfer in the absence of external wind. The consistency of the experimental and numerical rate of spread, as a function of combustible material bulk density and vegetation moisture was investigated. The numerical model is

consistent in all nine case combinations. The experiment is consistent in four cases. Based on comparisons between each two experiments and their numerical simulations, it is noted that the rate of spread variation from the numerical simulation is more consistent than the experimental one.

Keywords: Forest fires (Numerical simulation) - Amazon; Atmospheric Turbulence; Combustion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Sistema de coordenadas para a discretização angular. 93
Figura 5.1 – Localização dos experimentos. 107
Figura 5.2 – Propagação do fogo em um dos experimentos de laboratório no município de Cruzeiro do Sul (AC). 108
Figura 5.3 –Experimento de campo no município de Alta Floresta (MT) mostrando a propagação do fogo (esquerda) e simulação do incêndio no WFDS (direita)..... 109
Figura 5.4 – Fase inicial de um experimento de campo no município de Alta Floresta (MT)..... 110
Figura 5.5 –Experimento de campo no município de Alta Floresta (MT) com descontinuidade na linha de fogo. 110
Figura 5.6 – Experimento de campo no município de Alta Floresta (MT), onde se vê a heterogeneidade da camada vegetal. 111
Figura 5.7 – Frente de fogo descontínua em um experimento de campo no município de Alta Floresta (MT). 112
Figura 5.8 –Material carbonizado de um experimento de campo no município de Alta Floresta (MT). 112
Figura 5.9 – Material vegetal proveniente do experimento 1 do município de Alta Floresta (MT) sendo queimado. 113
Figura 5.10 – Material vegetal proveniente do experimento 2 do município de Alta Floresta (MT) sendo queimado. 113
Figura 5.11 – Material vegetal proveniente do experimento 3 do município de Alta Floresta (MT) sendo queimado. 114
Figura 6.1 – Evolução temporal da perda de massa da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Alta Floresta (MT)..... 128
Figura 6.2 – Evolução temporal da taxa de perda de massa da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Alta Floresta (MT). 130

Figura 6.3 - Evolução temporal da taxa de perda de massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #4 de Alta Floresta (MT) com modelos de evaporação e pirólise de Morvan e Arrhenius. 131
Figura 6.4 – Evolução temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Alta Floresta (MT). 132
Figura 6.5 - Evolução da variação da temperatura no tempo para o ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Alta Floresta (MT). 134
Figura 6.6 – Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Alta Floresta (MT). 135
Figura 6.7 – Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT). 136
Figura 6.8 – Detalhe da evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Alta Floresta (MT). 137
Figura 6.9 - Detalhe da evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Alta Floresta (MT). 138
Figura 6.10 – Perfil da componente u do vetor velocidade da fase gasosa (positivo para a direita) em t=70 s para o experimento #3 de Alta Floresta (MT). 139
Figura 6.11 – Perfil da componente u do vetor velocidade da fase gasosa (positivo para a direita) em t=80 s para o experimento #3 de Alta Floresta (MT). 139
Figura 6.12 – Perfil da temperatura da fase gasosa em t=70 s para o experimento #3 de Alta Floresta (MT). 140

Figura 6.13 – Perfil da componente w (vertical) do vetor velocidade da fase gasosa (positivo para cima) em t=92 s para o experimento #3 de Alta Floresta (MT).....141
Figura 6.14 – Perfil de temperatura da fase gasosa em t=92 s para o experimento #3 de Alta Floresta (MT). 142
Figura 6.15 – Evolução temporal da perda de massa da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC). 143
Figura 6.16 – Evolução temporal da taxa de perda de massa da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC).....146
Figura 6.17 – Evolução temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC). 147
Figura 6.18 - Evolução da variação da temperatura no tempo para o ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC).....149
Figura 6.19 – Evolução temporal do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC). 150
Figura 6.20 – Evolução temporal do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC). 151
Figura 6.21 - Detalhe da evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC). 152
Figura 6.22 - Detalhe da evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC). 153
Figura 6.23 - Evolução temporal da massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume (ASV) da vegetação. 155

Figura 6.24 - Evolução temporal da taxa de perda de massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume (ASV) da vegetação. 156
Figura 6.25 - Evolução temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume da vegetação. 157
Figura 6.26 - Evolução da variação da temperatura no tempo para o ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume da vegetação. 158
Figura 6.27 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume da vegetação. 159
Figura 6.28 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume da vegetação. 160
Figura 6.29 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume da vegetação. 161
Figura 6.30 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume da vegetação. 162
Figura 6.31 - Evolução temporal da massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na umidade da vegetação. 164
Figura 6.32 - Evolução temporal da taxa de perda de massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na umidade da vegetação. 165

Figura 6.33 - Evolução temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na umidade da vegetação. 166
Figura 6.34 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na umidade da vegetação. 167
Figura 6.35 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na umidade da vegetação. 168
Figura 6.36 – Detalhe da evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para a umidade da vegetação 20% maior que no experimento #1 de Alta Floresta (MT). 169
Figura 6.37 - Evolução temporal da massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume da vegetação. 171
Figura 6.38 - Evolução temporal da taxa de perda de massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume da vegetação. 172
Figura 6.39 - Evolução temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na massa específica aparente da vegetação. 173
Figura 6.40 - Evolução da variação da temperatura no tempo para o ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na massa específica aparente da vegetação. 174
Figura 6.41 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na massa específica aparente da vegetação. 175

Figura 6.42 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume da vegetação. 176
Figura 6.43 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na massa específica aparente da vegetação. 177
Figura 6.44 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume da vegetação. 178
Figura 6.45 - Evolução temporal da massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na temperatura inicial da vegetação.....180
Figura 6.46 - Evolução temporal da taxa de perda de massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na temperatura inicial da vegetação. 181
Figura 6.47 - Evolução temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na temperatura inicial da vegetação. 182
Figura 6.48 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na temperatura inicial da vegetação. 183
Figura 6.49 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na temperatura inicial da vegetação. 184
Figura 6.50 - Evolução temporal da massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na umidade do ar. 186

Figura 6.51 - Evolução temporal da taxa de perda de massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na umidade do ar.....187
Figura 6.52 - Evolução temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na umidade do ar.....188
Figura 6.53 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na umidade do ar.....189
Figura 6.54 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na umidade do ar.....190
Figura 6.55 – Evolução temporal da perda de massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variação com o material carbonizado permanecendo no domínio computacional. 191
Figura 6.56 – Evolução temporal da taxa de perda de massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variação com o material carbonizado permanecendo no domínio computacional. 192
Figura 6.57 – Evolução temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variação com o material carbonizado permanecendo no domínio computacional.....193
Figura 6.58 – Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variação com o material carbonizado permanecendo no domínio computacional. 195
Figura 6.59 – Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta

Floresta (MT) e variação com o material carbonizado permanecendo no domínio computacional. 196
Figura 6.60 – Detalhe da evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variação com o material carbonizado permanecendo no domínio computacional. 197
Figura 6.61 - Detalhe da evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variação com o material carbonizado permanecendo no domínio computacional. 198
Figura 6.62 - Detalhe da evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variação com o material carbonizado permanecendo no domínio computacional.....199
Figura 6.63 - Detalhe da evolução temporal do perfil do divergente dos fluxos de radiação e convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variação com o material carbonizado permanecendo no domínio computacional. 200

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Limites das bandas espectrais. 63
Tabela 4.1 - Módulos do WFDS 72
Tabela 4.2 – Valores de entrada para o modelo numérico – experimentos de Cruzeiro do Sul - AC. 104
Tabela 4.3 – Valores de entrada para o modelo numérico – experimentos de Alta Floresta - MT. 104
Tabela 5.1 – Dados do material vegetal dos experimentos de Alta Floresta (MT). 114
Tabela 5.2 – Dados do material vegetal dos experimentos de Cruzeiro do Sul (AC). 115
Tabela 5.3 – Distância, direção e tempo medidos e ROS calculada para a propagação do incêndio para o experimento #1 de Alta Floresta (MT). 115
Tabela 5.4 - Distância, direção e tempo medidos e ROS calculada para a propagação do incêndio para o experimento #2 de Alta Floresta (MT). 116
Tabela 5.5 - Distância, direção e tempo medidos e ROS calculada para a propagação do incêndio para o experimento #3 de Alta Floresta (MT). 116
Tabela 5.6 - Distância, direção e tempo medidos e ROS calculada para a propagação do incêndio para o experimento #4 de Alta Floresta (MT). 117
Tabela 5.7 – Valores da ROS experimental para cada experimento de Alta Floresta (MT) 117
Tabela 5.8 – Distância, direção e tempo medidos e ROS calculada para a propagação do incêndio para o experimento #1 de Cruzeiro do Sul (AC). 118
Tabela 5.9 - Distância, direção e tempo medidos e ROS calculada para a propagação do incêndio para o experimento #4 de Cruzeiro do Sul (AC). 118
Tabela 5.10 - Distância, direção e tempo medidos e ROS calculada para a propagação do incêndio para o experimento #6 de Cruzeiro do Sul (AC). 119

Tabela 5.11 - Distância, direção e tempo medidos e ROS calculada para a propagação do incêndio para o experimento #8 de Cruzeiro do Sul (AC). 119
Tabela 6.1 – Avaliação do tamanho da malha em função de D* para os experimentos de Alta Floresta (MT) e Cruzeiro do Sul (AC). 121
Tabela 6.2 – Comprimento ótico, tamanho máximo da célula e tamanho da célula utilizado para as simulações dos experimentos de Alta Floresta (MT) e Cruzeiro do Sul (AC). 122
Tabela 6.3 – Estudo de sensibilidade de malha para os experimentos #1 e #3 de Alta Floresta (MT). 123
Tabela 6.4 – Valores de espaço em disco necessário, horas de CPU e número de passos de tempo para cada simulação numérica – Cruzeiro do Sul (AC). 124
Tabela 6.5 – Valores de espaço em disco necessário, horas de CPU e número de passos de tempo para cada simulação numérica – Alta Floresta (MT). 124
Tabela 6.6 – Valores da fração de combustível vegetal virgem convertido em material carbonizado, massa específica aparente da vegetação e massa específica aparente de material combustível – Alta Floresta (MT). 126
Tabela 6.7 – Valores da massa seca inicial, massa final e relação massa final sobre massa seca inicial – Alta Floresta (MT). 129
Tabela 6.8 – Valores da ROS para os experimentos de Alta Floresta (MT). 129
Tabela 6.9 – Valores da temperatura inicial da vegetação, duração da evaporação da umidade e duração da pirólise para os experimentos de Alta Floresta (MT). 132
Tabela 6.10 – Valores da umidade da vegetação para os experimentos de Alta Floresta (MT). 133
Tabela 6.11 – Valores da massa seca inicial, massa final e relação massa final sobre massa seca inicial – Cruzeiro do Sul (AC). 144
Tabela 6.12 – Valores da fração de combustível vegetal virgem convertido em material carbonizado, massa específica aparente da vegetação e massa específica aparente de material combustível – Cruzeiro do Sul (AC). 144

Tabela 6.13 – Valores da umidade da vegetação para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC). 145
Tabela 6.14 – Valores da ROS para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC). 145
Tabela 6.15 – Valores da temperatura inicial da vegetação para os experimentos de Alta Floresta (MT). 148
Tabela 6.16 – Valores da área superficial por volume e da taxa de propagação do incêndio medida e simulada para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações paramétricas. 154
Tabela 6.17 – Valores da umidade e da taxa de propagação medida e simulada para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações paramétricas 163
Tabela 6.18 – Valores da massa específica aparente e da taxa de propagação medida e simulada para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações paramétricas. 170
Tabela 6.19 – Valores da temperatura inicial e da taxa de propagação medida e simulada para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações paramétricas. 179
Tabela 6.20 – Valores da umidade do ar e da taxa de propagação medida e simulada para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações paramétricas. 185
Tabela 6.21 – Comparação entre a ROS experimental e a numérica para Alta Floresta (MT) e Cruzeiro do Sul (AC). 201
Tabela 6.22 – Análise da ROS experimental e numérica em função da variação da massa específica aparente de material combustível e umidade da vegetação na comparação direta entre experimentos para Alta Floresta (MT) e Cruzeiro do Sul (AC). 202
Tabela 6.23 – Análise comparativa da ROS experimental e numérica quanto à sua coerência, em função da variação da massa específica aparente de material combustível e umidade da vegetação na comparação direta entre experimentos para Alta Floresta (MT) e Cruzeiro do Sul (AC). 203

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPU	Central Processing Unit
DNS	Direct Numerical Simulation
EDC	Eddy Dissipation Concept
FDF	Função de densidade filtrada
FDS	Fire Dynamics Simulator
FFT	Fast Fourier transform
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LES	Large Eddy Simulation
MPI	Message Passing Interface
NIST	National Institute of Standards and Technology
PDE	Partial differential equation
RANS	Reynolds-Averaged Navier–Stokes
ROS	Rate of Spread
RTE	Radiation Transfer Equation
SGS	Subgrid scale
TVD	Total Variation Diminishing
USDA	United States Department of Agriculture
WFDS	Wildland-urban interface Fire Dynamics Simulator

LISTA DE SÍMBOLOS

Variável	Descrição	Unidade
Caracteres Romanos		
A	Área frontal do elemento combustível	m^2
	Matriz de transformação	[-]
B	Energia emitida por radiação	W m^{-2}
	Matriz de transformação	[-]
$\mathrm{C_D}$	Coeficiente de arrasto	[-]
$\mathrm{C_{EDC}}$	Constante do modelo “Eddy Dissipation Concept”	[-]
$\mathrm{c_p}$	Calor específico à pressão constante	$\mathrm{kJ\ kg^{-1}\ ^{\circ}C^{-1}}$
$\mathrm{C_v}$	Coeficiente do modelo de Deardorff	[-]
D	Difusividade mássica	$m^2\ s^{-1}$
$\mathrm{D^*}$	Diâmetro característico do incêndio	m
$\mathbf{f}_{\mathrm{D}}'''$	Força de arrasto por unidade de volume	kg $m^{-2}\ s^{-2}$
F	Fração da intensidade de radiação de corpo negro	[-]
F	Termos de fluxo da quantidade de movimento	m s^{-2}
g	Vetor de aceleração da gravidade	m s^{-2}
$\mathrm{G}(\mathbf{x}, \mathbf{x}'; \Delta)$	Núcleo do filtro de largura característica Δ	m^{-3}
h	Entalpia da mistura	kJ kg^{-1}
h_i	Entalpia da espécie i	kJ kg^{-1}
$\dot{\mathrm{h}}_{\mathrm{b}}'''$	Taxa de variação da entalpia por unidade de volume devido à produção de massa da espécie gasosa i pela degradação térmica da vegetação	kW m^{-3}

H	Função degrau de Heaviside	m^{-1}
H_i	Entalpia molar da espécie i	kJ $kmol^{-1}$
$\mathcal{H}$	Energia de estagnação por unidade de massa	m^2 s^{-2}
I	Matriz identidade	[-]
$I(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{s}})$	Intensidade de radiação	W m^{-2}
$I_b(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{s}})$	Intensidade de radiação de corpo negro	W m^{-2}
J	Fluxo difusivo mássico	kg m^{-2} s
k	Condutividade térmica	W m^{-1} K^{-1}
K	Energia cinética	m^2 s^{-2}
m	Massa	Kg
$\dot{m}_i'''$	Taxa de produção ou consumo de massa da espécie gasosa i devido a uma reação química	kg m^{-3} s^{-1}
$\dot{m}_{b,i}'''$	Taxa aparente de produção de massa da espécie gasosa i devido à degradação térmica da vegetação	kg m^{-3} s^{-1}
$\dot{m}_b'''$	Taxa aparente de produção de massa devido à degradação térmica da vegetação	kg m^{-3} s^{-1}
$\dot{m}_F'''$	Taxa de consumo de combustível devido à reação química	kg m^{-3} s^{-1}
$\dot{m}_{k,i}$	Produção de massa da espécie gasosa i devido à degradação térmica do k-ésimo elemento combustível submalha	kg s^{-1}
$\dot{m}_{k,i}'''$	Taxa de produção de massa da espécie gasosa i devido à degradação térmica do k-ésimo elemento combustível submalha	kg m^{-3} s^{-1}
M	Umidade da vegetação (base seca)	[-]
n	Número da banda espectral	[-]

$\hat{\mathbf{n}}$	Vetor unitário normal	[-]
N_θ	Número de ângulos polares θ	[-]
N_ϕ	Número de ângulos azimutais ϕ	[-]
N_Ω	Número de ângulos sólidos Ω	[-]
p	Pressão hidrodinâmica	Pa
p_0	Pressão termodinâmica	Pa
$\tilde{p}$	Pressão de perturbação	Pa
Pr	Número de Prandtl	[-]
$\dot{q}'''_{net}$	Fluxo de calor radiativo mais convectivo	kW m^{-3}
$\mathbf{q}$	Vetor fluxo de calor	kW m^{-2}
$\dot{q}'''$	Taxa de liberação de calor por unidade de volume	kW m^{-3}
$\dot{Q}$	Taxa de liberação de calor	kW
$\dot{Q}'''_c$	Taxa de liberação de calor por unidade de volume devido às reações químicas	kW m^{-3}
r	Raio	m
r_i	Razão estequiométrica para a espécie gasosa i	[-]
R	Constante universal dos gases	J mol^{-1} k^{-1}
Re	Número de Reynolds	[-]
$\hat{\mathbf{s}}$	Vetor unitário na direção da intensidade de radiação	[-]
Sc	Número de Schmidt	[-]
S	Área superficial	m^2
$\mathbf{S}$	Tensor taxa de tensão	s^{-1}
t	Tempo	s
T	Temperatura	℃

u	Vetor velocidade	m s^{-1}
U	Intensidade de radiação integrada	W m^{-2}
v	Vetor velocidade	m s^{-1}
V	Volume	m^3
V_b	Volume da célula computacional	m^3
W	Peso molecular médio da mistura gasosa	kg $kmol^{-1}$
W_i	Peso molecular da espécie gasosa i	kg $kmol^{-1}$
x	Vetor posição	m
Y_i	Fração mássica da espécie i	[-]
Z_α	Fração mássica da espécie agrupada α	[-]

Caracteres Gregos

β	Razão de compactação	[-]
δx	Tamanho da célula da malha	m
$\delta(\mathbf{x})$	Função delta de Dirac	m^{-3}
δ_{ij}	Delta de Kronecker	[-]
δ_r	Comprimento ótico	m
Δ	Tamanho do filtro LES	m
Δh_c	Entalpia de combustão mássica	kJ kg^{-1}
Δh_i^0	Entalpia de formação	kJ kg^{-1}
Δh_{pir}	Entalpia de pirólise	kJ kg^{-1}
Δh_{vap}	Entalpia de vaporização	kJ kg^{-1}
ΔH_c	Entalpia de combustão molar	kJ $kmol^{-1}$
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	Espaçamento na malha	m

ε	Taxa de dissipação viscosa por unidade de massa	$m^2\ s^{-3}$
η	Escala de Kolmogorov	m
θ	Ângulo polar	rad
κ	Coeficiente de absorção por radiação	[-]
λ	Comprimento de onda	m
μ	Viscosidade dinâmica da mistura gasosa	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$
ν	Viscosidade cinemática	$m^2\ s^{-1}$
ν_i	Coeficiente estequiométrico da espécie i	[-]
ρ	Massa específica	$kg\ m^{-3}$
σ_B	Constante de Stefan–Boltzmann	$kW\ m^{-2}\ K^{-4}$
σ_e	Razão área superficial por volume para elementos combustíveis do tipo e	m^{-1}
σ_s	Coeficiente de espalhamento	[-]
$\boldsymbol{\tau}$	Tensor tensão	Pa
τ	Tempo característico	s
ϕ	Escalar arbitrário	[-]
	Ângulo azimutal	rad
$\bar{\phi}$	Filtragem convencional em um escalar arbitrário	[-]
$\tilde{\phi}$	Filtro de Favre implícito em um escalar arbitrário	[-]
$\langle\phi\rangle$	Filtragem explícita em um escalar arbitrário	[-]
χ_{char}	Fração de combustível vegetal virgem convertido a material carbonizado	[-]
χ_r	Fração do calor gerado devido a reações químicas e radiado para o ambiente	[-]
χ_s	Fração da massa do combustível consumido que é	[-]

	convertida em fuligem	
$\boldsymbol{\omega}$	Vetor vorticidade	s^{-1}
Ω	Ângulo sólido	rad

Subscritos

b	Quantidade aparente de combustível vegetal
	Corpo negro
c	Convecção
	Combustão
	Reação química
D	Arrasto
e	Tipo do elemento de combustível
ext	Externo ao domínio computacional
F	Espécie combustível
g	Fase gasosa
i	Espécie gasosa
k	Índice do elemento de combustível
m	Identificação de célula
r	Radiação
t	Turbulento
v	Vegetação virgem e seca
α	Espécie agrupada
∞	Ambiente

Sobrescritos

d	Parte deviatórica

l	Direção da intensidade de radiação
sgs	Escala submalha
T	Transposta de uma matriz

LISTA DE ESPÉCIES QUÍMICAS

CH_4	Metano
$C_{3,4}H_{6,2}O_{2,5}$	Composição média de materiais celulósicos
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
H_2O	Água
N_2	Nitrogênio
O_2	Oxigênio

LISTA DE MARCAS REGISTRADAS

Linux é uma marca registrada de Linus Torvalds
CRAYFISHPAK é uma marca registrada de Green Mountain Software

FDS não é uma marca registrada
SmokeView não é uma marca registrada
WFDS não é uma marca registrada
RadCal não é uma marca registrada
BEHAVE não é uma marca registrada
FIRETEC não é uma marca registrada
HIGRAD não é uma marca registrada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 33

1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO 36

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO 37

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 37

2 REVISÃO DA LITERATURA 39

2.1 ORGANIZAÇÃO DOS MODELOS QUE DESCREVEM OS INCÊNDIOS FLORESTAIS 39

2.2 OS PRIMEIROS TRABALHOS SOBRE INCÊNDIO FLORESTAL 40

2.3 OS MODELOS EMPÍRICOS E SEMI-EMPÍRICOS 41

2.4 OS MODELOS FÍSICOS 43

2.5 AS ATIVIDADES EXPERIMENTAIS 46

3 MODELO FÍSICO 49

3.1 A MALHA PARA A VEGETAÇÃO 50

3.2 FORMULAÇÃO LES 52

3.3 EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO PARA A FASE GASOSA 54

3.4 REAÇÃO QUÍMICA 60

3.5 O TRANSPORTE DE RADIAÇÃO TÉRMICA 61

3.6 EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO PARA A VEGETAÇÃO 66

4 MODELO NUMÉRICO 70

4.1 VISÃO GERAL DO MODELO NUMÉRICO UTILIZADO 70

4.2 A MALHA NUMÉRICA 74

4.3 O TRANSPORTE DE MASSA E ESPÉCIES 75

4.4 A APROXIMAÇÃO DE BAIXO NÚMERO DE MACH 77

4.5 O TRANSPORTE DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO 79

4.6 A EQUAÇÃO PARA A PRESSÃO (EQUAÇÃO DE POISSON) 87

4.7 A COMBUSTÃO 90

4.8 A RADIAÇÃO 92

4.9 MÉTODO DA SOLUÇÃO NUMÉRICA 99

4.10 LIMITADORES DE FLUXO 101

4.11 CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA A TEMPERATURA, FRAÇÃO MÁSSICA DE ESPÉCIES, E MASSA ESPECÍFICA 102

4.12 DADOS DE ENTRADA DO MODELO NUMÉRICO 103
4.12.1 Propriedades da vegetação 105
4.12.2 Propriedades do elemento combustível 105

5 EXPERIMENTOS DE QUEIMA DE VEGETAÇÃO NA FLORESTA AMAZÔNICA 107

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES 120

6.1 SIMULAÇÃO DOS EXPERIMENTOS DE ALTA FLORESTA (MT) 126
6.2 SIMULAÇÃO DOS EXPERIMENTOS DE CRUZEIRO DO SUL (AC) 143
6.3 VARIAÇÃO DA SIMULAÇÃO DO EXPERIMENTO #1 DE ALTA FLORESTA (MT): ANÁLISE DA ÁREA SUPERFICIAL POR VOLUME DA VEGETAÇÃO 154
6.4 VARIAÇÃO DA SIMULAÇÃO DO EXPERIMENTO #1 DE ALTA FLORESTA (MT): ANÁLISE DA UMIDADE DA VEGETAÇÃO 163
6.5 VARIAÇÃO DA SIMULAÇÃO DO EXPERIMENTO #1 DE ALTA FLORESTA (MT): ANÁLISE DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA VEGETAÇÃO 170
6.6 VARIAÇÃO DA SIMULAÇÃO DO EXPERIMENTO #1 DE ALTA FLORESTA (MT): ANÁLISE DA TEMPERATURA INICIAL DA VEGETAÇÃO 179
6.7 VARIAÇÃO DA SIMULAÇÃO DO EXPERIMENTO #1 DE ALTA FLORESTA (MT): ANÁLISE DA UMIDADE DO AR 185
6.8 VARIAÇÃO DA SIMULAÇÃO DO EXPERIMENTO #1 DE ALTA FLORESTA (MT): MATERIAL CARBONIZADO NÃO É REMOVIDO DO DOMÍNIO COMPUTACIONAL 191
6.9 COMPARAÇÃO EXPERIMENTO X SIMULAÇÃO 201

7 COMENTÁRIOS FINAIS 205

REFERÊNCIAS 208

GLOSSÁRIO 218

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, a ação do homem sobre a natureza sempre foi muito intensa, especialmente nas zonas abertas e litorâneas, com extração das riquezas florestais nas savanas, nos pampas e, em menor intensidade, nas áreas montanhosas. As florestas tropicais úmidas permaneceram por muito tempo à margem destas transformações. Porém, o aumento demográfico e a busca incessante dos países para aumentar suas fronteiras agrícolas e assim acomodar contingentes populacionais cada vez maiores, mas sem o planejamento ambiental adequado do uso destes recursos, alteraram de forma significativa os ecossistemas naturais no Brasil e no mundo. Grandes extensões naturais foram gradativamente sendo substituídas por pastagens e plantações (SILVA, 1998).

O fogo tem sido um importante instrumento para o desbravamento e ocupação de terras virgens. Porém, no Brasil, a partir da segunda metade do século XX, mais precisamente na década de 1970, quando a expansão da fronteira agrícola tomou rumo às Regiões Centro-Oeste e Norte, é que o fogo passou a ser mais intensivamente utilizado, principalmente por tratar-se de um instrumento de manejo agrícola barato, acessível e eficaz para os fins a que se destina. A intensidade e o uso indiscriminado das queimadas na abertura de novas áreas para agricultura transformou-se em um grave problema ambiental para o país. Também, na medida em que se ampliavam as áreas de pecuária bovina, o emprego do fogo para renovação de pastagens foi incrementado. Da mesma forma, com o crescimento da indústria canavieira, impulsionada pelo Programa Nacional do Álcool, a prática da queima de canaviais tornou-se uma constante naquela época. Já no início da década de 1990 eram queimadas cerca de quatro milhões de hectares dessa cultura, localizadas principalmente nas Regiões Sudeste e Nordeste. Essas queimadas, aliadas aos incêndios florestais, originados tanto por fenômenos naturais quanto pelo próprio homem, começaram a provocar não só impacto no meio ambiente, como também danos materiais e, mais importante, começaram a ameaçar a saúde e a própria vida das populações das áreas atingidas. Do ponto de vista ambiental, os danos não estavam restritos à extensão das áreas de floresta úmida tropical e cerrados nativos queimados e ao que isso representava em termos de

perda do bioma, mas também à emissão de gases para a atmosfera, contribuindo para o aumento do efeito estufa e perdas na qualidade atmosférica local e regional (RAMOS, 1995). É importante ressaltar a diferença entre incêndio florestal e queimada. Incêndio Florestal é a propagação do fogo, em áreas florestais e de savana (cerrados e caatingas). Normalmente ocorre com frequência e intensidade nos períodos de estiagem e está intrinsecamente relacionado com a redução da umidade ambiental (SECRETARIA NACIONAL DE DEFESA CIVIL, 2010). Queimada é o “fogo decorrente de prática agropastoril ou florestal, onde é utilizado de forma controlada, atuando como um fator de produção” (RAMOS, 1995, p.30).

Estudos realizados nos Estados Unidos (USDA Forest Service, 2006) sugerem que, como consequência da prática de gestão de supressão total do fogo no passado, muitas das florestas dos Estados Unidos têm acúmulo histórico de vegetação densa e morta no chão. Afirma-se que esta prática, juntamente com a mudança climática no oeste dos Estados Unidos, fez com que as florestas ficassem mais perigosas do ponto de vista de segurança contra incêndio além de enfraquecidas ecologicamente. Os incêndios inflamam e se espalham mais rapidamente e queimam com maior intensidade do que no passado. Um estudo feito por Agee, Wakimoto e Biswell (1978) quantificou o acúmulo de combustível e sua redução devido ao fogo para quatro coníferas de Sierra Nevada nos Estados Unidos. Segundo os autores, os primeiros incêndios florestais de coníferas mistas na Califórnia foram geralmente de baixa intensidade, pois a energia do combustível foi periodicamente liberada antes de chegar ao ponto em que uma grande liberação de energia pudesse ocorrer. A política de supressão de todos os incêndios florestais, tanto os naturais quanto os causados pelo homem, instituída no início do século XX permitiu a acumulação de energia ao longo dos anos, finalmente sendo liberada por incêndios não frequentes e de grandes danos. A queimada controlada está agora sendo reintroduzida em muitos ambientes florestais para reduzir os riscos de incêndio ou recriar as condições originais.

O fogo pode ser considerado como um inimigo potencial das florestas, porém quando usado de forma controlada é de grande utilidade para a atividade florestal, tanto na limpeza das áreas como na redução de material combustível no interior das florestas (LABORATÓRIO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS, 2012).

É possível diferenciar três tipos de incêndios florestais: os incêndios de superfície, de copa e os subterrâneos (SILVA, 1998). Os incêndios de superfície são

caracterizados pela queima da vegetação morta e rasteira, como as ervas, camada de folhas, galhos, etc. que se misturam com a terra que cobre o solo da mata, bem como dos troncos e de material que tenha sofrido decomposição (húmus). Estes incêndios não causam danos significativos em árvores de grande porte, porém são extremamente prejudiciais às vegetações rasteiras e plantas jovens, principalmente para sua regeneração (SILVA, 1998). Este sistema físico é ainda constituído de vegetação inferior a 2 m de altura, como pequenas árvores, arbustos e vegetação herbácea, cuja formação é composta por gramíneas, geralmente rasteiras (PASTOR et al., 2003). Os incêndios de copa são aqueles que se desenvolvem nas copas das árvores, onde a velocidade e a intensidade do fogo são maiores devido à grande circulação do vento nessas áreas. Por causa de sua rápida propagação, são os incêndios que mais causam danos à vida humana e silvestre bem como às construções (SILVA, 1998). Os incêndios subterrâneos são incêndios que se propagam debaixo da superfície terrestre, alimentados por matéria orgânica seca, raízes e turfas, bem compactadas, de combustão lenta e contínua. Ao contrário dos anteriores que se multiplicam com maior rapidez devido à presença de maior quantidade de oxigênio na combustão do material, este tipo de incêndio se espalha lentamente. Neste trabalho é estudado o incêndio de superfície que, no caso dos experimentos realizados no Acre e em Mato Grosso, tem a vegetação composta basicamente de folhas mortas com pequena quantidade de galhos mortos muito curtos e finos. Há ainda a presença de pequenos caules de plantas muito jovens e folhas vivas pendentes de ramos finos de arbustos, as quais chegam muito próximo do solo.

Os modelos numéricos usados para o estudo dos incêndios florestais podem ser classificados, segundo a natureza das equações envolvidas, em físicos ou teóricos, empíricos e semi-empíricos (PASTOR et al., 2003). Os modelos físicos são gerados a partir das leis que regem a mecânica dos fluidos, combustão e transferência de calor. A validação deste tipo de modelo é difícil, embora eles possam ser extrapolados para uma ampla variedade de situações de incêndio. Os modelos empíricos são compostos por correlações estatísticas extraídas a partir de experimentos ou estudos históricos dos incêndios florestais. Estes são apenas aplicáveis aos sistemas em que as condições são idênticas às utilizadas na formulação e teste dos modelos. Os modelos semi-empíricos são formulados a partir de expressões teóricas, gerais e simples, e finalizados por meio da experimentação.

Sua extrapolação é adequada em situações similares às utilizadas na obtenção dos dados experimentais. A dificuldade na validação destes modelos é menor do que em modelos físicos, embora ainda assim esta dificuldade seja significativa. O modelo utilizado neste trabalho é o físico, conforme descrito no capítulo 3.

1.1 Motivação do Trabalho

No Brasil, a questão do incêndio florestal tem merecido a atenção do governo e de universidades. Os resultados do trabalho de Soares e Santos (2003), que teve como objetivo estabelecer o perfil dos incêndios florestais no país por meio de dados coletados em áreas protegidas, mostraram que a área atingida por incêndios aumentou de 76 ha no período de 1983 a 1987 para mais de 135 ha no período de 1994 a 1997.

É muito difícil, senão impossível, estudar os incêndios florestais em grande escala com experiências repetíveis no campo devido ao seu custo, às implicações de segurança e às variações de clima, terreno e vegetação. Ainda assim, sempre houve uma grande necessidade de melhorar a compreensão destes incêndios (WILLIAMS, 1982). O incêndio que ocorre próximo ao chão da floresta é dificilmente detectado por satélites (INPE, 2010). Não se tem conhecimento de estatísticas que apontem para a porcentagem dos incêndios que ocorrem próximo ao chão da floresta com relação ao total de incêndios florestais.

Muitos trabalhos foram desenvolvidos nos Estados Unidos, Canadá, Austrália e Europa para desenvolver metodologias para prever a taxa de propagação de incêndios florestais. Trabalhos de base empírica, semi-empírica e física foram elaborados na tentativa de melhor predizer a velocidade com que o fogo avança na vegetação. Naturalmente, estes trabalhos utilizam dados de incêndios locais, em que a vegetação é diferente da encontrada na floresta amazônica. Na extensa revisão bibliográfica feita para este trabalho, não se encontrou nenhuma informação referente a simulações numéricas utilizando as condições do Brasil, e mais especificamente da floresta amazônica.

1.2 Objetivo do Trabalho

O objetivo deste trabalho é a determinação da taxa de propagação de um incêndio florestal de superfície por simulação numérica, com a comparação dos resultados com experimentos de campo realizados em Alta Floresta (MT) e Cruzeiro do Sul (AC). Para isso são usadas propriedades da vegetação relativas ao bioma da Amazônia. Como parte desse objetivo, é feita uma análise paramétrica para se determinar a importância de cada variável na velocidade de propagação do incêndio. As variáveis analisadas para a vegetação são a área superficial por volume, umidade, massa específica aparente e temperatura inicial, e para o ar analisou-se a umidade. Por fim, o estudo de tendências das velocidades de propagação do incêndio (por simulação numérica e experimental) é conduzido para se avaliar seu comportamento em função das variáveis que mais influenciam a propagação do incêndio.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho foi organizado para apresentar de forma clara todo o conteúdo resultante dos estudos realizados em seu desenvolvimento. Para tanto, ele foi dividido em sete capítulos, cuja descrição é apresentada a seguir.

Para facilitar a leitura e o entendimento do trabalho, é apresentada no início do texto uma lista com as figuras e tabelas utilizadas. Uma lista de abreviaturas e siglas, de símbolos utilizados nas equações matemáticas, de espécies químicas e de marcas registradas é apresentada na sequência das listas anteriores.

No primeiro capítulo é feita a introdução ao tema da tese, apresentada a sua motivação, seu objetivo e sua organização.

O capítulo 2 expõe a revisão da literatura. Trata da organização dos modelos elaborados até o momento para descrever os incêndios florestais, resume os principais trabalhos que deram início aos modelos e aos entendimentos atuais sobre o tema e descreve os trabalhos elaborados sobre modelos empíricos, semi-empíricos e físicos para a propagação dos incêndios florestais. Também se aborda

as atividades experimentais, que são fundamentais na elaboração dos modelos empíricos e semi-empíricos e servem de base para a validação dos modelos físicos.

No capítulo 3 são apresentados os conceitos teóricos e as formulações matemáticas correspondentes ao modelo utilizado. A malha para a vegetação, a formulação LES, as equações de conservação para a fase gasosa, a reação química, o transporte de radiação térmica e as equações de conservação para a vegetação são descritos e as equações transientes que representam os processos físicos são introduzidas, bem como as hipóteses simplificadoras.

No quarto capítulo apresenta-se o modelo numérico utilizado para a resolução das equações apresentadas no capítulo 3. Explana-se em detalhes a formulação numérica utilizada e explicam-se os parâmetros e os valores usados.

No quinto capítulo descrevem-se os experimentos realizados no Acre e em Mato Grosso, cujas medições de campo foram utilizadas como entrada para as simulações numéricas.

No capítulo 6 são descritos os resultados obtidos nas simulações numéricas. Os resultados são comparados com os experimentos de campo. Também se investigam os efeitos de vários parâmetros de entrada sobre os resultados das simulações.

O capítulo 7 apresenta os comentários finais, com um resumo dos resultados mais importantes. É também sugerida uma linha de desenvolvimento de futuros trabalhos.

As referências bibliográficas utilizadas são apresentadas na sequência do capítulo 7.

Tendo em vista que alguns termos utilizados neste trabalho, necessários para a correta introdução dos assuntos aqui tratados, não são de conhecimento de muitos profissionais, é apresentado um glossário desses termos logo após as referências bibliográficas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Os artigos publicados sobre incêndios florestais e modelos para se predizer a propagação do fogo nos incêndios são muitos, e os locais de publicação, variados. Isso se deve ao fato do assunto ser de interesse em muitos países. A seguir se trata da organização dos modelos que descrevem os incêndios florestais e são resumidos os principais trabalhos sobre o tema e sobre os modelos empíricos, semi-empíricos e físicos. Algumas atividades experimentais são descritas na sequência.

2.1 Organização dos modelos que descrevem os incêndios florestais

Como esse assunto é amplo e de interesse mundial, algumas tentativas foram feitas para se organizar as pesquisas realizadas de acordo com o modelo utilizado (WEBER, 1991; PASTOR et al., 2003; MORVAN; DUPUY, 2004; MELL et al., 2007; SULLIVAN, 2009a; SULLIVAN, 2009b; SULLIVAN, 2009c). Weber (1991) em sua revisão sobre modelagem física de incêndios florestais propôs um sistema pelo qual os modelos foram descritos como físicos, empíricos ou estatísticos. Os modelos estatísticos não fazem qualquer tentativa de envolver mecanismos físicos, sendo uma mera descrição estatística dos incêndios. Os modelos empíricos são os que se baseiam no princípio da conservação de energia, mas que não diferenciam entre os modos de transferência de calor (condução, convecção e radiação). Os modelos físicos diferenciam os modos de transferência de calor e tentam predizer a taxa de propagação do incêndio florestal usando a descrição física dos processos de transferência de calor e massa. A classificação de Pastor et al. (2003) que já foi descrita anteriormente é a usada neste trabalho. Morvan e Dupuy (2004) propuseram descrições dos modelos como físicos, empíricos e semi-empíricos, de forma muito semelhante ao modelo de Pastor et al. (2003). Mell et al. (2007) também propuseram descrições dos modelos como físicos, empíricos e semi-empíricos, seguindo o definido por Pastor et al. (2003). Os modelos operacionais mais comumente utilizados para simular a propagação dos incêndios florestais dependem

de relações empiricamente derivadas para predizer a taxa de propagação de um incêndio. Os dados utilizados para elaborar as correlações empíricas utilizadas nestes modelos foram obtidos a partir de experimentos e observações de campo ou de experiências em escala de laboratório, com uma frente de fogo plana, com uma taxa de propagação quase constante em um leito combustível fixo, espacialmente homogêneo e sem vento. Sullivan (2009a; 2009b; 2009c) apresentou um resumo dos modelos criados ou usados no período de 1990 a 2007, e os dividiu em três grandes categorias. A primeira categoria é a dos modelos físicos e quase-físicos, a segunda dos modelos empíricos e semi-empíricos e a terceira de simulação e modelos matemáticos. O modelo físico é aquele que tenta representar tanto a física como a química da propagação do incêndio, enquanto que o modelo quase-físico tenta representar apenas a física. O modelo empírico não contém nenhuma compreensão física, sendo geralmente apenas de natureza estatística, e o modelo quase-empírico é aquela que usa alguma forma de física em sua estrutura, sobre a qual a modelagem estatística é baseada. Modelos empíricos e semi-empíricos podem ser sub categorizados como baseados em laboratório e em campo. O objetivo é diferenciar experimentos em pequena escala que são realizados internamente e com controle total e aqueles a céu aberto que têm controle limitado. Os modelos de simulação são aqueles que implementam um modelo de incêndio pré-existente, geralmente de pequena dimensão espacial, para abordar um conjunto diferente de problemas relacionados com computação. Modelos matemáticos são os que utilizam um preceito matemático em vez de um físico para a modelagem da propagação de incêndios.

2.2 Os primeiros trabalhos sobre incêndio florestal

A modelagem do comportamento do incêndio florestal teve seu início na década de 1920. O trabalho de Hawley (1926) foi pioneiro na noção de que a compreensão deste fenômeno e a sua previsão podem ser obtidas através da medição, observação e análise teórica dos fatores que podem influenciar os incêndios. Do ponto de vista teórico, o mecanismo de combustão foi relacionado com as condições da floresta em geral, incluindo efeitos da temperatura, umidade,

suprimento de ar, temperatura de ignição, entalpia de combustão e estado de agregação ou relação área superficial por volume do combustível. Adicionalmente, verificou-se que a umidade de um tipo de vegetação específico varia muito não apenas devido à estação, mas também em um mesmo dia (RICHARDS, 1940). As variações nos parâmetros acima foram confirmadas nas medições de campo usadas como referência nesta tese. A diferença na umidade da vegetação nos experimentos de Alta Floresta (MT) chegou a 17% entre os valores máximo e mínimo, enquanto que em Cruzeiro do Sul (AC) atingiu 220%.

Muitos trabalhos atuais consideram a relação área superficial por volume do combustível nos seus modelos, conforme previsto no trabalho de Hawley (1926), embora naquele momento não houvesse técnicas de medição desta relação disponíveis (CURRY; FONS, 1938). Outros trabalhos estavam sendo desenvolvidos na época pelo “Northern Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station” para se criar uma classificação de perigo de incêndio. Richards (1940) elaborou um estudo com a finalidade de descobrir fatores mensuráveis que pudessem representar as condições da vegetação para incorporação nesse trabalho. Até hoje a mensuração desses parâmetros de entrada para as simulações numéricas não são simples, e mesmo seguindo procedimentos bem estabelecidos há variações que podem ser importantes na caracterização da propagação de um incêndio.

O trabalho de Fons (1946) foi um dos primeiros a apresentar a necessidade de modelar fisicamente o incêndio florestal, para que os estudos sobre o assunto não ficassem restritos a condições locais muito específicas que dificilmente seriam reproduzidas novamente em outro incêndio. Apesar disso, suas equações ainda mostravam forte dependência dos estudos e simulações em túnel de vento, com condições de vegetação muito particulares.

2.3 Os modelos empíricos e semi-empíricos

Desde o início das atividades de gerenciamento florestal, os gestores e aqueles envolvidos em pesquisas envolvendo incêndios florestais nos Estados Unidos precisavam de um método consistente para prever a propagação e a intensidade do fogo nesses combustíveis. A disponibilidade do modelo semi-empírico de

propagação do fogo apresentado por Rothermel (1972) ofereceu pela primeira vez um método de avaliação quantitativa da frequência e da intensidade de propagação do fogo em combustíveis que se enquadravam nas suposições feitas no modelo. Esse modelo é baseado no balanço de energia desenvolvido por Frandsen (1971). Os parâmetros do combustível e clima mensuráveis no campo foram determinados como entradas para o modelo de incêndio em regime permanente, que foi usado no "National Fire-Danger Rating System" americano. A introdução de modelos semi-empíricos, mesmo que limitados, ofereceu a possibilidade aos gestores florestais de analisar as consequências dos programas florestais propostos, respondendo às perguntas de forma mais objetiva e quantitativa. As análises podiam ser aplicadas também a aspectos mais amplos de atividades de manipulação da vegetação, como o planejamento da supressão de um incêndio e de queimadas. As decisões podiam estar mais frequentemente em consonância com os resultados desejados quando as alternativas às práticas propostas podiam ser comparadas e avaliadas antes de qualquer ação no campo. Frandsen e Rothermel (1972) criaram dois métodos para determinar a taxa de liberação de energia em um incêndio, a qual é relacionada à taxa de consumo de combustível. Os resultados confirmam as observações anteriores de Rothermel (1972). O modelo de Rothermel foi, no Serviço Florestal americano, a primeira ferramenta quantitativa e sistemática para prever a propagação e a intensidade dos incêndios florestais, e ainda é a principal ferramenta em uso hoje (WELLS, 2008). O software de predição do comportamento do fogo “BEHAVE” utiliza o modelo de Rothermel junto com outros modelos para criar ferramentas que possam representar melhor a realidade do incêndio florestal (ANDREWS, 1986; ANDREWS; CHASE, 1989). Além desse trabalho, vários outros foram desenvolvidos por pesquisadores do Serviço Florestal Americano, tanto para determinar as características dos combustíveis vegetais como para criar modelos que representassem a forma como os incêndios florestais se propagam e como podem ser previstos (HOUGH, 1969; ALBINI, 1981; ANDERSON, 1982; ROTHERMEL; RINEHART, 1983; SCOTT; BURGAN, 2005). Albini (1981) criou um primeiro modelo, unidimensional, para analisar a chama turbulenta de uma frente de fogo na qual o empuxo era a principal fonte de quantidade de movimento vertical. Seu objetivo principal era determinar as dimensões da chama através de uma formulação matemática. Anderson (1982) estudou e determinou modelos de combustível para se estimar o comportamento do incêndio. Os combustíveis foram

classificados em quatro grupos: gramíneas, arbustos, madeira e detritos devidos ao corte da madeira. As diferenças no comportamento do incêndio entre esses grupos são basicamente relacionadas com a carga de combustível e sua distribuição entre as classes de tamanho do combustível. Rothermel e Rinehart (1983) estudaram os problemas das previsões de fogo no nível operacional a fim de identificar formas de previsão do incêndio.

Catalogar a vegetação e suas propriedades não foi um trabalho simples. Como dito anteriormente, as propriedades da vegetação mudam constantemente e as análises em laboratório nem sempre refletem as condições encontradas no campo. Um exemplo disso foi o trabalho de Hough (1969) que estudou a entalpia de combustão de diversas espécies vegetais encontradas em florestas do sul, leste e centro-norte dos Estados Unidos. Segundo o autor, os valores da entalpia de combustão obtidos por meio de testes de amostras em um calorímetro variam muito. Como ocorre a combustão completa da vegetação no aparelho de ensaio, o que geralmente não ocorre em um incêndio florestal, os valores do calorímetro são uma indicação da quantidade máxima de energia liberada quando um material reage com o oxigênio. Scott e Burgan (2005) descrevem em seu trabalho um novo conjunto de modelos de combustível para uso com o modelo de propagação do incêndio de superfície de Rothermel (1972). Apresentam informações como carga de combustível fino (folhas principalmente), razão área superficial por volume característico, a razão de compactação, e o teor de umidade a partir do qual o fogo se extingue. A relação área superficial por volume da vegetação é um fator difícil de determinar, daí a importância desse trabalho, que relaciona os dados a fotos da vegetação que os representa. Esse trabalho não possui os dados para a vegetação de superfície da Floresta Amazônica.

2.4 Os modelos físicos

Muitos trabalhos foram realizados para desenvolver modelos físicos que representassem da melhor forma as observações experimentais. Como o fenômeno do incêndio florestal é composto de muitos mecanismos físicos que, por si só, já justificariam trabalhos individuais, os modelos físicos muitas vezes não representam

todos os mecanismos presentes nos incêndios. Cada modelo aborda o incêndio florestal usando premissas que simplificam o fenômeno de forma que possa ser estudado, modelado e reproduzido pelos meios computacionais disponíveis no momento.

Uma série de trabalhos desenvolvidos primeiramente por Linn (1997), e seguidos por Linn et al. (2002), Linn e Cunningham (2005), Cunningham e Linn (2007) e Colman e Linn (2007) estudou os modelos de transporte para predizer o comportamento dos incêndios florestais. Nesse modelo, a taxa de propagação do incêndio é determinada pelas equações de transporte e as taxas de reação são limitadas pelo processo de mistura, e não pela cinética química. A propagação da linha de fogo foi inicialmente analisada em um plano vertical paralelo à direção de avanço do incêndio, para em trabalhos posteriores ser analisada tridimensionalmente. O modelo é baseado na conservação de massa, quantidade de movimento e energia, e inclui o transporte das espécies e a turbulência. A radiação é modelada empiricamente, ao invés de resolvida por integração das equações diferenciais de radiação. As taxas de pirólise e evaporação de água foram determinadas por uma função de distribuição de probabilidade. Estas taxas são função da quantidade de combustível e da temperatura. Os trabalhos de Linn et al. (2002), Linn e Cunningham (2005), Cunningham e Linn (2007) e Colman e Linn (2007) foram baseados no modelo para incêndios FIRETEC e no modelo de dinâmica atmosférica HIGRAD, em que a atmosfera e o fogo são acoplados, e utiliza modelos de processos baseados na física para representar o comportamento do fogo. Estes trabalhos analisaram a contribuição da transferência de calor por radiação e convecção, a relação entre esses processos e a evolução do perfil de temperatura e a diferença entre as formulações conjunta e separada da combustão com a pirólise.

A formulação multifásica, que consiste na solução das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia em base média em um volume de controle foi utilizada por muitos autores (LARINI et al., 1998; DUPUY; LARINI, 1999; MORVAN et al., 2000; MORVAN; DUPUY, 2001; SIMEONI et al., 2003; MORVAN; DUPUY, 2004; MORVAN; MÉRADJI; ACCARY, 2009). Apesar de físico, o modelo de Larini et al. (1998) era unidimensional e não considerou mecanismos físicos como combustão incandescente, difusão de espécies químicas e o efeito gravitacional. O modelo físico de Dupuy e Larini (1999) também era

simplificado, mas incluiu os efeitos do empuxo no escoamento dos gases. O modelo é dividido em uma zona de pré-aquecimento e outra de combustão com chama. Na zona de pré-aquecimento a pirólise e as reações químicas são desprezadas, e o escoamento dos gases é considerado unidimensional. Na zona de combustão com chama, alguns parâmetros são utilizados para simplificar a descrição dos processos físicos e químicos. Morvan et al. (2000) melhoraram esse modelo para prever a taxa de propagação dos incêndios, onde a energia trocada por radiação foi avaliada pela integração da equação de transferência de calor por radiação, obtida tomando-se em conta os termos de fonte vindos da contribuição da combustão dos produtos de pirólise com o ar e da fuligem. Morvan e Dupuy (2001) realizaram novos estudos nas mesmas condições descritas em Morvan et al. (2000) e revisaram as três situações que descreviam a variação da taxa de propagação do incêndio no leito vegetal em relação à carga de combustível. Simeoni et al. (2003) propuseram um simulador de incêndios florestais através da descrição simplificada de um modelo multifásico que foi usado como referência. A simplificação do escoamento considerou basicamente os efeitos de empuxo induzidos pela combustão da vegetação. Morvan e Dupuy (2004) consideraram uma descrição mais completa dos processos físicos na fase sólida, como a evaporação da umidade da vegetação, a pirólise e a combustão incandescente. Morvan, Méradji e Accary (2009) complementaram o modelo físico desenvolvido anteriormente para incluir o cálculo da degradação térmica da vegetação por desidratação e pirólise e o escoamento turbulento e reativo, resultado da mistura do ar ambiente com os gases provenientes da pirólise. A vegetação é representada como um meio poroso, e na sua interface com o ar ambiente as forças de arrasto são modeladas.

A vegetação também é representada como um meio poroso nos trabalhos de Zhou e Pereira (2000), Séro-Guillaume e Margerit (2002), Margerit e Séro-Guillaume (2002) e Zhou, Mahalingam e Weise (2005). Os modelos apresentados por esses autores foram simplificados para que o esforço computacional não fosse muito grande. Assim, Zhou e Pereira (2000) desenvolveram um modelo físico bidimensional e resolveram a equação de transferência de calor por radiação usando o método de ordenadas discretas, enquanto que Séro-Guillaume e Margerit (2002) e Margerit e Séro-Guillaume (2002) apresentaram um modelo tridimensional mas não consideraram a transferência de calor por radiação. Zhou, Mahalingam e Weise (2005) desenvolveram um modelo físico bidimensional com um mecanismo

de combustão simplificado, que considera os efeitos de secagem da vegetação, pirólise e combustão do carvão.

Na mesma linha de reduzir o esforço computacional dos modelos teóricos, Balbi et al. (2007) e Balbi et al. (2009) propuseram um modelo que, apesar de obedecer às leis da física aplicada aos incêndios florestais, foi simplificado usando dez hipóteses principais a fim de reduzir todas as equações em uma só, a qual fornece a taxa de propagação do incêndio como função da velocidade do vento, da inclinação do terreno e da vegetação. Já o trabalho de NMIRA et al. (2010) considera as fases sólida e gasosa, mas resolve apenas as equações de transporte para a fase gasosa.

Como observação final sobre as características dos modelos acima, ressalta-se que as vegetações estudadas são diferentes daquela estudada neste trabalho.

2.5 As atividades experimentais

Independentemente do tipo de modelo que se desenvolve e da sua complexidade em relação aos fenômenos físicos representados, é sempre necessário verificar se os resultados são comparáveis a experimentos realizados nas mesmas condições. Muitos autores voltaram seus esforços a atividades experimentais, para determinar características dos incêndios e da vegetação que pudessem validar os modelos criados. Os experimentos realizados em laboratório são mais numerosos que os de campo, devido às facilidades de execução e capacidade de reprodução dos experimentos sob as mesmas condições.

No Brasil, alguns experimentos de campo foram realizados na floresta amazônica. Dois deles foram realizados por Carvalho Jr et al. (1995) e Araújo et al. (1999) para determinar o balanço de massa de carbono, temperaturas no ar e taxas de transferência de calor para dentro do solo. Outro experimento foi realizado por Carvalho, Veras e Carvalho Jr. (2002) que investigaram o processo de combustão incandescente em toras de madeira. Um experimento realizado por Carvalho Jr et al. (2003) é de grande importância do ponto de vista de referência para esta tese. Os autores realizaram experimentos na Amazônia para determinar a propagação de incêndios em área de teste previamente desmatada e preparada. A vegetação

presente era heterogênea e com umidade variável de acordo com o tipo de material. As taxas médias de propagação da frente de fogo variaram de 0,16 a 0,26 m min^{-1}. A altura de chama ficou entre 15 e 30 cm, enquanto que a largura da frente de fogo variou entre 10 e 15 cm. Em todos os experimentos exceto um, as chamas estavam inclinadas em direção à área queimada, devido aos efeitos de convecção do ar e ausência de ventos dentro da floresta. Com o objetivo de investigar os efeitos da umidade da vegetação na propagação da frente de fogo, medidas foram tomadas em vários locais da área a ser queimada algumas horas antes do experimento. A umidade da vegetação variou de 7% a 34%. Como era de se esperar, as áreas com vegetação mais úmida tiveram uma menor velocidade de propagação da frente de fogo, enquanto que as áreas com menor umidade na vegetação apresentaram uma maior velocidade de propagação do incêndio.

Experimentos de campo são poucos. Os feitos por Morandini et al. (2006), Santon et al. (2006), e Silvani e Morandini (2009) foram conduzidos na França, enquanto que o experimento de Clements et al. (2007) foi feito nos Estados Unidos. Os combustíveis variaram de arbustos altos e densos do Mediterrâneo a gramíneas selvagens do sul do Texas. Esses experimentos visaram validar em condições reais de campo os modelos físicos de propagação de incêndios. As medições e observações dos experimentos de Morandini et al. (2006) mostram que o comportamento do fogo e a estrutura da chama são muito diferentes das encontradas em laboratório. A turbulência em larga escala influencia a propagação do incêndio, a forma da chama, a temperatura e a emissão de radiação.

Experimentos de laboratório foram realizados por muitos autores, utilizando diferentes materiais vegetais em condições específicas. Alguns usaram o túnel de vento para estudar a propagação do fogo em diferentes condições, como Fleeter et al. (1984), Chetehouna, Séro-Guillaume e Degiovanni (2005) e Pérez et al. (2009), enquanto que Mell et al. (2009) consideram ser importante refazer os experimentos usados como referência em seu modelo teórico em condições de ar em movimento em um túnel de vento. Cada um dos autores usou um combustível diferente. Fleeter et al. (1984) utilizaram palitos de madeira, Chetehouna, Séro-Guillaume e Degiovanni (2005) realizaram seus experimentos com o arbusto *Quercus coccifera*, a vegetação dominante no sul da França e Pérez et al. (2009) usaram folhas de trigo. Os trabalhos de Frandsen e Rothermel (1972), Fleeter et al. (1984), Saastamoinen et al. (2000), Bilbao et al. (2001), Dupuy, Marechal e Morvan (2003) e

Park, Atreya e Baum (2010) utilizaram em seus experimentos aparas, palha, pequenos pedaços ou esferas de madeira. Mell, Manzello e Maranghides (2006) consideraram em seus experimentos realizados no NIST (National Institute of Standards and Technology) arbustos inteiros do tipo conífera. Os experimentos de laboratório de Morandini, Santoni e Balbi (2001a), Morandini, Santoni e Balbi (2001b), Dupuy, Marechal e Morvan (2003), Zhou, Weise e Mahalingam (2005), Chetehouna, Séro-Guillaume e Degiovanni (2005), Zhou, Mahalingam e Weise (2007), Saâdaoui et al. (2008), Tihay et al. (2009a), Boboulos e Purvis (2009), Monod et al. (2009), Àgueda et al. (2010) e Mindykowski et al. (2011) utilizaram folhas ou ramos de arbustos.

Os experimentos de laboratório apresentam algumas dificuldades para reproduzir as condições encontradas em campo. O relato de Pérez et al. (2009) é um bom exemplo dessa dificuldade. Os experimentos foram realizados em um laboratório em Portugal, com dois arranjos de testes. Apesar da vegetação do experimento ser de um único tipo, os autores relatam dificuldades em recebê-la em fardos homogêneos, sendo a principal diferença observada na razão área superficial por volume.

Para a comparação com as simulações numéricas deste trabalho, foram realizados dois experimentos em locais e momentos diferentes. O primeiro foi realizado no município de Cruzeiro do Sul no Acre e o segundo no município de Alta Floresta no Mato Grosso, conforme descrito no capítulo 5.

3 MODELO FÍSICO

A principal tarefa na construção de um modelo de um fenômeno físico-químico é a identificação dos processos envolvidos. Esta é seguida pela formulação de equações matemáticas que descrevem esses processos, de modo que possam ser resolvidas a fim de fornecer uma previsão do comportamento dos processos. O desenvolvimento de uma abordagem tridimensional e totalmente transitória para modelar a propagação do fogo em um leito vegetal é um passo importante.

Neste cenário de incêndio, existem duas regiões: vegetação e ar. A razão para haver duas regiões é que cada uma tem suas próprias propriedades e, embora elas precisem ser integradas no mecanismo de solução, há diferentes fenômenos que ocorrem em cada uma. Na região de vegetação, a abordagem é representá-la como partículas cercadas de ar. Neste trabalho, o caráter heterogêneo da vegetação foi levado em conta usando propriedades físicas médias características da floresta amazônica. Os fenômenos físico-químicos nesta região são a evaporação da umidade da vegetação, pirólise, a transferência de calor por radiação e convecção. Na região do ar, a combustão com chama ocorre em um ambiente turbulento, onde as transferências de calor por radiação e por convecção desempenham um papel significativo.

Para incluir nesse modelo os efeitos do transporte turbulento é utilizado o método LES, que calcula explicitamente as grandes estruturas turbulentas diretamente, mas trata a dissipação e a cascata inercial em escalas menores usando aproximações na escala submalha.

As duas regiões trocam massa e energia. O comportamento da mistura gasosa resultante da degradação térmica da vegetação e das reações de combustão é regido pelas equações de Navier-Stokes. O método utilizado para discretização das equações é o método de diferenças finitas em malha deslocada. O modelo numérico utilizado (WFDS) resolve as equações de Navier-Stokes para fluidos compressíveis usando a média de Favre. A dissipação de energia cinética é obtida através de um fechamento simples para a tensão turbulenta: o modelo de coeficiente constante de Deardorff. O transporte turbulento de energia e massa é contabilizado pelo uso, respectivamente, de números de Prandtl e de Schmidt turbulentos constantes.

As equações fundamentais da dinâmica dos fluidos são baseadas em três leis de conservação: massa, quantidade de movimento e energia. A equação que resulta da aplicação da lei de conservação de massa para um escoamento fluido é chamada de equação da continuidade. A lei de conservação da quantidade de movimento nada mais é do que a segunda lei de Newton. Quando essa lei é aplicada a um escoamento fluido, ela gera uma equação vetorial conhecida como equação da quantidade de movimento. A lei de conservação da energia é idêntica à primeira lei da termodinâmica, e a equação resultante é chamada de equação da energia. Em adição às equações desenvolvidas a partir dessas leis universais, é necessário estabelecer o relacionamento entre as propriedades do fluido a fim de fechar o sistema de equações. Um exemplo desse relacionamento é a equação de estado, que relaciona as variáveis termodinâmicas pressão (p), massa específica (ρ) e temperatura (T) (ANDERSON, 1984).

As seções a seguir descrevem as características da malha para a vegetação, a formulação LES utilizada, as equações para a fase gasosa, reação química, transporte de radiação térmica e, finalmente, as equações de conservação para a vegetação.

3.1 A malha para a vegetação

Denota-se por V_b o volume no qual uma propriedade aparente (do inglês “bulk property”) da vegetação termicamente fina é determinada. Este volume é também o volume da célula da malha computacional. A vegetação é idealizada como elementos combustíveis submalha, uniformemente distribuídos em V_b. O volume de um elemento combustível termicamente fino ”k”, do tipo “e” é $V_{e,k} \ll V_b$. Variados tipos de vegetação podem ser diferenciados por tamanho ou geometria (por exemplo, folhagem, galhos, etc.) ou alguma outra propriedade física relevante (por exemplo, teor de umidade). Durante todo o restante deste trabalho o subscrito “e” é suprimido, exceto quando necessário para um melhor entendimento. Admite-se ainda que $\sum_e \sum_k V_{e,k} \ll V_g$ onde V_g é o volume ocupado pelo gás em V_b. Assim, a vegetação termicamente fina é aproximada como fontes pontuais de massa, arrasto,

liberação de calor e absorção e emissão de radiação. Seu efeito sobre as equações de conservação da fase gasosa vem através de termos fonte determinados pela soma das contribuições de todos os elementos combustíveis em V_b. O formalismo para obter os termos fonte utilizados nas equações do modelo é similar em conceito à abordagem da função de densidade filtrada (FDF) introduzida por Pope (1990).

A fonte de massa discreta para a espécie gasosa i, em razão da degradação térmica do k-ésimo elemento combustível submalha, é:

$$\dot{m}_{k,i}(t) \equiv \int_{S_k(t)} \rho Y_i \mathbf{v}_i . \hat{\mathbf{n}} dS \tag{3.1}$$

Pode-se, então, definir a massa específica da fonte de massa discreta como:

$$\dot{m}'''_{k,i}(\mathbf{x}, t) \equiv \delta\big(\mathbf{x} - \mathbf{x}_k(t)\big)\dot{m}_{k,i}(t) \tag{3.2}$$

onde $\delta(\mathbf{x})$ é o delta de Dirac. O delta de Dirac é utilizado para modelar uma função pico alta e estreita (um impulso) e outras abstrações semelhantes, como um ponto de massa no caso da vegetação submalha. O delta de Dirac aplicado à massa específica da vegetação submalha diz que em um ponto $\mathbf{x}_k(t)$ no interior da célula da malha computacional seu valor não é zero e, nas demais regiões da célula, é zero.

Somando-se a equação (3.2) para todos os elementos combustíveis, tem-se a massa específica aparente da fonte de massa discreta:

$$\dot{m}'''_{b,i}(\mathbf{x}, t) \equiv \sum_k \dot{m}'''_{k,i}(\mathbf{x}, t) \tag{3.3}$$

Adicionalmente, somando-se a equação (3.3) para todas as espécies gasosas tem-se a produção de massa em razão da degradação térmica da vegetação:

$$\dot{m}'''_b(\mathbf{x}, t) \equiv \sum_i \dot{m}'''_{b,i}(\mathbf{x}, t) \tag{3.4}$$

Note-se que as equações (3.2)–(3.4) são funções descontínuas no espaço. Em princípio, um cálculo detalhado da evolução de cada elemento combustível pode ser realizado para obter $\dot{m}_{k,i}(t)$. Entretanto, algumas hipóteses simplificadoras são feitas para acelerar os cálculos. Primeiro, admite-se que a perda de massa para um dado elemento combustível é independente da posição dentro do elemento combustível, uma vez que ele é termicamente fino. Assim, os gases produzidos pela degradação térmica dentro de um elemento combustível instantaneamente saem na sua superfície. Em seguida, no interior de uma dada célula computacional, admite-se que os elementos combustíveis do mesmo tipo têm as mesmas propriedades termofísicas e evolução. Isto é consistente com a hipótese de que o divergente do fluxo de calor não varia dentro de uma célula da malha computacional.

3.2 Formulação LES

O LES é o método escolhido para tratar a turbulência neste trabalho, pois resolve as grandes escalas do escoamento e permite uma melhor representação da situação real do incêndio, quando comparado a métodos como RANS (do inglês *Reynolds-Averaged Navier–Stokes*). Quando comparado ao DNS (do inglês *direct numerical simulation*), sua vantagem é a de modelar as escalas menores (e computacionalmente mais caras) da solução, ao invés de resolvê-las diretamente. No LES, as escalas resolvida (isto é, grandes) e submalha (isto é, pequenas) são formalmente definidas através de uma operação de filtragem espacial. Para um escalar arbitrário ϕ pode-se distinguir entre dois tipos de filtragem usados para derivar as equações de conservação: a filtragem convencional para obter $\overline{\phi}$ e a filtragem explícita para obter $\langle\phi\rangle_{V_b}$. Quantidades LES convencionais são filtradas implicitamente na simulação. O filtro espacial implícito convencional é expresso como:

$$\overline{\phi}(\mathbf{x},t) \equiv \int G(\mathbf{x},\mathbf{x}';\Delta)\phi(\mathbf{x}',t)d\mathbf{x}' \tag{3.5}$$

onde $G(\mathbf{x}, \mathbf{x}'; \Delta)$ é a função de filtro de largura Δ. O tamanho do filtro é dado por:

$$\Delta = \sqrt[3]{V_b} \tag{3.6}$$

onde V_b é o volume da célula da malha computacional.

O filtro explícito usa um filtro caixa anisotrópico (POPE, 2000) introduzido por Deardorff (1970) para determinar os termos fonte aparentes, devido à presença de elementos combustíveis submalha. Do escalar arbitrário ϕ é calculada a média sobre uma célula de uma malha retangular, a qual tem a forma:

$$\langle \phi(\mathbf{x}, t) \rangle_{V_b} \equiv \frac{1}{V_b} \int_{x-\frac{\Delta x}{2}}^{x+\frac{\Delta x}{2}} \int_{y-\frac{\Delta y}{2}}^{y+\frac{\Delta y}{2}} \int_{z-\frac{\Delta z}{2}}^{z+\frac{\Delta z}{2}} \phi(\mathbf{x}', t) dx' dy' dz' \tag{3.7}$$

As duas operações de filtragem são equivalentes (Mell et al., 2009) quando o núcleo do filtro implícito é baseado na função degrau de Heaviside:

$$G(\mathbf{x}; \Delta) = \frac{1}{V_b} \prod_{l=1}^{3} H\left(\frac{\Delta_{(l)}}{2} - \left|\mathbf{x}_{(l)}\right|\right) \tag{3.8}$$

onde

$$H\left(\frac{\Delta_{(l)}}{2} - \left|x_{(l)}\right|\right) = \begin{cases} 0, & \left(\frac{\Delta_{(l)}}{2} - \left|x_{(l)}\right|\right) < 0 \\ 1, & \left(\frac{\Delta_{(l)}}{2} - \left|x_{(l)}\right|\right) \geq 0 \end{cases} \tag{3.9}$$

Para as equações do escoamento a baixo número de Mach, o filtro espacial implícito convencional resulta em um termo subfiltro adicional $(\overline{\rho\phi})$. No entanto, é desejável evitar o modelamento das escalas subfiltro nas equações de conservação. Por esta razão, é utilizada uma operação de filtragem ponderada pela massa específica, chamada filtragem de Favre, a qual é também implícita e é definida para uma quantidade arbitrária ϕ como:

$$\widetilde{\phi}(\mathbf{x},t) \equiv \frac{\overline{\rho(\mathbf{x},t)\,\phi(\mathbf{x},t)}}{\overline{\rho(\mathbf{x},t)}} \tag{3.10}$$

a qual para escoamentos com massa específica constante se torna a operação de filtragem normal.

3.3 Equações de conservação para a fase gasosa

As equações de transporte filtradas para massa, espécies, quantidade de movimento e energia e a equação de estado são mostradas a seguir:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla.(\bar{\rho}\widetilde{\mathbf{u}}) = \langle \dot{m}_b''' \rangle_{V_b} \tag{3.11}$$

O primeiro termo do lado esquerdo da equação (3.11) é a variação da massa específica da fase gasosa no tempo e o segundo termo descreve o fluxo líquido de massa para fora do volume através de suas fronteiras e é chamado de termo advectivo. O termo do lado direito da equação é a taxa aparente de produção de massa devido à degradação térmica da vegetação.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\bar{\rho}\widetilde{Y}_i\right) + \nabla.\left(\bar{\rho}\widetilde{Y}_i\widetilde{\mathbf{u}}\right) = -\nabla.\left(\bar{\mathbf{J}}_i + \mathbf{J}_i^{sgs}\right) + \overline{\dot{m}_i'''} + \langle \dot{m}_{b,i}''' \rangle_{V_b} \tag{3.12}$$

O primeiro termo do lado esquerdo da equação (3.12) é a variação da massa específica da espécie gasosa i no tempo e o segundo termo descreve o fluxo líquido da massa específica da espécie gasosa i para fora do volume através de suas fronteiras (termo advectivo). O primeiro termo do lado direito da equação é o fluxo difusivo líquido da espécie gasosa i filtrado ($\bar{\mathbf{J}}_i$) e submalha ($\mathbf{J}_i^{sgs}$), o segundo termo é a taxa de produção ou consumo de massa da espécie gasosa i pela reação química e o terceiro termo é a taxa de produção de massa da espécie gasosa i pela degradação térmica da vegetação.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{\mathbf{u}}) + \nabla.(\bar{\rho}\tilde{\mathbf{u}}\tilde{\mathbf{u}}) = -\nabla\bar{p} - \nabla.(\bar{\boldsymbol{\tau}} + \boldsymbol{\tau}^{sgs}) + \bar{\rho}\mathbf{g} + \langle \mathbf{f}_D''' \rangle_{V_b} \tag{3.13}$$

O primeiro termo do lado esquerdo da equação (3.13) é a variação temporal da quantidade de movimento no volume de controle e o segundo termo descreve o fluxo líquido devido ao transporte advectivo da quantidade de movimento. O primeiro termo do lado direito da equação é o gradiente de pressão, o segundo termo é o fluxo líquido de quantidade de movimento devido à viscosidade molecular e à dilatação do volume fluido, o terceiro termo corresponde à força da gravidade na massa de fluido no volume de controle e o quarto termo é a força de arrasto por unidade de volume devido à vegetação.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\bar{\rho}\tilde{h}\right) + \nabla.\left(\bar{\rho}\tilde{h}\tilde{\mathbf{u}}\right) = \frac{\widetilde{D}p_0}{\widetilde{D}t} - \nabla.(\bar{\mathbf{q}} + \mathbf{q}^{sgs}) - \nabla.\bar{\mathbf{q}}_r + \langle \dot{q}_{c,b}''' \rangle_{V_b} + \langle \dot{h}_b''' \rangle_{V_b} \tag{3.14}$$

O primeiro termo do lado esquerdo da equação (3.14) é a taxa de acúmulo de entalpia e o segundo termo descreve fluxo líquido de entalpia por advecção. O primeiro termo do lado direito da equação é a variação de energia devido à pressão termodinâmica, o segundo termo é o fluxo líquido de energia por condução e difusão (molecular e submalha), o terceiro termo corresponde ao fluxo líquido de radiação térmica, o quarto termo representa a transferência de calor convectiva entre as fases condensada e gasosa e o quinto termo é a taxa de variação da entalpia por unidade de volume devido à produção de massa da espécie gasosa i pela degradação térmica da vegetação.

A equação de estado para o gás ideal é

$$\bar{\rho} = \frac{p_0 \bar{W}}{R\widetilde{T}} \tag{3.15}$$

sendo ρ a massa específica, p_0 a pressão termodinâmica, W o peso molecular médio da mistura gasosa, R a constante universal dos gases e T a temperatura.

Na equação de conservação de energia, o termo $\widetilde{D}/\widetilde{D}t$ é a derivada material, utilizando a velocidade filtrada de Favre para o termo advectivo.

As quantidades $\bar{\mathbf{J}}_i$ e $\mathbf{J}_i^{sgs}$ na equação de conservação das espécies (3.12) representam os fluxos difusivos das espécies molecular e submalha respectivamente, que são modeladas como:

$$\bar{\mathbf{J}}_i + \mathbf{J}_i^{sgs} = -\bar{\rho}\left(\widetilde{D}_i + \frac{\nu_t}{Sc_t}\right)\nabla\widetilde{Y}_i \tag{3.16}$$

As quantidades $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ e $\boldsymbol{\tau}^{sgs}$ na equação de quantidade de movimento (3.13) representam a tensão viscosa molecular e submalha respectivamente, as quais são modeladas como:

$$\bar{\boldsymbol{\tau}} = -2\tilde{\mu}\left(\tilde{\mathbf{S}} - \frac{1}{3}(\nabla.\,\tilde{\mathbf{u}})\mathbf{I}\right) \tag{3.17}$$

$$\boldsymbol{\tau}^{sgs,d} \equiv \boldsymbol{\tau}^{sgs} - \frac{1}{3}\text{traço}(\boldsymbol{\tau}^{sgs})\mathbf{I} \tag{3.18}$$

e portanto,

$$\boldsymbol{\tau}^{sgs,d} = -2\bar{\rho}\nu_t\left(\tilde{\mathbf{S}} - \frac{1}{3}(\nabla.\,\tilde{\mathbf{u}})\mathbf{I}\right) \tag{3.19}$$

Os coeficientes de transporte da filtragem de Favre são obtidos a partir de coeficientes moleculares avaliados usando temperatura e concentrações de espécies filtradas, como por exemplo $\tilde{\mu} = \mu(\widetilde{\mathbf{Y}}, \widetilde{T})$.

A viscosidade turbulenta é obtida a partir do modelo de Deardorff de coeficiente constante (DEARDORFF, 1980):

$$\nu_t = C_v\,\Delta\,K_t^{1/2} \tag{3.20}$$

onde

$$C_v = 0{,}1, \qquad \Delta = \sqrt[3]{V_b}\,, \qquad K_t = \frac{1}{2}(\mathbf{u}_t^2)$$

Os números de Schmidt e Prandtl turbulentos são $Sc_t = 0{,}5$ e $Pr_t = 0{,}5$ respectivamente, baseados em experimentos de McGrattan et al. (2008).

A força de arrasto por unidade de volume $\langle \mathbf{f}_D''' \rangle_{V_b}$ representa a quantidade de movimento retirada da fase gasosa pela vegetação. A filtragem explícita das fontes de arrasto discretas fornece:

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{f}_D''' \rangle_{V_b} &= \frac{1}{V_b} \sum_{k \in V_b} \frac{1}{2} C_{D,k} A_k \bar{\rho} |\mathbf{u}_k - \tilde{\mathbf{u}}| (\mathbf{u}_k - \tilde{\mathbf{u}}) \\ &= \beta_e \sigma_e \frac{1}{8} C_{D,e} \bar{\rho} |\mathbf{u}_e - \tilde{\mathbf{u}}| (\mathbf{u}_e - \tilde{\mathbf{u}}) \end{aligned} \tag{3.21}$$

onde o subscrito “k” se refere a uma partícula de combustível e o subscrito “e” indica um tipo de combustível.

O fator 1/8 é para um elemento combustível esférico, e também foi usado por Porterie et al. (1998) e Porterie et al. (2000). O fator 3/8 para um elemento combustível cilíndrico foi usado em simulações numéricas de propagação de fogo através de um leito de combustível florestal (MORVAN; DUPUY, 2001), arbustos do Mediterrâneo (MORVAN; DUPUY, 2004) e pastagens australianas (MELL et al., 2007). O valor do coeficiente de arrasto $C_{D,e}$ depende do número de Reynolds local Re_e:

$$C_{D,e} = \begin{cases} 24/Re_e\,, & Re_e \leq 1 \\ 24\left(0{,}85 + 0{,}15 Re_e^{0{,}687}\right)/Re_e\,, & 1 < Re_e < 1000 \\ 0{,}44, & 1000 \leq Re_e \end{cases} \tag{3.22}$$

$$\mathrm{Re}_e = \frac{2\rho|\mathbf{u}_e - \tilde{\mathbf{u}}|r_e}{\tilde{\mu}} \tag{3.23}$$

onde r_e é o raio equivalente para uma esfera ($r_e = 3/\sigma_e$) e σ_e é a razão área superficial por volume de um elemento combustível do tipo “e”. Expressões similares para $C_{D,e}$ foram usadas anteriormente (MELL et al., 2007; PORTERIE et al., 1998; PORTERIE et al., 2000).

Os fluxos de calor molecular e submalha são:

$$\bar{\mathbf{q}} + \mathbf{q}^{sgs} = -\left(\tilde{k} + \bar{\rho}\tilde{c}_p \frac{\nu_t}{Pr_t}\right)\nabla\tilde{T} - \sum_i \bar{\rho}\left(\tilde{D}_i + \frac{\nu_t}{Pr_t}\right)\tilde{h}_i \nabla\tilde{Y}_i \tag{3.24}$$

A transferência de calor convectiva entre as fases condensada e gasosa é dada por:

$$\langle \dot{q}'''_{c,b} \rangle_{V_b} = \beta_e \sigma_e h_{c,e}\left(T_e - \tilde{T}\right) \tag{3.25}$$

A razão área superficial por volume de elementos combustíveis do tipo e que é mostrada na equação (3.25) não é zero apenas quando há uma fase condensada na célula computacional. A correlação empírica para o coeficiente de troca de calor por convecção é (PORTERIE et al., 1998):

$$h_{c,e} = 0{,}5\, k\left(\tilde{T}\right)\frac{0{,}683\mathrm{Re}_e^{0{,}466}}{2/\sigma_e} \tag{3.26}$$

Como um componente importante do método utilizado para resolver as equações (3.11)-(3.15), é derivada uma restrição no divergente da velocidade tomando a derivada material da equação de estado (MCDERMOTT; MCGRATTAN; MELL, 2007):

$$\nabla.\tilde{\mathbf{u}} = \left(\frac{1}{\bar{\rho}\tilde{c}_p\tilde{T}} - \frac{1}{p_0}\right)\frac{\tilde{D}p_0}{\tilde{D}t} + \frac{\bar{W}}{\bar{\rho}}\left(\sum_i \frac{1}{W_i}\left[\overline{\dot{m}_i'''} + \langle \dot{m}_{b,i}''' \rangle_{V_b} - \nabla.\left(\bar{\mathbf{J}}_i + \mathbf{J}_i^{sgs}\right)\right]\right) + \frac{1}{\bar{\rho}\tilde{c}_p\tilde{T}}\left(-\nabla.\left(\bar{\mathbf{q}} + \mathbf{q}^{sgs}\right) - \nabla.\overline{\mathbf{q}_r} + \sum_i \tilde{h}_i\,\nabla.\left(\bar{\mathbf{J}}_i + \mathbf{J}_i^{sgs}\right) + \dot{Q}_c''' + \langle \dot{q}_{c,b}''' \rangle_{V_b} + \langle \dot{h}_b''' \rangle_{V_b} - \sum_i \tilde{h}_i \langle \dot{m}_{b,i}''' \rangle_{V_b}\right) \tag{3.27}$$

Essa restrição é utilizada na equação de Poisson (obtida a partir do divergente da equação da quantidade de movimento) para a pressão hidrodinâmica. Na equação (3.27), o peso molecular da mistura é dado por:

$$\bar{W} = \left(\sum_i \tilde{Y}_i / W_i\right)^{-1} \tag{3.28}$$

O calor específico à pressão constante da mistura é:

$$\tilde{c}_p = \sum_i \tilde{Y}_i c_{p,i} \tag{3.29}$$

A energia da mistura gasosa em um sistema reativo, expressa na forma da entalpia absoluta é dada por:

$$\tilde{h} = \sum_i \tilde{Y}_i \tilde{h}_i \tag{3.30}$$

onde $\tilde{h}_i$ é a entalpia absoluta por unidade de massa da espécie i calculada por:

$$\tilde{h}_i = \Delta h_i^0 + \int_{T_0}^{\tilde{T}} c_{p,i}\,dT \tag{3.31}$$

3.4 Reação química

A entalpia molar de combustão de uma dada reação química a pressão constante é dada por (MELL, 2009):

$$\Delta H_c \equiv -\sum_i \nu_i H_i(T) = -\sum_i \nu_i h_i(T) W_i \tag{3.32}$$

onde ν_i é o coeficiente estequiométrico da espécie gasosa i ($\nu < 0$ para espécies reagentes e $\nu > 0$ para espécies produto). A relação estequiométrica simplificada

$$C_{3,4}H_{6,2}O_{2,5} + 3{,}7(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow 3{,}4CO_2 + 3{,}1H_2O + 13{,}91N_2 \tag{3.33}$$

é usada para modelar a reação química do ar com os gases combustíveis gerados pela pirólise da vegetação (RITCHIE et al., 1997). Neste estudo, que é focado em propagação do fogo, não se consideram as reações secundárias. A taxa de consumo de massa para qualquer uma das espécies pode ser escrita como:

$$\dot{m}_i''' = r_i \dot{m}_F''' \tag{3.34}$$

$$r_i = \frac{\nu_i W_i}{\nu_F W_F} \tag{3.35}$$

$$\nu_F = -1; \quad \nu_{O_2} = -3{,}7; \quad \nu_{CO_2} = 3{,}4; \quad \nu_{H_2O} = 3{,}1 \tag{3.36}$$

Com as equações (3.34) - (3.36) a taxa de liberação de calor por unidade de volume no processo de combustão pode ser representada em termos da entalpia de combustão como:

$$\dot{Q}_c''' \equiv -\sum_i \tilde{h}_i \overline{\dot{m}_i'''} = -\frac{\overline{\dot{m}_F'''}}{\nu_F W_F} \sum_i \nu_i \tilde{h}_i W_i = \frac{\overline{\dot{m}_F'''}}{\nu_F W_F} \Delta\tilde{H}_c = -\overline{\dot{m}_F'''} \Delta\tilde{h}_c \qquad (3.37)$$

onde $\Delta\tilde{h}_c = \Delta\tilde{H}_c / W_F$ é a entalpia de combustão mássica avaliada em $\tilde{T}$. O termo fonte de consumo de massa filtrado devido à reação química $\overline{\dot{m}_F'''}$ é obtido do modelo EDC de Magnussen e Hjertager (1976):

$$\overline{\dot{m}_F'''} = -\frac{\min\left(\bar{\rho}\tilde{Y}_F, \bar{\rho}\tilde{Y}_{O_2} r_{O_2}\right)}{\tau} \qquad (3.38)$$

$$\tau = C_{EDC} \frac{\Delta^2 Sc_t}{\nu_t} \qquad (3.39)$$

$$C_{EDC} = 0{,}1 \qquad (3.40)$$

O modelo “Eddy Dissipation” aplica-se melhor aos escoamentos turbulentos quando a velocidade da reação química é rápida em relação aos processos de transporte no escoamento. Não existe controle da cinética do processo de reação. Assim, processos onde a cinética química pode limitar a taxa de reação podem ser mal previstos pelo modelo. Spalding concluiu de seu trabalho experimental (ARTEMOV, 2008) que a cinética química tem um efeito menor na combustão turbulenta quando comparada à aerodinâmica do campo de escoamento. Com base neste conceito, o modelo “Eddy Dissipation” foi desenvolvido com pequenas alterações em constantes e na representação das concentrações das espécies.

3.5 O transporte de radiação térmica

A equação de transporte radiativo (RTE na sigla em inglês) para um meio que absorve, emite e espalha a radiação é:

$$\mathbf{s}.\nabla \mathbf{I}_\lambda(\mathbf{x},\mathbf{s}) = -\kappa(\mathbf{x},\lambda)\mathbf{I}_\lambda(\mathbf{x},\mathbf{s}) - \sigma_s(\mathbf{x},\lambda)\mathbf{I}_\lambda(\mathbf{x},\mathbf{s}) + \mathrm{B}(\mathbf{x},\lambda) + \frac{\sigma_s(\mathbf{x},\lambda)}{4\pi}\int_{4\pi}\Phi(\mathbf{s}',\mathbf{s})\,\mathbf{I}_\lambda(\mathbf{x},\mathbf{s}')\mathrm{d}\mathbf{s}' \tag{3.41}$$

O primeiro termo do lado direito da equação (3.41) é a atenuação da intensidade de radiação pela absorção, o segundo é a atenuação da intensidade de radiação por espalhamento, o terceiro é o termo fonte de emissão (descrevendo o quanto de energia é emitida pela fase gasosa e vegetação local) e o quarto representa o termo de espalhamento para dentro. Ainda com relação à equação (3.41), $\mathbf{I}_\lambda(\mathbf{x},\mathbf{s})$ é a intensidade de radiação no comprimento de onda λ, $\mathbf{s}$ é o vetor direção da intensidade de radiação, $\kappa(\mathbf{x},\lambda)$ é o coeficiente de absorção local e $\sigma_s(\mathbf{x},\lambda)$ é o coeficiente de espalhamento local. A integral no lado direito da equação descreve o espalhamento vindo de outras direções.

Nas simulações práticas, a dependência espectral (λ) da RTE não pode ser resolvida com precisão. Em vez disso, o espectro de radiação é dividido num número relativamente pequeno de bandas e uma RTE é derivada para cada banda. Outra simplificação se refere ao espalhamento, que geralmente é desprezado nas simulações práticas. A RTE específica para uma banda para um gás que não possui a propriedade de espalhamento é:

$$\mathbf{s}.\nabla \mathbf{I}_\mathrm{n}(\mathbf{x},\mathbf{s}) = \kappa_\mathrm{n}(\mathbf{x})\left[\mathbf{I}_{\mathrm{b,n}}(\mathbf{x}) - \mathbf{I}_\mathrm{n}(\mathbf{x},\mathbf{s})\right] \qquad \mathrm{n} = 1,\ldots,\mathrm{N} \tag{3.42}$$

onde $\mathbf{I}_\mathrm{n}$ é a intensidade integrada sobre a banda n e κ_n é o coeficiente de absorção médio para a banda.

Os limites das bandas são selecionados para se obter uma representação precisa das bandas de radiação mais importantes de CO2 e vapor d'água. O combustível é o metano (CH_4). Os limites das bandas são mostrados na Tabela 3.1, onde a letra F é usada para designar a fuligem. São mostrados nesta tabela dois modelos, o de nove bandas e o de seis bandas. Entre os dois modelos é mostrado o comprimento de onda limite para cada banda. Assim, para a banda 1 de cada modelo tem-se como limite inferior o comprimento de onda de 1,00 $\mu\mathrm{m}$ e no limite superior o valor de 2,63 $\mu\mathrm{m}$. Como pode ser observado na tabela a fuligem está

presente em todas as bandas espectrais dos dois modelos, já que ela emite e absorve radiação em todo o espectro. Os demais compostos químicos estão presentes apenas em algumas bandas de cada um dos modelos apresentados.

Tabela 3.1 – Limites das bandas espectrais.

9 bandas	1	2	3	4	5	6	7	8	9
espécies	F	CO_2 H_2O F	CH_4 F	F	CO_2 F	H_2O F	H_2O CH_4 F	F	F

λ (μm)	1,0	2,63	2,94	3,57	4,17	4,70	7,00	8,62	10,0	200

6 bandas	1	2	3	4	5	6
espécies	F	CO_2 H_2O F	CH_4 F	CO_2 F	H_2O CH_4 F	F

Para cada banda espectral n, o termo fonte de emissão é função do índice de refração n_n, do coeficiente de absorção κ_n e da intensidade de radiação de corpo negro, $\mathbf{I}_{b,n}$:

$$B(\mathbf{x},\lambda) = n_n\, \kappa_n(\mathbf{x})\, \mathbf{I}_{b,n}(\mathbf{x}) \tag{3.43}$$

O termo fonte pode ser escrito como uma fração da radiação de corpo negro à temperatura T(**x**):

$$\mathbf{I}_{b,n}(\mathbf{x}) = F_n(\lambda_{min}, \lambda_{max})\, \frac{\sigma_B T(\mathbf{x})^4}{\pi} \tag{3.44}$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann e F_n é a fração da intensidade de radiação de corpo negro entre os comprimentos de onda λ_{min} e λ_{max}. Quando as intensidades correspondentes às bandas são conhecidas, a intensidade total é calculada somando-se todas as bandas:

$$\mathbf{I}(\mathbf{x},\mathbf{s}) = \sum_{n=1}^{N} \mathbf{I}_n(\mathbf{x},\mathbf{s}) \tag{3.45}$$

Mesmo com um número razoavelmente pequeno de bandas, resolver múltiplas RTEs é computacionalmente caro. Na maioria dos cenários de incêndio a fuligem é o mais importante produto da combustão a controlar a radiação térmica a partir da chama e da pluma quente (MCGRATTAN et al., 2012). Como o espectro de radiação da fuligem é contínuo, é possível presumir que o gás se comporta como um meio cinza. A dependência espectral é então agrupada em um coeficiente de absorção (N = 1) e o termo fonte é dado pela intensidade de radiação de corpo negro:

$$\mathbf{I}_b(\mathbf{x}) = \frac{\sigma_B T(\mathbf{x})^4}{\pi} \tag{3.46}$$

Este é o modo padrão do WFDS e é apropriado para a maioria dos problemas de engenharia de incêndios.

O combustível vegetal é constituído por elementos de combustível submalha fixos, uniformemente distribuídos (no volume V_b). Considera-se ainda que o combustível vegetal não tenha a propriedade de espalhamento (MELL et al., 2009).

Seguindo Consalvi, Porterie e Loraud (2002), por simplicidade o elemento combustível é considerado esférico. O coeficiente de absorção é:

$$\kappa_{b,e} = \frac{1}{4}\frac{\rho_{bv,e}}{\rho_e}\sigma_e = \frac{1}{4}\beta_e\sigma_e \tag{3.47}$$

Esta expressão para o coeficiente de absorção foi usada em outros modelos de propagação do fogo (MORVAN; DUPUY, 2001; MORVAN;DUPUY, 2004; MELL et al., 2007; MELL et al., 2009) e foi validada experimentalmente para combustíveis vegetais (BUTLER, 1993) . A forma final da RTE sem os termos de espalhamento, com a contribuição da fase gasosa e da vegetação é então dada por:

$$\hat{\mathbf{s}}.\nabla\bar{\mathbf{I}}(\mathbf{x},\hat{\mathbf{s}}) = \kappa\left[\mathbf{I}_b\left(\tilde{T}\right) - \bar{I}(\mathbf{x},\hat{\mathbf{s}})\right] + \kappa_{b,e}[\mathbf{I}_b(T_e) - \bar{\mathbf{I}}(\mathbf{x},\hat{\mathbf{s}})] \tag{3.48}$$

Uma tabela contendo os valores de κ como uma função das frações mássicas das espécies e da temperatura para uma dada mistura de espécies gasosas participantes (H_2O, CO_2) e partículas de fuligem é calculada antes do início da simulação. Não é utilizado um modelo para a fuligem. Em vez disso, a massa de fuligem gerada localmente é considerada ser uma fração (χ_s) da massa de gás combustível consumido pelo processo de combustão. Nas simulações aqui relatadas usando o WFDS, é usado $\chi_s = 0{,}01$. Valores de χ_s para o Pinheiro do Oregon (espécie de conífera dos Estados Unidos) variam de menos de 0,01 a 0,025 em combustão com chama (MELL et al., 2009).

Integrando a RTE (3.48) sobre todos os ângulos sólidos fornece a equação de conservação de energia radiante:

$$\begin{aligned} \nabla . \overline{\mathbf{q}}_r(\mathbf{x}) &= \kappa\left[4\pi \mathbf{I}_b\left(\widetilde{T}\right) - \overline{U}(\mathbf{x})\right] + \kappa_{b,e}[4\pi \mathbf{I}_b(T_e) - \overline{U}(\mathbf{x})] \\ &= \kappa\left[4\pi \mathbf{I}_b\left(\widetilde{T}\right) - \overline{U}(\mathbf{x})\right] + \langle \nabla . \mathbf{q}_{r,b} \rangle_{V_b} \end{aligned} \tag{3.49}$$

onde $\overline{U}$ é a intensidade de radiação integrada:

$$\overline{U}(\mathbf{x}) = \int_{4\pi} \mathbf{I}(\mathbf{x}, \mathbf{s}') d\mathbf{s}' \tag{3.50}$$

e

$$\langle \nabla . \mathbf{q}_{r,b} \rangle_{V_b} = \kappa_{b,e}[4\pi \mathbf{I}_b(T_e) - \overline{U}(\mathbf{x})] \tag{3.51}$$

A equação (3.49) é necessária na equação de transporte de energia (3.14) e na equação do divergente (3.27).

Capturar os efeitos da heterogeneidade submalha da temperatura da chama requer tratamento especial do termo de emissão de radiação $\kappa \mathbf{I}_b$ uma vez que este termo depende da quarta potência da temperatura local. Em simulações de incêndio florestal típicas, usam-se células da malha numérica que correspondem a tamanhos

que variam de alguns centímetros a dezenas de centímetros e, consequentemente, as temperaturas calculadas constituem uma média no volume para uma dada célula da malha e são consideravelmente mais baixas do que a temperatura máxima da chama de difusão. Devido à sua dependência da quarta potência da temperatura, o termo fonte deve ser modelado nas células da malha numérica onde ocorre a combustão. Em outros lugares, a temperatura calculada é utilizada diretamente para calcular o termo fonte. Admite-se que a região em que ocorre a combustão é onde a taxa de liberação de calor local é maior que zero. Nesta região, utiliza-se uma fração da taxa de liberação de calor local. Por esta razão, modela-se o termo de emissão de radiação da fase gasosa como:

$$k\mathbf{I}_b(\tilde{T}) = \max\left(\chi_r \dot{Q}_c''', k\sigma_B \tilde{T}^4/\pi\right) \tag{3.52}$$

onde χ_r é a fração da taxa de liberação de calor da reação química por unidade de volume que é irradiada para o volume em torno da região de chama. Note-se que parte dessa radiação será absorvida pela fuligem e pelo combustível vegetal circundantes. Para “pool fires” o valor local é $\chi_r \cong 0{,}30 - 0{,}35$ enquanto que o valor global é menor, 0,10 (KOSEKI; MULHOOAND, 1991). Em pedaços de madeira $\chi_r \cong 0.20 - 0.40$ (QUINTIERE, 1997). O valor usado nas simulações deste trabalho é $\chi_r = 0.35$.

3.6 Equações de conservação para a vegetação

Nesta seção são fornecidos os detalhes para a obtenção dos termos fonte mássicos $\langle \dot{m}_{b,i}''' \rangle_{V_b}$ para o vapor d’água ($i = H_2O$) e vapor combustível ($i = F$) necessários nas equações de transporte.

O modelo para a degradação térmica do combustível vegetal termicamente fino usado aqui é similar ao empregado por outros autores (por exemplo, PORTERIE et al., 1998) e, anteriormente, em simulações com o WFDS para a propagação do fogo em pastagem (MELL et al., 2007) e “Douglas fir” (MELL et al., 2009). A equação que

descreve a temperatura de um elemento combustível termicamente fino “k” com os filtros espaciais explícitos aplicados é:

$$\rho_{e,b} c_{p,e} \frac{dT_e}{dt} = -\Delta h_{vap} \langle \dot{m}'''_{b,H_2O} \rangle_{V_b} - \Delta h_{pir} \langle \dot{m}'''_{b,F} \rangle_{V_b} - \langle \dot{q}'''_{c,b} \rangle_{V_b} - \langle \nabla . \mathbf{q}_{r,b} \rangle_{V_b} \quad (3.53)$$

O terceiro e quarto termos no lado direito da equação (3.53) são as contribuições do elemento de combustível à transferência de calor por convecção e radiação, que são dadas pelas equações (3.25) e (3.51).

No modelo de fase sólida, a massa específica e o calor específico aparentes têm contribuições do combustível vegetal virgem seco e da sua umidade:

$$\rho_{e,b} = \rho_{b,v} + \rho_{b,H_2O} \quad (3.54)$$

$$c_{p,e} = \frac{\rho_{b,v} c_{p,v} + \rho_{b,H_2O} c_{p,H_2O}}{\rho_b} \quad (3.55)$$

onde inicialmente $\rho_{e,b,H_2O} = M_e \rho_{b,v}$ e M_e é o teor de umidade do combustível vegetal do tipo “e” (representado como uma fração e não uma porcentagem).

A equação da temperatura (3.53) para o leito de combustível é resolvida admitindo um processo de decomposição endotérmica de dois estágios: evaporação da água seguida por volatilização do combustível vegetal. Isto resulta em uma perda de massa do combustível vegetal:

$$\frac{d\rho_{e,b}}{dt} = \langle \dot{m}'''_{e,b} \rangle_{V_b} = \langle \dot{m}'''_{e,b,H_2O} \rangle_{V_b} + \langle \dot{m}'''_{e,b,F} \rangle_{V_b} \quad (3.56)$$

O modelo de evaporação da umidade da vegetação usado é (MORVAN; DUPUY, 2004):

$$\langle \dot{m}'''_{e,b,H_2O} \rangle_{V_b} = \beta_e \dot{m}'''_{e,H_2O}$$

$$= \begin{cases} 0, & T_e < 100°C \\ \dfrac{\langle \dot{q}'''_{net} \rangle_{V_b}}{\Delta h_{vap}}, & T_e = 100°C,\ \rho_{H_2O} V_b > 0,\ \langle \dot{q}'''_{net} \rangle_{V_b} > 0 \end{cases} \quad (3.57)$$

O modelo de degradação térmica da vegetação é representado como (MORVAN; DUPUY, 2004):

$$\langle \dot{m}'''_{e,b,F} \rangle_{V_b} = \beta_e \dot{m}'''_{e,F}$$

$$= \begin{cases} 0, & T_e < 127°C \\ \dfrac{\langle \dot{q}'''_{net} \rangle_{V_b}}{\Delta h_{pir}} \left(\dfrac{T_e - 127}{100} \right), & 127°C \leq T_e \leq 227°C, \\ \dfrac{\langle \dot{q}'''_{net} \rangle_{V_b}}{\Delta h_{pir}}, & T_e \geq 227°C \\ \text{para todos os casos}, & \rho_{b,F} V_b > \chi_{e,char} \rho_{bv} V_b,\ \ \langle \dot{q}'''_{net} \rangle_{V_b} > 0 \end{cases} \quad (3.58)$$

onde $\chi_{e,char}$ é a fração de material carbonizado para elementos combustíveis do tipo "e". A entalpia de vaporização para a água é $\Delta h_{vap} = 2.259\ \mathrm{kJ\ kg^{-1}}$ e a entalpia de pirólise é $\Delta h_{pir} = 416\ \mathrm{kJ\ kg^{-1}}$ (MORVAN; DUPUY, 2004). A temperatura inicial $T_e(t_0)$ é ou a ambiente ou a definida pelo usuário.

O divergente do fluxo de calor líquido é definido como

$$\langle \dot{q}'''_{net} \rangle_{V_b} \equiv -\langle \dot{q}'''_{c,b} \rangle_{V_b} - \langle \nabla . \mathbf{q}_{r,b} \rangle_{V_b} \quad (3.59)$$

A temperatura do combustível vegetal evolui de acordo com a equação (3.53), que também foi utilizada, até o ponto de pirólise, por Albini (1985; 1986). Uma vez que T_e atinge a temperatura de ebulição da água é admitido que a secagem da

vegetação requer todo o calor disponível de forma que $T_e = 100℃$ até que toda a umidade tenha evaporado. Depois que toda a umidade tenha sido removida, a temperatura do elemento de combustível evolui de acordo com a equação (3.53) com $\langle \dot{m}'''_{b,H_2O} \rangle_{V_b} = 0$. Com fluxo de calor para o elemento de combustível, T_e continua a subir atingindo finalmente a temperatura $T_e = 127℃$, quando começa a pirólise. O modelo para a degradação térmica do combustível vegetal usa a expressão da taxa de perda de massa dependente da temperatura de Morvan e Dupuy (2004). Esse modelo de volatilização do combustível é baseado em análise termogravimétrica de uma série de espécies vegetais (DIMITRAKIPOULOS, 2001; MORO, 1997). Já que a oxidação do material carbonizado não é modelada, a combustão incandescente não é considerada.

4 MODELO NUMÉRICO

4.1 Visão geral do modelo numérico utilizado

A abordagem numérica utilizada para a simulação de incêndios em áreas abertas como campos e florestas é o WFDS (MELL et al., 2009). O WFDS é uma extensão das capacidades do FDS (Fire Dynamics Simulator), que é um modelo de comportamento do fogo desenvolvido pelo NIST em cooperação com o VTT Technical Research Center da Finlândia, da indústria e de universidades.

O modelo numérico é baseado em uma abordagem de grandes escalas turbulentas (LES) e fornece uma solução transiente para as equações de transporte de massa, quantidade de movimento e energia. O efeito da expansão térmica devido à reação química e à transferência de calor e massa entra no cálculo através de uma restrição elíptica, derivada utilizando a equação de energia no campo de velocidade. A temperatura média local é então obtida por meio da equação de estado para o gás ideal. A dissipação de energia cinética turbulenta é obtida através de um fechamento simples para a tensão turbulenta: o modelo de coeficiente constante de Deardorff. O transporte turbulento de energia e massa é contabilizado pelo uso, respectivamente, de números de Prandtl e de Schmidt turbulentos constantes. A heterogeneidade submalha da concentração de espécies e da temperatura é tratada em conjunto com os modelos de reação, transferência de calor e intensidade de radiação.

A equação da continuidade é resolvida juntamente com a forma de Stokes das equações da quantidade de movimento em uma malha cartesiana estruturada e deslocada. As discretizações espaciais são de segunda ordem. As equações das espécies são avançadas utilizando uma versão modificada do esquema preditor-corretor de MacCormack, enquanto as equações da quantidade de movimento são avançadas usando um esquema de projeção em duas fases com base no método de Euler modificado explícito. A taxa de liberação de calor devido à combustão é modelada com base no modelo EDC de Magnussen e Hjertager (1976).

O modelo de vegetação é composto de elementos de combustível fixos e termicamente finos. A suposição de vegetação termicamente fina é comumente usada em modelos de propagação de incêndios envolvendo combustíveis florestais finos, como grama e folhagens de arbustos e árvores (ROTHERMEL, 1972). A vegetação que é termicamente fina é suficientemente pequena em tamanho (por exemplo, galhos menores que 6 mm de diâmetro) de forma que ela não está resolvida nas malhas computacionais usadas neste trabalho (1,25 cm e 1,00 cm). Na abordagem aqui utilizada, os processos térmicos, mássicos e de arrasto entre as fases condensada e gasosa são determinados a partir das propriedades da vegetação aparente (vegetação mais ar), como por exemplo, a massa específica aparente.

Tanto a transferência de calor por convecção como por radiação entre a fase gasosa e a vegetação são consideradas, assim como o arrasto da vegetação sobre o escoamento de ar. Em geral, à medida que a temperatura do combustível vegetal aumenta, primeiro a umidade é removida, depois ocorre a pirólise (a formação de vapores de combustível), e em seguida a oxidação do material carbonizado (também conhecido como combustão incandescente, mas não foi considerada neste trabalho). Na abordagem utilizada neste trabalho, a equação da temperatura para o leito de combustível vegetal é resolvida admitindo um processo de decomposição endotérmica de dois estágios, sendo o primeiro para a evaporação da água e o segundo para a pirólise da vegetação. Como o foco deste trabalho é a previsão da propagação do fogo pela vegetação, a oxidação do material carbonizado não é modelada.

A solução das equações apresentadas neste trabalho, tanto para a fase gasosa quanto para a fase sólida necessita de aproximações baseadas em métodos numéricos. O sistema de equações diferenciais apresentado é transformado em um conjunto de equações algébricas que são resolvidas por processos iterativos.

O WFDS foi usado em ambiente Linux e sua tecnologia núcleo é um conjunto de módulos em linguagem Fortran, que pode ser usado já compilado ou os usuários podem criar seus próprios aplicativos ou alterar os já existentes e compilar os módulos. Além do executável principal, o WFDS também possui alguns utilitários para realizar tarefas simples de pós-processamento. A Tabela 4.1 mostra os módulos do WFDS e sua descrição.

Tabela 4.1 - Módulos do WFDS

Módulo	Descrição
cons	Vetores e constantes globais
ctrl	Definições e rotinas para funções de controle
data	Dados para quantidades de saída e propriedades termofísicas
devc	Definições de tipos derivados e constantes para dispositivos
divg	Calcula o divergente do escoamento
dump	Copia os dados de saída em arquivos
evac	Cálculos de evacuação
fire	Rotinas de combustão
func	Funções e subrotinas globais
geom	Rotinas de apoio a geometrias complexas e não estruturadas
ieva	Rotinas de suporte aos cálculos de evacuação
init	Inicializa variáveis e a subrotina de Poisson
irad	Funções necessárias para a subrotina de radiação
main	Programa principal
mass	Equação de conservação de massa e condições de contorno térmicas
mesh	Vetores e constantes associados com cada malha
mpip	Compilação MPI
mpis	Compilação não MPI
part	Transporte de partículas Lagrangeanas e ativação de sprinkler
pois	Subrotina de Poisson (pressão)
prec	Especificação da precisão numérica
pres	Discretização especial da equação de Poisson (pressão)
radi	Subrotina de radiação

(continua)

Módulo	Descrição
(continuação)	
read	Leitura de parâmetros de entrada
smvv	Rotinas para cálculo e saída de dados 3D
turb	Rotinas experimentais, a maioria envolvendo o modelo de turbulência
type	Definição de tipos derivados
vege	Modelo para a vegetação
velo	Conservação da quantidade de movimento
wall	Condições de contorno de parede

As principais características do WFDS que o levaram a ser escolhido neste trabalho foram o fato do software ser de código aberto, é escrito em linguagem Fortran, possui um bom visualizador de resultados (SmokeView), possui opção de processamento paralelo e foi desenvolvido especificamente para resolver cenários que envolvam fogo e incêndios.

A vantagem do código aberto é a eliminação dos custos de licenciamento do produto e o acesso ao seu código fonte para se fazer as alterações necessárias para customizar o código às necessidades específicas do trabalho, desde que se tenha conhecimento da sua estrutura de dados e das técnicas de programação envolvidas.

Algumas das principais características do WFDS em sua configuração padrão que o tornam prático e rápido para simulações de escoamentos térmicos, em particular os incêndios, são: aproximação de baixo número de Mach, uso de LES, malha estruturada, deslocada e uniforme, “Eddy Dissipation Concept” para reação química turbulenta de um único passo controlada pela mistura que utiliza três espécies agrupadas, o modelo de coeficiente constante de Deardorff para a viscosidade turbulenta, números de Schmidt e Prandtl turbulento constantes e a radiação de corpo cinza com solução por volumes finitos para a equação de transporte de radiação. O modelo, no entanto, não está limitado a estes algoritmos simples. Por exemplo, pode-se especificar reações múltiplas, taxa de reação finita, um modelo de radiação de banda larga, e várias outras características específicas. A física mais detalhada se traduz em aumento do custo computacional e cabe ao

usuário justificá-lo em troca de uma maior precisão. As opções do modelo padrão foram selecionadas com base em resultados a partir de diversos experimentos de validação em escala integral.

4.2 A malha numérica

O código WFDS permite resolver diferentes aplicações de incêndios e escoamentos com troca de calor. Por isso, é relativamente rápido, robusto e fácil de descrever o cenário. Isso significa que o usuário precisa apenas especificar um número pequeno de parâmetros numéricos, concentrando-se na descrição física do problema. Uma vez que o domínio computacional geralmente engloba um volume de vegetação mais ar, a mais evidente e mais simples malha numérica é a retangular. De fato, uma malha uniforme é preferida (MCGRATTAN et al., 2012) e os únicos parâmetros numéricos escolhidos são as três dimensões da malha.

As equações de conservação são aproximadas utilizando o método de diferenças finitas de segunda ordem sobre malhas tridimensionais uniformemente espaçadas. Múltiplas malhas podem ser processadas em paralelo usando bibliotecas “Message Passing Interface” (MPI). As quantidades escalares são designadas no centro de cada célula da malha, enquanto as componentes vetoriais são atribuídas às faces. Isto é referido como malha deslocada. Seu principal objetivo é evitar problemas no acoplamento pressão-velocidade representando naturalmente o divergente da velocidade, uma quantidade termodinâmica muito importante no modelo.

O capítulo 6 apresenta três critérios utilizados para se definir o tamanho das células da malha numérica. O mais importante se refere à sensibilidade da malha, pois define a malha a partir da qual os resultados das simulações ou não variam ou têm uma variação muito pequena. Os outros dois critérios se referem ao diâmetro característico do incêndio e ao comprimento ótico.

4.3 O transporte de massa e espécies

A descrição mais básica da química de um incêndio é a de uma reação de um combustível à base de hidrocarbonetos com oxigênio que produz dióxido de carbono e vapor d'água. Uma vez que um incêndio florestal é um processo de combustão relativamente ineficiente envolvendo múltiplos gases combustíveis que contêm mais do que apenas átomos de carbono e de hidrogênio, o número de espécies gasosas para se controlar na simulação é grande. Para tornar as simulações realizáveis dentro de um espaço de tempo adequado, o WFDS limita o número de combustíveis geralmente a um e o número de reações a apenas uma ou duas. O WFDS também deixa em aberto a possibilidade de a reação química não prosseguir por falta de oxigênio suficiente na corrente de ar, tal como ocorre quando um incêndio em um compartimento fechado se extingue. Mesmo com esta abordagem simplificada para a química, ainda é preciso controlar pelo menos seis espécies gasosas (combustível, O_2, CO_2, H_2O, CO e N_2), além das partículas de fuligem. Se for considerada uma reação de etapa única, não é necessário resolver explicitamente sete equações de transporte. Na verdade, só é necessário resolver duas - uma para o combustível e outra para os produtos. O ar é a parcela do gás que não é nem combustível nem produtos. Enquanto o combustível é uma espécie gasosa única, o ar e os produtos da combustão são espécies agrupadas. Uma espécie agrupada representa uma mistura de espécies gasosas transportadas em conjunto, isto é, as espécies agrupadas possuem um conjunto único de propriedades de transporte e reagem em conjunto e do ponto de vista do modelo numérico podem ser tratadas como uma única espécie. Na verdade, as equações de transporte de massa não fazem distinção entre uma espécie única ou espécies agrupadas. Por exemplo, o ar é uma espécie agrupada que consiste em nitrogênio, oxigênio e traços de vapor d'água e dióxido de carbono. Usam-se os símbolos Z_A, Z_F, e Z_P para designar as frações mássicas de ar, combustível e produtos respectivamente ($Z_A = 1 - Z_F - Z_P$). As frações mássicas de espécies agrupadas são linearmente relacionadas com as frações mássicas de espécies primitivas Y_i. Assim, a conversão de um para o outro é uma simples questão de uma multiplicação de matrizes. Por exemplo, a completa combustão das espécies agrupadas combustível, ar e produtos

$$C_{3,4}H_{6,2}O_{2,5} + 3{,}7\,(O_2 + 3{,}76\,N_2) \rightarrow 3{,}4\,CO_2 + 3{,}1\,H_2O + 13{,}91\,N_2 \tag{4.1}$$

é expressa como:

$$\text{Combustível} + 3{,}7\,\text{Ar} \rightarrow \text{Produtos} \tag{4.2}$$

e as espécies primitivas podem ser recuperadas a partir das espécies agrupadas através da relação:

$$\begin{bmatrix} 0{,}77 & 0{,}00 & 0{,}66 \\ 0{,}23 & 0{,}00 & 0{,}00 \\ 0{,}00 & 1{,}00 & 0{,}00 \\ 0{,}00 & 0{,}00 & 0{,}25 \\ 0{,}00 & 0{,}00 & 0{,}09 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_A \\ Z_F \\ Z_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{N_2} \\ Y_{O_2} \\ Y_{C_{3.4}H_{6.2}O_{2.5}} \\ Y_{CO_2} \\ Y_{H_2O} \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

Note-se que as colunas da matriz são as frações mássicas das espécies primitivas dentro de uma determinada espécie agrupada.

A abordagem das espécies agrupadas não altera as equações de transporte de massa. A equação para a conservação de massa é:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho u) = \dot{m}_b''' \tag{4.4}$$

Note-se que o termo fonte do lado direito representa a adição de massa a partir da pirólise da vegetação, que é modelada como um objeto submalha o qual se admite não ocupar um volume. Assim ele é visto pelas equações de conservação como fontes pontuais de massa, quantidade de movimento e energia. A equação de transporte para cada uma das espécies agrupadas menos uma (geralmente o ar), tem a mesma forma que a equação de transporte para uma única espécie:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Z_\alpha) + \nabla.(\rho Z_\alpha u) = -\nabla.(\rho D_\alpha \nabla Z_\alpha) + \dot{m}_\alpha''' + \dot{m}_{b,\alpha}''' \tag{4.5}$$

onde $\dot{m}_b''' = \sum_i \dot{m}_{b,\alpha}'''$ é a taxa de produção de espécies por pirólise da vegetação. A soma das equações para todas as espécies fornece a equação de conservação de massa original, pois $\sum Z_\alpha = 1$ e $\sum \dot{m}_\alpha''' = 0$ e $\sum \dot{m}_{b,\alpha}''' = \dot{m}_b'''$ por definição, pois se admite que $\sum \rho D_\alpha \nabla Z_\alpha = 0$. Esta última afirmação não é verdade em geral. No entanto, as equações de transporte são resolvidas para a massa total e todas menos uma das espécies, implicando que o coeficiente de difusão da espécie implícita é escolhido de modo que a soma de todos os fluxos difusivos seja zero.

4.4 A aproximação de baixo número de Mach

Rehm e Baum (1978) observaram que para aplicações de baixa velocidade como incêndios, a pressão resolvida espacial e temporalmente, p, pode ser decomposta em uma pressão de fundo, $p_0(z,t)$, além de uma perturbação, $\tilde{p}(x,y,z,t)$, com apenas a pressão de fundo retida na equação de estado (lei do gás ideal):

$$p_0 = \rho R T \sum_i \frac{Y_i}{W_i} \equiv \frac{\rho R T}{\bar{W}} \tag{4.6}$$

Note-se que z é a coordenada espacial na direção da gravidade. Assim, a estratificação da atmosfera está incluída na pressão de fundo. A perturbação $\tilde{p}$ é responsável pelo movimento do fluido.

Essa aproximação traz várias consequências, sendo que a primeira de interesse para este trabalho é que a equação de estado modificada conduz a uma redução do número de variáveis dependentes do sistema de equações em um. Também, elimina a necessidade de resolver a equação de transporte de energia de forma explícita. Outra consequência importante é que altera o regime de velocidades do escoamento (em relação à velocidade do som) para as quais o código foi concebido. Códigos de escoamento de alta velocidade envolvem efeitos de compressibilidade e de ondas de choque. Códigos para escoamentos a baixas

velocidades, no entanto, explicitamente eliminam os efeitos de compressibilidade que dão origem a ondas acústicas. As equações de Navier-Stokes descrevem a propagação de informações a velocidades comparáveis às do escoamento do fluido (para o fogo de superfície, aproximadamente 0,005 m/s), mas também a velocidades comparáveis às de ondas sonoras (340 m/s a 15°C). Resolver a forma discretizada destas equações exigiria passos de tempo extremamente pequenos, a fim de obter informações viajando à velocidade do som, tornando difícil a realização de simulações práticas.

Outra consequência da aproximação de baixo número de Mach é que a energia interna e a entalpia podem ser relacionadas em termos da pressão termodinâmica de fundo: $\mathrm{h} = \mathrm{e} + \mathrm{p}_0/\rho$. A equação de conservação da energia é escrita em termos da entalpia conforme a equação (3.14), reproduzida abaixo:

$$\frac{\partial}{\partial \mathrm{t}}\left(\bar{\rho}\tilde{\mathrm{h}}\right) + \nabla.\left(\rho\tilde{\mathrm{h}}\tilde{\mathbf{u}}\right) = \frac{\widetilde{\mathrm{D}}\mathrm{p}_0}{\widetilde{\mathrm{D}}\mathrm{t}} - \nabla.\left(\bar{\mathbf{q}} + \mathbf{q}^{\mathrm{sgs}}\right) - \nabla.\bar{\mathbf{q}}_{\mathrm{r}} + \langle \dot{\mathrm{q}}'''_{\mathrm{c,b}} \rangle_{\mathrm{V_b}} + \langle \dot{\mathrm{h}}'''_{\mathrm{b}} \rangle_{\mathrm{V_b}} \tag{3.14}$$

Note-se que a derivada material da pressão termodinâmica é simplificada devido à aproximação de baixo número de Mach:

$$\frac{\mathrm{Dp}}{\mathrm{Dt}} \equiv \frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{t}} + \mathbf{u}.\nabla \mathrm{p} \approx \frac{\partial \mathrm{p}_0}{\partial \mathrm{t}} + \mathrm{w}\frac{\partial \mathrm{p}_0}{\partial \mathrm{z}} \tag{4.7}$$

Como mencionado acima, não se resolve a equação (3.14) explicitamente. Em vez disso, se fatora o divergente da velocidade equação (3.27). O solucionador hidrodinâmico garante que a equação do divergente da velocidade é satisfeita. Segue-se que a equação (3.14) também é satisfeita (a energia é conservada). A importância do divergente da velocidade para o algoritmo global é que o divergente pode ser calculado utilizando apenas as variáveis termodinâmicas ρ, Z_α, e p_0. Como será mostrado abaixo, a forma de se avançar o escoamento de velocidade no tempo é primeiro estimar as variáveis termodinâmicas no passo de tempo seguinte, calcular o divergente da velocidade, e em seguida resolver a equação para a pressão que irá

garantir que o divergente da velocidade atualizado é idêntico ao que é calculado unicamente a partir das variáveis termodinâmicas.

4.5 O transporte de quantidade de movimento

Em forma conservativa, a equação da quantidade de movimento para o componente i da velocidade é:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_i u_j\right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + f_{D,i} \qquad (4.8)$$

Nessa formulação, $f_{D,i}$ representa a força de arrasto devido a partículas não resolvidas na submalha. Estas partículas estão presentes no modelo de vegetação. Para que a equação (4.8) seja aplicável, a resolução da malha deve ser menor do que a escala de Kolmogorov, η, a escala de comprimento dos menores vórtices turbulentos,

$$\eta \equiv (\nu^3/\varepsilon)^{1/4} \qquad (4.9)$$

Aqui, ν é a viscosidade cinemática e ε é a taxa de dissipação viscosa (a conversão da energia cinética em energia interna pela viscosidade),

$$\varepsilon \equiv \tau_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 2\mu\left(S_{ij}S_{ij} - \frac{1}{3}(\nabla.\mathbf{u})^2\right) \quad ; \quad S_{ij} \equiv \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \qquad (4.10)$$

Em cenários de incêndio, η é geralmente da ordem de um milímetro. Com os domínios das simulações de incêndios variando de metros a quilômetros, a resolução da malha acessível para a maioria dos cálculos usando LES varia de centímetros a metros. O objetivo do LES é evoluir os valores médios de massa, quantidade de movimento e energia em uma célula explicitamente, ao mesmo tempo que leva em consideração os efeitos do transporte e da química submalha sobre os

campos médios. Para este fim, aplica-se um filtro de caixa nas equações de conservação para se obterem as equações filtradas. Como exemplo, considere-se a equação da quantidade de movimento. Aplicando a equação (3.7) na equação (4.8) resulta em

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u_i}) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\overline{\rho u_i u_j}\right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{D,i} \tag{4.11}$$

O dilema que se enfrenta agora é que o valor médio $\overline{\rho u_i u_j}$ da célula não é por si só uma variável primitiva no cálculo e não se tem uma forma de calcular as variáveis sob as barras para se avançar a equação (4.11) no tempo. Tem-se então que decompor os termos, o que conduz a problemas de fechamento (mais incógnitas que equações).

O próximo passo é aplicar o filtro de Favre:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\bar{\rho}\widetilde{u_i u_j}\right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{D,i} \tag{4.12}$$

O primeiro termo é agora separável, desde que se tenha uma solução para $\bar{\rho}$. Mas ainda não se tem uma maneira de calcular a correlação $\widetilde{u_i u_j}$ na malha. Não se pode simplesmente usar $\tilde{u}_i \tilde{u}_j$ como um substituto. Ao invés disso, define-se a tensão na escala submalha (SGS na sigla em inglês) como:

$$\tau_{ij}^{SGS} \equiv \bar{\rho}(\widetilde{u_i u_j} - \tilde{u}_i \tilde{u}_j) \tag{4.13}$$

Substituindo-se a equação (4.13) na equação (4.12) tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\bar{\rho}\tilde{u}_i \tilde{u}_j\right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^{SGS}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{D,i} \tag{4.14}$$

A equação (4.14) é o que normalmente se refere como a equação da quantidade de movimento LES. Todas as variáveis são primitivas ou calculáveis uma

vez que se encontre um fechamento adequado para a tensão na escala submalha, τ_{ij}^{SGS}.

Há ainda algumas modificações a se fazer para se obter a equação (4.14) na forma usada no WFDS. A primeira é decompor a tensão na escala submalha e aplicar a lei de Newton da viscosidade como a relação constitutiva para a parte deviatórica. Note-se que $\bar{\tau}_{ij}$ já é a parte deviatórica da tensão viscosa. Modela-se a tensão deviatórica total como:

$$\tau_{ij}^{d} \equiv \bar{\tau}_{ij} + \tau_{ij}^{SGS} - \frac{1}{3}\tau_{kk}^{SGS}\delta_{ij} = -2(\mu + \mu_t)\left(\tilde{S}_{ij} - \frac{1}{3}(\nabla.\tilde{\mathbf{u}})\delta_{ij}\right) \qquad (4.15)$$

Note-se que δ_{ij} é o delta de Kronecker ($\delta_{ij} = 1$ se i=j, $\delta_{ij} = 0$ se i≠j). A viscosidade turbulenta μ_t requer um modelo, que é discutido mais a seguir.

Em LES de baixo número de Mach, a parte isotrópica da tensão turbulenta é somada ao termo de pressão. Define-se a energia cinética submalha como metade do traço da tensão turbulenta,

$$k^{SGS} \equiv \frac{1}{2}\tau_{kk}^{SGS} \qquad (4.16)$$

Define-se a pressão filtrada modificada como

$$\bar{p} \equiv \overline{p} + \frac{2}{3}k^{SGS} \qquad (4.17)$$

Substituindo-se as equações (4.15) e (4.17) na equação (4.14) tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{u}_j\right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}^{d}}{\partial x_j} + \bar{\rho}g_i + \bar{f}_{D,i} \qquad (4.18)$$

Observe-se que a equação (4.18) se assemelha à equação da quantidade de movimento (4.8). Por esta razão, o formalismo do filtro será relaxado quando se

discutirem os detalhes numéricos do algoritmo. Reescrevendo a equação (4.18) de forma não conservativa, tem-se:

$$\bar{\rho}\frac{D\tilde{u}_i}{Dt} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}^d}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{D,i} \tag{4.19}$$

A equação de transporte para a energia cinética resolvida por unidade de massa, $K \equiv \frac{1}{2}\tilde{u}_i\tilde{u}_i$, é derivada através do produto interno da equação da quantidade de movimento LES com o vetor velocidade resolvido. O resultado é:

$$\begin{gathered}\bar{\rho}\frac{DK}{Dt} = -\tilde{u}_i\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \tilde{u}_i\frac{\partial \tau_{ij}^d}{\partial x_j} + (\bar{\rho} g_i + \bar{f}_{D,i})\tilde{u}_i \\ \bar{\rho}\frac{DK}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\bar{p}\delta_{ij} + \tau_{ij}^d\right)\tilde{u}_i\right] = \bar{p}\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} + \tau_{ij}^d\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \left(\bar{\rho} g_i + \bar{f}_{D,i}\right)\tilde{u}_i\end{gathered} \tag{4.20}$$

Os termos do lado esquerdo representam o transporte advectivo. Os termos do lado direito são fontes ou sumidouros de energia cinética. De particular interesse no LES é a produção de energia cinética submalha, presente no segundo termo do lado direito da igualdade. O efeito deste termo é a transferência de energia entre as escalas resolvidas e não resolvidas do movimento. No entendimento clássico da cascata de energia, a transferência líquida de energia é das escalas grandes para as pequenas, onde finalmente os movimentos são dissipados em energia interna pela viscosidade. Em LES, contudo, este termo pode também ser uma fonte de energia, um fenômeno chamado “backscatter”. Uma questão que faz o projeto de fechamentos submalha para LES ser desafiador é que, longe de ser a exceção, “backscatter” está sempre presente e muitas vezes é crítico para a formação dos grandes movimentos.

Os fechamentos submalha de LES mais simples fazem com que a produção de energia cinética submalha seja igual à dissipação de energia cinética total. Usando a difusão do gradiente para o fechamento turbulento, essa hipótese implica o seguinte:

$$\begin{aligned}\tau_{ij}^{d}\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} &= -2(\mu+\mu_t)\left(\tilde{S}_{ij}-\frac{1}{3}(\nabla.\tilde{\mathbf{u}})\delta_{ij}\right)\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j}\\ &= -2(\mu+\mu_t)\left(\tilde{S}_{ij}-\frac{1}{3}(\nabla.\tilde{\mathbf{u}})\delta_{ij}\right)\tilde{S}_{ij}\\ &= -2(\mu+\mu_t)\left(\tilde{S}_{ij}\tilde{S}_{ij}-\frac{1}{3}(\nabla.\tilde{\mathbf{u}})^2\right)\\ &= -2\mu\left(S_{ij}S_{ij}-\frac{1}{3}(\nabla.\mathbf{u})^2\right)\equiv\varepsilon\end{aligned} \tag{4.21}$$

No LES, o modelo de turbulência se refere ao fechamento para os termos de fluxo submalha. No WFDS, a difusão do gradiente é o modelo de turbulência utilizado para fechar os termos de fluxo submalha. Em seguida, se requer um modelo para o coeficiente de transporte turbulento: a viscosidade turbulenta ou a difusividade turbulenta. A difusividade turbulenta é obtida usando um número de Schmidt constante (para a difusividade mássica) ou um número de Prandtl constante (para a difusividade térmica), de modo que o coeficiente de transporte mais importante é a viscosidade turbulenta, μ_t. Há várias opções disponíveis no WFDS, mas uma variação do modelo de Deardorff que é o padrão é também o usado neste trabalho, conforme descrito no capítulo 3. O modelo de Deardorff é mais barato computacionalmente e tende a ter um melhor desempenho para dinâmicas de incêndios que usam baixa resolução numérica do que os modelos dinâmicos. Na forma discretizada da equação da quantidade de movimento a viscosidade modelada é definida no centro das células.

A partir da identidade vetorial $(\mathbf{u}.\nabla)\mathbf{u} = (\nabla|\mathbf{u}|^2)/2 - \mathbf{u}\mathrm{x}\boldsymbol{\omega}$ e definindo a energia de estagnação por unidade de massa $\mathcal{H} \equiv |\mathbf{u}|^2/2 + \tilde{p}/\rho$, a equação da quantidade de movimento pode ser escrita como (MCGRATTAN et al., 2012):

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \mathbf{u}\mathrm{x}\boldsymbol{\omega} + \nabla\mathcal{H} - \tilde{p}\nabla\left(\frac{1}{\rho}\right) = \frac{1}{\rho}\left[(\rho-\rho_0)g + \mathbf{f}_b + \nabla.\boldsymbol{\tau}_{ij}\right] \tag{4.22}$$

O termo $\mathbf{f}_b$ representa a força de arrasto exercida pela partícula de vegetação submalha. A tensão viscosa $\boldsymbol{\tau}_{ij}$ é fechada por meio da difusão do gradiente com a viscosidade turbulenta obtida a partir do modelo de viscosidade turbulenta de Deardorff.

É conveniente escrever a equação (4.22) na forma:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathrm{t}} + \mathbf{F} + \nabla \mathcal{H} = 0 \tag{4.23}$$

onde

$$\mathbf{F} = -\mathbf{u}\mathrm{x}\boldsymbol{\omega} - \tilde{\mathrm{p}}\nabla\left(\frac{1}{\rho}\right) - \frac{1}{\rho}\left[(\rho - \rho_0)\mathbf{g} + \mathbf{f}_\mathrm{b} + \nabla.\boldsymbol{\tau}_\mathrm{ij}\right] \tag{4.24}$$

De modo que a equação de Poisson para a pressão pode ser derivada tomando-se o divergente da equação (4.23):

$$\nabla^2 \mathcal{H} = -\left[\frac{\partial}{\partial \mathrm{t}}(\nabla.\mathbf{u}) + \nabla.\mathbf{F}\right] \tag{4.25}$$

Note-se o surgimento da derivada temporal do divergente da velocidade. Esta é uma característica importante do sistema de marcha do tempo. Note-se também que o lado direito da equação de Poisson retém um termo que inclui a perturbação de pressão $\tilde{\mathrm{p}}\nabla(1/\rho)$. Este termo é o torque baroclínico. Ele é incluído no lado direito da equação de Poisson utilizando o seu valor a partir do instante de tempo anterior. Esta aproximação permite resolver outra forma da equação de Poisson, para a qual existem solucionadores que são rápidos e diretos, otimizados para malhas uniformes.

Na equação (4.23) o vetor $\mathbf{F}$ é referido coletivamente como os termos de fluxo de quantidade de movimento e o termo $\nabla\mathcal{H}$ é referido como o gradiente de pressão, apesar de $\mathcal{H}$ não ser verdadeiramente uma pressão. A discretização espacial das equações da quantidade de movimento toma a forma

$$\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{t}} + \mathrm{F}_{\mathrm{x,ijk}} + \frac{\mathcal{H}_{\mathrm{i+1,jk}} - \mathcal{H}_{\mathrm{ijk}}}{\delta \mathrm{x}} = 0 \tag{4.26}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + F_{y,ijk} + \frac{\mathcal{H}_{i,j+1,k} - \mathcal{H}_{ijk}}{\delta y} = 0 \tag{4.27}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + F_{z,ijk} + \frac{\mathcal{H}_{ij,k+1} - \mathcal{H}_{ijk}}{\delta z} = 0 \tag{4.28}$$

onde $\mathcal{H}_{ijk}$ é referente ao centro da célula ijk, u_{ijk} e $F_{x,ijk}$ são referentes à face da célula na direção x, v_{ijk} e $F_{y,ijk}$ são referentes à face da célula na direção y e w_{ijk} e $F_{z,ijk}$ são referentes à face da célula na direção z (vertical). Os termos de fluxo na equação (4.24) são discretizados da seguinte forma:

$$F_x = w\omega_y - v\omega_z - \frac{1}{\rho}\left(f_x + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}\right) \tag{4.29}$$

$$F_y = u\omega_z - w\omega_x - \frac{1}{\rho}\left(f_y + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}\right) \tag{4.30}$$

$$F_z = v\omega_x - u\omega_y - \frac{1}{\rho}\left(f_z + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}\right) \tag{4.31}$$

Nas definições a seguir, os componentes da vorticidade (ω_x, ω_y, ω_z) estão localizados nas faces das células apontando para as direções x, y e z, respectivamente. O mesmo é verdadeiro para os termos fora da diagonal do tensor tensão viscoso: $\tau_{zy} = \tau_{yz}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$, e $\tau_{xy} = \tau_{yx}$. Os componentes diagonais do tensor tensão, τ_{xx}, τ_{yy}, e τ_{zz}, e os componentes de força externa, f_x, f_y e f_z, estão localizados nas respectivas faces das células.

$$F_{x,ijk} = \frac{1}{2}\left(w_{i+\frac{1}{2},jk}\omega_{y,ijk} + w_{i+\frac{1}{2},j,k-1}\omega_{y,ij,k-1}\right) - \frac{1}{2}\left(v_{i+\frac{1}{2},jk}\omega_{z,ijk} + v_{i+\frac{1}{2},j-1,k}\omega_{z,i,j-1,k}\right) - \frac{1}{\rho_{i+\frac{1}{2},jk}}\left(f_{x,ijk} + \frac{\tau_{xx,i+1,jk} - \tau_{xx,ijk}}{\delta x} + \frac{\tau_{xy,ijk} - \tau_{xy,i,j-1,k}}{\delta y} + \frac{\tau_{xz,ijk} - \tau_{xz,ij,k-1}}{\delta z}\right) \quad (4.32)$$

$$F_{y,ijk} = \frac{1}{2}\left(w_{i,j+\frac{1}{2},k}\omega_{z,ijk} + w_{i-1,j+\frac{1}{2},k}\omega_{z,i-1,jk}\right) - \frac{1}{2}\left(w_{i,j+\frac{1}{2},k}\omega_{x,ijk} + w_{i,j+\frac{1}{2},k-1}\omega_{x,ij,k-1}\right) - \frac{1}{\rho_{i,j+\frac{1}{2},k}}\left(f_{y,ijk} + \frac{\tau_{yx,ijk} - \tau_{yx,i-1,jk}}{\delta x} + \frac{\tau_{yy,i,j+1,k} - \tau_{yy,ijk}}{\delta y} + \frac{\tau_{yz,ijk} - \tau_{yz,ij,k-1}}{\delta z}\right) \quad (4.33)$$

$$F_{z,ijk} = \frac{1}{2}\left(v_{ij,k+\frac{1}{2}}\omega_{x,ijk} + v_{i,j-1,k+\frac{1}{2}}\omega_{x,i,j-1,k}\right) - \frac{1}{2}\left(u_{ij,k+\frac{1}{2}}\omega_{y,ijk} + u_{i-1,j,k+\frac{1}{2}}\omega_{y,i-1,jk}\right) - \frac{1}{\rho_{ij,k+\frac{1}{2}}}\left(f_{z,ijk} + \frac{\tau_{zx,ijk} - \tau_{zx,i-1,jk}}{\delta x} + \frac{\tau_{zy,ijk} - \tau_{zy,i,j-1,k}}{\delta y} + \frac{\tau_{zz,ij,k+1} - \tau_{zz,ijk}}{\delta z}\right) \quad (4.34)$$

Os componentes do vetor vorticidade são:

$$\omega_{x,ijk} = \frac{w_{i,j+1,k} - w_{ijk}}{\delta y} + \frac{v_{ij,k+1} - v_{ijk}}{\delta z} \quad (4.35)$$

$$\omega_{y,ijk} = \frac{u_{ij,k+1} - u_{ijk}}{\delta z} + \frac{w_{i+1,jk} - w_{ijk}}{\delta x} \quad (4.36)$$

$$\omega_{z,ijk} = \frac{v_{i+1,jk} - v_{ijk}}{\delta x} + \frac{u_{i,j+1,k} - u_{ijk}}{\delta y} \tag{4.37}$$

Os componentes do tensor das tensões viscosas são:

$$\tau_{xx,ijk} = \mu_{ijk}\left(\frac{4}{3}(\nabla.\mathbf{u})_{ijk} - 2\frac{v_{ijk} - v_{i,j-1,k}}{\delta y} - 2\frac{w_{ijk} - w_{ij,k-1}}{\delta z}\right) \tag{4.38}$$

$$\tau_{yy,ijk} = \mu_{ijk}\left(\frac{4}{3}(\nabla.\mathbf{u})_{ijk} - 2\frac{u_{ijk} - u_{i-1,jk}}{\delta x} - 2\frac{w_{ijk} - w_{ij,k-1}}{\delta z}\right) \tag{4.39}$$

$$\tau_{zz,ijk} = \mu_{ijk}\left(\frac{4}{3}(\nabla.\mathbf{u})_{ijk} - 2\frac{u_{ijk} - u_{i-1,jk}}{\delta x} - 2\frac{v_{ijk} - v_{i,j-1,k}}{\delta y}\right) \tag{4.40}$$

$$\tau_{xy,ijk} = \tau_{yx,ijk} = \mu_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}\left(\frac{u_{i,j+1,k} - u_{ijk}}{\delta y} + \frac{v_{i+1,jk} - v_{ijk}}{\delta x}\right) \tag{4.41}$$

$$\tau_{xz,ijk} = \tau_{zx,ijk} = \mu_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}\left(\frac{u_{ij,k+1} - u_{ijk}}{\delta z} + \frac{w_{i+1,jk} - w_{ijk}}{\delta x}\right) \tag{4.42}$$

$$\tau_{yz,ijk} = \tau_{zy,ijk} = \mu_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}\left(\frac{v_{ij,k+1} - v_{ijk}}{\delta z} + \frac{w_{i,j+1,k} - w_{ijk}}{\delta y}\right) \tag{4.43}$$

4.6 A equação para a pressão (equação de Poisson)

Uma equação diferencial parcial elíptica (conhecida como a equação de Poisson) é obtida tomando o divergente da equação da quantidade de movimento, conforme a equação (4.25), repetida abaixo:

$$\nabla^2\mathcal{H} = -\left[\frac{\partial}{\partial t}(\nabla.\mathbf{u}) + \nabla.\mathbf{F}\right] \tag{4.25}$$

onde

$$\mathbf{F} = -\mathbf{u}\mathrm{x}\boldsymbol{\omega} - \tilde{\mathrm{p}}\nabla\left(\frac{1}{\rho}\right) - \frac{1}{\rho}\left[(\rho - \rho_0)\mathbf{g} + \mathbf{f}_\mathrm{b} + \nabla.\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{ij}}\right] \tag{4.24}$$

Note-se que a pressão de perturbação $\tilde{\mathrm{p}}$ aparece em ambos os lados da equação (4.25). A pressão no lado direito da equação é retirada do passo de tempo anterior do esquema de marcha no tempo explícito. Ele pode ser negligenciado se o torque baroclínico não for importante numa dada simulação, como em escoamentos de massa específica constante. A pressão no lado esquerdo da equação que está incorporada na variável $\mathcal{H}$ é resolvida diretamente. A razão para a decomposição do termo de pressão é para que o sistema algébrico linear resultante da discretização da equação (4.25) tenha coeficientes constantes e possa ser resolvido através de um método rápido, direto (isto é, não-iterativo) que utiliza a Transformada Rápida de Fourier (FFT na sigla em inglês).

A forma discretizada da equação de Poisson para a pressão modificada, $\mathcal{H}$, é:

$$\begin{aligned}\frac{\mathcal{H}_{\mathrm{i+1,jk}} - 2\mathcal{H}_{\mathrm{ijk}} + \mathcal{H}_{\mathrm{i-1,jk}}}{\delta\mathrm{x}^2} + \frac{\mathcal{H}_{\mathrm{i,j+1,k}} - 2\mathcal{H}_{\mathrm{ijk}} + \mathcal{H}_{\mathrm{i,j-1,k}}}{\delta\mathrm{y}^2} \\ + \frac{\mathcal{H}_{\mathrm{ij,k+1}} - 2\mathcal{H}_{\mathrm{ijk}} + \mathcal{H}_{\mathrm{ij,k-1}}}{\delta\mathrm{z}^2} \\ = -\frac{\mathrm{F}_{\mathrm{x,ijk}} - \mathrm{F}_{\mathrm{x,i-1,jk}}}{\delta\mathrm{x}} - \frac{\mathrm{F}_{\mathrm{y,ijk}} - \mathrm{F}_{\mathrm{y,i,j-1,k}}}{\delta\mathrm{y}} \\ - \frac{\mathrm{F}_{\mathrm{z,ijk}} - \mathrm{F}_{\mathrm{z,ij,k-1}}}{\delta\mathrm{z}} - \frac{\delta}{\delta\mathrm{t}}(\nabla.\mathbf{u})_{\mathrm{ijk}}\end{aligned} \tag{4.44}$$

A ausência de um sobrescrito implica que todas as quantidades devem ser avaliadas no mesmo tempo. Esta equação diferencial parcial (PDE na sigla em inglês) elíptica é resolvida usando um solucionador baseado em FFT, que é parte de uma biblioteca de rotinas para a solução de PDEs elípticas chamado CRAYFISHPAK.

A derivada temporal do divergente da velocidade é definida no passo preditor como:

$$\frac{\delta}{\delta t}(\nabla.\mathbf{u})_{ijk} \equiv \frac{(\nabla.\mathbf{u})^{*}_{ijk} - (\nabla.\mathbf{u})^{n}_{ijk}}{\delta t} \tag{4.45}$$

e no passo corretor como:

$$\frac{\delta}{\delta t}(\nabla.\mathbf{u})_{ijk} \equiv \frac{(\nabla.\mathbf{u})^{n+1}_{ijk} - \frac{1}{2}\left[(\nabla.\mathbf{u})^{*}_{ijk} + (\nabla.\mathbf{u})^{n}_{ijk}\right]}{\delta t/2} \tag{4.46}$$

Nessas equações “n” se refere ao enésimo passo de tempo e “*” é uma estimativa de primeira ordem para o passo de tempo seguinte.

Condições de contorno abertas: Um contorno aberto é onde o fluido é permitido escoar para dentro ou para fora do domínio computacional, dependendo do gradiente de pressão local. A condição de contorno para a pressão depende se o escoamento local é de entrada ou saída. Em ambos os casos, admite-se que a quantidade $\mathcal{H} \equiv |\mathbf{u}|^2/2 + \tilde{p}/\rho$ permanece constante ao longo de uma linha de corrente. Supõe-se também que a perturbação da pressão no contorno seja uma entrada especificada pelo usuário ($\tilde{p}_{ext}$), e que é igual a zero por padrão. O solucionador de Poisson para a quantidade $\mathcal{H}$ requer uma condição de Dirichlet em um contorno aberto, isto é, o seu valor é especificado na fronteira do domínio computacional. Como um exemplo, considere o contorno em x = x_{min}. O valor de $\mathcal{H}$ no contorno é dado pelas seguintes expressões, dependendo da direção do escoamento através da face externa da célula:

$$\mathcal{H}_{\frac{1}{2},jk} = \begin{cases} \dfrac{\tilde{p}_{ext}}{\rho_{1,jk}} + \dfrac{1}{2}\left(\bar{u}^2_{1,jk} + \bar{v}^2_{1,jk} + \bar{w}^2_{1,jk}\right) & \text{saindo} \\ \dfrac{\tilde{p}_{ext}}{\rho_{\infty}} + \dfrac{1}{2}\left(u^2_{\infty} + v^2_{\infty} + w^2_{\infty}\right) & \text{entrando} \end{cases} \tag{4.47}$$

A barra sobre as componentes da velocidade indicam uma média sobre as respectivas faces da célula adjacente ao contorno. O índice ∞ representa os valores da velocidade e da massa específica especificados pelo usuário longe do domínio.

Tipicamente, a velocidade longe do domínio é zero, mas em simulações envolvendo um vento externo, esse valor pode ser especificado pelo usuário.

4.7 A combustão

A combustão é introduzida nas equações de conservação através de um termo fonte na equação de transporte de energia e espécies. Como a equação da energia não é resolvida explicitamente, estes termos são levados em consideração através da expressão para o divergente da velocidade.

Para a maioria das aplicações, o WFDS utiliza um modelo de combustão limitado pela mistura, com reação infinitamente rápida de espécies agrupadas. A reação do combustível com o oxigênio não é, necessariamente, instantânea e completa. Para uma reação infinitamente rápida, espécies reagentes numa dada célula da malha são convertidas em espécies produto a uma taxa determinada por um tempo de mistura característico. Para simulações com LES, onde a malha não é fina o suficiente para resolver a difusão do combustível e do oxigênio, é considerado o modelo de combustão limitado pela mistura. O WFDS considera a reação simples

$$\text{Combustível} + \text{Ar} \rightarrow \text{Produtos} \tag{4.48}$$

Em uma reação de hidrocarbonetos simples, os reagentes são o combustível, o oxigênio e o nitrogênio, e os produtos principais são o dióxido de carbono, o vapor d'água e o nitrogênio. As frações mássicas das espécies primitivas são dadas pelo vetor

$$\mathrm{Y} = \begin{bmatrix} \mathrm{Y}_{\mathrm{N}_2} \\ \mathrm{Y}_{\mathrm{O}_2} \\ \mathrm{Y}_{\mathrm{C}_{3.4}\mathrm{H}_{6.2}\mathrm{O}_{2.5}} \\ \mathrm{Y}_{\mathrm{CO}_2} \\ \mathrm{Y}_{\mathrm{H}_2\mathrm{O}} \end{bmatrix} \tag{4.49}$$

As espécies agrupadas são grupos de espécies primitivas, que só existem no escoamento em determinadas proporções. Por exemplo, o ar pode ser considerado como uma espécie agrupada composta por 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio, em volume.

Conforme descrito na equação (4.2), 3,7 moles da espécie agrupada ar reagem com um mol da espécie agrupada combustível, para a produção de um mol da espécie agrupada produtos. No WFDS, a espécie agrupada ar não é transportada mas sim resolvida uma vez que a soma das frações mássicas das espécies agrupadas deve ser 1. As espécies agrupadas são definidas pelo vetor Z que é indexado a partir de 0 e o número de espécies agrupadas é definido por N_z. Isto significa que são resolvidas ($N_z - 1$) equações de transporte. No caso deste trabalho, duas equações de transporte são resolvidas, uma para o combustível e outra para os produtos. A transformação linear de espécies agrupadas para espécies primitivas é dada por:

$$\mathrm{Y} = \mathrm{A}\,\mathrm{Z} \tag{4.50}$$

onde A é a matriz de transformação. Cada coluna de A representa uma espécie agrupada diferente. Os elementos de A são as frações mássicas para cada espécie primitiva em uma determinada espécie agrupada:

$$\mathrm{A}_{i\alpha} = \frac{\nu_{i\alpha}\mathrm{W}_{\alpha}}{\sum_{\alpha}\nu_{i\alpha}\mathrm{W}_{\alpha}} \tag{4.51}$$

onde $\nu_{i\alpha}$ é a razão volumétrica de uma espécie primitiva i em espécies agrupadas α.

Para transformar as espécies primitivas em espécies agrupadas usa-se a relação:

$$\mathrm{Z} = \mathrm{B}\,\mathrm{Y} \qquad ; \qquad \mathrm{B} = (\mathrm{A}^{\mathrm{T}}\mathrm{A})^{-1}\mathrm{A}^{\mathrm{T}} \tag{4.52}$$

Como pode ser visto pela matriz da equação (4.49), o monóxido de carbono e a fuligem são zero por padrão. Pode-se especificar a produção de CO e fuligem (y_{CO} e y_S, respectivamente) na linha REAC do arquivo de entrada de dados do WFDS, o

que determina a composição dos produtos. Neste trabalho, como o ambiente é bem ventilado, considera-se que a produção de CO seja zero. Entretanto, especifica-se um valor para a produção de fuligem. Neste sistema de reação, o ar é a espécie agrupada 0, o combustível é a espécie agrupada 1, e os produtos são a espécie agrupada 2.

A taxa de liberação da entalpia de combustão é modelada com base no modelo EDC. O modelo de combustão turbulenta adota a hipótese de reação química infinitamente rápida entre o combustível e o oxigênio e é controlado apenas pela velocidade de mistura desses reagentes, que representa bem a física de incêndios em ambientes bem ventilados (WANG; CHATTERJEE; DE RIS, 2011). Se qualquer célula da malha contiver todos os reagentes da reação química e se a temperatura da célula satisfizer a determinados critérios, a taxa de consumo de combustível é dada pelas equações (3.38), (3.39) e (3.40).

4.8 A radiação

Da mesma forma que a combustão, a radiação é introduzida nas equações de conservação através de um termo fonte na equação de transporte de energia. Como a equação de energia não é resolvida explicitamente, estes termos são levados em consideração através da expressão para o divergente da velocidade.

Em simulações práticas, a dependência espectral de $\mathbf{I}$, $\mathbf{I}_b$ e κ não pode ser resolvida com precisão, nem se possui dados confiáveis para combustíveis não ideais, típicos de incêndios reais. Enquanto o WFDS tem uma opção para dividir o espectro de radiação em um número relativamente pequeno de bandas e resolver uma RTE separada para cada banda, isso não é geralmente necessário porque em incêndios reais, a fuligem é o emissor e o absorvedor dominantes de radiação térmica e não é particularmente sensível ao comprimento de onda. O coeficiente de absorção médio, κ, é uma função da composição das espécies e da temperatura. Seus valores são obtidos por pesquisa em tabela usando um modelo de banda estreita, RadCal.

O termo fonte $\mathbf{I}_b$ requer tratamento especial devido à resolução limitada da malha numérica na proximidade das chamas. Nas simulações de incêndio em larga escala, as células da malha numérica são tipicamente da ordem de dezenas de centímetros. Folhas de chama relativamente finas não podem ser resolvidas, caso em que o campo de temperatura resolvido não irá refletir as temperaturas reais que seriam de se esperar encontrar na zona de reação. Consequentemente, o termo fonte é aproximado em células da malha onde o combustível e o oxigênio reagem. Em outro lugar o campo de temperatura submalha é homogêneo e o termo de fonte pode ser calculado diretamente.

A equação de radiação é resolvida usando uma técnica similar ao método de volumes finitos para o transporte convectivo, e assim o nome dado a esta técnica é Método dos Volumes Finitos. Utilizando cerca de 100 ângulos discretos que são atualizados a determinado intervalo de tempo, o solucionador de volumes finitos do WFDS requer cerca de 20% do tempo total de CPU (do inglês *central processing unit*) de um cálculo, um custo modesto dada a complexidade da transferência de calor por radiação. O espalhamento das espécies gasosas e da fuligem não está incluída no modelo.

Para se obter a forma discretizada da RTE, uma esfera unitária é dividida em um número finito de ângulos sólidos. O sistema de coordenadas utilizado para discretizar o ângulo sólido é mostrado na Figura 4.1:

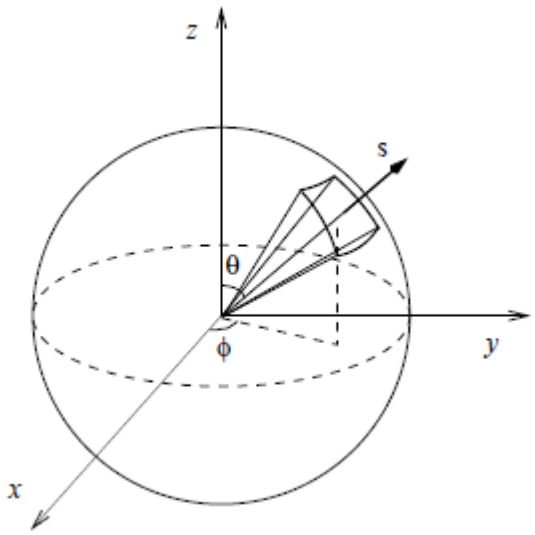

Figura 4.1 – Sistema de coordenadas para a discretização angular.

A discretização do ângulo sólido é feita dividindo-se primeiro o ângulo polar θ em N_θ bandas, onde N_θ é um inteiro par. Cada banda θ é então dividida em $N_\phi(\theta)$ partes na direção azimutal (ϕ). $N_\phi(\theta)$ deve ser divisível por 4. Os números N_θ e $N_\phi(\theta)$ são escolhidos para dar o número total de ângulos N_Ω tão perto do valor definido no arquivo de entrada quanto possível. N_Ω é calculado como:

$$N_\Omega = \sum_{i=1}^{N_\theta} N_\phi(\theta_i) \tag{4.53}$$

A distribuição dos ângulos é baseada em regras empíricas que tentam produzir ângulos sólidos iguais:

$$\delta\Omega^l = \frac{4\pi}{N_\Omega} \tag{4.54}$$

O número de bandas θ é:

$$N_\theta = 1{,}17 N_\Omega{}^{1/2.26} \tag{4.55}$$

arredondado para o número inteiro par mais próximo. O número de ângulos ϕ em cada banda é:

$$N_\phi(\theta) = \max\{4; 0{,}5 N_\Omega[\cos(\theta^-) - \cos(\theta^+)]\} \tag{4.56}$$

arredondado para o número inteiro mais próximo que seja divisível por 4. As variáveis θ^- e θ^+ são os limites inferior e superior da banda θ, respectivamente. A discretização é simétrica em relação aos planos x = 0, y = 0 e z = 0.

Para a discretização espacial, a malha utilizada para resolver a RTE é a mesma usada para resolver as equações de conservação. Para se obter a forma discretizada da RTE, o domínio computacional e a esfera unitária são divididos conforme explicado anteriormente. Em cada célula da malha uma equação

discretizada é derivada integrando a equação (3.42) no volume da célula ijk e no ângulo de controle $\delta\Omega^{l}$, para se obter:

$$\int_{\delta\Omega^{l}}\int_{V_{ijk}} \mathbf{s}'.\nabla\mathbf{I}(\mathbf{x}',\mathbf{s}')\mathrm{d}\mathbf{x}'\mathrm{d}\mathbf{s}' = \int_{\delta\Omega^{l}}\int_{V_{ijk}} \kappa(\mathbf{x}')[\mathbf{I}_{b}(\mathbf{x}')-\mathbf{I}(\mathbf{x}',\mathbf{s}')]\mathrm{d}\mathbf{x}'\mathrm{d}\mathbf{s}' \tag{4.57}$$

A integral de volume no lado esquerdo da equação é substituída por uma integral de superfície nas faces da célula usando o teorema do divergente.

Supondo que a intensidade da radiação $\mathbf{I}(\mathbf{x},\mathbf{s})$ é constante em cada uma das faces da célula, a integral de superfície pode ser aproximada por uma somatória nas faces da célula. Admitindo além disso, que $\mathbf{I}(\mathbf{x},\mathbf{s})$ é constante dentro do volume V_{ijk} e no ângulo $\delta\Omega^{l}$ e que $\kappa(\mathbf{x}')$ e $\mathbf{I}_{b}(\mathbf{x}')$ são constantes dentro do volume V_{ijk}, obtém-se:

$$\sum_{m=1}^{6} A_{m}I_{m}^{l}\int_{\Omega^{l}}\mathbf{s}'.\mathbf{n}_{m}\mathrm{d}\mathbf{s}' = \kappa_{ijk}\left[I_{b,ijk}-I_{ijk}^{l}\right]V_{ijk}\delta\Omega^{l} \tag{4.58}$$

onde I_{ijk}^{l} é a intensidade de radiação na direção l, I_{m}^{l} é a intensidade de radiação na face m da célula, $I_{b,ijk}$ é a intensidade de radiação de corpo negro na célula, $\delta\Omega^{l}$ é o ângulo sólido correspondente à direção l, V_{ijk} é o volume da célula ijk, A_{m} é a área da face m da célula e $\mathbf{n}_{m}$ é o vetor normal unitário da face m da célula.

Enquanto a intensidade é considerada constante dentro do ângulo $\delta\Omega^{l}$, a sua direção cobre exatamente o ângulo $\delta\Omega^{l}$. A intensidade de radiação incidente local é:

$$U_{ijk} = \sum_{l=1}^{N_{\Omega}} I_{ijk}^{l}\delta\Omega^{l} \tag{4.59}$$

Em coordenadas cartesianas, os vetores normais $\mathbf{n}_m$ são os vetores de base do sistema de coordenadas e as integrais no ângulo sólido não dependem da coordenada física, mas apenas da direção. Essas integrais são escritas como

$$D_m^l = \int_{\Omega^l} (\mathbf{s}' . \mathbf{n}_m) d\mathbf{s}' \tag{4.60}$$

e a equação (4.58) fica

$$\sum_{m=1}^{6} A_m I_m^l D_m^l = \kappa_{ijk} \left[I_{b,ijk} - I_{ijk}^l \right] V_{ijk} \delta\Omega^l \tag{4.61}$$

As intensidades nos contornos da célula, I_m^l, são calculadas utilizando o esquema “upwind” de primeira ordem. Se o espaço físico for varrido na direção $\mathbf{s}^l$, a intensidade I_{ijk}^l pode ser obtida diretamente a partir de uma equação algébrica. Isto faz com que a solução numérica do método de volumes finitos seja muito rápida.

As intensidades nas faces da célula, I_m^l, que aparecem no lado esquerdo da equação (4.61) são calculadas utilizando um esquema “upwind” de primeira ordem. Considere-se, por exemplo, um ângulo de controle tendo um vetor de direção $\mathbf{s}$. Se a radiação está viajando na direção x positiva, ou seja, $\mathbf{s} . \mathbf{i} \geq 0$, a intensidade no lado “upwind”, I_{xu}^l é considerada como sendo a intensidade da célula vizinha, $I_{i-1,jk}^l$, e a intensidade no lado “downwind” é a intensidade na própria célula I_{ijk}^l, a qual é desconhecida. A RTE pode então ser escrita usando as intensidades “upwind” I_{xu}^l, I_{yu}^l e I_{zu}^le a intensidade na própria célula I_{ijk}^l:

$$\begin{aligned} &A_x I_{xu}^l D_{xu}^l + A_x I_{ijk}^l D_{xd}^l + A_y I_{yu}^l D_{yu}^l + A_y I_{ijk}^l D_{yd}^l + A_z I_{zu}^l D_{zu}^l \\ &+ A_z I_{ijk}^l D_{zd}^l = \kappa_{ijk} I_{b,ijk} V_{ijk} \delta\Omega^l + \kappa_{ijk} I_{ijk}^l V_{ijk} \delta\Omega^l \end{aligned} \tag{4.62}$$

onde os termos D no lado esquerdo da igualdade são as integrais definidas em (4.60) avaliadas nos lados “upwind” e “downwind” da célula. As integrais nos ângulos sólidos podem ser calculadas analiticamente por:

$$
\begin{aligned}
D_x^l &= \int_{\Omega^l} (s^l . i) d\Omega \\
&= \int_{\delta\phi} \int_{\delta\theta} (s^l . i) \operatorname{sen}\theta \, d\theta d\phi \\
&= \int_{\delta\phi} \int_{\delta\theta} \cos\phi \operatorname{sen}\theta \operatorname{sen}\theta \, d\theta d\phi \\
&= \frac{1}{2}(\operatorname{sen}\phi^+ - \operatorname{sen}\phi^-)[\Delta\theta - (\cos\theta^+ \operatorname{sen}\theta^+ - \cos\theta^- \operatorname{sen}\theta^-)]
\end{aligned}
\tag{4.63}
$$

$$
\begin{aligned}
D_y^l &= \int_{\Omega^l} (s^l . j) d\Omega \\
&= \int_{\delta\phi} \int_{\delta\theta} (s^l . j) \operatorname{sen}\theta \, d\theta d\phi \\
&= \int_{\delta\phi} \int_{\delta\theta} \operatorname{sen}\phi \operatorname{sen}\theta \operatorname{sen}\theta \, d\theta d\phi \\
&= \frac{1}{2}(\cos\phi^- - \cos\phi^+)[\Delta\theta - (\cos\theta^+ \operatorname{sen}\theta^+ - \cos\theta^- \operatorname{sen}\theta^-)]
\end{aligned}
\tag{4.64}
$$

$$
\begin{aligned}
D_z^l &= \int_{\Omega^l} (s^l . k) d\Omega \\
&= \int_{\delta\phi} \int_{\delta\theta} (s^l . k) \operatorname{sen}\theta \, d\theta d\phi \\
&= \int_{\delta\phi} \int_{\delta\theta} \cos\theta \operatorname{sen}\theta \, d\theta d\phi \\
&= \frac{1}{2}\Delta\phi[(\operatorname{sen}\theta^+)^2 - (\operatorname{sen}\theta^-)^2]
\end{aligned}
\tag{4.65}
$$

$$\delta\Omega^{l} = \int_{\Omega^{l}} d\Omega = \int_{\delta\phi}\int_{\delta\theta} \operatorname{sen}\theta \, d\theta d\phi \tag{4.66}$$

A equação (4.62) é escrita em função da intensidade I^{l}_{ijk} como:

$$a^{l}_{ijk} I^{l}_{ijk} = a^{l}_{x} I^{l}_{xu} + a^{l}_{y} I^{l}_{yu} + a^{l}_{z} I^{l}_{zu} + b^{l}_{ijk} \tag{4.67}$$

onde:

$$a^{l}_{ijk} = A_{x}\left|D^{l}_{x}\right| + A_{y}\left|D^{l}_{y}\right| + A_{z}\left|D^{l}_{z}\right| + \kappa_{ijk} V_{ijk} \delta\Omega^{l} \tag{4.68}$$

$$a^{l}_{x} = A_{x}\left|D^{l}_{x}\right| \tag{4.69}$$

$$a^{l}_{y} = A_{y}\left|D^{l}_{y}\right| \tag{4.70}$$

$$a^{l}_{z} = A_{z}\left|D^{l}_{z}\right| \tag{4.71}$$

$$b^{l}_{ijk} = \kappa_{ijk} I_{b,ijk} V_{ijk} \delta\Omega^{l} \tag{4.72}$$

Aqui **i**, **j** e **k** são os vetores de base do sistema de coordenadas Cartesiano, e θ^{+}, θ^{-}, ϕ^{+} e ϕ^{-} são os limites superior e inferior do ângulo de controle nas direções polar e azimutal respectivamente, e $\Delta\theta = \theta^{+} - \theta^{-}$ e $\Delta\phi = \phi^{+} - \phi^{-}$.

O método de solução da equação (4.62) baseia-se numa sequência de marcha explícita. O sentido de marcha depende da direção de propagação da intensidade de radiação. À medida que a marcha é feita na direção "downwind", as intensidades "upwind" em todas as três direções espaciais são conhecidas, e a intensidade I^{l}_{ijk} pode ser resolvida diretamente a partir de equações algébricas.

Com relação às condições de contorno, os contornos abertos são tratados como paredes negras, em que a intensidade de entrada é a intensidade de corpo negro à temperatura ambiente.

4.9 Método da solução numérica

Em uma dada célula da malha no enésimo passo de tempo, tem-se a massa específica, ρ^n, frações mássicas de espécies agrupadas, Z_α^n, vetor velocidade, $\mathbf{u}^n$, energia de estagnação por unidade de massa, $\mathcal{H}^n$ e a pressão de fundo, p_0^n. A temperatura é encontrada a partir da equação de estado. Estas variáveis são avançadas no tempo usando um esquema preditor / corretor de segunda ordem explícito. O procedimento básico é o seguinte:

Preditor

1. Estima-se ρ, Z_α e p_0 no próximo passo de tempo com o método de Euler explícito. A massa específica, por exemplo, é estimada por:

$$\frac{\rho^* - \rho^n}{\delta t} + \nabla . \rho^n \mathbf{u}^n = 0 \tag{4.73}$$

   O asterisco indica uma estimativa de primeira ordem no passo de tempo seguinte. Note-se que o termo fonte é dividido no tempo, como discutido abaixo.
2. Calcula-se a temperatura T^* a partir da equação de estado.
3. Calcula-se o divergente da velocidade $(\nabla . \mathbf{u})^*$ a partir da equação (3.27) usando as quantidades termodinâmicas estimadas. Note-se o uso de parêntesis para realçar o fato de que uma estimativa do campo de velocidades no próximo passo de tempo ainda não foi calculada, somente o seu divergente.
4. Resolve-se a equação de Poisson para o termo de pressão:

$$\nabla^2 \mathcal{H}^n = -\frac{(\nabla . \mathbf{u})^* - \nabla . \mathbf{u}^n}{\delta t} - \nabla . \mathbf{F}^n \tag{4.74}$$

5. Estima-se a velocidade no próximo passo de tempo.

$$\frac{\mathbf{u}^{*}-\mathbf{u}^{\mathrm{n}}}{\delta \mathrm{t}}+\mathbf{F}^{\mathrm{n}}+\nabla \mathcal{H}^{\mathrm{n}}=0 \tag{4.75}$$

Note-se que este procedimento garante que o divergente do campo de velocidade estimado, $\nabla.\mathbf{u}^{*}$, é identicamente igual ao divergente da velocidade que é derivado das quantidades termodinâmicas estimadas, $(\nabla.\mathbf{u})^{*}$, no passo 3.

6. Verifica-se se o passo de tempo $\delta \mathrm{t}$ satisfaz a condição de estabilidade

$$\delta \mathrm{t} \max\left(\frac{|\mathrm{u}|}{\delta \mathrm{x}}, \frac{|\mathrm{v}|}{\delta \mathrm{y}}, \frac{|\mathrm{w}|}{\delta \mathrm{z}}\right)<1 \tag{4.76}$$

Se o passo de tempo for muito grande, ele é reduzido para satisfazer a condição de estabilidade e o procedimento retorna ao início do passo de tempo. Se o critério de estabilidade é satisfeito, o procedimento continua para o passo do corretor.

Corretor

1. Corrige-se a massa específica no próximo passo de tempo:

$$\frac{\rho^{**}-\frac{1}{2}\left(\rho^{\mathrm{n}}+\rho^{*}\right)}{\delta \mathrm{t}/2}+\nabla.\rho^{*}\mathbf{u}^{*}=0 \tag{4.77}$$

As frações mássicas das espécies agrupadas e a pressão de fundo são corrigidas de forma similar.

2. Calcula-se a temperatura T^{**} a partir da equação de estado.
3. Divisão de tempo para termos fonte de massa: após o passo do corretor para o esquema de transporte, termos fonte são aplicados aos escalares (para as reações químicas e para as partículas Lagrangeanas). Os termos fonte são avaliados utilizando os resultados do esquema de transporte do escalar corrigido. Por exemplo,

$$\frac{(\rho \mathbf{Y}_i)^{n+1} - (\rho \mathbf{Y}_i)^{**}}{\delta t} = \dot{m}_i'''(\mathbf{Y}^{**}, T^{**}) \tag{4.78}$$

4. Com a massa específica e composição atualizadas, calcula-se a temperatura final T^{n+1} a partir da equação de estado.
5. Calcula-se o divergente $(\nabla . \mathbf{u})^{n+1}$ a partir das quantidades termodinâmicas corrigidas.
6. Calcula-se a pressão usando as quantidades estimadas,

$$\nabla^2 \mathcal{H}^* = -\frac{(\nabla . \mathbf{u})^{n+1} - \frac{1}{2}(\nabla . \mathbf{u}^* + \nabla . \mathbf{u}^n)}{\delta t/2} - \nabla . \mathbf{F}^* \tag{4.79}$$

7. Corrige-se a velocidade no próximo passo de tempo.

$$\frac{\mathbf{u}^{n+1} - \frac{1}{2}(\mathbf{u}^* + \mathbf{u}^n)}{\delta t/2} + \mathbf{F}^* + \nabla \mathcal{H}^* = 0 \tag{4.80}$$

Note-se que o divergente do campo de velocidades corrigido é identicamente igual ao divergente que foi calculado no passo 5.

4.10 Limitadores de fluxo

Um limitador de fluxo é um esquema de interpolação para definir os fluxos de massa nas faces da célula. A interpolação linear simples dos dados de escalares centrados nas células para a face da célula resulta em um esquema de diferenças centrais. Tais regimes puramente centrais são conhecidos por gerar níveis intoleráveis de erro de dispersão levando a resultados não físicos, tais como massas específicas negativas ou frações mássicas fora do intervalo [0,1]. Para resolver este problema, o WFDS se baseia em dois esquemas: um limitador de fluxo que lida com

a maior parte do problema e um corretor de fluxo que acrescenta uma quantidade mínima de difusão numérica para manter a estabilidade.

Para a velocidades de escoamento uniforme, uma propriedade fundamental da solução exata para as equações que governam o transporte escalar é que a variação total do campo escalar (a soma dos valores absolutos das diferenças do escalar entre células vizinhas) ou é preservada ou diminuída (nunca aumentada). Em outras palavras, não são criados novos extremos. Esquemas numéricos que preservam essa propriedade são chamados de “total variation diminishing” (TVD). A importância prática da utilização de um esquema TVD para a modelagem de incêndios é que tal esquema é capaz de acompanhar com precisão a estrutura de vórtices em chamas turbulentas e não desenvolver zonas de reação espúrias.

O WFDS emprega dois esquemas TVD de segunda ordem para o transporte escalar, sendo que para o LES é recomendado o Superbee (ROE, 1986), pois ele preserva com mais precisão a variação do escalar para soluções com malhas grosseiras, que não se espera que seja suave.

4.11 Condições de contorno para a temperatura, fração mássica de espécies, e massa específica

A temperatura da fase gasosa, as frações mássicas das espécies, e a massa específica são calculadas no centro de cada célula da malha. Em um contorno exterior, esses valores têm de ser calculados na face da célula que cai na interface do contorno. Em geral, a temperatura no contorno, T_f, é calculada em primeiro lugar, seguido das frações mássicas das espécies, $Z_{\alpha,f}$, seguido pela massa específica, ρ_f. A massa específica é normalmente determinada a partir da equação de estado:

$$\rho_f = \frac{p_0}{RT_f \sum_\alpha \left(Z_{\alpha,f}/W_\alpha\right)} \tag{4.81}$$

onde p_0 é a pressão de fundo da fase gasosa. Quando necessário, o valor no contorno é linearmente extrapolado uma metade de uma célula da malha para a célula fantasma para uso pelo solucionador da fase gasosa.

Contornos abertos: O termo aberto denota um limite exterior não sólido do domínio computacional. Gases circulam livremente para dentro e para fora. Nesses contornos, a temperatura e as frações mássicas das espécies assumem seus respectivos valores exteriores se o fluxo é de entrada, e assumem os respectivos valores da célula adjacente ao contorno se o fluxo é de saída. Esta é uma condição de contorno “upwind” simples. Esta é a condição de contorno utilizada em todo o domínio computacional, exceto pela interface inferior da vegetação que é adiabática.

4.12 Dados de entrada do modelo numérico

Simulações computacionais foram realizadas para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC) e Alta Floresta (MT). Os experimentos são descritos no capítulo 6.

Para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC), foram realizadas quatro simulações e para os experimentos de Alta Floresta (MT) foram realizadas outras quatro. Os experimentos de Alta Floresta foram realizados dentro da floresta, em condições mais realistas que os de Cruzeiro do Sul.

A validação das simulações numéricas foram feitas comparando as taxas medida e calculada da propagação do incêndio (ROS, na sigla em inglês). A ROS é uma variável muito importante, uma vez que é o resultado dos processos acoplados de energia gerada pela combustão da fase gasosa, transferência de calor por convecção e por radiação para a vegetação, e a degradação térmica resultante da vegetação que pode criar vapor de combustível adicional para posterior combustão.

O modelo numérico exige certo número de propriedades térmicas e físicas para a fase gasosa e para o combustível vegetal. As propriedades requeridas para o combustível vegetal estão listadas na Tabela 4.2 (experimentos de Cruzeiro do Sul – AC) e na Tabela 4.3 (experimentos de Alta Floresta – MT), e podem ser classificadas como segue.

Tabela 4.2 – Valores de entrada para o modelo numérico – experimentos de Cruzeiro do Sul - AC.

	Símbolo	Unidade	Simulação Experimento #1	Simulação Experimento #4	Simulação Experimento #6	Simulação Experimento #8
Fase gasosa	Δh_c	kJ kg^{-1}	17.700	17.700	17.700	17.700
	χ_r		0,35	0,35	0,35	0,35
	χ_s		0,01	0,01	0,01	0,01
	T	°C	33,7	30,3	32,0	27,0
	Umidade	%	47,0	51,0	60,0	60,0
Vegetação	σ	m^{-1}	4.000	4.000	4.000	4.000
	χ_{char}		0,0987	0,1468	0,1886	0,1769
	$c_{p,v}$	kJ kg^{-1} °C^{-1}	=0,1 + 0,0037 Ts	=0,1 + 0,0037 Ts	=0,1 + 0,0037 Ts	=0,1 + 0,0037 Ts
	ρ_e	kg m^{-3}	650	650	650	650
	ρ_{bv}	kg m^{-3}	13,18	15,70	15,49	13,44
	T_s	°C	33,7	30,3	32,0	27,0
	M		0,1010	0,2224	0,1380	0,1698

Tabela 4.3 – Valores de entrada para o modelo numérico – experimentos de Alta Floresta - MT.

	Símbolo	Unidade	Simulação Experimento #1	Simulação Experimento #2	Simulação Experimento #3	Simulação Experimento #4
Fase gasosa	Δh_c	kJ kg^{-1}	17.700	17.700	17.700	17.700
	χ_r		0,35	0,35	0,35	0,35
	χ_s		0,01	0,01	0,01	0,01
	T	°C	34,1	32,1	30,0	30,9
	Umidade	%	27,0	31,0	34,5	36,0
Vegetação	σ_e	m^{-1}	4.000	4.000	4.000	4.000
	χ_{char}		0,3099	0,4461	0,2760	0,3793
	$c_{p,v}$	kJ kg^{-1} °C^{-1}	=0,1 + 0,0037 Ts	=0,1 + 0,0037 Ts	=0,1 + 0,0037 Ts	=0,1 + 0,0037 Ts
	ρ_e	kg m^{-3}	650	650	650	650
	ρ_{bv}	kg m^{-3}	13,34	12,24	16,45	14,49
	Ts	°C	34,1	32,1	30,0	30,9
	M		0,1438	0,1570	0,1396	0,1636

4.12.1 Propriedades da vegetação

Geometria: O modelo numérico representa a camada vegetal como um volume retangular e sua altura varia dependendo do local do experimento, como mostrado no capítulo 5.

Massa específica aparente: As equações do modelo matemático requerem a massa específica aparente da vegetação termicamente fina e seca (umidade zero). Uma estimativa para a massa específica da vegetação termicamente fina e seca pode ser obtida a partir da perda de massa seca medida Δm_{seca}, e o volume aparente estimado da camada vegetal, $\rho_{bv} = \Delta m_{seca}/V_{camada\ vegetal}$. Em todos os casos, é considerado que a vegetação é distribuída uniformemente por todo o volume retangular, de modo que a massa específica aparente é espacialmente independente. A massa específica aparente da camada vegetal varia dependendo do local do experimento, conforme relatado no capítulo 5.

Razão de compactação: A razão de compactação $\beta = \rho_{bv}/\rho_e$ é um parâmetro importante no arrasto e na transferência de calor por radiação. O seu valor depende da massa específica aparente ρ_{bv} e da massa específica do elemento combustível ρ_e.

4.12.2 Propriedades do elemento combustível

Massa específica: O valor de $\rho_e = 650\ kg\ m^{-3}$ foi utilizado para a massa específica do elemento combustível (JAYALAKSHMY; PHILIP, 2010).

Temperatura inicial: Foi considerado que a temperatura inicial dos elementos combustíveis é a mesma que a temperatura medida do ar.

Umidade (base seca): A umidade do elemento combustível foi definida como sendo a média da umidade medida a partir da camada vegetal de um dado experimento. Estas medições foram feitas em uma série de locais nos combustíveis termicamente finos.

Fração de conversão de material carbonizado: os valores da fração de conversão para material carbonizado são apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3 para todos os experimentos simulados, e foram calculados de acordo com a equação $\chi_{\mathrm{char}} = \frac{\mathrm{m_{e,char}}}{\mathrm{m_{e,v}}}$, onde $\mathrm{m_{e,char}}$ é a massa de material carbonizado para o elemento de combustível e $\mathrm{m_{e,v}}$ é a massa de vegetação seca e virgem.

Calor específico: A relação para o calor específico de vegetação virgem e seca é como relatado por Mell et al. (2009) e apresentado nas Tabelas 4.2 e 4.3.

Razão área superficial por volume: A razão área superficial por volume é $\sigma = 4.000\ \mathrm{m^{-1}}$.

A maioria das entradas do modelo para a fase gasosa são discutidos no capítulo 3. A entalpia de combustão $\Delta \mathrm{h_c} = 17{,}700\ \mathrm{kJ\ kg^{-1}}$ é a entalpia liberada por kg de combustível gasoso, e não por kg de combustível vegetal.

5 EXPERIMENTOS DE QUEIMA DE VEGETAÇÃO NA FLORESTA AMAZÔNICA

As experiências de queima da vegetação rasteira da Amazônia aqui relatadas foram realizadas em dois lugares diferentes: município de Cruzeiro do Sul no Acre e município de Alta Floresta no Mato Grosso (Figura 5.1). O local A é o município de Cruzeiro do Sul no Acre onde experimentos de laboratório foram realizados. O local B é o município de Alta Floresta no Mato Grosso onde foram realizados experimentos de campo.

Figura 5.1 – Localização dos experimentos.

O material da vegetação rasteira na floresta Amazônica é composto principalmente de folhas mortas, as quais foram utilizadas nos experimentos. A fim de melhor compreender os principais processos observados na ignição da vegetação rasteira da floresta amazônica e estudar a propagação do fogo, um conjunto de experimentos foi realizado no município de Cruzeiro do Sul próximo a um local onde um grupo de pesquisa realizava estudos de fogo em um desmatamento. O material da vegetação rasteira na área adjacente ao experimento principal foi recolhido e transportado para uma fazenda próxima, usada como uma base de pesquisa. Nessa fazenda o material vegetal foi espalhado em um campo para secagem e o solo foi limpo e trabalhado para se ter paralelismo e planicidade. Um conjunto de pequenos marcadores de ferro indicou o ponto central e uma circunferência de 1,3 m em torno dele. A Figura 5.2 mostra a propagação do fogo em um dos experimentos de laboratório no município de Cruzeiro do Sul. Em todos os experimentos o fogo foi iniciado no centro do material vegetal.

Figura 5.2 – Propagação do fogo em um dos experimentos de laboratório no município de Cruzeiro do Sul (AC).

O material foi coletado, pesado e espalhado dentro do perímetro marcado. Em seguida, a umidade da vegetação foi medida antes da ignição. A velocidade do vento foi medida durante a propagação do fogo por um anemômetro, e a sua direção

registrada. A ignição ocorreu no centro da circunferência, por meio de pequena quantidade de etanol colocada dentro de uma área de 10 cm de diâmetro.

O segundo conjunto de experimentos foi realizado no interior da floresta no Estado de Mato Grosso, município de Alta Floresta. Nove experimentos foram realizados para medir a taxa de propagação do incêndio. Quatro dos nove experimentos tiveram o material vegetal de uma área adjacente ao experimento de queima coletado, pesado, embalado, identificado e transportado para o centro de pesquisas do INPE em Cachoeira Paulista no Estado de São Paulo, onde o material vegetal foi seco em estufa, pesado e queimado para se determinar a porcentagem de material carbonizado. A temperatura e a umidade do ar e a altura da camada vegetal e sua umidade foram medidas no campo antes da ignição. A velocidade do vento foi medida no início dos experimentos e a distância de propagação do fogo em conjunto com a sua direção foram medidas em determinados momentos. A velocidade do vento foi medida por um anemômetro e a direção registrada. A ignição ocorreu por meio de pequena quantidade de etanol colocada dentro de uma área de 10 cm de diâmetro. A Figura 5.3 mostra um dos experimentos realizados em Alta Floresta (MT) onde já se percebe um anel de fogo formado (esquerda) ao lado da simulação do WFDS para esse mesmo experimento (direita). As Figuras 5.4, 5.5, 5.6, e 5.7 mostram a propagação do fogo em outros experimentos de Alta Floresta (MT) e a Figura 5.8 mostra uma área após a queima.

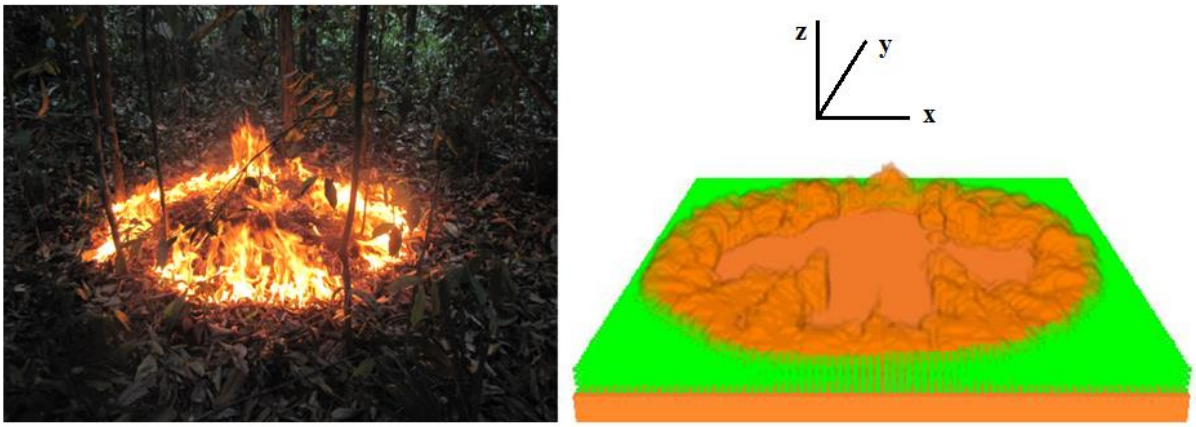

Figura 5.3 –Experimento de campo no município de Alta Floresta (MT) mostrando a propagação do fogo (esquerda) e simulação do incêndio no WFDS (direita).

Na Figura 5.4 folhas mortas, vegetação rasteira viva e troncos finos com ramos baixos compõem a vegetação de um dos experimentos. Na Figura 5.5 observa-se

que o fogo já passou por troncos finos sem queimá-los. À direita na figura nota-se uma descontinuidade na frente de fogo.

Figura 5.4 – Fase inicial de um experimento de campo no município de Alta Floresta (MT).

Figura 5.5 –Experimento de campo no município de Alta Floresta (MT) com descontinuidade na linha de fogo.

Na Figura 5.6 observa-se que a fumaça não é escura, o que mostra pouca presença de material particulado, e na Figura 5.7 observa-se também uma fumaça clara com uma frente de fogo com duas descontinuidades. A altura da chama não é maior que 30 cm.

Figura 5.6 – Experimento de campo no município de Alta Floresta (MT), onde se vê a heterogeneidade da camada vegetal.

Na Figura 5.8 a chama não foi alta o suficiente para queimar as folhas em ramos pendentes. As Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 mostram o processo de queima em três dos quatro experimentos de Alta Floresta. Após a queima total do material vegetal, o material carbonizado foi pesado no mesmo local, identificado e armazenado. Na Figura 5.10 observa-se que o material vegetal do experimento 2 possui pequenos gravetos além das folhas. Da mesma forma que na Figura 5.9, percebe-se pontos de combustão incandescente em região por onde o fogo já passou. Este processo de queima do material vegetal é um processo importante para a determinação da porcentagem de material carbonizado, o qual é um dos dados de entrada para as simulações com o WFDS.

Figura 5.7 – Frente de fogo descontínua em um experimento de campo no município de Alta Floresta (MT).

Figura 5.8 –Material carbonizado de um experimento de campo no município de Alta Floresta (MT).

Figura 5.9 – Material vegetal proveniente do experimento 1 do município de Alta Floresta (MT) sendo queimado.

Figura 5.10 – Material vegetal proveniente do experimento 2 do município de Alta Floresta (MT) sendo queimado.

Figura 5.11 – Material vegetal proveniente do experimento 3 do município de Alta Floresta (MT) sendo queimado.

A Tabela 5.1 lista as características do material vegetal utilizado nos experimentos de Alta Floresta (MT), enquanto que a Tabela 5.2 lista as referentes a Cruzeiro do Sul (AC). A umidade da camada vegetal é sempre base seca.

Tabela 5.1 – Dados do material vegetal dos experimentos de Alta Floresta (MT).

Experimento #	Altura da camada vegetal (m)	Temperatura (°C)	Umidade da camada vegetal (%)	Massa específica aparente (kg/m3)
1	0,05	34,1	14,38	13,34
2	0,05	32,1	15,70	12,24
3	0,05	30,0	13,96	16,45
4	0,05	30,9	16,36	14,49

Tabela 5.2 – Dados do material vegetal dos experimentos de Cruzeiro do Sul (AC).

Experimento #	Altura da camada vegetal (m)	Temperatura (°C)	Umidade da camada vegetal (%)	Massa específica aparente (kg/m3)
1	0,12	33,7	10,10	13,18
4	0,12	30,3	22,24	15,70
6	0,09	32,0	13,80	15,49
8	0,06	27,0	16,98	13,44

As Tabelas 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam, para os experimentos de campo de Alta Floresta (MT), a distância, direção e tempo medidos e a ROS calculada para a propagação do incêndio. Pelos dados apresentados, nota-se que as medidas não foram tomadas nem a distâncias iguais ou próximas, nem em direções iguais e nem em tempos iguais. Nota-se também que a quantidade de medidas tomadas em cada experimento é diferente, sendo que para o experimento #2 apenas quatro medidas foram tomadas e seu desvio padrão é comparativamente o maior. A ROS desse experimento varia de 0,04 a 0,17 m min^{-1}.

Tabela 5.3 – Distância, direção e tempo medidos e ROS calculada para a propagação do incêndio para o experimento #1 de Alta Floresta (MT).

Distância percorrida pelo incêndio (m)	Direção de propagação (graus)	Tempo (min)	ROS (m min^{-1})
1,04	0	6,3	0,17
1,15	30	6,3	0,18
1,25	90	6,3	0,20
1,47	130	6,3	0,23
1,75	170	6,3	0,28
1,50	190	6,3	0,24
1,12	300	6,3	0,18
		Média	0,21 +/- 0,04

Tabela 5.4 - Distância, direção e tempo medidos e ROS calculada para a propagação do incêndio para o experimento #2 de Alta Floresta (MT).

Distância percorrida pelo incêndio (m)	Direção de propagação (graus)	Tempo (min)	ROS (m min^{-1})
1,04	0	6,3	0,17
1,70	50	10,0	0,17
1,22	92	10,0	0,12
0,40	180	10,0	0,04
		Média	0,12 +/- 0,06

Tabela 5.5 - Distância, direção e tempo medidos e ROS calculada para a propagação do incêndio para o experimento #3 de Alta Floresta (MT).

Distância percorrida pelo incêndio (m)	Direção de propagação (graus)	Tempo (min)	ROS (m min^{-1})
2,29	0	5,2	0,44
1,70	40	5,2	0,33
1,55	98	4,2	0,37
0,91	180	4,0	0,24
1,29	240	4,0	0,32
1,52	300	4,0	0,38
		Média	0,35 +/- 0,07

Na Tabela 5.7, a primeira e segunda colunas de ROS são para distâncias percorridas pelo incêndio, de aproximadamente 1 m e 1,7 m respectivamente. A ROS é calculada dividindo a distância percorrida pelo incêndio pelo tempo necessário para percorrer aquela distância. A última coluna de ROS contém a media e o desvio padrão da ROS para todas as distâncias. O motivo da distinção entre as distâncias de 1 m e 1,7 m foi a de analisar se a ROS calculada pelas medidas de campo era sensível à distância percorrida pelo incêndio desde o seu início. A

conclusão é de que em alguns casos a diferença é significativa. O experimento #1 teve variação na ROS de quase 70% e o experimento 3, quase 40%. Além disso, percebe-se que o desvio padrão em todas as ROS é alto.

Tabela 5.6 - Distância, direção e tempo medidos e ROS calculada para a propagação do incêndio para o experimento #4 de Alta Floresta (MT).

Distância percorrida pelo incêndio (m)	Direção de propagação (graus)	Tempo (min)	ROS (m min^{-1})
1,85	0	8,0	0,23
1,18	110	5,0	0,24
1,12	180	5,0	0,22
1,12	240	6,0	0,19
1,63	260	6,1	0,27
1,85	310	6,1	0,30
		Média	0,24 +/- 0,04

Tabela 5.7 – Valores da ROS experimental para cada experimento de Alta Floresta (MT).

Experimento #	Distância percorrida pelo incêndio (m)	ROS do experimento (m min^{-1})	Distância percorrida pelo incêndio (m)	ROS do experimento (m min^{-1})	ROS do experimento para todas as distâncias (m min^{-1})
1	1,04	0,17	1,75	0,28	0,21 +/- 0,04
2	1,04	0,17	1,70	0,17	0,12 +/- 0,06
3	0,91	0,24	1,70	0,33	0,35 +/- 0,07
4	0,91	0,20	1,63	0,23	0,24 +/- 0,04

As Tabelas 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11 apresentam, para os experimentos de campo de Cruzeiro do Sul (AC), a distância, direção e tempo medidos e a ROS calculada para a propagação do incêndio. Para todos os experimentos a distância percorrida pelo incêndio foi de 0,65 m. A quantidade de medidas tomadas em cada

experimento foi fixada em quatro, correspondendo aos pontos cardeais (N = 0°, O = 90°, S = 180° e L = 270°).

Tabela 5.8 – Distância, direção e tempo medidos e ROS calculada para a propagação do incêndio para o experimento #1 de Cruzeiro do Sul (AC).

Distância percorrida pelo incêndio (m)	Direção de propagação (graus)	Tempo (min)	ROS ($m\ min^{-1}$)
0,65	0	4,5	0,15
0,65	90	3,8	0,17
0,65	180	4,2	0,15
0,65	270	2,9	0,22
		Média	0,17 +/- 0,03

Tabela 5.9 - Distância, direção e tempo medidos e ROS calculada para a propagação do incêndio para o experimento #4 de Cruzeiro do Sul (AC).

Distância percorrida pelo incêndio (m)	Direção de propagação (graus)	Tempo (min)	ROS ($m\ min^{-1}$)
0,65	0	4,7	0,14
0,65	90	4,7	0,14
0,65	180	5,1	0,13
0,65	270	3,5	0,19
		Média	0,15 +/- 0,02

Tabela 5.10 - Distância, direção e tempo medidos e ROS calculada para a propagação do incêndio para o experimento #6 de Cruzeiro do Sul (AC).

Distância percorrida pelo incêndio (m)	Direção de propagação (graus)	Tempo (min)	ROS (m min^{-1})
0,65	0	4,6	0,14
0,65	90	4,2	0,16
0,65	180	5,9	0,11
0,65	270	4,2	0,16
		Média	0,14 +/- 0,02

Tabela 5.11 - Distância, direção e tempo medidos e ROS calculada para a propagação do incêndio para o experimento #8 de Cruzeiro do Sul (AC).

Distância percorrida pelo incêndio (m)	Direção de propagação (graus)	Tempo (min)	ROS (m min^{-1})
0,65	0	5,6	0,12
0,65	90	5,0	0,13
0,65	180	5,3	0,12
0,65	270	4,4	0,15
		Média	0,13 +/- 0,01

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com as simulações no WFDS.

Qualquer simulação numérica de mecânica dos fluidos deve verificar se os resultados obtidos são independentes da malha utilizada. O processo de discretização das equações de transporte implica em erros proporcionais ao tamanho do volume de controle. Em geral, deve-se construir um arquivo de entrada usando uma malha relativamente grossa, e então gradualmente refinar a malha até que não se vejam diferenças importantes nos resultados. Isto é referido como um estudo de sensibilidade de malha.

No estudo de incêndios, são recomendados na literatura específica (MCGRATTAN et al., 2012; MORVAN e DUPUY, 2001) dois parâmetros guia para o tamanho da malha como discutidos a seguir.

Um critério que foi utilizado neste trabalho é o que considera que para as simulações envolvendo plumas, uma medida de quão bem o campo de escoamento é resolvido é dado pela expressão não dimensional $\mathrm{D}^*/\delta\mathrm{x}$, em que D* é o diâmetro característico do incêndio:

$$\mathrm{D}^* = \left(\frac{\dot{\mathrm{Q}}}{\rho_\infty \mathrm{c_p} \mathrm{T}_\infty \sqrt{\mathrm{g}}}\right)^{\frac{2}{5}} \tag{6.1}$$

Esta equação é mais usada para a fase inicial do incêndio de superfície, quando ainda não se formou o anel da frente de fogo. Quanto menor for o diâmetro característico do incêndio, menor será o tamanho que as células devem ter, a fim de resolver adequadamente o escoamento fluido e a dinâmica do incêndio. O parâmetro $\delta\mathrm{x}$ é o tamanho nominal de uma célula da malha. O valor de $\mathrm{D}^*/\delta\mathrm{x}$ varia de 4 (malha grossa) a 16 (malha fina) (MCGRATTAN et al., 2012). A quantidade $\dot{\mathrm{Q}}$ é a taxa de liberação de calor do incêndio. Se esta taxa muda ao longo do tempo, deve-se considerar a mudança correspondente na resolução da malha. Na determinação do valor do diâmetro característico do incêndio neste trabalho utilizou-

se o valor médio da taxa de liberação de calor. A quantidade $D^*/\delta x$ pode ser pensada como o número de células computacionais que abrangem o diâmetro característico do incêndio (não necessariamente o físico). Quanto mais células abrangem o incêndio, melhor a precisão do cálculo. É útil avaliar a qualidade da malha em termos deste parâmetro adimensional em vez de um tamanho de célula absoluto. Por exemplo, um tamanho de célula de 10 cm pode ser adequado para avaliar a propagação de fumaça através de um incêndio de tamanho considerável, mas pode não ser apropriado para estudar um pequeno incêndio. A Tabela 6.1 mostra os valores para os tamanhos das células de cada simulação de acordo com a expressão para D*.

Tabela 6.1 – Avaliação do tamanho da malha em função de D* para os experimentos de Alta Floresta (MT) e Cruzeiro do Sul (AC).

Experimento #	Malha grossa (cm)	Malha moderada (cm)	Malha Fina (cm)	Tamanho da célula (xyz) baseado em D* (cm)
1 – MT	6,39	2,56	1,60	1,25 x 1,25 x 1,25
2 – MT	4,26	1,70	1,06	1,25 x 1,25 x 1,25
3 – MT	7,10	2,84	1,78	1,25 x 1,25 x 1,25
4 – MT	6,03	2,41	1,51	1,25 x 1,25 x 1,25
1 – AC	8,62	3,45	2,15	1,0 x 1,0 x 1,0
4 – AC	6,57	2,63	1,64	1,0 x 1,0 x 1,0
6 – AC	7,30	2,92	1,82	1,0 x 1,0 x 1,0
8 – AC	4,70	1,88	1,17	1,0 x 1,0 x 1,0

Assim, por este critério, observa-se que a malha fina está próxima do valor utilizado.

O segundo parâmetro guia é usar o tamanho da célula da malha numérica pequeno o suficiente para resolver os gradientes de transferência de calor. Morvan e Dupuy (2001) usam uma regra baseada no comprimento ótico. Essa regra empírica fornece uma escala de comprimento representativa da transferência de calor por

radiação para se determinar o número de células na região que representa a vegetação e é dada por:

$$\delta_r = \frac{4}{\beta\sigma_e} \tag{6.2}$$

onde δ_r é o comprimento ótico. Considerou-se que para representar adequadamente os processos envolvidos com a vegetação, pelo menos três células devem estar dentro do comprimento ótico acima definido. A Tabela 6.2 mostra o comprimento ótico para cada caso simulado, o tamanho máximo da célula (equivalente a um terço do comprimento ótico) e o tamanho da malha utilizado.

Tabela 6.2 – Comprimento ótico, tamanho máximo da célula e tamanho da célula utilizado para as simulações dos experimentos de Alta Floresta (MT) e Cruzeiro do Sul (AC).

Experimento #	Comprimento ótico (cm)	Tamanho máximo da célula (cm)	Tamanho da célula (xyz) baseado em δ_r (cm)
1 – MT	4,9	1,6	1,25 x 1,25 x 1,25
2 – MT	5,3	1,8	1,25 x 1,25 x 1,25
3 – MT	4,0	1,3	1,25 x 1,25 x 1,25
4 – MT	4,5	1,5	1,25 x 1,25 x 1,25
1 – AC	4,9	1,6	1,0 x 1,0 x 1,0
4 – AC	4,1	1,4	1,0 x 1,0 x 1,0
6 – AC	4,2	1,4	1,0 x 1,0 x 1,0
8 – AC	4,8	1,6	1,0 x 1,0 x 1,0

Como pode ser observado, o tamanho da malha utilizada nas simulações numéricas está abaixo do valor máximo sugerido para cada simulação.

Tomando-se os valores obtidos com as recomendações acima, procedeu-se à verificação da independência de malha.

Um estudo de sensibilidade de malha foi realizado para os experimentos #1 e #3 de Mato Grosso (Tabela 6.3). Como pode ser observado, a ROS é a mesma para tamanhos de célula a partir de 1,25 cm. Nos experimentos simulados numericamente de Alta Floresta, a espessura da camada vegetal era de 5 cm. Assim, a camada vegetal representada por células de 2,5 cm de aresta tinha duas células em sua altura, chegando a oito células para o caso de aresta igual a 0,625 cm. Como o estudo de sensibilidade de malha mostrou que não há variação da ROS a partir de células de 1,25 cm de aresta, selecionou-se este tamanho de célula para a malha computacional.

Tabela 6.3 – Estudo de sensibilidade de malha para os experimentos #1 e #3 de Alta Floresta (MT).

Experimento #	Tamanho da célula (xyz) (cm)	ROS calculado na simulação (cm/min)
1	2,5 x 2,5 x 2,5	36
1	1,25 x 1,25 x 1,25	21
1	1,0 x 1,0 x 1,0	21
1	0,625 x 0,625 x 0,625	21
3	2,5 x 2,5 x 2,5	35
3	1,25 x 1,25 x 1,25	20
3	0,625 x 0,625 x 0,625	20

Desta forma, considerando os três critérios expostos acima, o tamanho da célula da malha computacional utilizado para as simulações dos experimentos de Alta Floresta é de 1,25 cm e para as de Cruzeiro do Sul é de 1 cm.

As simulações foram realizadas em um cluster com 36 processadores de 3,1 GHz cada um. O tempo físico simulado foi de 180 s em todos os casos. As Tabelas 6.4 (Cruzeiro do Sul – AC) e 6.5 (Alta Floresta – MT) apresentam o espaço em disco necessário, horas de CPU e número de passos de tempo para cada simulação.

Tabela 6.4 – Valores de espaço em disco necessário, horas de CPU e número de passos de tempo para cada simulação numérica – Cruzeiro do Sul (AC).

Simulação	Espaço em disco necessário (MB)	Horas de CPU (h)	Número de passos de tempo
Experimento 1	1.385	30,0	83.230
Experimento 4	2.180	36,8	116.940
Experimento 6	1.403	37,1	103.506
Experimento 8	1.221	34,5	107.723

Tabela 6.5 – Valores de espaço em disco necessário, horas de CPU e número de passos de tempo para cada simulação numérica – Alta Floresta (MT).

Simulação	Espaço em disco necessário (MB)	Horas de CPU (h)	Número de passos de tempo
Experimento 1	594	22,0	78.706
Experimento 2	638	19,0	92.278
Experimento 3	616	22,2	81.808
Experimento 4	642	23,2	75.100

As simulações descritas acima são detalhadas a seguir. Nas simulações, uma vez que o combustível virgem é totalmente pirolisado ele é removido do domínio computacional. Este procedimento pode afetar a transferência de calor no interior do leito de combustível alterando o escoamento do fluido através do termo de arrasto e os fluxos de calor por radiação através de alterações na absorção e emissão de radiação. Como a oxidação do material carbonizado não foi considerada no modelo matemático, preferiu-se remover o combustível queimado do domínio.

Em todas as simulações considerou-se que a temperatura inicial da fase gasosa e a temperatura de vegetação eram as mesmas. O fogo começa em um quadrado de 0,1 m no centro do domínio. Um elemento de combustível localizado numa célula a 0,35 m a partir do centro da vegetação na direção x, em y = 0 e na superfície da vegetação (direção z) foi utilizado em todos os casos simulados para se obter os resultados temporais da temperatura e dos divergentes dos fluxos de

radiação e convecção. As análises da perda de massa e taxa de perda de massa se aplicam para toda a vegetação do domínio, e não apenas para um elemento de combustível.

Nas seções que se seguem, as simulações dos experimentos de Alta Floresta (MT) são apresentadas primeiro para depois serem descritas as simulações dos experimentos de Cruzeiro do Sul (AC). Na sequencia, são apresentadas as variações paramétricas para o experimento #1 de Alta Floresta para as variáveis da vegetação: área superficial por volume, umidade, massa específica aparente e temperatura inicial. Também se avalia a importância da umidade do ar. A última análise comparativa se refere ao material carbonizado. Em todas as simulações apresentadas o material carbonizado é retirado do domínio computacional após o processo de pirólise, exceto nessa última em que ele é deixado no domínio.

A apresentação dos resultados e as discussões são feitas para todos os experimentos de Alta Floresta (MT) de forma agrupada e separadas dos relativos a Cruzeiro do Sul (AC) que também são feitas de forma agrupada. O motivo para isso é que os procedimentos de campo para a realização dos experimentos foi diferente para cada local. Além disso, em Cruzeiro do Sul os experimentos foram feitos fora da floresta. Em Alta Floresta, os experimentos foram feitos dentro da floresta.

6.1 Simulação dos experimentos de Alta Floresta (MT)

Das simulações para os quatro experimentos de campo em Alta Floresta (MT), a simulação para o experimento #2 foi a única que apresentou problemas numéricos e não conseguiu representar a condição real do incêndio. O que chama a atenção nos dados coletados no experimento são a mais alta fração de combustível vegetal virgem convertido em material carbonizado e a mais baixa de todas as massas específicas aparentes da vegetação, conforme mostrado na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Valores da fração de combustível vegetal virgem convertido em material carbonizado, massa específica aparente da vegetação e massa específica aparente de material combustível – Alta Floresta (MT).

Simulação	fração de combustível vegetal virgem convertido em material carbonizado	Massa específica aparente (kg/m^3)	Massa específica aparente de material combustível (kg/m^3)
Experimento 1	0,31	13,34	9,20
Experimento 2	0,45	12,24	6,73
Experimento 3	0,28	16,45	11,84
Experimento 4	0,38	14,49	8,98

A combinação desses dois valores causa uma menor produção de vapores combustíveis através do processo de pirólise, o que parece levar o modelo numérico a condições em que a simulação não é capaz de reproduzir o experimento. Além da menor produção de vapores combustíveis, a massa específica aparente tem influência direta na transmissão de calor por radiação, conforme equação (3.47), que é uma relação empírica e comprovada para uso em incêndios de arbustos (MELL et al., 2009). Nessa equação, o coeficiente de absorção é diretamente proporcional à massa específica aparente da vegetação virgem ($\rho_{bv,e}$). Assim, o valor baixo da massa específica aparente da vegetação diminui o valor do coeficiente de absorção que, por sua vez, diminui o divergente do fluxo de radiação ($\nabla . \overline{\mathbf{q}}_r$) conforme equação (3.49). Desta forma, as partículas submalha que representam a vegetação

absorvem menos energia, a qual é usada inicialmente para elevar a temperatura da partícula até o ponto em que se inicia a evaporação de sua umidade, e depois para finalizar os processos de evaporação dessa umidade e de pirólise. Como o coeficiente de emissão de radiação é igual ao coeficiente de absorção, a partícula emite menos radiação. Isso se aplica a todas as partículas que representam a vegetação no domínio computacional. Assim, a troca de calor por radiação, que é um fenômeno volumétrico ou integral, afeta a distribuição de temperatura na célula e consequentemente a taxa de perda de massa. A taxa de perda de massa e a temperatura afetam a pirólise, que é responsável pela geração dos produtos voláteis que reagirão com o ar de acordo com o modelo de combustão EDC. O modelo numérico ainda estabelece uma temperatura mínima para que ocorra a combustão no volume de controle, que também precisa do tempo característico para determinar se os reagentes estão misturados e a combustão pode ocorrer. Pode ocorrer, por erro de arredondamento ou numérico, que as condições necessárias para a combustão sejam satisfeitas em uma célula e não o sejam na célula ao lado, e essas mesmas condições podem ser satisfeitas num instante de tempo e em outro não. Esse processo pode acarretar em uma variação na energia recebida e emitida tanto pela fase gasosa como pelas partículas representativas da vegetação e todo o ciclo se realimenta gerando uma propagação do incêndio não homogênea, apesar dos parâmetros de entrada do modelo numérico serem homogêneos no espaço.

Entretanto, não se pode afirmar que o problema na representação numérica do experimento #2 é do modelo numérico ou das medições de campo. Pode ser que os parâmetros de entrada que afetam o processo de radiação térmica não tenham sido tomados com a precisão que deveriam. Isto pode ser visto no desvio padrão da ROS dos experimentos de Alta Floresta (MT).

Após a variação de muitos parâmetros de entrada para essa simulação, constatou-se que nenhum parâmetro sozinho foi capaz de produzir uma simulação coerente com o observado no campo. Entretanto, quando combinadas as alterações no valor da fração de combustível vegetal virgem convertido em material carbonizado (30% menos que o valor original) e na massa específica aparente da vegetação (10% a mais que o valor original), obteve-se uma simulação em que os resultados foram coerentes. A variação de 30% para menos na fração de combustível vegetal virgem convertido em material carbonizado e a variação de 10% a mais na massa específica aparente da vegetação foi para que seus valores se

aproximassem do valor medido no experimento #1, que foi o que apresentou a ROS simulada mais próxima à ROS medida em campo. Assim sendo, não se mostram na discussão que segue as curvas referentes ao experimento #2.

O histórico temporal para a perda de massa para a vegetação total no domínio dos experimentos #1, #3 e #4 é representado na Figura 6.1.

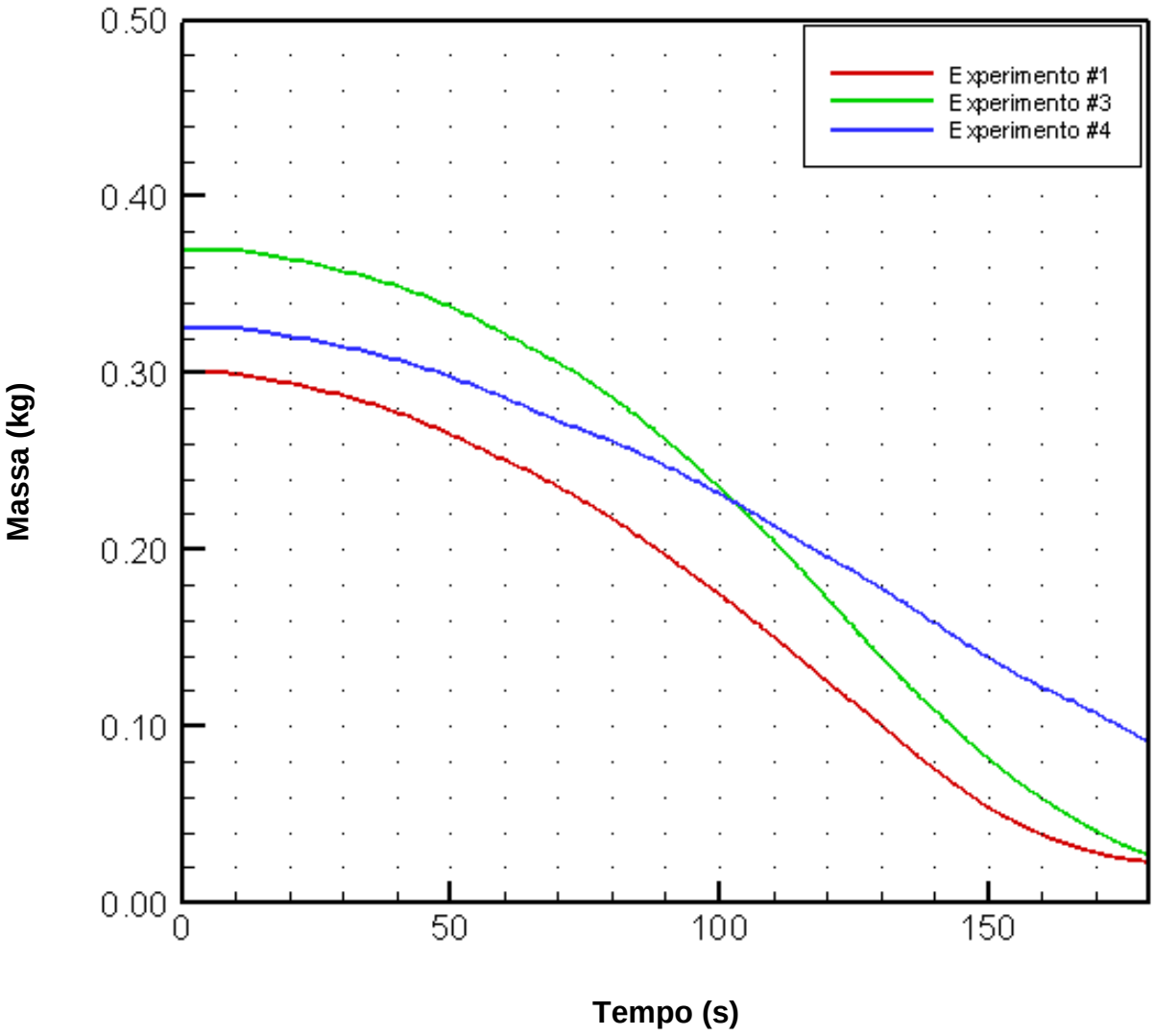

Figura 6.1 – Evolução temporal da perda de massa da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Alta Floresta (MT).

A massa seca inicial, massa final e a porcentagem de massa final em relação à massa seca inicial são conforme a Tabela 6.7. A relação massa final sobre massa seca inicial representa a massa seca total inicial que não foi queimada na simulação depois de 180 s de tempo real. A curva de perda de massa simulada para o experimento #4 tem formato ligeiramente diferente das curvas das simulações dos

experimentos #1 e #3, devido ao fato de que existe comparativamente uma maior massa seca que ainda não foi queimada após o tempo real de 180 s. Isso indica que a ROS calculada pela simulação numérica para esse experimento é menor que as demais, conforme pode ser constatado na Tabela 6.8.

Tabela 6.7 – Valores da massa seca inicial, massa final e relação massa final sobre massa seca inicial – Alta Floresta (MT).

Simulação	Massa seca inicial (kg)	Massa final (kg)	Massa final / massa seca inicial (%)
Experimento 1	0,30	0,02	8
Experimento 3	0,37	0,03	7
Experimento 4	0,33	0,09	28

Tabela 6.8 – Valores da ROS para os experimentos de Alta Floresta (MT).

Simulação	ROS medida no campo (m/min)	ROS da simulação numérica (m/min)
Experimento 1	0,21	0,21
Experimento 3	0,35	0,20
Experimento 4	0,24	0,18

O histórico temporal para a taxa de perda de massa para a vegetação total no domínio dos experimentos #1, #3 e #4 é representado na Figura 6.2. A taxa de perda de massa é a inclinação das curvas da Figura 6.1. Como pode ser visto na Figura 6.1 e Tabela 6.7, a massa final das simulações numéricas dos experimentos #1 e #3 são praticamente as mesmas, enquanto que a massa seca inicial do experimento #3 é maior. Isso faz com que a inclinação da curva do experimento #3 seja maior e isso é constatado pela análise da Figura 6.2. As curvas para as simulações numéricas dos experimentos #1 e #3 atingem o seu máximo entre 100 s e 140 s, quando a frente do fogo atinge os limites do domínio computacional.

A curva da taxa de perda de massa para a simulação numérica do experimento #4 apresenta um padrão diferente das demais curvas. Os vales na curva nos tempos 75 s, 120 s e 165 s se referem a um estreitamento da frente de fogo, com posterior

recuperação da largura original. Isso foi causado pelo modelo de pirólise adotado. Como comprovação, rodou-se o mesmo caso do experimento #4 onde se substituiu o modelo de Morvan pelo modelo de Arrhenius para a evaporação da umidade da vegetação e para a pirólise. O resultado está na Figura 6.3. Como pode ser observado, a taxa de perda de massa apresenta resultado bem diferente quando se usa o modelo de Arrhenius, e verificando-se a propagação do incêndio percebe-se que não houve variação na largura da frente de fogo. Entretanto, isso não quer dizer que o modelo de Arrhenius deva ser adotado ou que ele represente melhor a física do incêndio, mas apenas que para a condição do experimento #4 o modelo de pirólise de Morvan apresentou variações na espessura da frente de fogo. Como durante o experimento de campo não se prestou atenção a esse fato, não se pode dizer qual dos dois modelos representa melhor a física do problema.

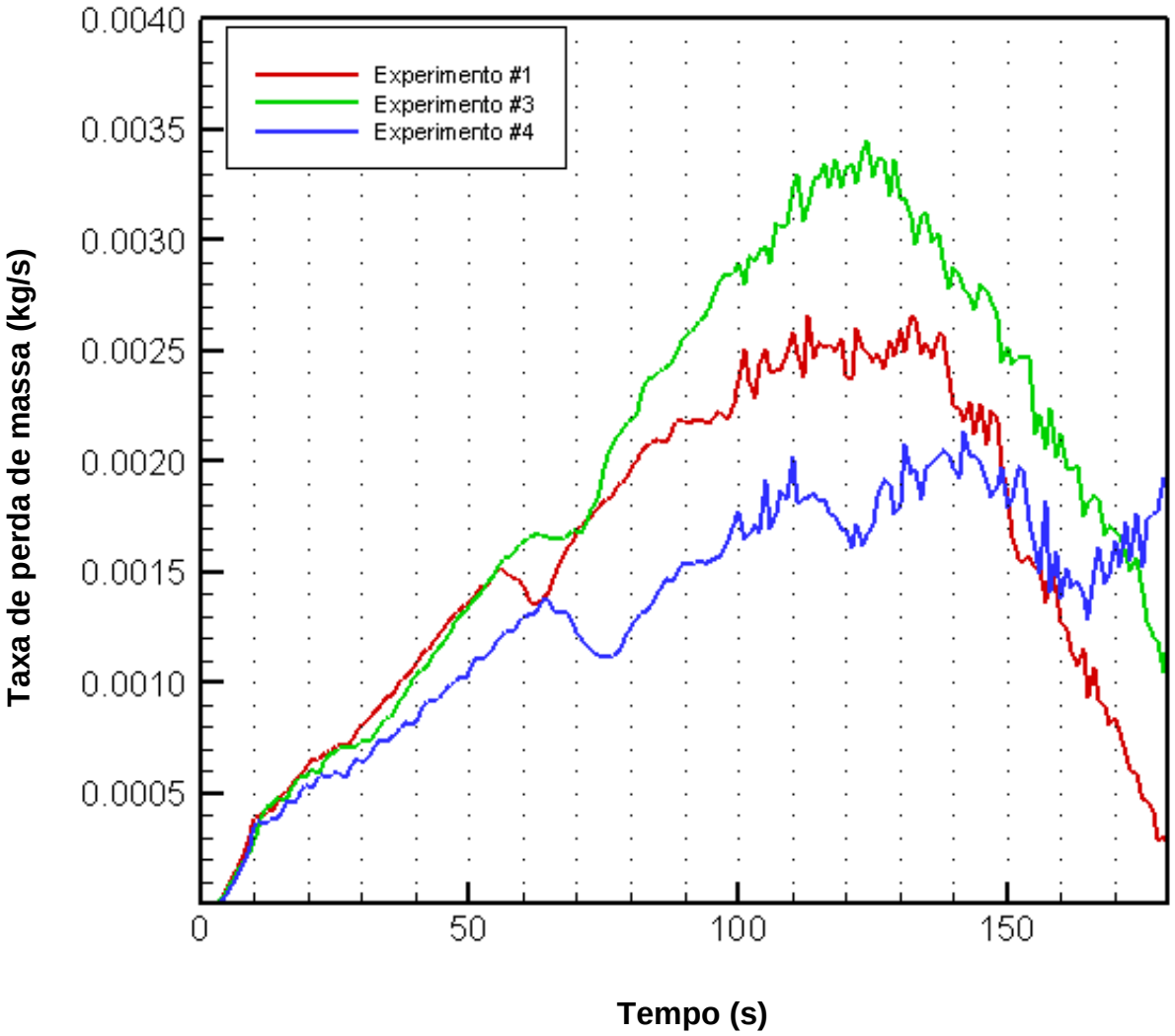

Figura 6.2 – Evolução temporal da taxa de perda de massa da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Alta Floresta (MT).

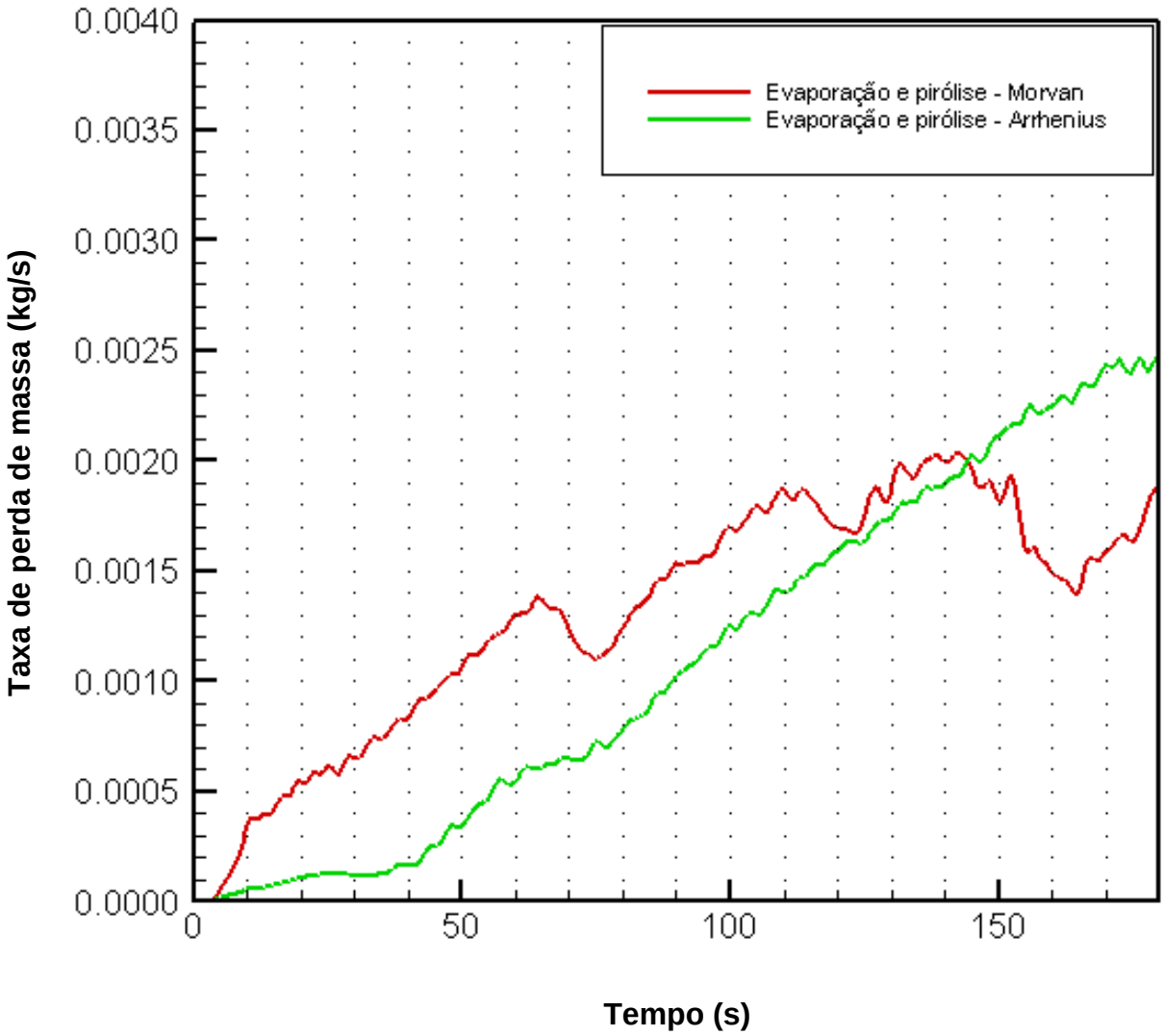

Figura 6.3 - Evolução temporal da taxa de perda de massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #4 de Alta Floresta (MT) com modelos de evaporação e pirólise de Morvan e Arrhenius.

O histórico temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional é representado na Figura 6.4. As temperaturas iniciais da vegetação e as durações dos processos de evaporação da umidade da vegetação e sua pirólise são conforme a Tabela 6.9.

Depois de cerca de 5 s para todas as simulações numéricas, a temperatura do elemento de combustível começa a subir lentamente devido à transferência de calor por radiação (Figuras 6.6 e 6.8). Neste momento, não há contribuição para o aumento da temperatura do elemento de combustível a partir da transferência de calor por convecção (Figuras 6.7 e 6.9).

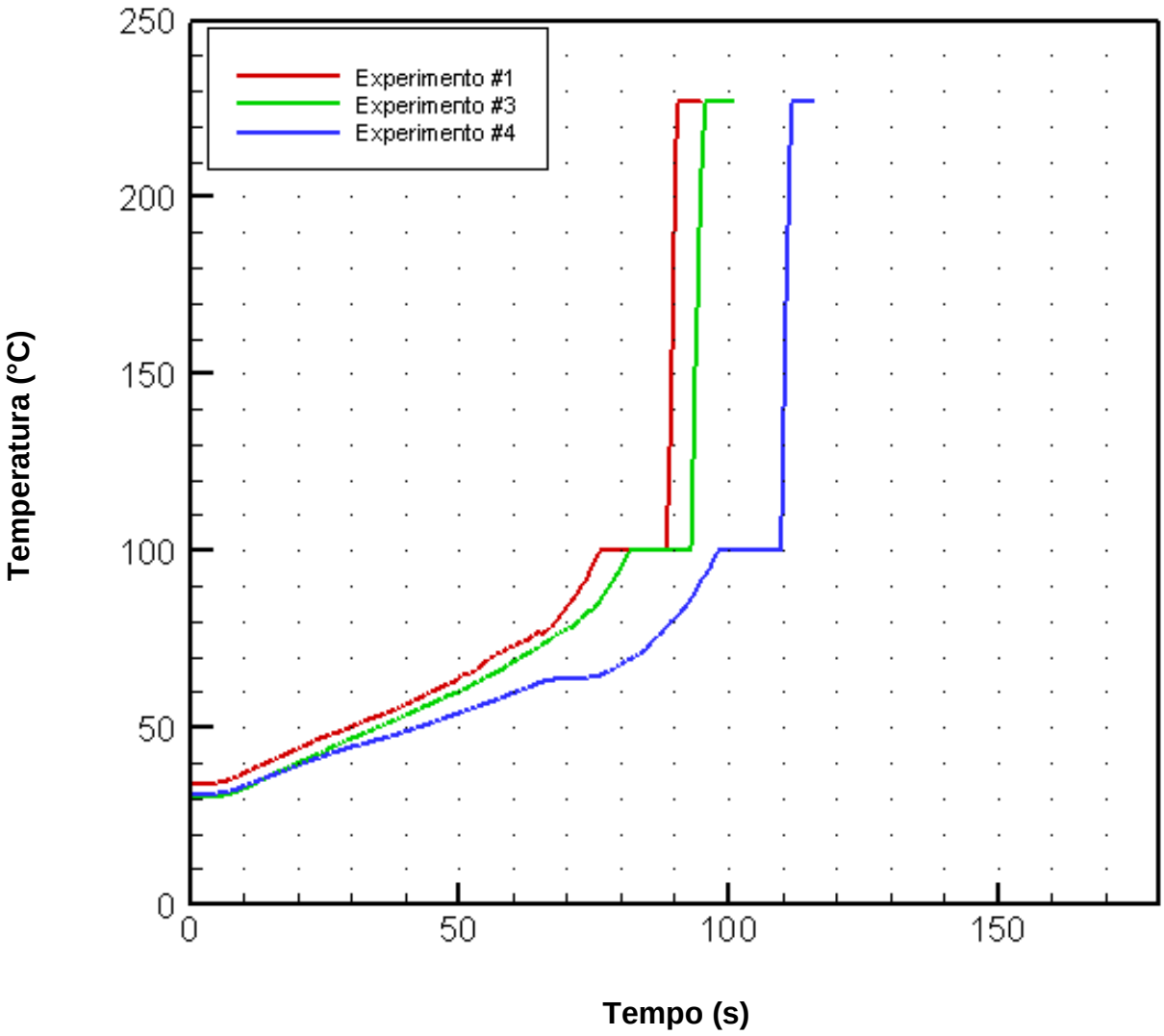

Figura 6.4 – Evolução temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Alta Floresta (MT).

Tabela 6.9 – Valores da temperatura inicial da vegetação, duração da evaporação da umidade e duração da pirólise para os experimentos de Alta Floresta (MT).

Simulação	Temperatura inicial da vegetação (°C)	Duração da evaporação da umidade da vegetação (s)	Duração da pirólise da vegetação (s)
Experimento 1	34,1	12	6
Experimento 3	30,0	11	8
Experimento 4	30,9	11	6

A duração da evaporação da umidade da vegetação é ligeiramente maior para o experimento #1 que para o experimento #3. Isso pode ser observado pelo pico das curvas do divergente do fluxo radiativo na Figura 6.6, cujos tempos coincidem com o fim do processo de evaporação da umidade da vegetação. Apesar do divergente do fluxo convectivo ser maior para o experimento #1 (Figura 6.7), ele não é suficiente para superar a diferença do divergente do fluxo radiativo.

Pela análise da Tabela 6.10, nota-se que a umidade da vegetação é a mesma para os experimentos #1 e #3, sendo maior para o experimento #4. Isso contribui para que a ROS seja menor nesse último caso, conforme pode ser constatado pela análise da Tabela 6.8.

Tabela 6.10 – Valores da umidade da vegetação para os experimentos de Alta Floresta (MT).

Simulação	Umidade da vegetação
Experimento 1	0,14
Experimento 3	0,14
Experimento 4	0,16

A duração da pirólise da vegetação é menor para o experimento #1 que para o experimento #3. Isso pode ser observado principalmente pelas curvas do divergente do fluxo convectivo na Figura 6.7. Na faixa de tempo em que ocorre a pirólise nas simulações numéricas dos experimentos #1 e #3, observa-se que o divergente do fluxo convectivo é maior para o caso do experimento #1. Pode-se ainda observar que para o experimento #3 há um fornecimento de energia por convecção para a fase gasosa durante o processo de pirólise, o que faz com que o tempo decorrido para terminar esse processo seja maior que o do experimento #1.

Para os experimentos #1, #3 e #4, a taxa no tempo de aumento da temperatura do elemento de combustível em análise é apresentada até 50 s de tempo real na Figura 6.5, que foi obtida a partir dos dados da Figura 6.4. Considerando para uma análise os dados das curvas desde o tempo 10 s até 45 s, e apesar das variações mostradas para dT/dt ao longo dessa faixa de tempo, pode-se aproximar as curvas por uma reta horizontal. Isso significa que a taxa de fornecimento de calor ao elemento de combustível é aproximadamente constante, para os três experimentos,

no intervalo de tempo de 10s a 45s. Observa-se, entretanto que a taxa de variação da temperatura, neste intervalo de tempo, é menor para o experimento #4. Isto ocorre devido ao menor fluxo liquido de radiação (Figura 6.8) para este experimento. É interessante notar que a evolução de todo o perfil de temperatura é dependente desta taxa de subida (Figura 6.4). Ou seja, o fluxo por radiação é decisivo para a subida da temperatura no elemento de combustível e de todo o processo de combustão.

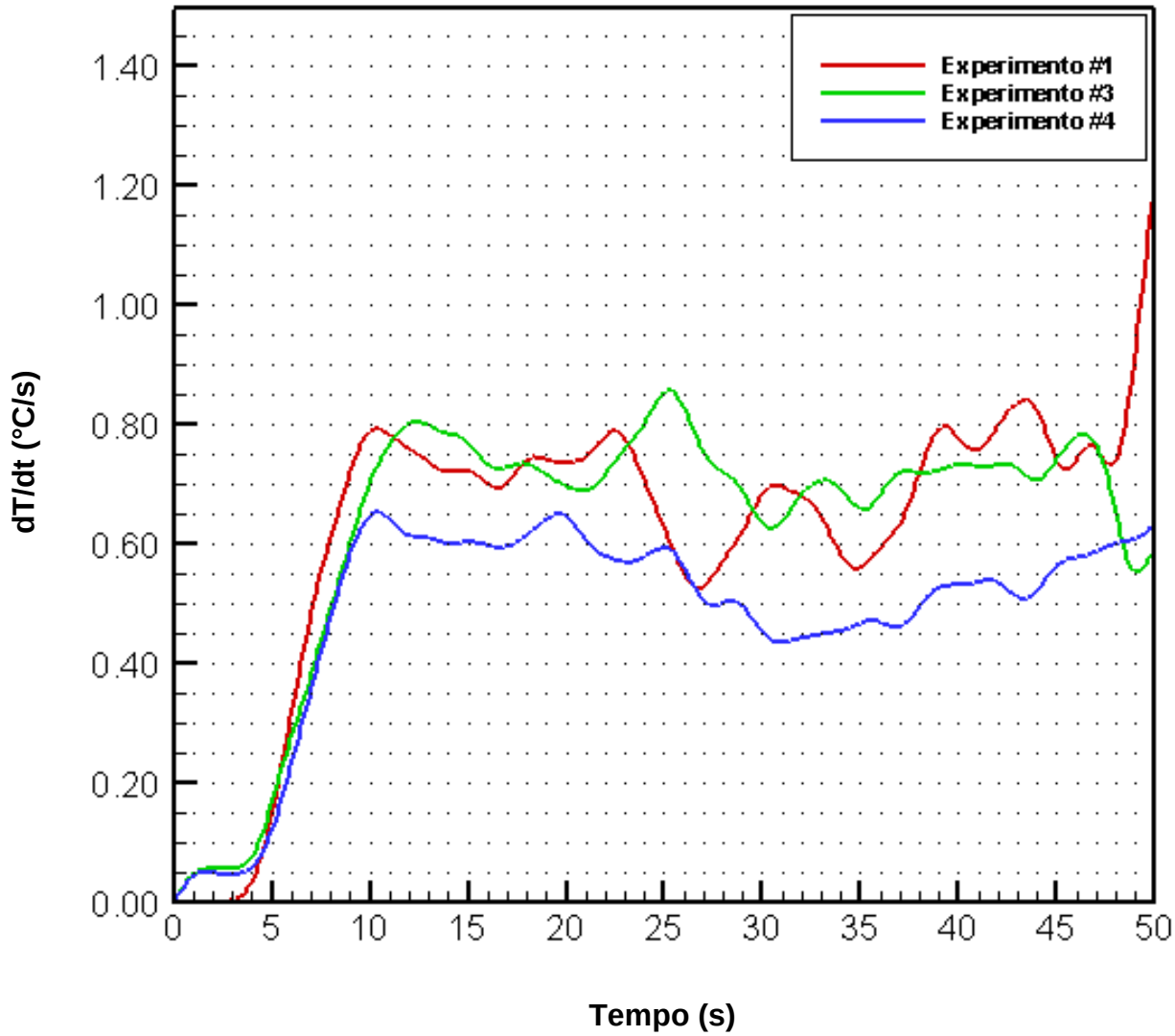

Figura 6.5 - Evolução da variação da temperatura no tempo para o ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Alta Floresta (MT).

Como pode ser observado pelas Figuras 6.6 e 6.7, o calor fornecido ao elemento de combustível sendo analisado no experimento #4 ocorre em um tempo

posterior ao dos experimentos #1 e #3. Isso faz com que a curva de temperatura para o experimento #4 esteja à direita das demais na Figura 6.4.

O padrão da curva de temperatura com o tempo merece uma explicação. Seu formato, com dois patamares que ocorrem a 100 ℃ e a 227 ℃, são devidos aos modelos de evaporação da vegetação e pirólise utilizados, conforme equações (3.57) e (3.58) que foram apresentadas quando da discussão das equações de conservação para a vegetação.

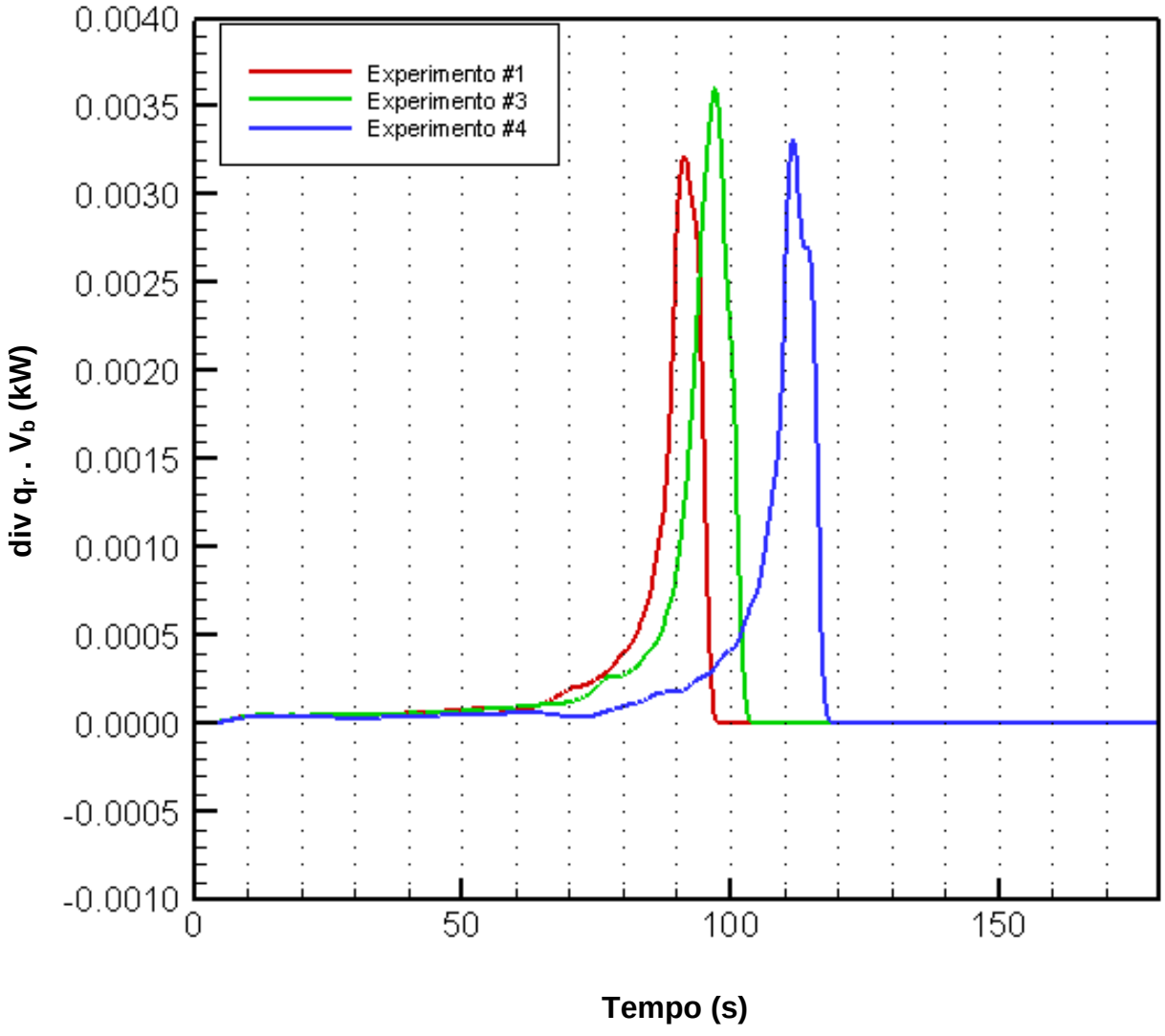

Figura 6.6 – Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Alta Floresta (MT).

Em todos os casos, após o processo de evaporação da umidade da vegetação ocorrer, a temperatura sobe rapidamente e logo se inicia o processo de pirólise.

Os históricos temporais dos divergentes dos fluxos radiativo e convectivo sobre o elemento de combustível são apresentados nas Figuras 6.6 e 6.7.

Pode ser visto a partir dos gráficos que o fluxo de calor por radiação é dominante sobre o fluxo de calor por convecção. Até quase a metade do processo de evaporação da umidade da vegetação, e para os três casos analisados, o fluxo líquido de calor por radiação é o único processo disponível para o aquecimento do elemento de combustível.

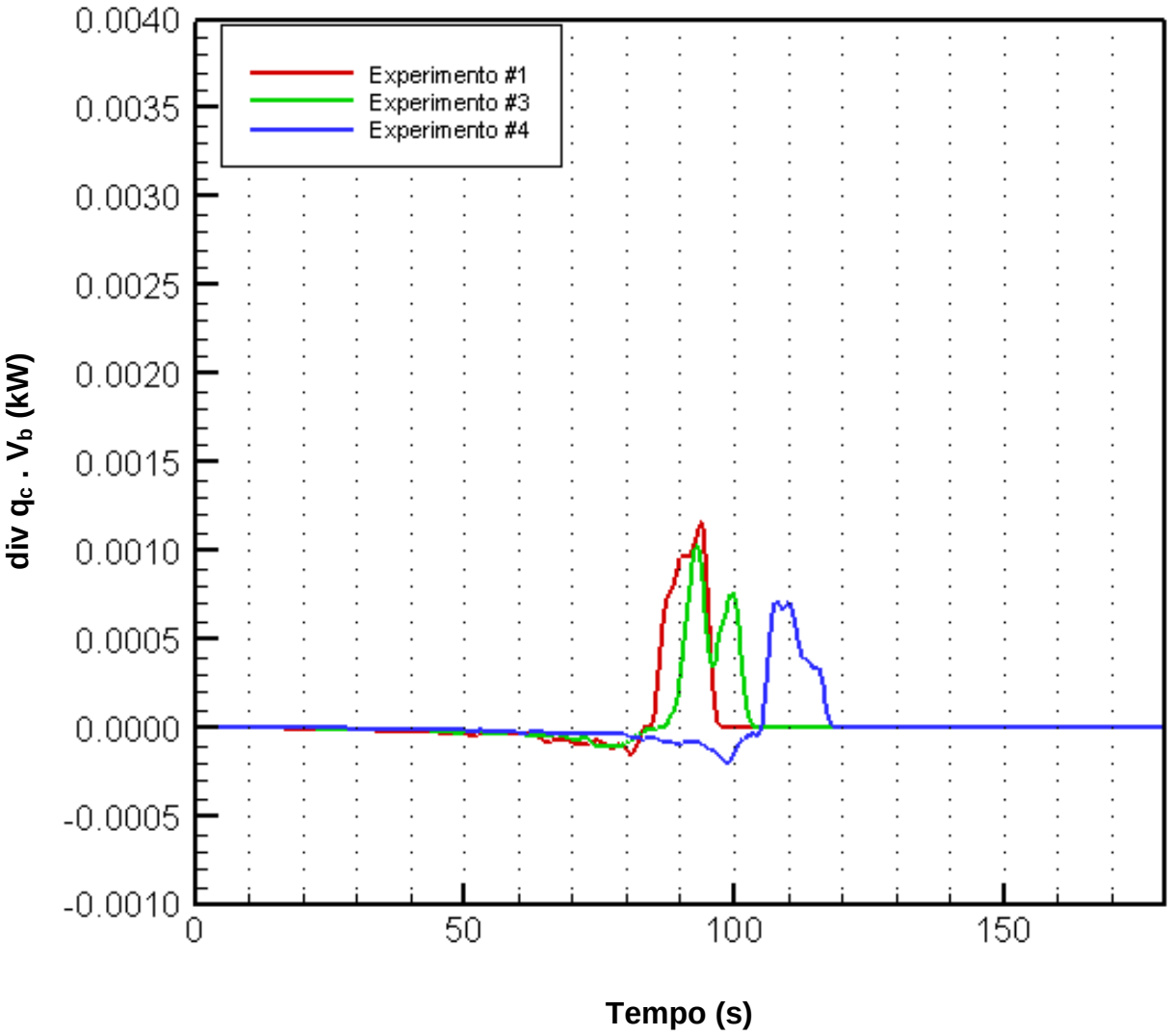

Figura 6.7 – Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT).

Uma análise mais detalhada dos 50 s iniciais do divergente do fluxo de radiação é mostrado na Figura 6.8. Pode-se perceber que a curva referente ao

experimento #4 tem os menores valores do divergente do fluxo de radiação, se comparada às curvas dos outros dois experimentos. Isso explica a taxa de perda de massa menor para o experimento #4, conforme mostrado na Figura 6.2.

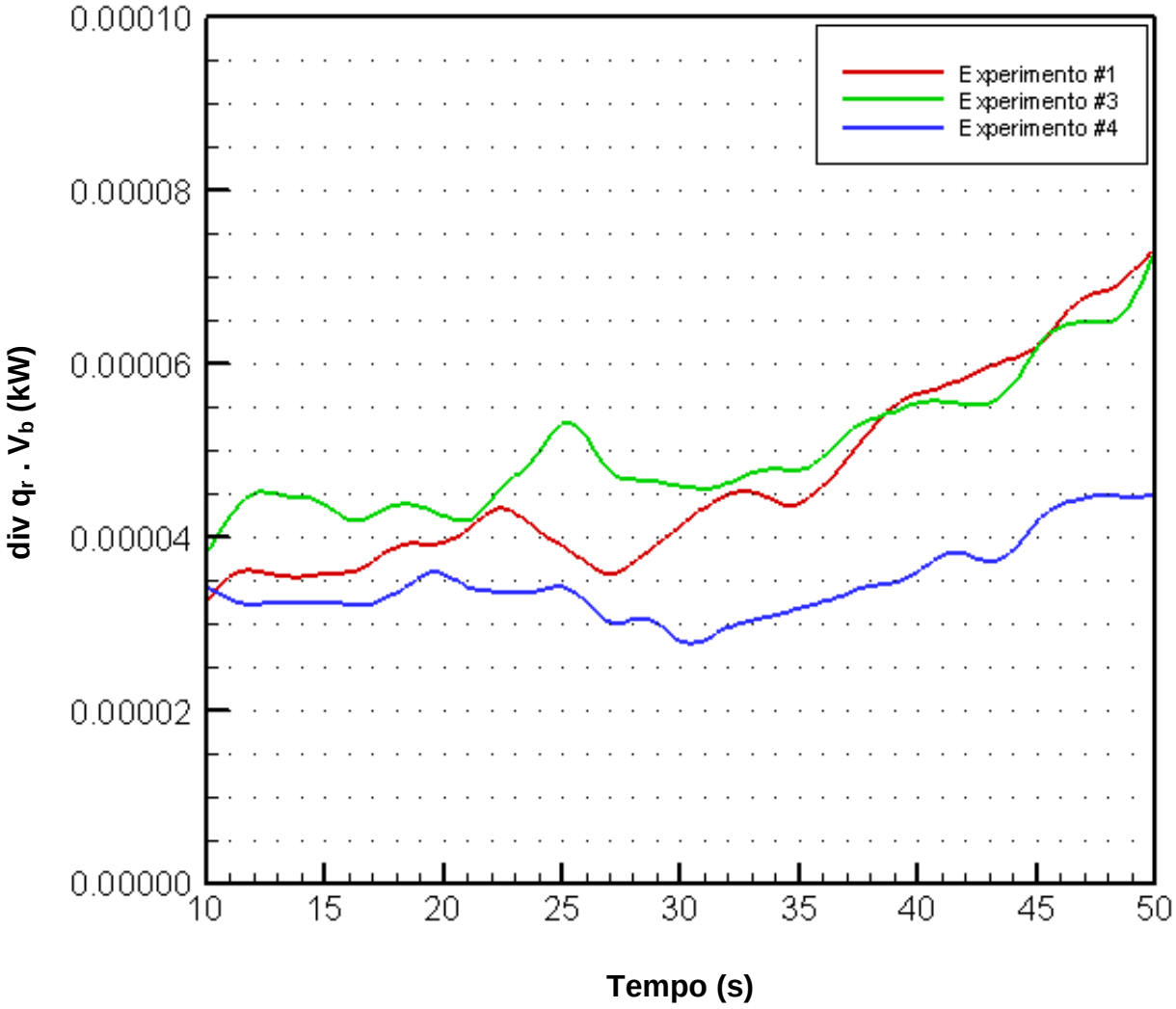

Figura 6.8 – Detalhe da evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Alta Floresta (MT).

Uma mesma análise mais detalhada foi feita para os 50 s iniciais do divergente do fluxo de convecção, conforme mostrado na Figura 6.9. Pode-se perceber que a curva referente ao experimento #4 agora tem, em módulo, os maiores valores do divergente do fluxo de convecção, se comparada às curvas dos outros dois experimentos. Entretanto, os valores são negativos, o que indica que o elemento de combustível em análise cede calor por convecção para a fase gasosa. O fluxo de

calor convectivo (Figura 6.7) do experimento #4 é menor que os outros porque a sua temperatura é mais baixa que a dos outros.

Para os três casos analisados, percebe-se que o elemento de combustível em análise fornece energia líquida por convecção para o meio gasoso antes de começar a receber energia. A explicação será baseada no experimento #3, mas é válida para os demais experimentos.

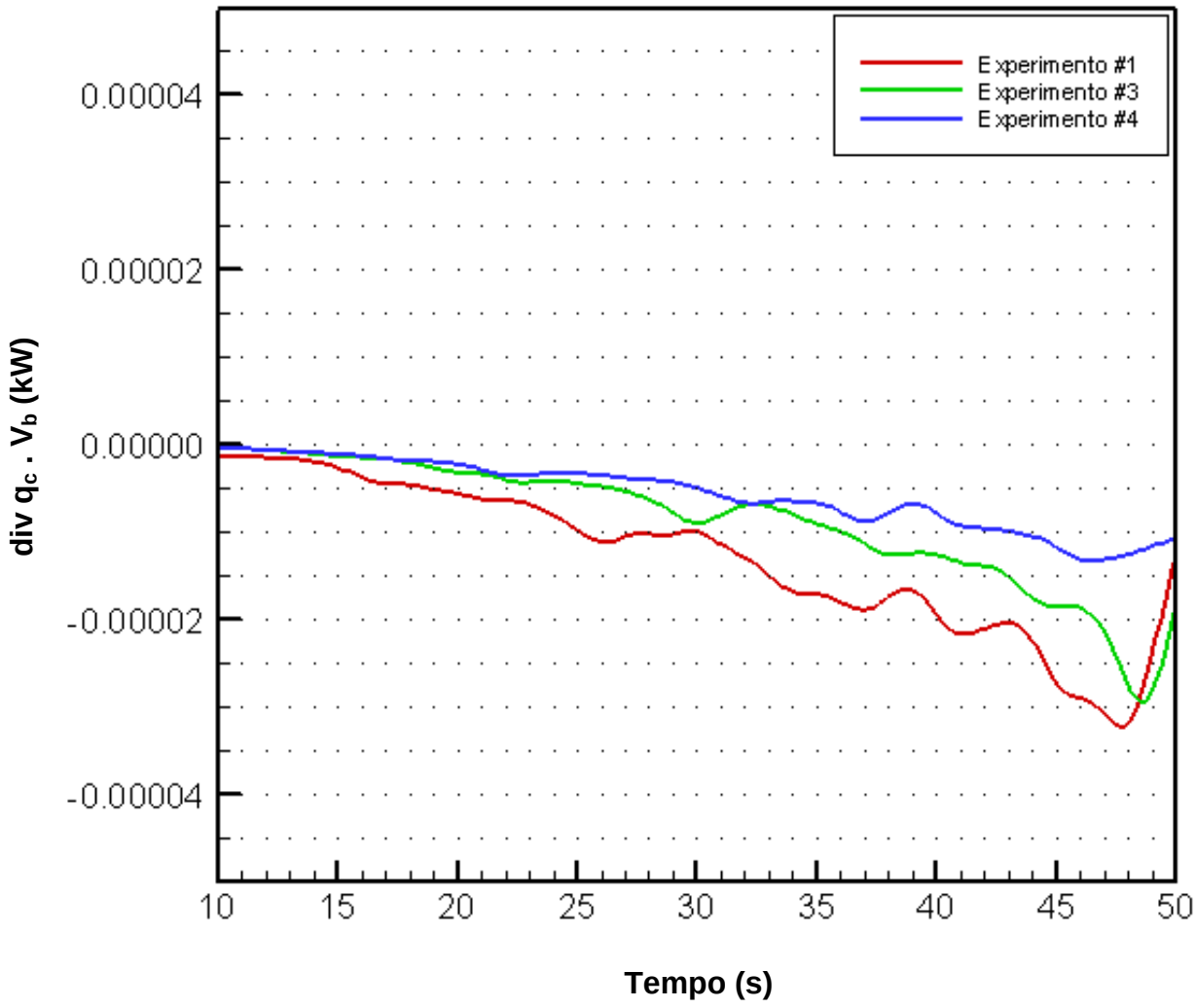

Figura 6.9 - Detalhe da evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Alta Floresta (MT).

As Figuras 6.10 e 6.11 apresentam o perfil da componente u do vetor velocidade da fase gasosa em t=70 s e t=80 s respectivamente. Também é representado o ponto de análise do combustível em cor vermelha, na superfície da representação da vegetação e ao lado direito do domínio. A velocidade é positiva

para a direita. Assim, a cor azul representa o sentido para a esquerda e a cor vermelha e amarela o sentido para a direita.

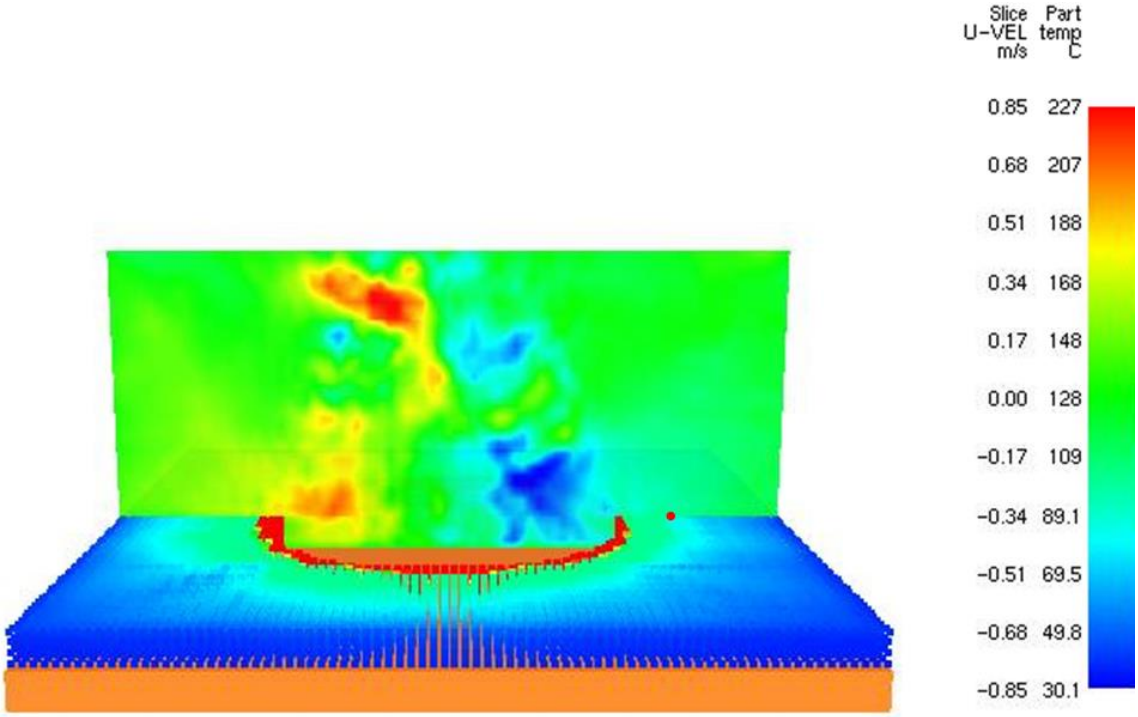

Figura 6.10 – Perfil da componente u do vetor velocidade da fase gasosa (positivo para a direita) em t=70 s para o experimento #3 de Alta Floresta (MT).

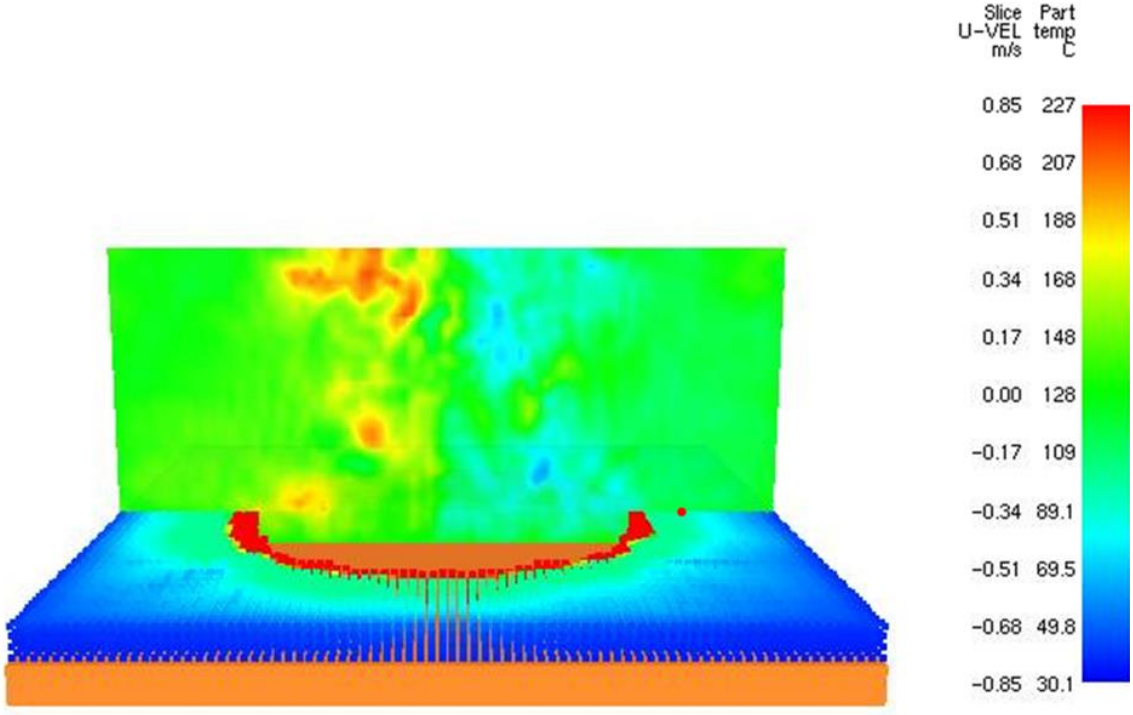

Figura 6.11 – Perfil da componente u do vetor velocidade da fase gasosa (positivo para a direita) em t=80 s para o experimento #3 de Alta Floresta (MT).

Em uma situação em que a velocidade do vento é nula, como nos casos dos experimentos aqui descritos, o ar necessário para a combustão dos produtos provenientes da pirólise vem de sentido contrário à propagação do incêndio. Isso quer dizer que para a região onde se localiza o elemento de combustível em análise o ar vem da direita.

Como o ar vem de região fora da área do incêndio, ele é mais frio do que o ar na região do incêndio. Como a temperatura do elemento de combustível em t=70 s é de aproximadamente 78 °C, e o ar está a uma temperatura menor (Figura 6.12), o elemento combustível cede energia para a fase gasosa.

Em t=80 s, a temperatura do elemento de combustível é de 95 °C e a temperatura do ar sobre esse elemento é a mesma que na análise para t=70 s. Assim, há um maior fornecimento de energia por convecção pelo elemento de combustível para a fase gasosa, conforme pode ser observado pela análise da Figura 6.7.

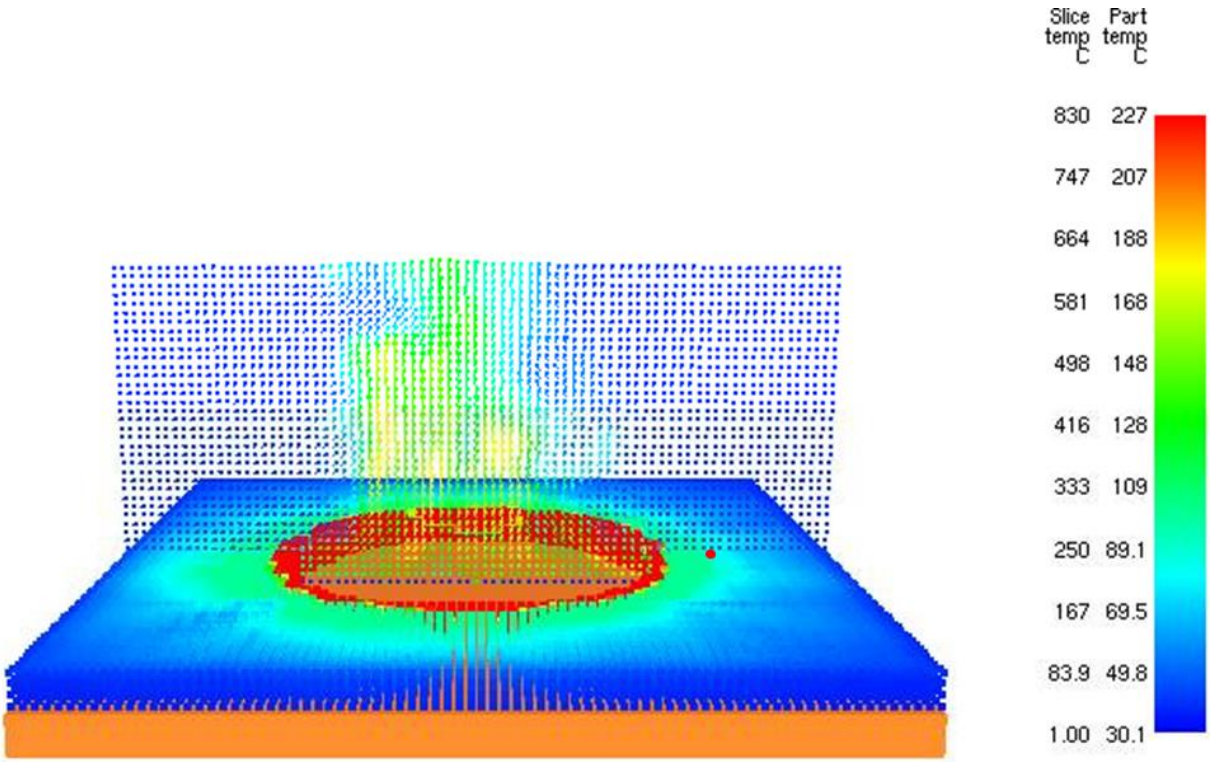

Figura 6.12 – Perfil da temperatura da fase gasosa em t=70 s para o experimento #3 de Alta Floresta (MT).

Ainda pela análise da Figura 6.7, percebe-se que a curva da simulação numérica do experimento #3 apresenta dois picos e um vale entre t=90 s e t=100 s. O primeiro pico que ocorre em aproximadamente t=92 s. A Figura 6.13 apresenta o perfil da componente w (vertical) do vetor velocidade da fase gasosa em t=92 s. O ponto de análise do elemento de combustível (na cor amarela) está em região onde a temperatura da vegetação é de 100 °C, mas bem próximo de uma região a 227 °C.

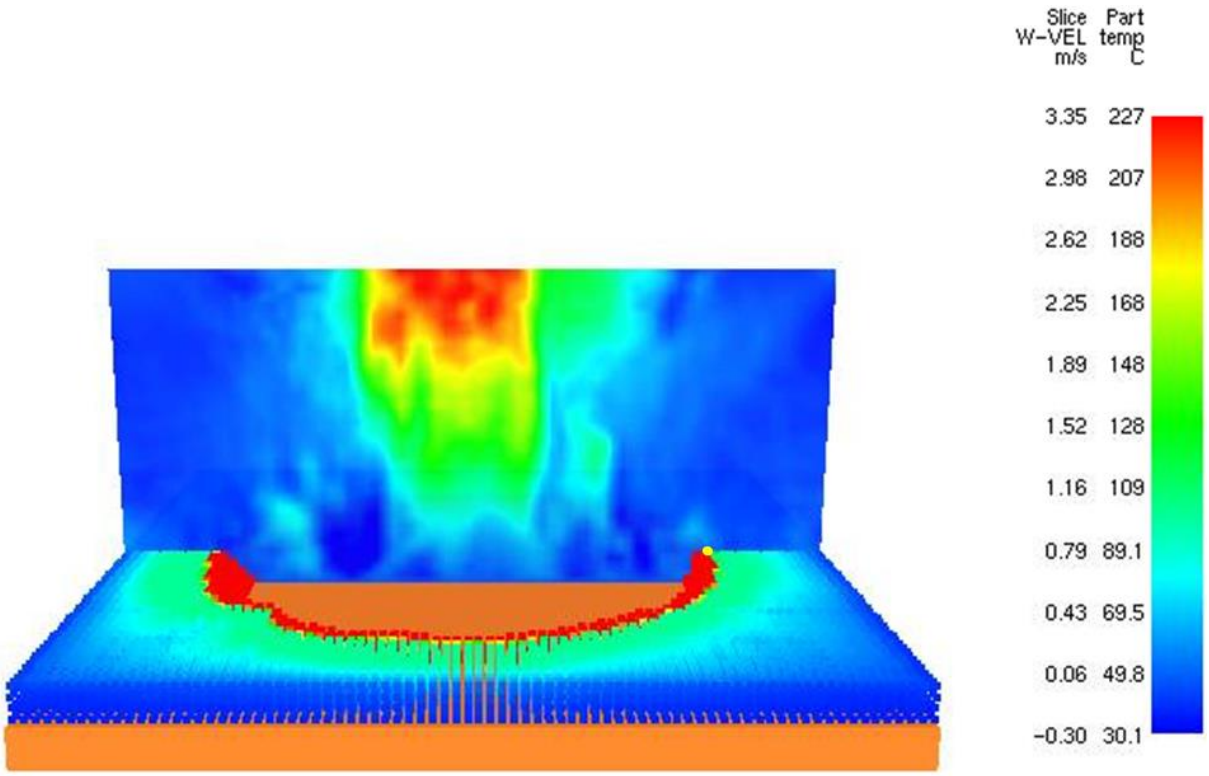

Figura 6.13 – Perfil da componente w (vertical) do vetor velocidade da fase gasosa (positivo para cima) em t=92 s para o experimento #3 de Alta Floresta (MT).

Os gases provenientes da pirólise nessa região são quentes e ascendentes (Figuras 6.13 e 6.14), passando pelo elemento de combustível em análise e fornecendo energia por convecção. A análise do outro vale e outro pico na curva do divergente do fluxo convectivo (Figura 6.7) seguem o raciocínio já apresentado.

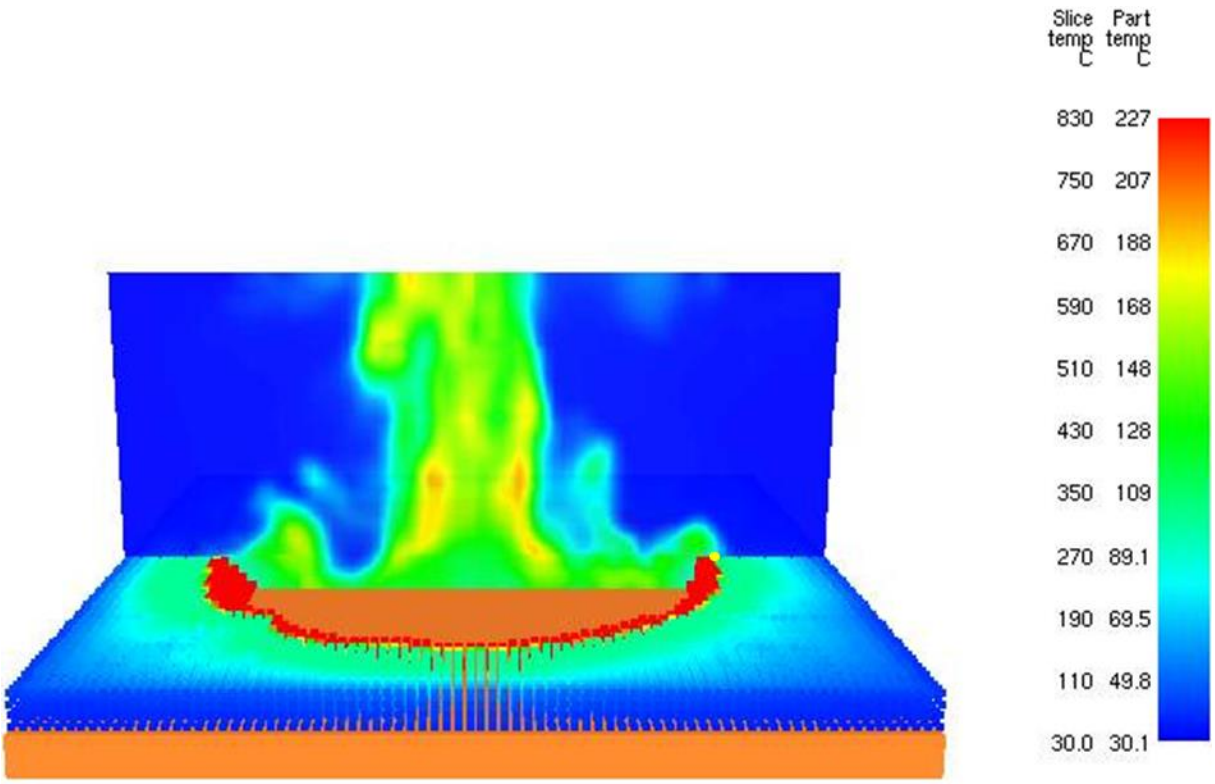

Figura 6.14 – Perfil de temperatura da fase gasosa em t=92 s para o experimento #3 de Alta Floresta (MT).

6.2 Simulação dos experimentos de Cruzeiro do Sul (AC)

O histórico temporal para a perda de massa para a vegetação total no domínio dos experimentos #1, #4, #6 e #8 é representado na Figura 6.15.

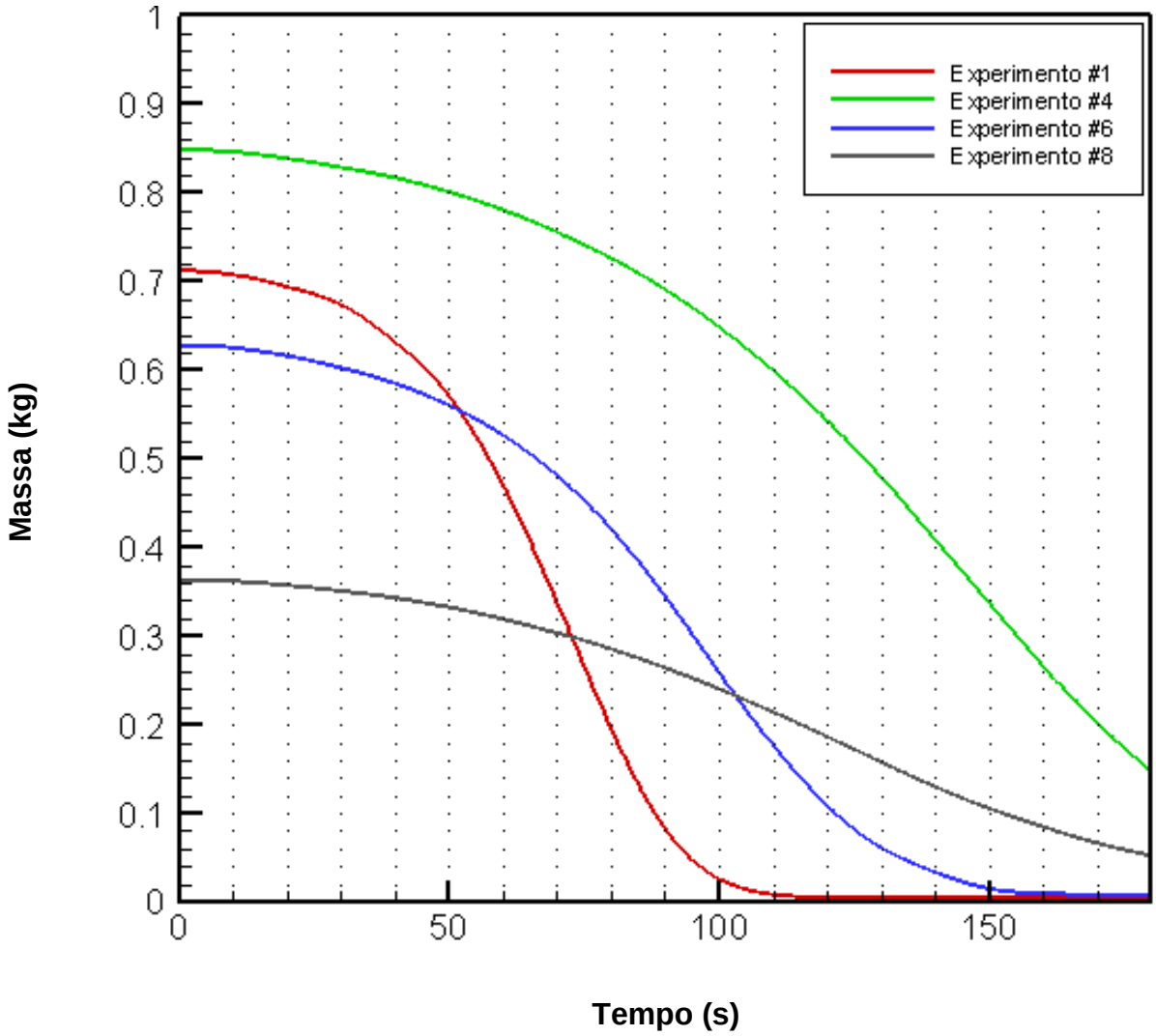

Figura 6.15 – Evolução temporal da perda de massa da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC).

A massa seca inicial, massa final e a porcentagem de massa final em relação à massa seca inicial são conforme a Tabela 6.11. A relação massa final sobre massa seca inicial representa a massa seca total inicial que não foi queimada na simulação depois de 180 s de tempo real. Os valores iniciais para a massa seca da vegetação na Figura 6.1 estão de acordo com os valores da massa específica aparente e altura

da camada vegetal mostrados na Tabela 6.12 e de acordo com a umidade mostrada na Tabela 6.13. A curva de perda de massa simulada para os experimentos #4 e #8 mostram que existe, comparativamente aos experimentos #1 e #6 uma maior massa seca que ainda não foi queimada após o tempo real de 180 s. As massas finais das simulações numéricas dos experimentos #1 e #6 são muito pequenas, e pode-se considerar que a massa total da vegetação de cada caso foi totalmente consumida.

Tabela 6.11 – Valores da massa seca inicial, massa final e relação massa final sobre massa seca inicial – Cruzeiro do Sul (AC).

Simulação	Altura da camada vegetal (m)	Massa seca inicial (kg)	Massa final (kg)	Massa final / massa seca inicial (%)
Experimento 1	0,12	0,71	0,005	0,7
Experimento 4	0,12	0,85	0,15	18
Experimento 6	0,09	0,63	0,008	1,3
Experimento 8	0,06	0,36	0,05	14

Tabela 6.12 – Valores da fração de combustível vegetal virgem convertido em material carbonizado, massa específica aparente da vegetação e massa específica aparente de material combustível – Cruzeiro do Sul (AC).

Simulação	fração de combustível vegetal virgem convertido em material carbonizado	Massa específica aparente (kg/m^3)	Massa específica aparente de material combustível (kg/m^3)
Experimento 1	0,10	13,18	11,86
Experimento 4	0,15	15,70	13,35
Experimento 6	0,19	15,49	12,55
Experimento 8	0,18	13,44	11,02

A massa específica aparente de material combustível, que é igual a 1 – (fração de combustível vegetal virgem convertido em material carbonizado) x massa específica aparente, indica o quanto de combustível pode ser pirolisado a partir de

uma célula computacional de vegetação. Quanto maior essa variável, mais material pirolisado é gerado e utilizado no processo de combustão. Entretanto, quanto maior a umidade da vegetação (ver Tabela 6.13) mais energia deve ser fornecida para a sua evaporação. Como os experimentos tiveram uma altura da camada vegetal variando até 100% entre seus valores mínimo e máximo, a avaliação da ROS não pode ser feita apenas com a massa específica aparente de material combustível e a umidade da vegetação.

Tabela 6.13 – Valores da umidade da vegetação para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC).

Simulação	Umidade da vegetação
Experimento 1	0,10
Experimento 4	0,22
Experimento 6	0,14
Experimento 8	0,17

Os valores da ROS medida no campo e calculada pela simulação numérica são conforme indicado na Tabela 6.14.

Tabela 6.14 – Valores da ROS para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC).

Simulação	ROS medida no campo (m/min)	ROS da simulação numérica (m/min)
Experimento 1	0,17	0,23
Experimento 4	0,15	0,14
Experimento 6	0,14	0,19
Experimento 8	0,13	0,17

O histórico temporal para a taxa de perda de massa para a vegetação total no domínio dos experimentos #1, #4, #6 e #8 é representado na Figura 6.16. A taxa de perda de massa é a inclinação das curvas da Figura 6.15, o que pode ser confirmado pelos resultados da Figura 6.16. As curvas para as simulações

numéricas dos experimentos atingem o seu máximo em momentos diferentes, quando a frente do fogo atinge os limites do domínio computacional.

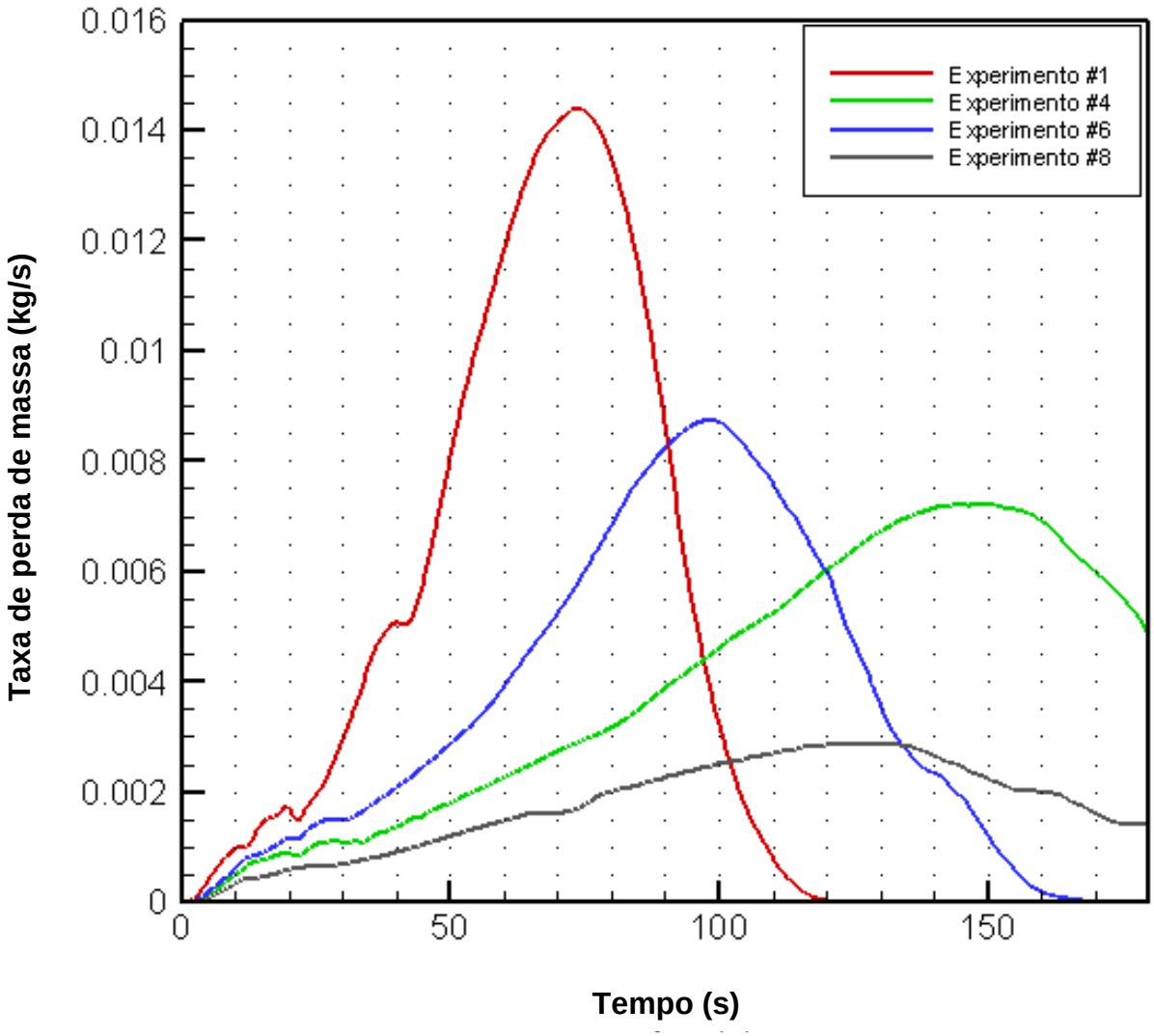

Figura 6.16 – Evolução temporal da taxa de perda de massa da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC).

O histórico temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional é representado na Figura 6.17. As temperatura iniciais da vegetação e as durações dos processos de evaporação da umidade da vegetação e sua pirólise são conforme a Tabela 6.15.

A temperatura do elemento de combustível começa a subir lentamente devido à transferência de calor por radiação (Figura 6.19). Em 3 s esse efeito é sentido pelo elemento de combustível do experimento #1, em seguida o mesmo ocorre para o do experimento #6, #4 e finalmente o #8 em 6 s. Neste momento, não há contribuição

para o aumento da temperatura do elemento de combustível a partir da transferência de calor por convecção (Figura 6.20).

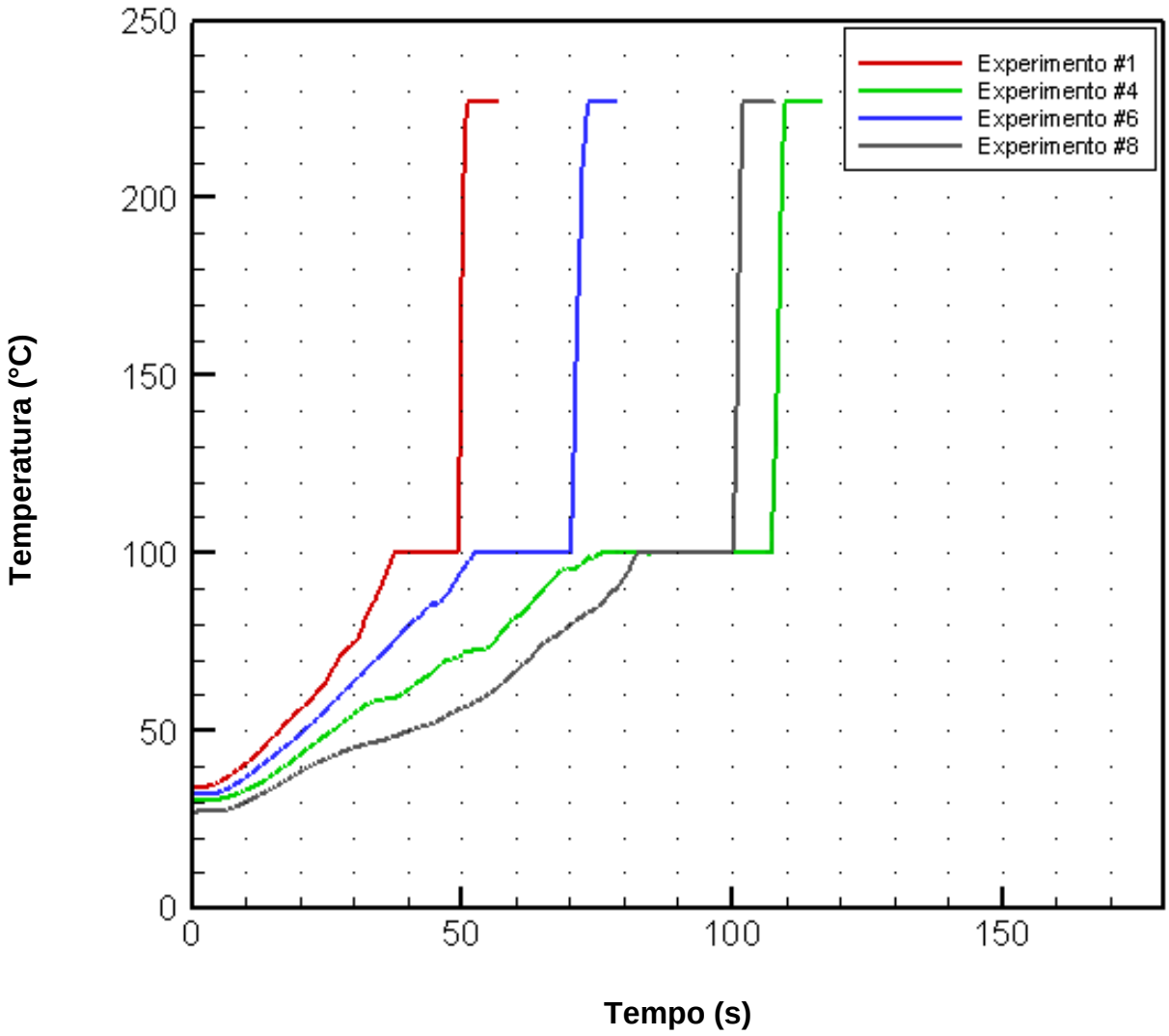

Figura 6.17 – Evolução temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC).

Pela análise da Figura 6.17 e Tabela 6.15 nota-se que para a simulação numérica do experimento #1 a duração da evaporação da umidade da vegetação é a menor de todos os casos, o que pode ser observado pela Tabela 6.13, onde a umidade da vegetação é a menor de todas.

Para a simulação numérica do experimento #4 a duração da evaporação da umidade da vegetação é a maior de todos os casos, o que também é observável pela Tabela 6.13, em que a umidade da vegetação é a maior de todas.

Com relação à duração da pirólise para as simulações numéricas dos experimentos, ela é praticamente a mesma.

Tabela 6.15 – Valores da temperatura inicial da vegetação para os experimentos de Alta Floresta (MT).

Simulação	Temperatura inicial da vegetação (°C)	Duração da evaporação da umidade da vegetação (s)	Duração da pirólise da vegetação (s)
Experimento 1	33,7	12	7
Experimento 4	30,3	31	9
Experimento 6	32,0	18	8
Experimento 8	27,0	17	7

Para os experimentos #1, #4, #6 e #8, a taxa no tempo de aumento da temperatura do elemento de combustível em análise é apresentada até 50 s de tempo real na Figura 6.18, que foi obtida a partir dos dados da Figura 6.17. Considerando para uma análise os dados das curvas desde o tempo 10 s até 45 s, e apesar das variações mostradas para dT/dt ao longo dessa faixa de tempo, pode-se aproximar as curvas dos experimentos #4, #6 e #8 por uma reta horizontal. Isso significa que a taxa de fornecimento de calor ao elemento de combustível é aproximadamente constante, para os três experimentos, no intervalo de tempo de 10s a 45s. Para o caso do experimento #1, o processo de evaporação da umidade começa em torno de 40 s, e por isso a curva da Figura 6.18 deve ser analisada até 35 s para desconsiderar a variação causada por esse processo. Ainda assim, a variação da curva é grande e não se pode aproxima-la para um valor constante de dT/dt. Considerando a Figura 6.21 que representa o divergente do fluxo de radiação até 50 s, nota-se que a curva do experimento #1 tem um crescimento acentuado a partir de 20 s, e aumenta quatro vezes até o tempo 40 s. Isso pode ser explicado pela baixa umidade da vegetação deste experimento, quando comparado aos demais. Essa quantidade de energia, muito maior que para os outros casos, é a responsável por aumentar a temperatura do elemento de combustível em análise, conforme se pode ver na Figura 6.17. Apesar disso, esse aumento de temperatura

não é homogêneo, conforme Figura 6.18. A contribuição do divergente do fluxo de convecção (Figura 6.22) é no sentido de remover calor do elemento de combustível em análise, devido ao influxo de ar frio para alimentar a combustão na frente de fogo.

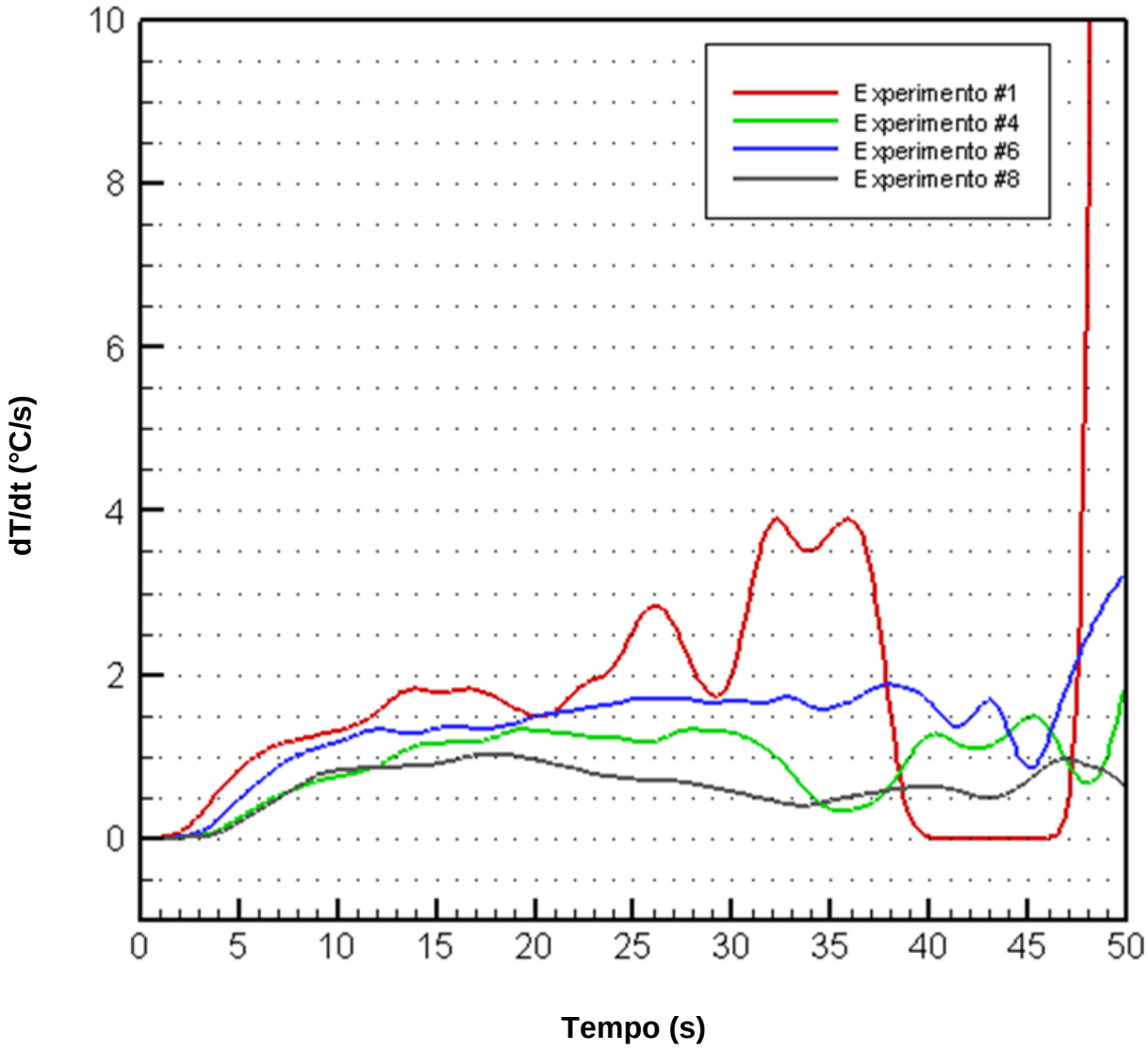

Figura 6.18 - Evolução da variação da temperatura no tempo para o ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC).

Os históricos temporais dos divergentes dos fluxos radiativo e convectivo sobre o elemento de combustível são apresentados nas Figuras 6.19 e 6.20.

Pode ser visto a partir dos gráficos que o fluxo de calor por radiação é dominante sobre o fluxo de calor por convecção.

Para as simulações numéricas dos experimentos #4 e #8, a energia proveniente da convecção não é disponível para o elemento de combustível em análise durante o processo de evaporação da umidade. No caso das simulações numéricas dos experimentos #1 e #6, até a metade do processo de evaporação da umidade da vegetação o fluxo líquido de calor por radiação é o único processo disponível para o aquecimento do elemento de combustível.

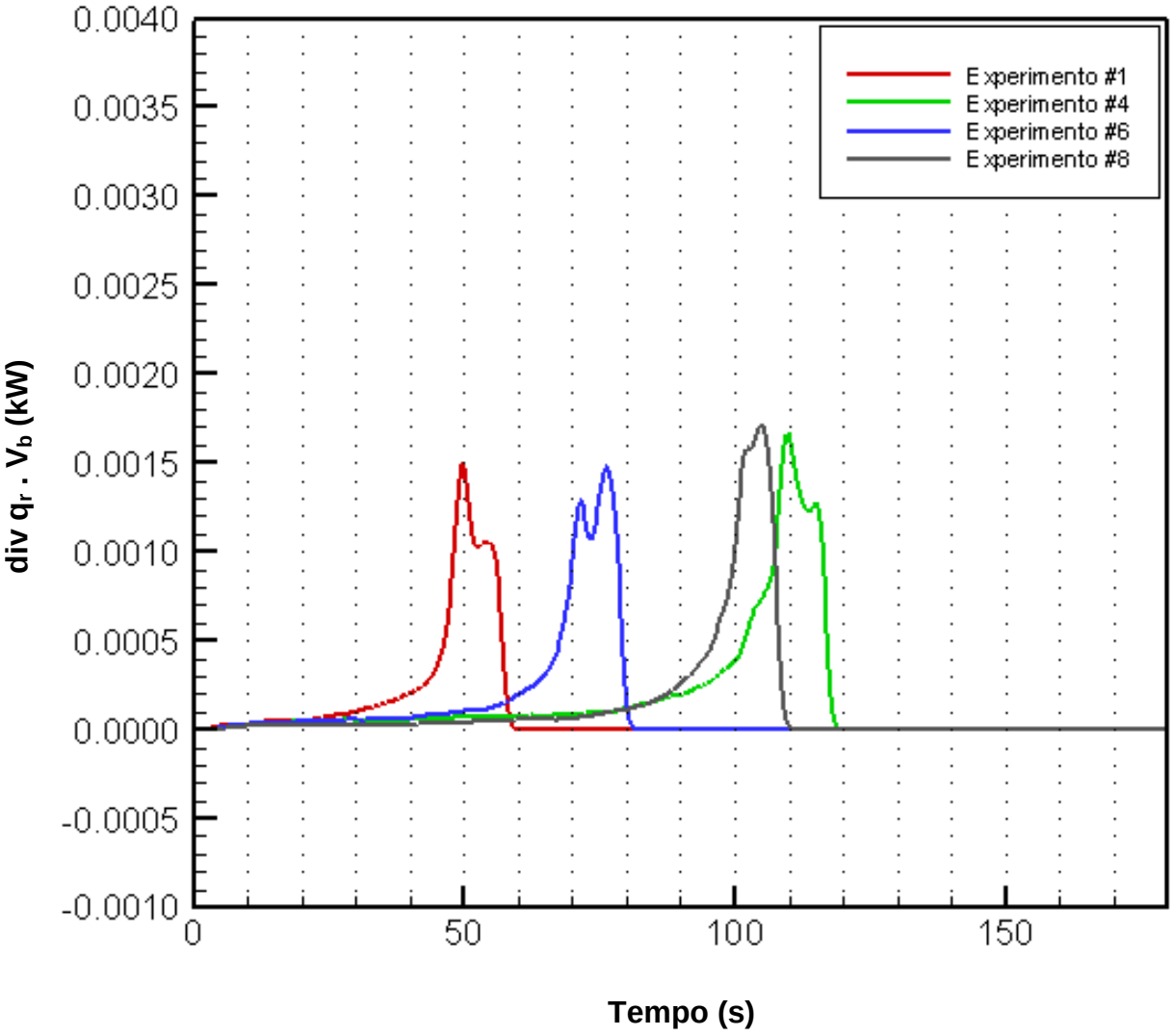

Figura 6.19 – Evolução temporal do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC).

Uma análise mais detalhada dos 50 s iniciais do divergente do fluxo de radiação é mostrado na Figura 6.8. Pode-se perceber que a curva referente ao experimento #8 tem os menores valores do divergente do fluxo de radiação, se

comparada às curvas dos outros dois experimentos. Isso explica a taxa de perda de massa menor para o experimento #8, conforme mostrado na Figura 6.16.

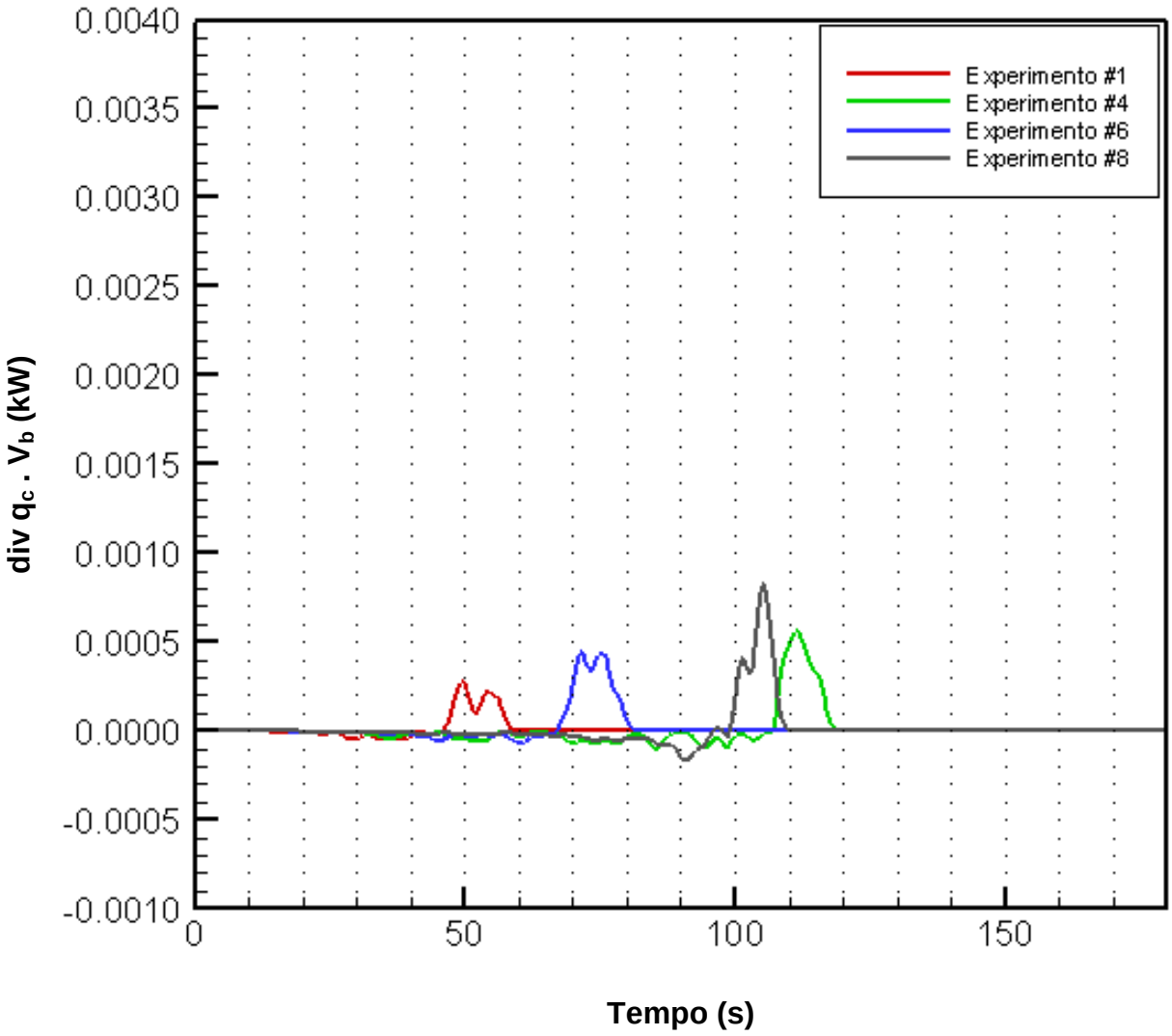

Figura 6.20 – Evolução temporal do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC).

Uma mesma análise mais detalhada foi feita para os 50 s iniciais do divergente do fluxo de convecção, conforme mostrado na Figura 6.22. Pode-se perceber que a curva referente ao experimento #8 praticamente não possui oscilações. A curva do experimento #1 deve ser analisada até 35 s, conforme foi feito para a sua curva referente ao dT/dt. Na faixa de tempo de análise de cada curva, nota-se que os valores são negativos, o que indica que o elemento de combustível em análise cede

calor por convecção para a fase gasosa, conforme detalhado no caso de Alta Floresta (MT).

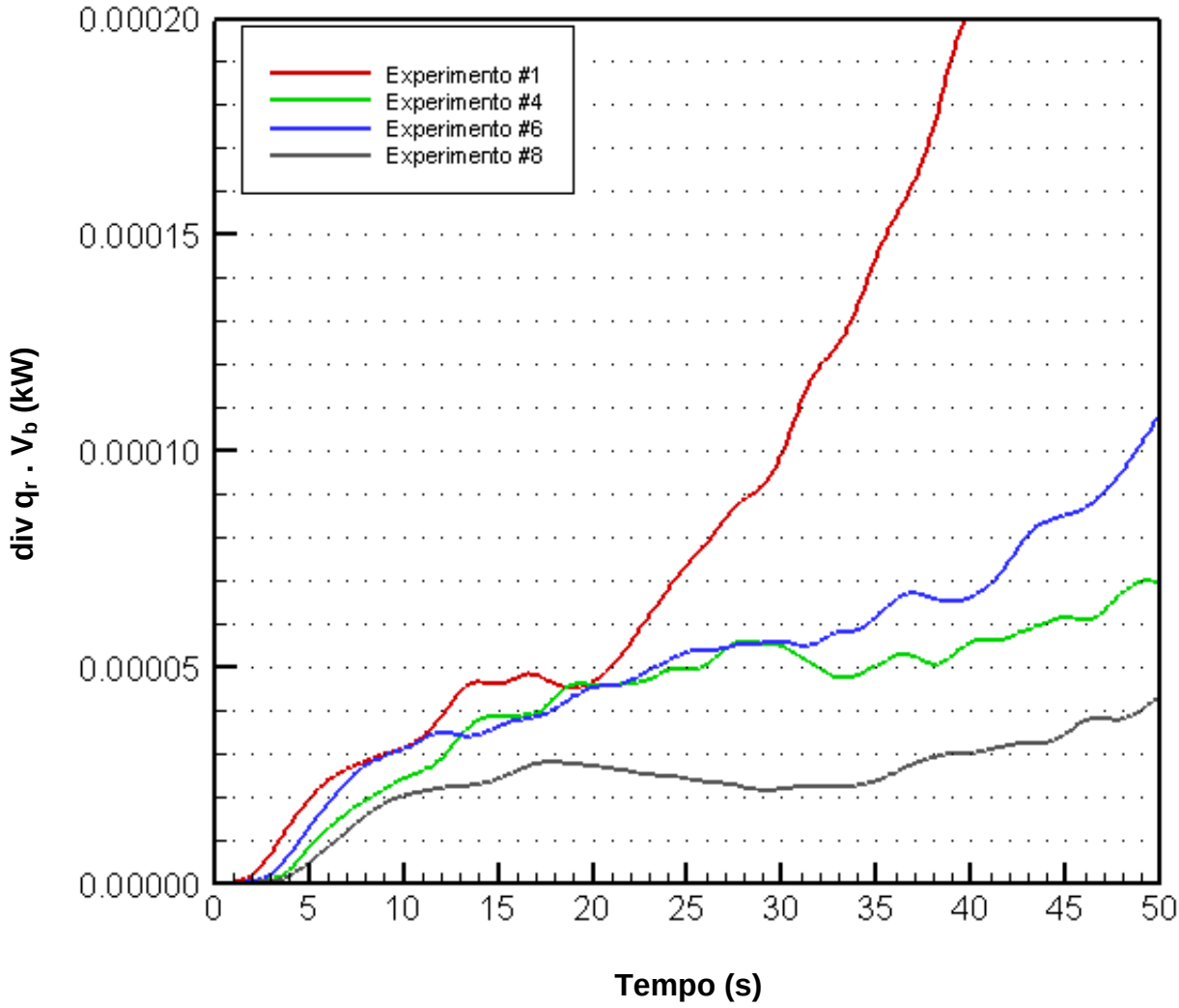

Figura 6.21 - Detalhe da evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC).

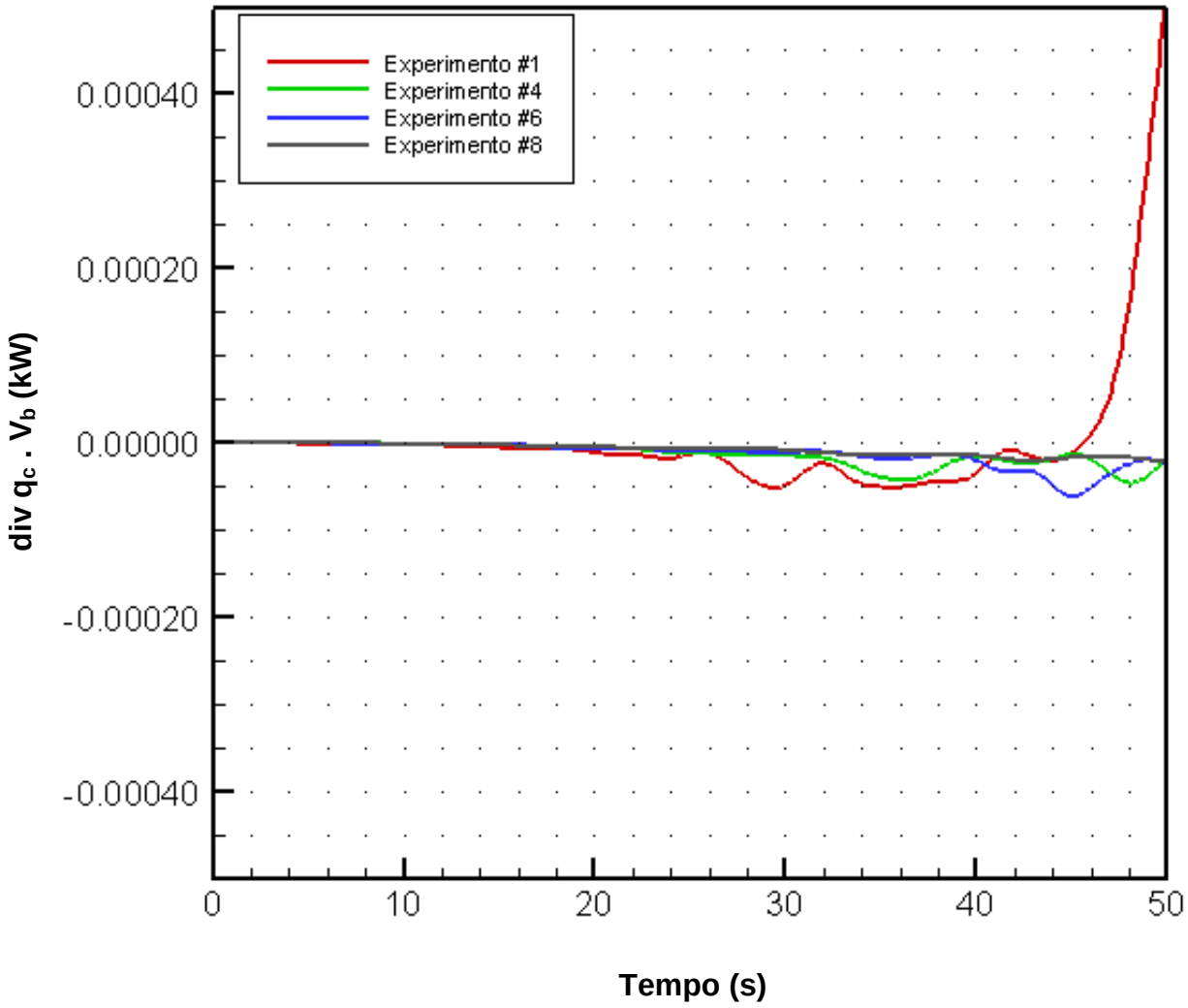

Figura 6.22 - Detalhe da evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para os experimentos de Cruzeiro do Sul (AC).

6.3 Variação da simulação do experimento #1 de Alta Floresta (MT): análise da área superficial por volume da vegetação

Este caso é o mesmo que o do experimento #1 de Alta Floresta (MT), com a única diferença que foram feitas duas simulações adicionais para avaliar o efeito da variação da área superficial por volume (ASV). As simulações avaliaram o que aconteceria caso a área superficial por volume da vegetação fosse 20% menor e 20% maior. O valor de 20% foi escolhido para os estudos de variação paramétrica pois representa amplitude de mudança significativa para cada uma das variáveis. Os impactos da variação da área superficial por volume são descritos a seguir.

A ROS medida no campo e a ROS calculada pela simulação do experimento #1 foram de 0,21 m min^{-1}. Para o caso em que a área superficial por volume da vegetação é 20% menor que o valor medido no experimento #1, a ROS não pode ser calculada (conforme descrito em 6.1), o que gerou como resultado a extinção do incêndio em partes do domínio a partir do tempo t = 70 s. Para o caso em que a variável é 20% maior, a ROS calculada é de 0,24 m min^{-1} (Tabela 6.16).

Tabela 6.16 – Valores da área superficial por volume e da taxa de propagação do incêndio medida e simulada para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações paramétricas.

	Área superficial por volume da vegetação	ROS (m min-1)	Variação da ROS com relação ao experimento (m min-1)
Experimento #1	-----	0,21	-----
Simulação do experimento #1	4.000	0,21	0
Simulação com valor da área superficial por volume da vegetação 20% menor	3.200	-----	-----
Simulação com valor da área superficial por volume da vegetação 20% maior	4.800	0,24	0,03

A razão área superficial por volume da vegetação é uma variável importante na caracterização da vegetação, conforme já demonstrado no item 6.1. Um valor

pequeno para essa variável indica que para um determinado volume, a troca de calor por convecção (equações (3.25) e (3.26)), por radiação (equações (3.47) e (3.49)), evaporação da umidade (equação (3.57)) e volatilização de produtos inflamáveis (equação (3.58)) é menor. A maior importância está entretanto no coeficiente de absorção e consequentemente no fluxo líquido de radiação. Por isso a ROS diminui quando a área superficial por volume da vegetação diminui.

Os históricos temporais para a perda de massa e taxa de perda de massa obtidos a partir da simulação do experimento #1 e suas variações são representados nas Figuras 6.23 e 6.24, respectivamente.

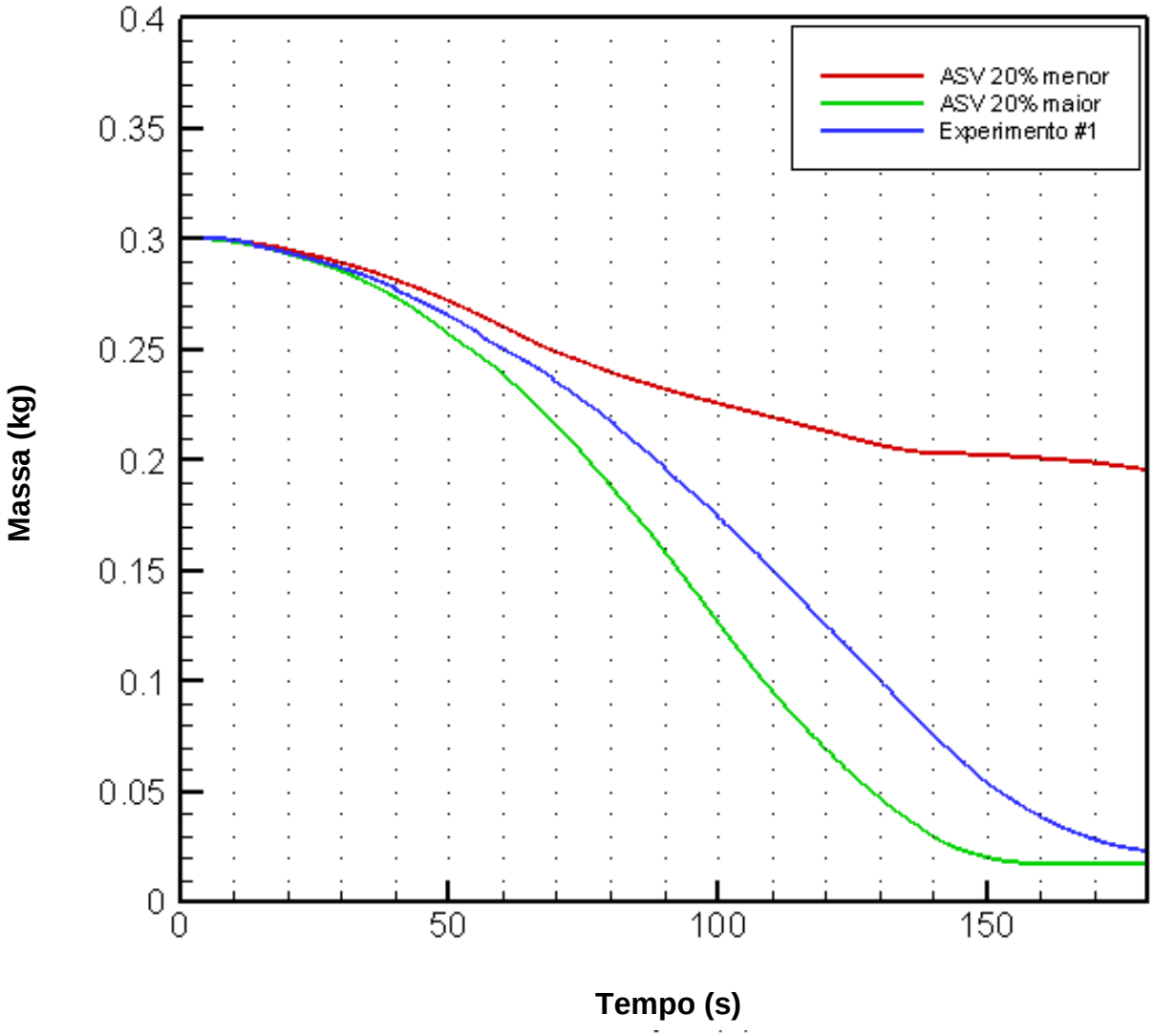

Figura 6.23 - Evolução temporal da massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume (ASV) da vegetação.

A massa seca inicial foi 0,30 kg para os três casos caindo depois de 180 s a valores tão menores quanto maior a ROS. Exceto para o caso em que o valor da área superficial por volume da vegetação é 20% menor, as curvas para a massa da vegetação em função do tempo tem a mesma forma.

A taxa de perda de massa atinge o seu máximo quando a frente do fogo atinge os limites do domínio computacional. O gráfico que representa o caso em que a área superficial por volume da vegetação é 20% menor que o valor medido no experimento #1 é apresentado apenas como referência.

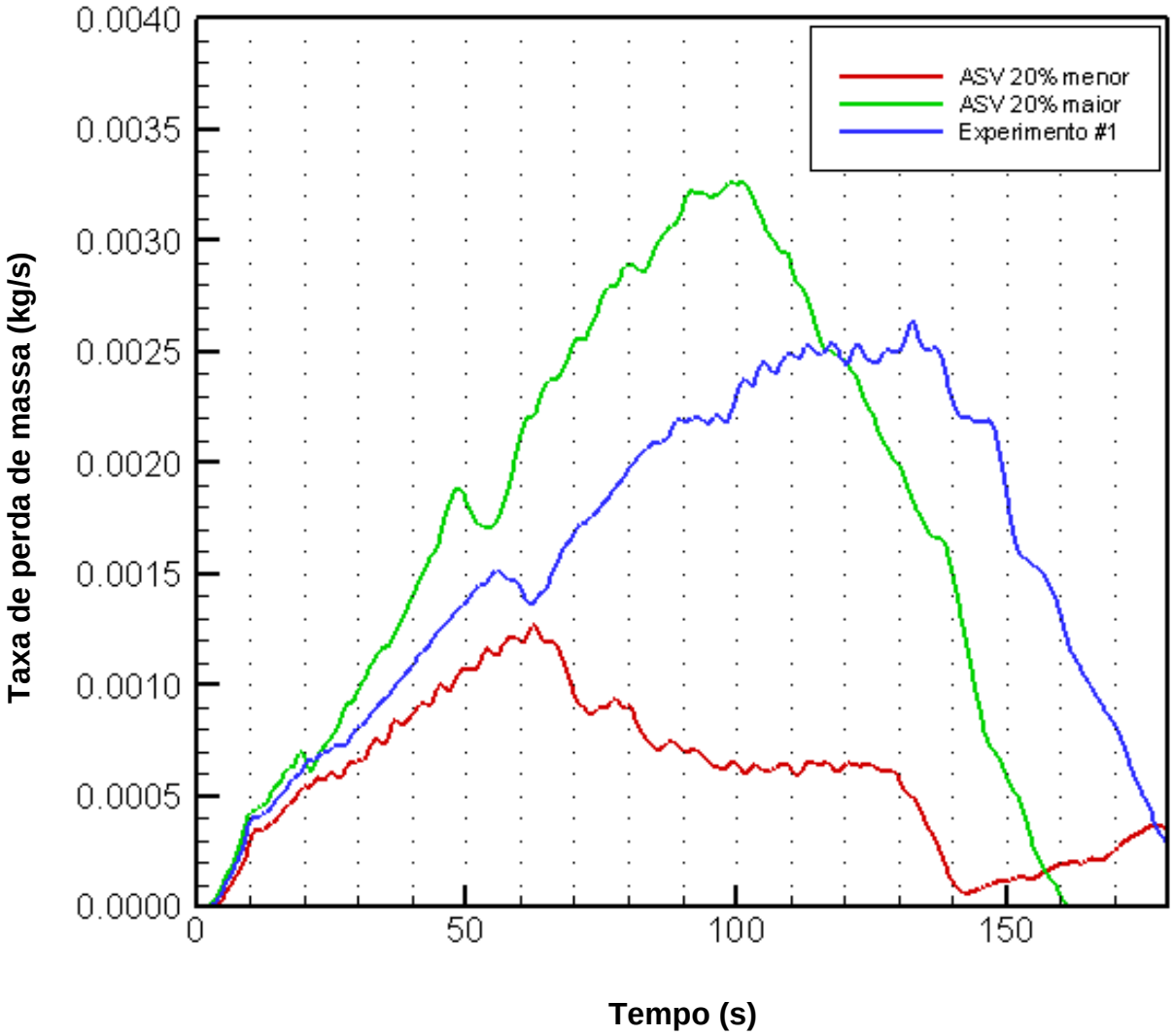

Figura 6.24 - Evolução temporal da taxa de perda de massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume (ASV) da vegetação.

O formato das curvas para os casos da simulação numérica do experimento #1 e para o caso em que a variável é 20% maior é semelhante. Como a curva da perda de massa do caso em que a variável é 20% maior, Figura 6.23, tem maior inclinação que a curva do experimento #1, sua taxa de perda de massa é maior (Figura 6.24).

O histórico temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional é representado na Figura 6.25.

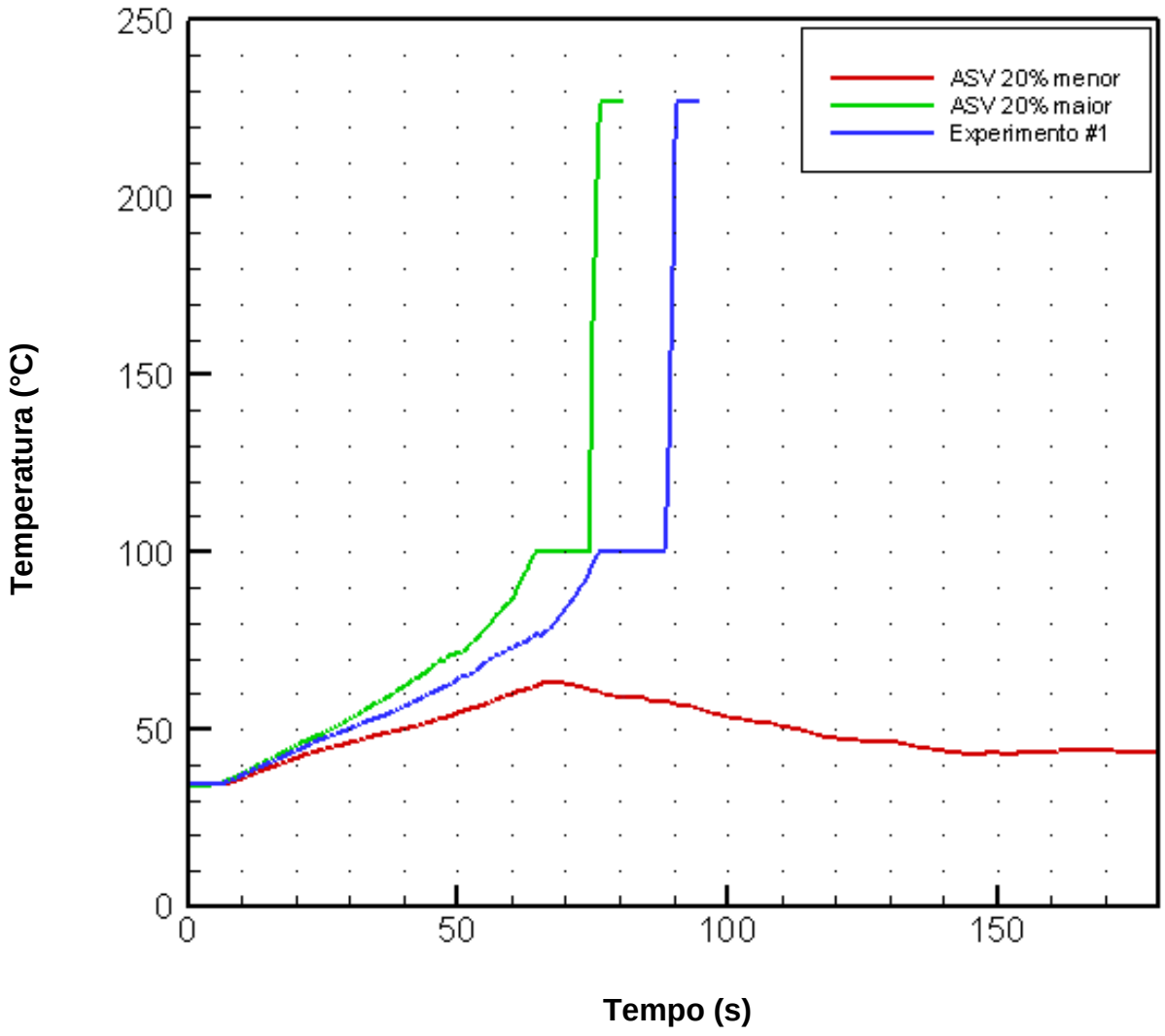

Figura 6.25 - Evolução temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume da vegetação.

O gráfico de temperatura para o caso em que a área superficial por volume da vegetação é 20% menor é mostrado como referência. A temperatura desse elemento não chega a ser suficiente para se iniciar o processo de evaporação da

umidade da vegetação. O gráfico de temperatura para o caso em que a área superficial por volume da vegetação é 20% maior apresenta o mesmo comportamento que a simulação do experimento #1.

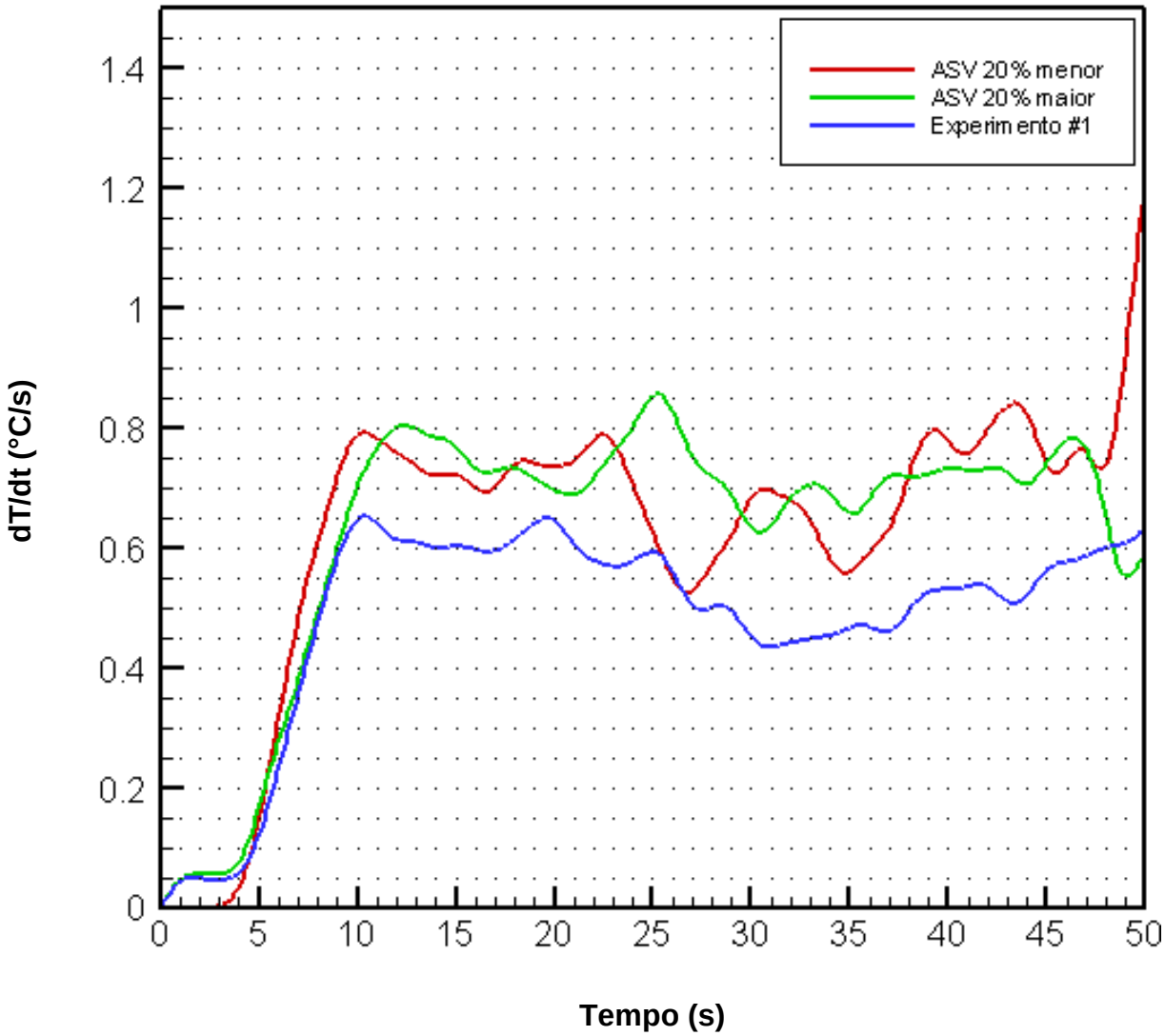

Figura 6.26 - Evolução da variação da temperatura no tempo para o ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume da vegetação.

Para os experimentos simulados, a taxa no tempo de aumento da temperatura do elemento de combustível em análise é apresentada até 50 s de tempo real na Figura 6.26, que foi obtida a partir dos dados da Figura 6.25. Considerando para uma análise os dados das curvas desde o tempo 10 s até 45 s, e apesar das variações mostradas para dT/dt ao longo dessa faixa de tempo, pode-se aproximar as curvas por uma reta horizontal. Isso significa que a taxa de fornecimento de calor

ao elemento de combustível é aproximadamente constante, para os três experimentos, no intervalo de tempo de 10s a 45s.

Os históricos temporais dos divergentes dos fluxos radiativo e convectivo sobre o elemento de combustível são apresentados nas Figuras 6.27 e 6.29, respectivamente.

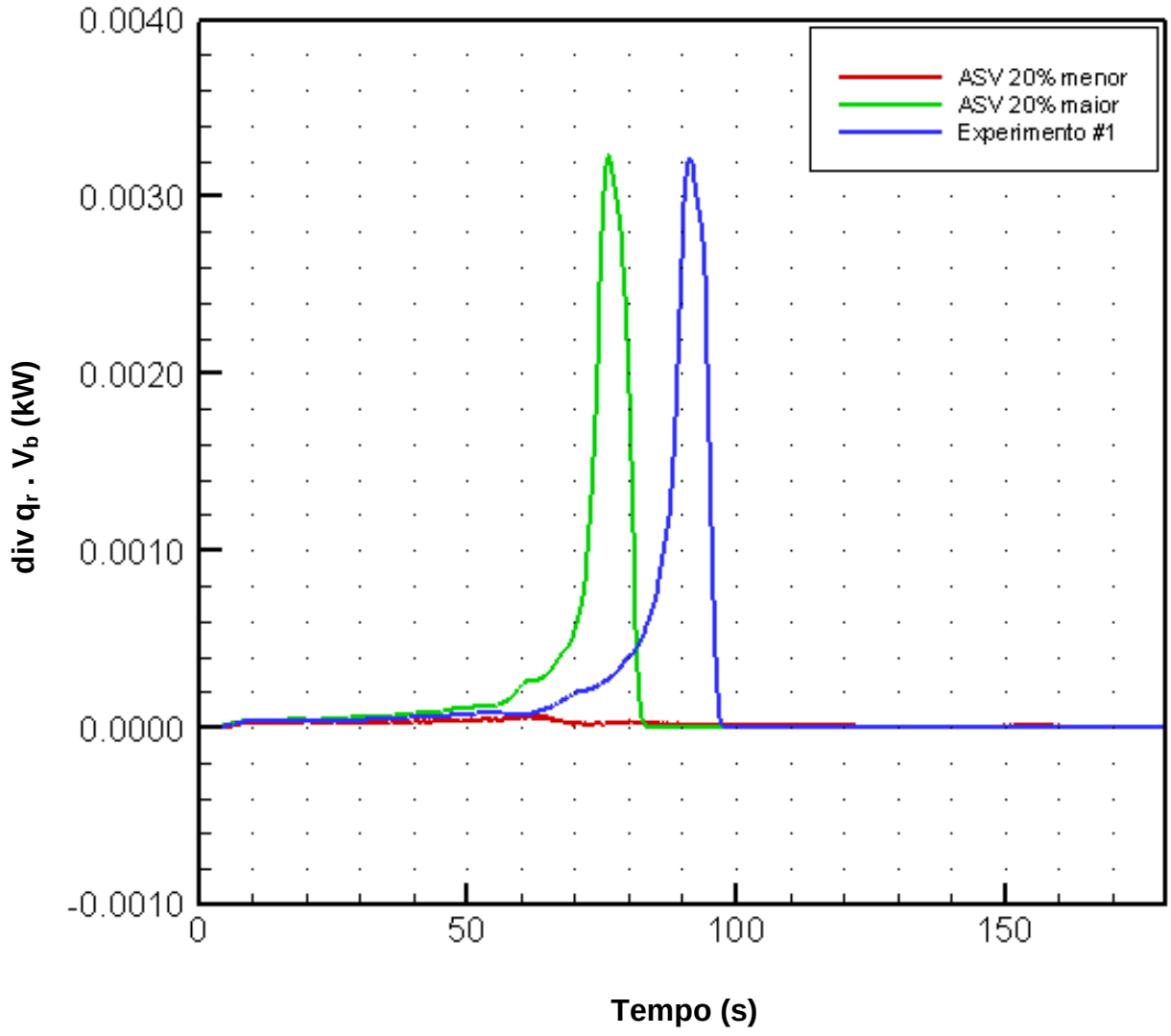

Figura 6.27 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume da vegetação.

As curvas do caso em que a área superficial por volume da vegetação é 20% menor que o valor usado para a simulação do experimento #1 mostra que os divergentes dos fluxos radiativo e convectivo são desprezíveis. Como se viu nos casos anteriores, o divergente do fluxo de calor radiativo é o único responsável pelo

aumento da temperatura do elemento de combustível até o ponto em que se inicia a evaporação da umidade da vegetação. Se a magnitude desse divergente for pequena, a temperatura do elemento combustível pode não ser alta o suficiente para que se inicie a evaporação da umidade da vegetação, como se pode ver pela análise da Figura 6.25. Como o coeficiente de absorção por radiação (equação (3.47)) é diretamente proporcional à área superficial por volume, um valor baixo dessa variável faz com que o fluxo líquido de radiação para o elemento de combustível seja pequeno.

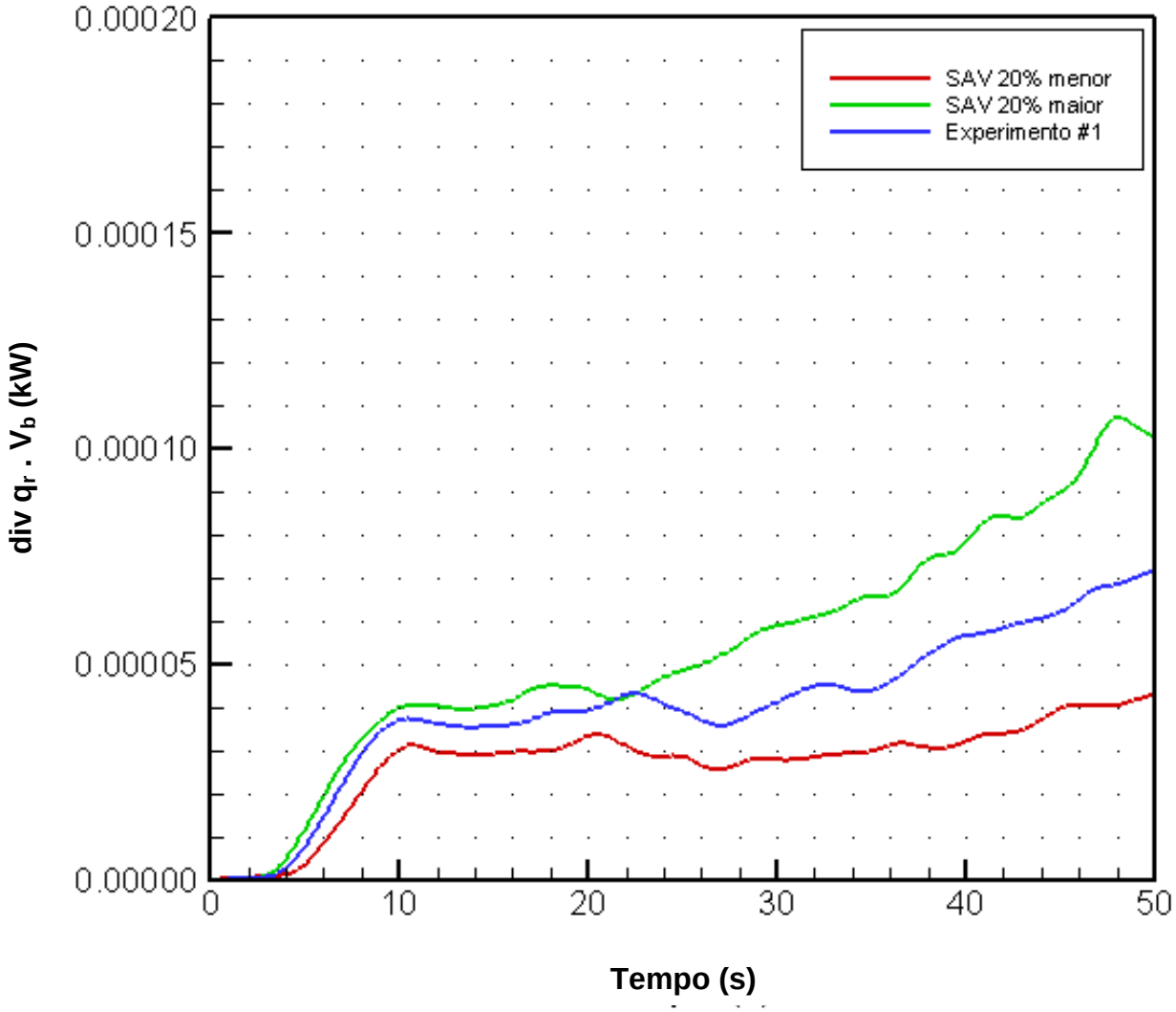

Figura 6.28 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume da vegetação.

Pode ser visto a partir dos gráficos que o fluxo de calor por radiação é dominante sobre o fluxo de calor por convecção. Até quase a metade do processo

de evaporação da umidade da vegetação, e para os dois casos analisados, o fluxo líquido de calor por radiação é o único processo disponível para o aquecimento do elemento de combustível.

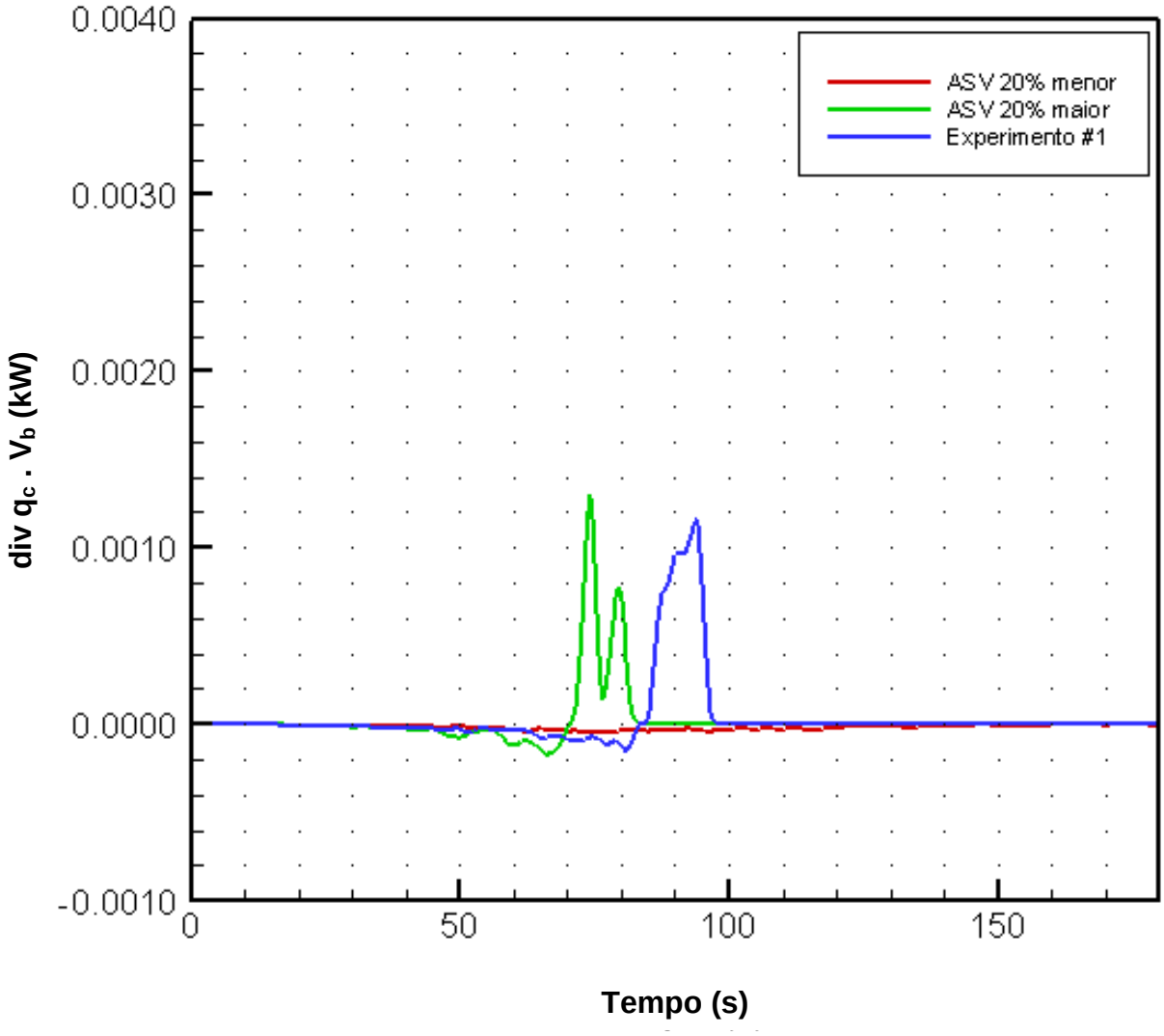

Figura 6.29 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume da vegetação.

Uma análise mais detalhada dos 50 s iniciais do divergente do fluxo de radiação é mostrado na Figura 6.28. Pode-se perceber que a curva referente ao experimento em que a ASV é 20% menor tem os menores valores do divergente do fluxo de radiação, se comparada às curvas dos outros dois experimentos. Isso explica a taxa de perda de massa menor para o experimento em que a ASV é 20% menor, conforme mostrado na Figura 6.24.

Uma mesma análise mais detalhada foi feita para os 50 s iniciais do divergente do fluxo de convecção, conforme mostrado na Figura 6.30. Pode-se perceber que a curva referente à ASV 20% maior tem os maiores valores do divergente do fluxo de convecção, se comparada às curvas dos outros dois experimentos. Entretanto, os valores são negativos, o que indica que o elemento de combustível em análise cede calor por convecção para a fase gasosa, conforme já detalhado em 6.1.

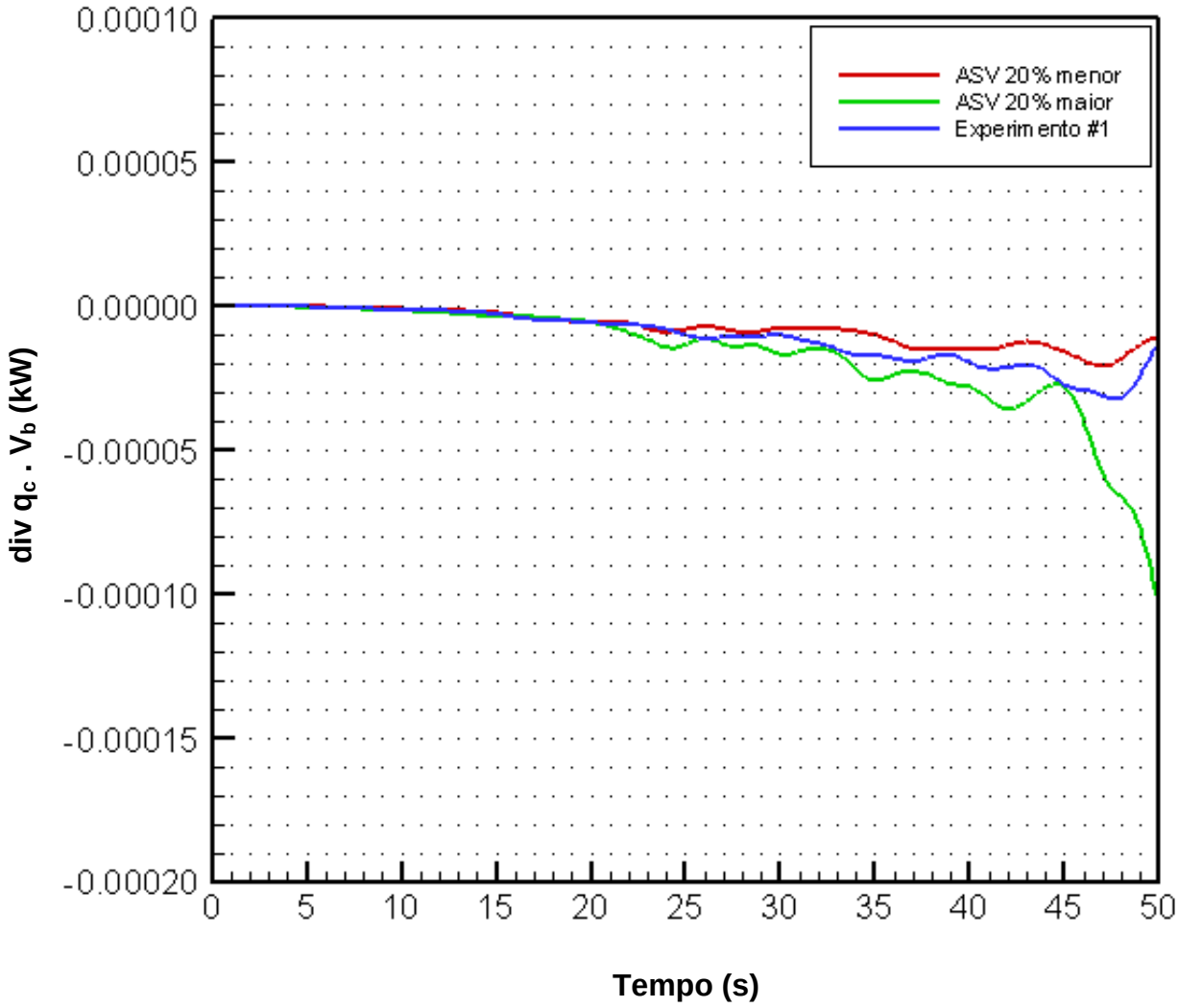

Figura 6.30 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume da vegetação.

6.4 Variação da simulação do experimento #1 de Alta Floresta (MT): análise da umidade da vegetação

Este caso é o mesmo que o do experimento #1 de Alta Floresta (MT), com a única diferença que foram feitas duas simulações adicionais para avaliar o efeito da variação da umidade da vegetação. As simulações avaliaram o que aconteceria caso a umidade da vegetação fosse 20% menor e 20% maior. Os impactos dessa variação são descritos e comparados com o caso base que é a simulação do experimento #1.

A ROS medida no campo e a ROS calculada pela simulação do experimento #1 foram de 0,21 m min^{-1}. Para o caso em que a umidade da vegetação é 20% menor que o valor medido no experimento #1, a ROS calculada é de 0,25 m min^{-1}. Para o caso em que a variável é 20% maior, a ROS calculada é de 0,17 m min^{-1} (Tabela 6.17). Observou-se que a magnitude da variação da ROS é igual nos dois casos aqui analisados quando comparados ao experimento #1. No caso com umidade da vegetação menor, a ROS é 0,04 m min^{-1} maior que o valor medido no campo, o qual é 0,04 m min^{-1} maior que o caso com umidade da vegetação maior (Tabela 6.17).

Tabela 6.17 – Valores da umidade e da taxa de propagação medida e simulada para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações paramétricas.

	Umidade da vegetação	ROS (m min^{-1})	Variação da ROS com relação ao experimento (m min^{-1})
Experimento #1	-----	0,21	-----
Simulação do experimento #1	0,1438	0,21	0
Simulação com valor da umidade da vegetação 20% menor	0,1150	0,25	0,04
Simulação com valor da umidade da vegetação 20% maior	0,1726	0,17	- 0,04

A umidade da vegetação é um parâmetro muito importante na propagação do incêndio. Ela está presente na equação que descreve a temperatura de um elemento combustível (equação (3.53)) e, no modelo de fase sólida, a massa específica e o calor específico aparentes têm contribuições da umidade (equações (3.54) e (3.55)). Quanto maior a umidade da vegetação, mais energia lhe deve ser fornecida para a evaporação de sua umidade e menor a velocidade com que o fogo se propaga. Mas diferentemente do parâmetro área superficial por volume, a umidade da vegetação não afeta o coeficiente de absorção de radiação.

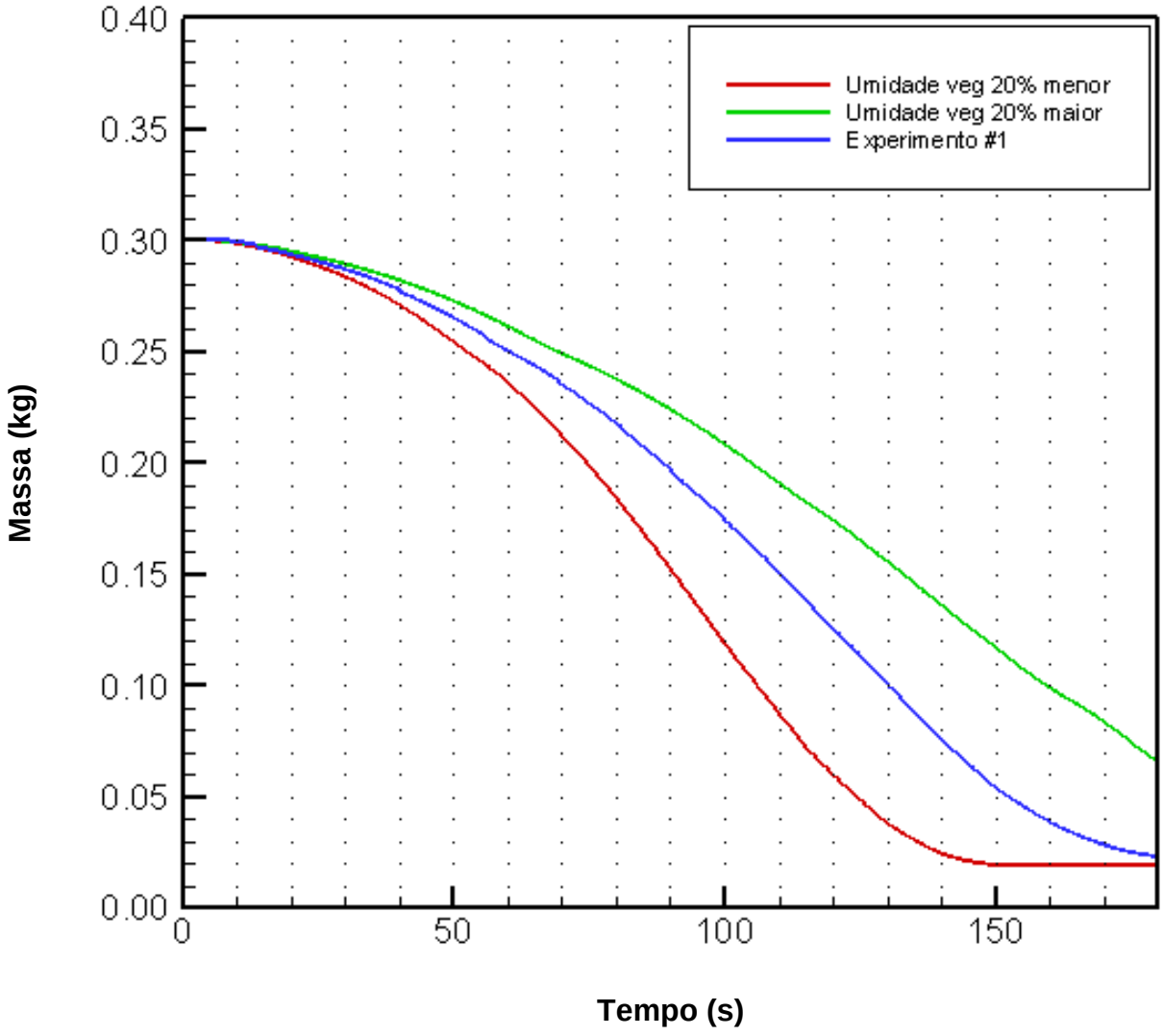

Figura 6.31 - Evolução temporal da massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na umidade da vegetação.

Os históricos temporais para a perda de massa e taxa de perda de massa obtidos a partir da simulação do experimento #1 e suas variações são representados nas Figuras 6.31 e 6.32, respectivamente.

As curvas para a massa da vegetação em função do tempo tem a mesma forma para todos os casos. A taxa de perda de massa atinge o seu máximo quando a frente do fogo atinge os limites do domínio computacional. As curvas na Figura 6.32 estão de acordo com as inclinações das curvas na Figura 6.31.

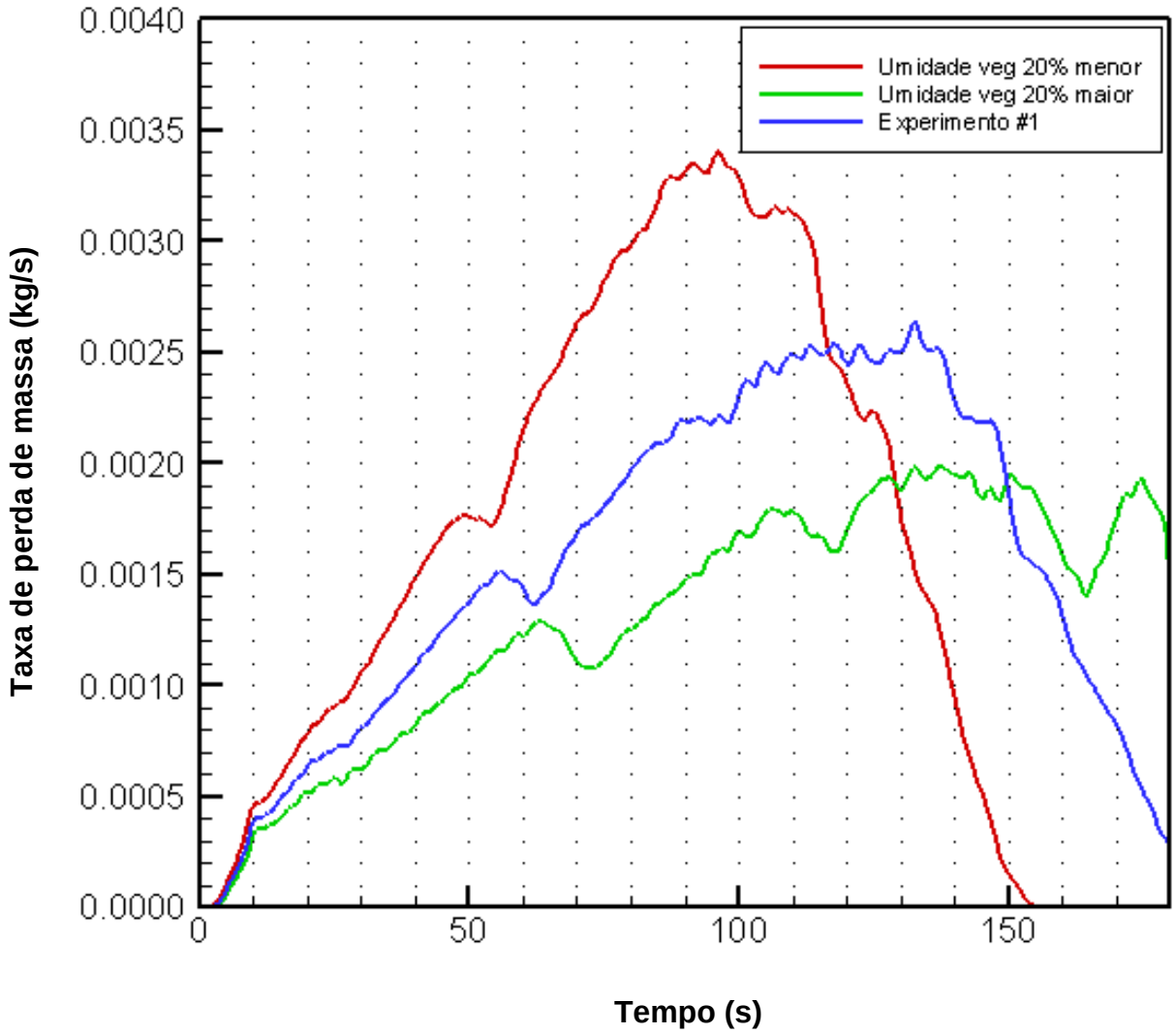

Figura 6.32 - Evolução temporal da taxa de perda de massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na umidade da vegetação.

O histórico temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional é representado na Figura 6.33. As curvas de temperatura apresentam um detalhe que fica mais evidente quanto maior a umidade da

vegetação. Assim, adota-se a curva em que a umidade da vegetação é 20% maior para explicar o fenômeno. Nota-se pela Figura 6.33 que a partir de aproximadamente 65 s a curva muda de inclinação, agora mais suave, para a partir de 85 s retomar o crescimento a uma inclinação maior que aquela apresentada até 65 s. Analisando-se o detalhe da curva do fluxo de calor radiativo líquido (Figura 6.36), percebe-se que há três vales importantes, sendo o primeiro a 61 s, o segundo a 64 s e o terceiro entre 67 s e 68 s, os quais são responsáveis pelo que acontece com a curva de temperatura (Figura 6.33) entre 65 s e 85 s.

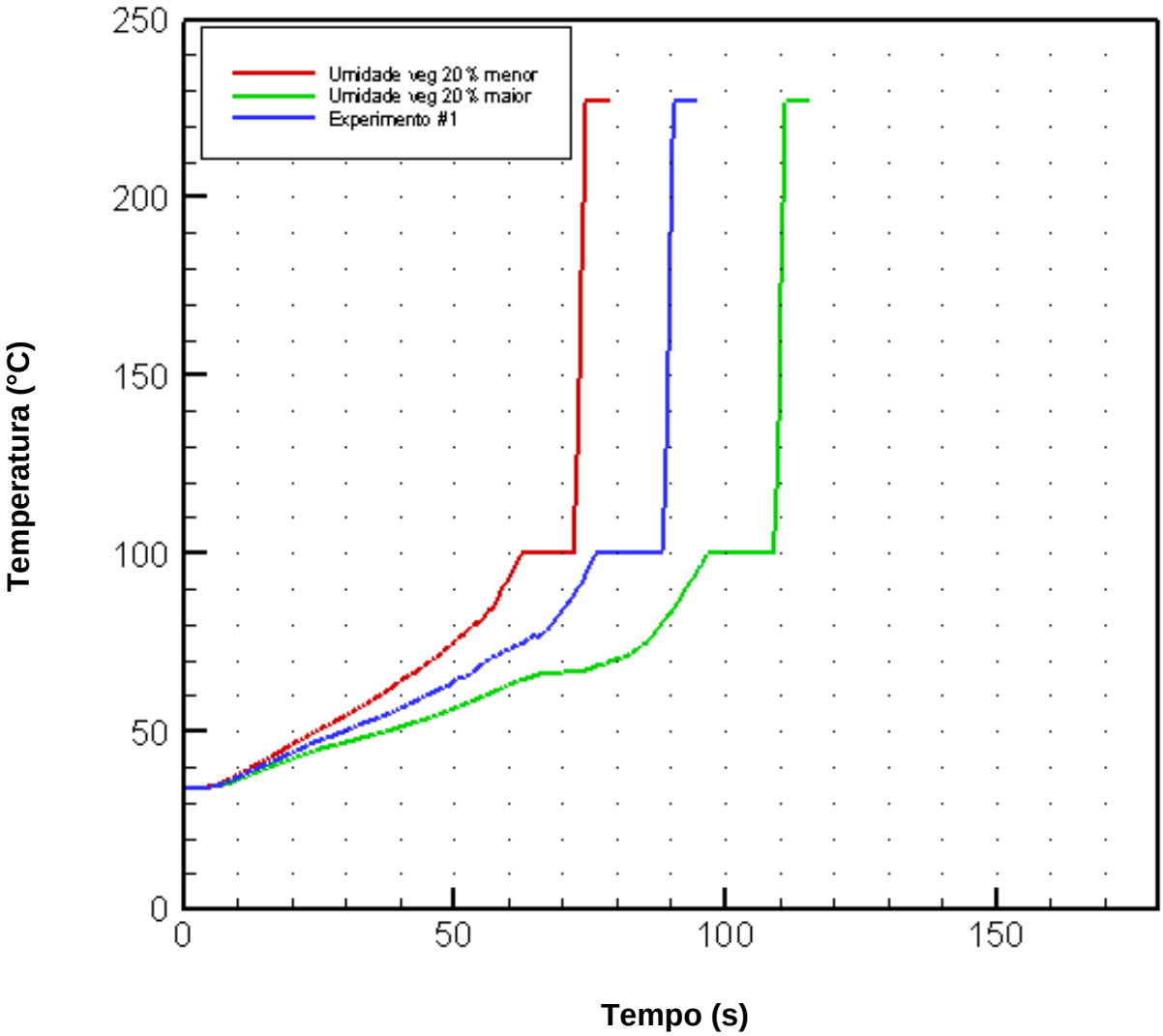

Figura 6.33 - Evolução temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na umidade da vegetação.

Cabe ressaltar nas curvas de temperatura, embora já esperado, que a duração do processo de evaporação da umidade da vegetação é tanto mais longo quanto maior a umidade da vegetação.

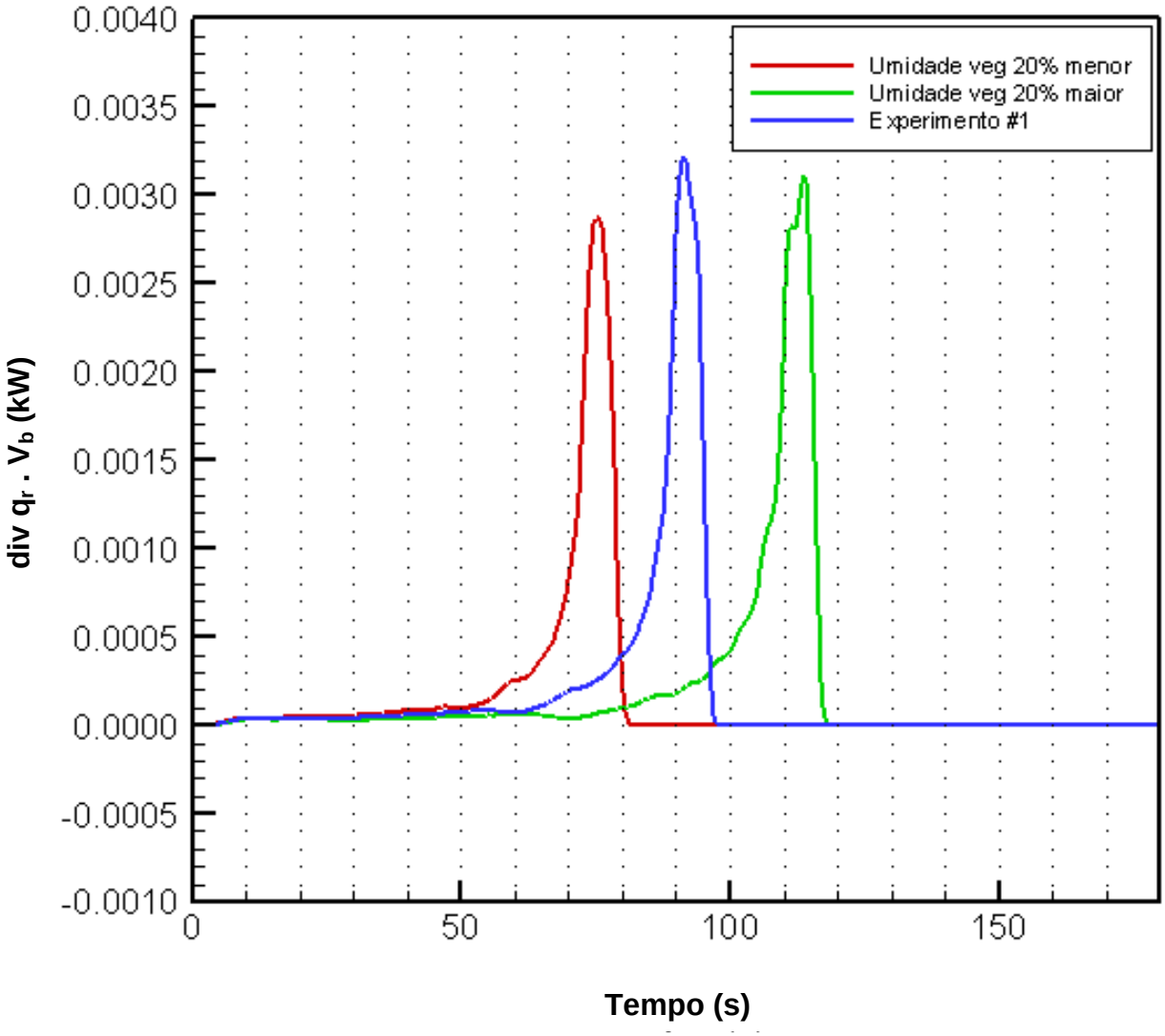

Figura 6.34 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na umidade da vegetação.

Os históricos temporais dos divergentes dos fluxos radiativo e convectivo sobre o elemento de combustível são apresentados nas Figuras 6.34 e 6.35, respectivamente. Pode ser visto a partir dos gráficos que o fluxo de calor por radiação é dominante sobre o fluxo de calor por convecção. Até quase a metade do processo de evaporação da umidade da vegetação, e para os três casos analisados, o fluxo líquido de calor por radiação é o único processo disponível para o

aquecimento do elemento de combustível. Em todos os três casos pode-se observar que a convecção fornece calor para o processo de evaporação da umidade apenas na sua fase final. Sua maior contribuição é para o processo de pirólise.

Tanto as curvas dos divergentes dos fluxos de calor por radiação como por convecção são semelhantes.

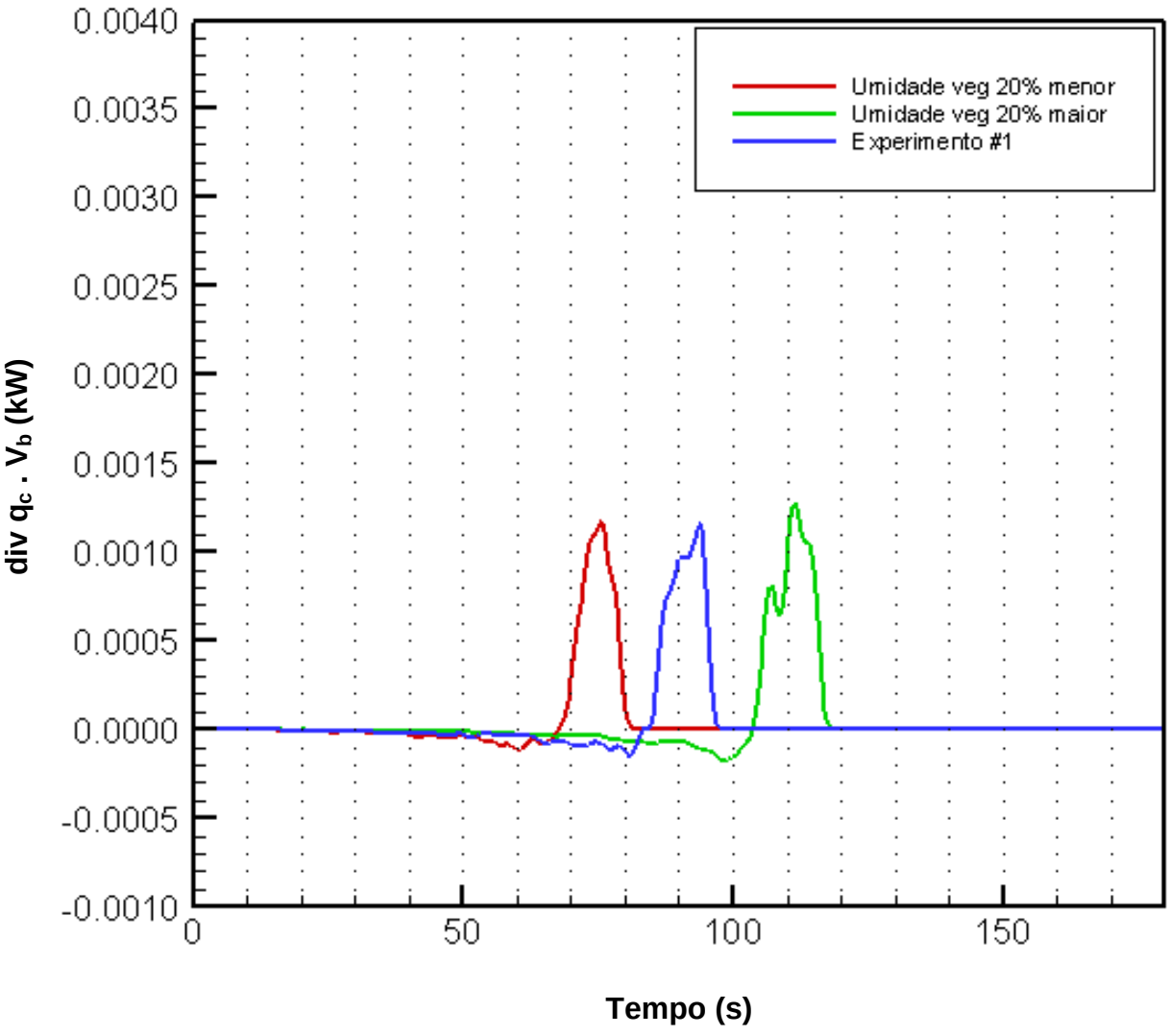

Figura 6.35 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na umidade da vegetação.

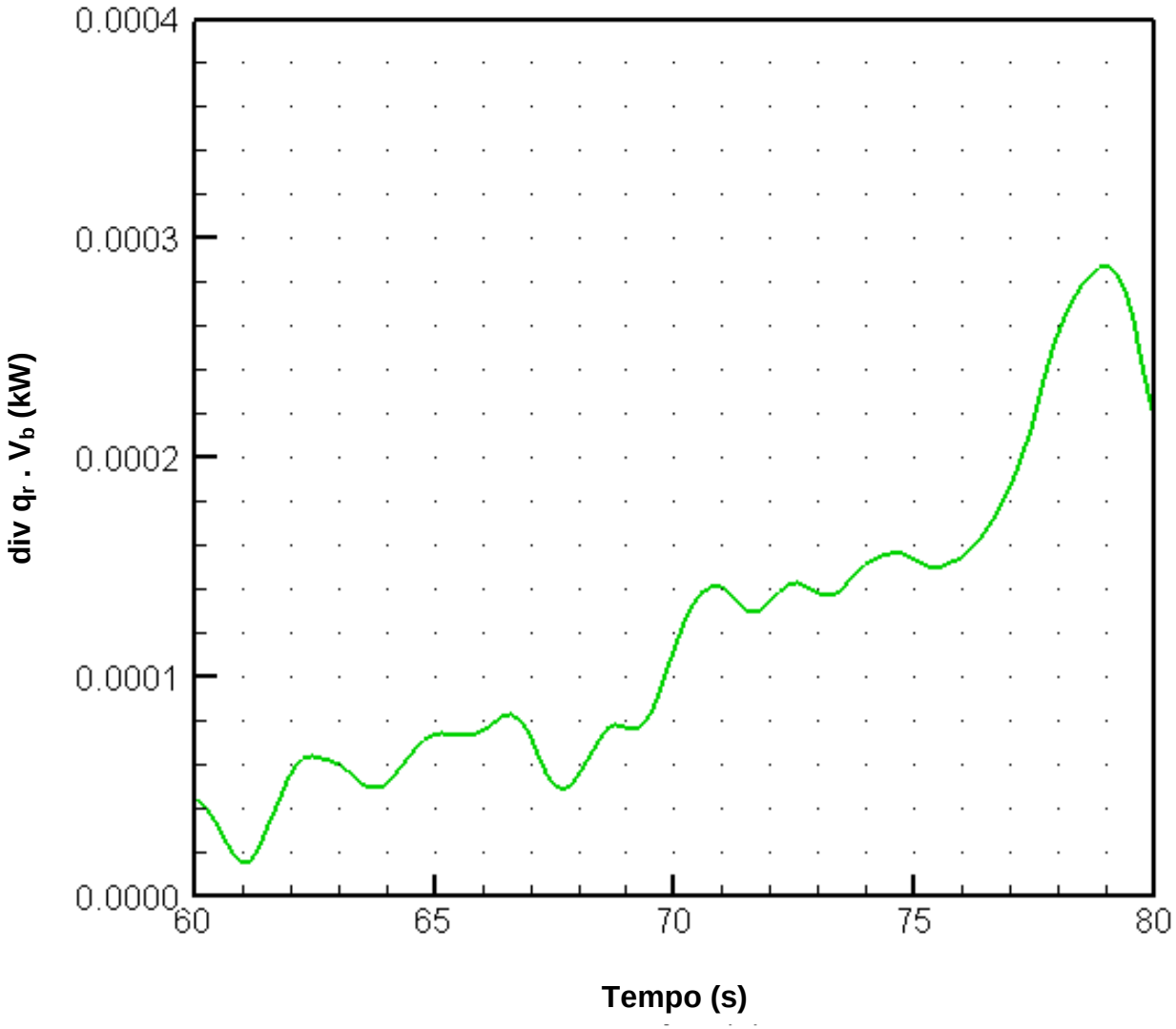

Figura 6.36 – Detalhe da evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para a umidade da vegetação 20% maior que no experimento #1 de Alta Floresta (MT).

6.5 Variação da simulação do experimento #1 de Alta Floresta (MT): análise da massa específica aparente da vegetação

Este caso é outra variante do caso apresentado no experimento #1 de Alta Floresta (MT). O objetivo destas duas simulações adicionais é avaliar o efeito da variação da massa específica aparente da vegetação. As simulações avaliaram o que aconteceria caso a massa específica aparente da vegetação fosse 20% menor e 20% maior. Os impactos dessa variação são comentados a seguir.

Para o caso em que a massa específica aparente da vegetação é 20% menor que o valor medido no experimento #1, a ROS não pode ser calculada (conforme descrito em 6.1), devido à extinção do incêndio em partes do domínio. Entretanto, para uma variação de 10% para menor, a ROS é de 0,22 m min^{-1}. Para o caso em que a variável é 20% maior, a ROS calculada é de 0,19 m min^{-1} (Tabela 6.18). A ROS medida no campo e a ROS calculada pela simulação do experimento #1 foram de 0,21 m min^{-1}.

Tabela 6.18 – Valores da massa específica aparente e da taxa de propagação medida e simulada para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações paramétricas.

	Massa específica aparente da vegetação	ROS (m min^{-1})	Variação da ROS com relação ao experimento (m min^{-1})
Experimento #1	-----	0,21	-----
Simulação do experimento #1	13,34	0,21	0
Simulação com valor da massa específica aparente da vegetação 20% menor	10,67	-----	-----
Simulação com valor da massa específica aparente da vegetação 20% maior	16,01	0,19	- 0,02

Os históricos temporais para a perda de massa e taxa de perda de massa obtidos a partir da simulação do experimento #1 e suas variações são representados nas Figuras 6.37 e 6.38, respectivamente. A massa seca inicial varia em função da massa específica aparente da vegetação. As curvas para a massa da vegetação em função do tempo têm a mesma forma para todos os casos, embora no caso com massa específica aparente da vegetação menor a curva tenha a influência de um menor fluxo líquido de radiação para o elemento combustível, devido a um coeficiente de absorção menor. Além disso, entre 50 s e 70 s o divergente do fluxo de calor por radiação diminui (Figura 6.41), o que é refletido na curva de massa específica aparente 20% menor na Figura 6.37.

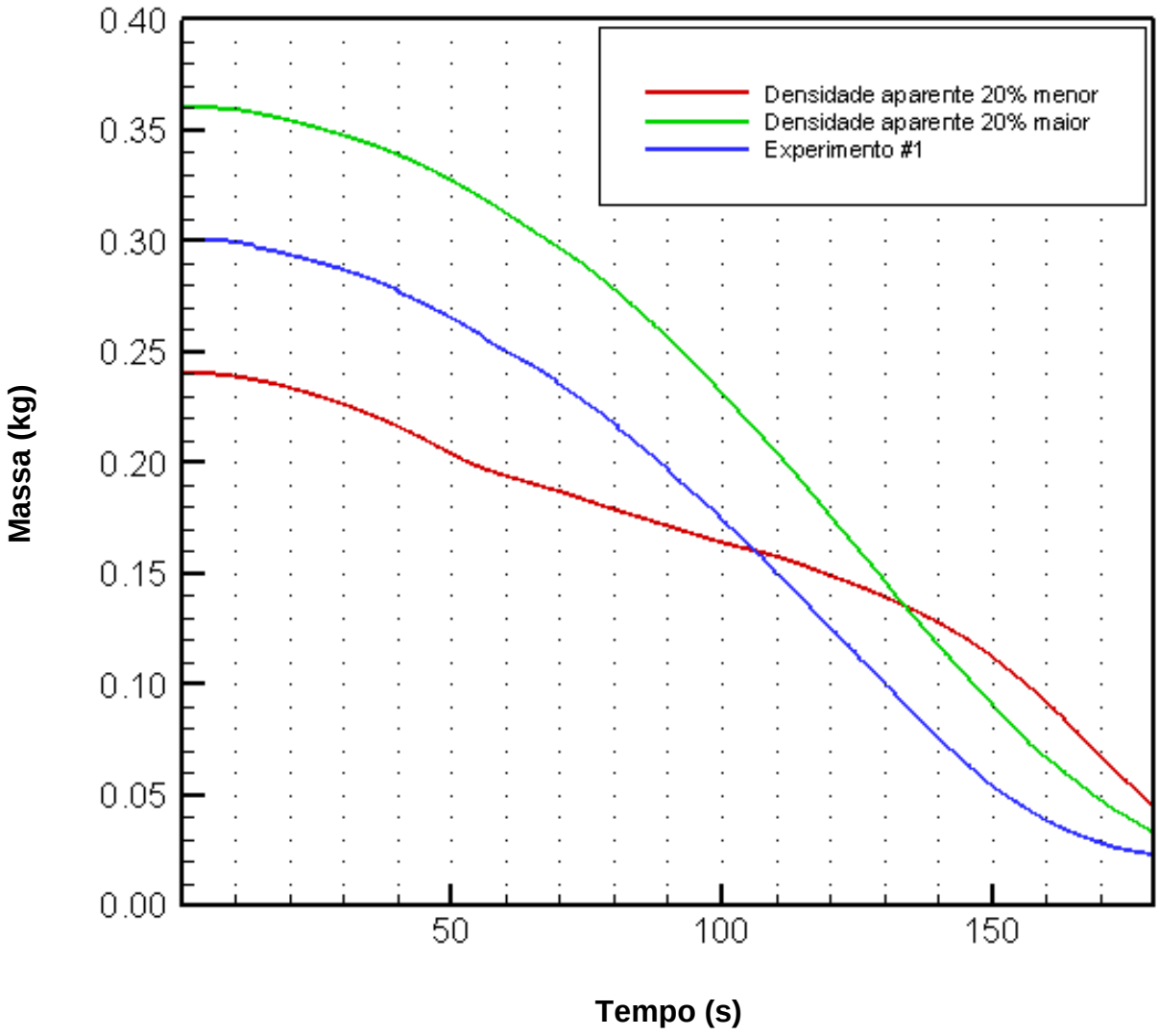

Figura 6.37 - Evolução temporal da massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume da vegetação.

A taxa de perda de massa atinge o seu máximo quando a frente do fogo atinge os limites do domínio computacional.

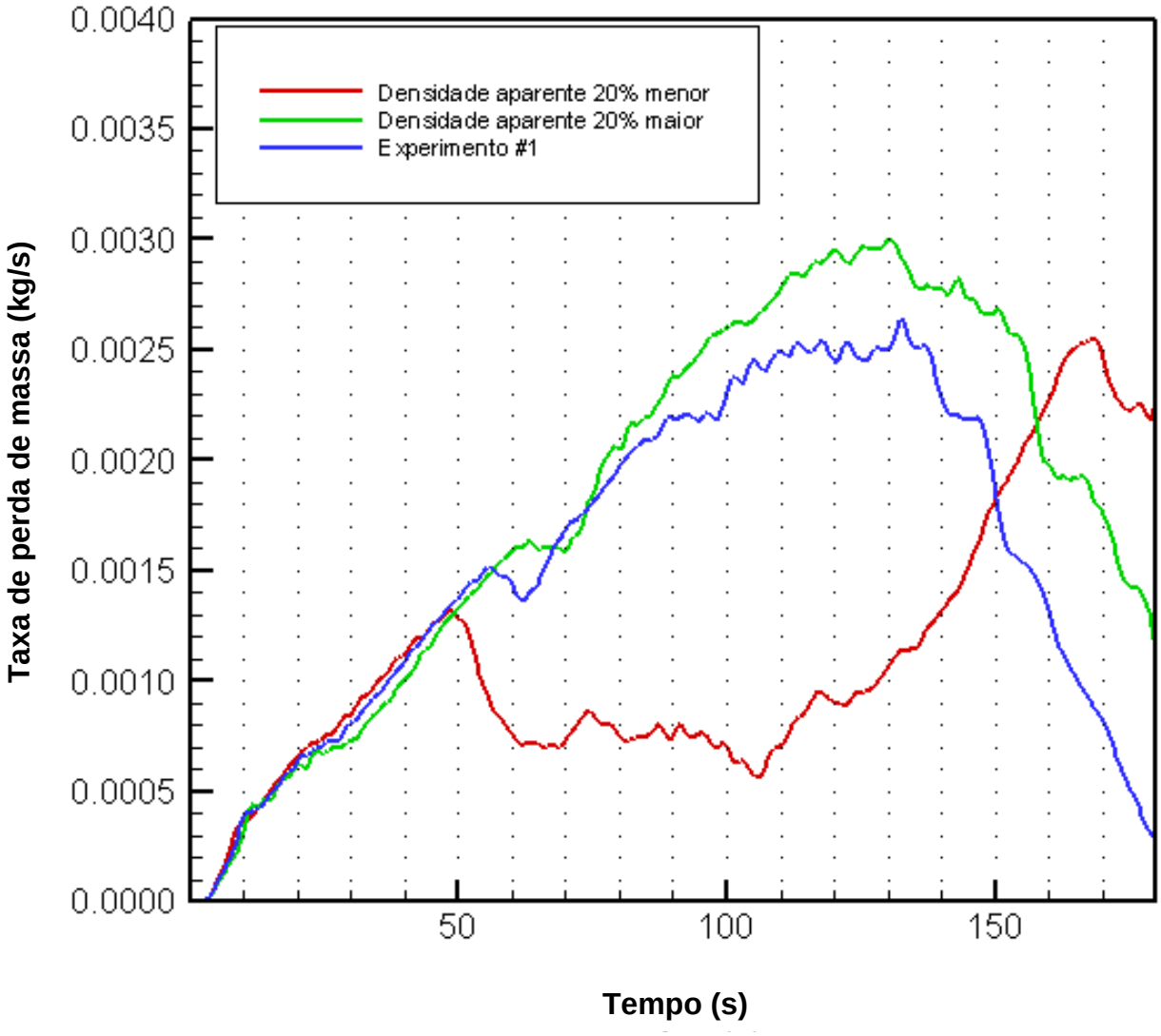

Figura 6.38 - Evolução temporal da taxa de perda de massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume da vegetação.

A massa específica aparente da vegetação também é uma variável importante na caracterização da vegetação. Um valor maior para essa variável indica que para um determinado volume, existe proporcionalmente mais vegetação e menos ar. Havendo mais vegetação há proporcionalmente mais força de arrasto (equação (3.21)) e uma maior troca de calor por convecção (equação (3.25)). Também são afetadas as trocas de calor por radiação (equação (3.47)), a evaporação da umidade (equação (3.57)) e volatilização de produtos inflamáveis (equação (3.58)).

Entretanto, como pode ser observado na Tabela 6.18, a variação da ROS com a massa específica aparente da vegetação não é muito influenciada, quando comparada por exemplo com a variação da umidade da vegetação.

O histórico temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional é representado na Figura 6.39.

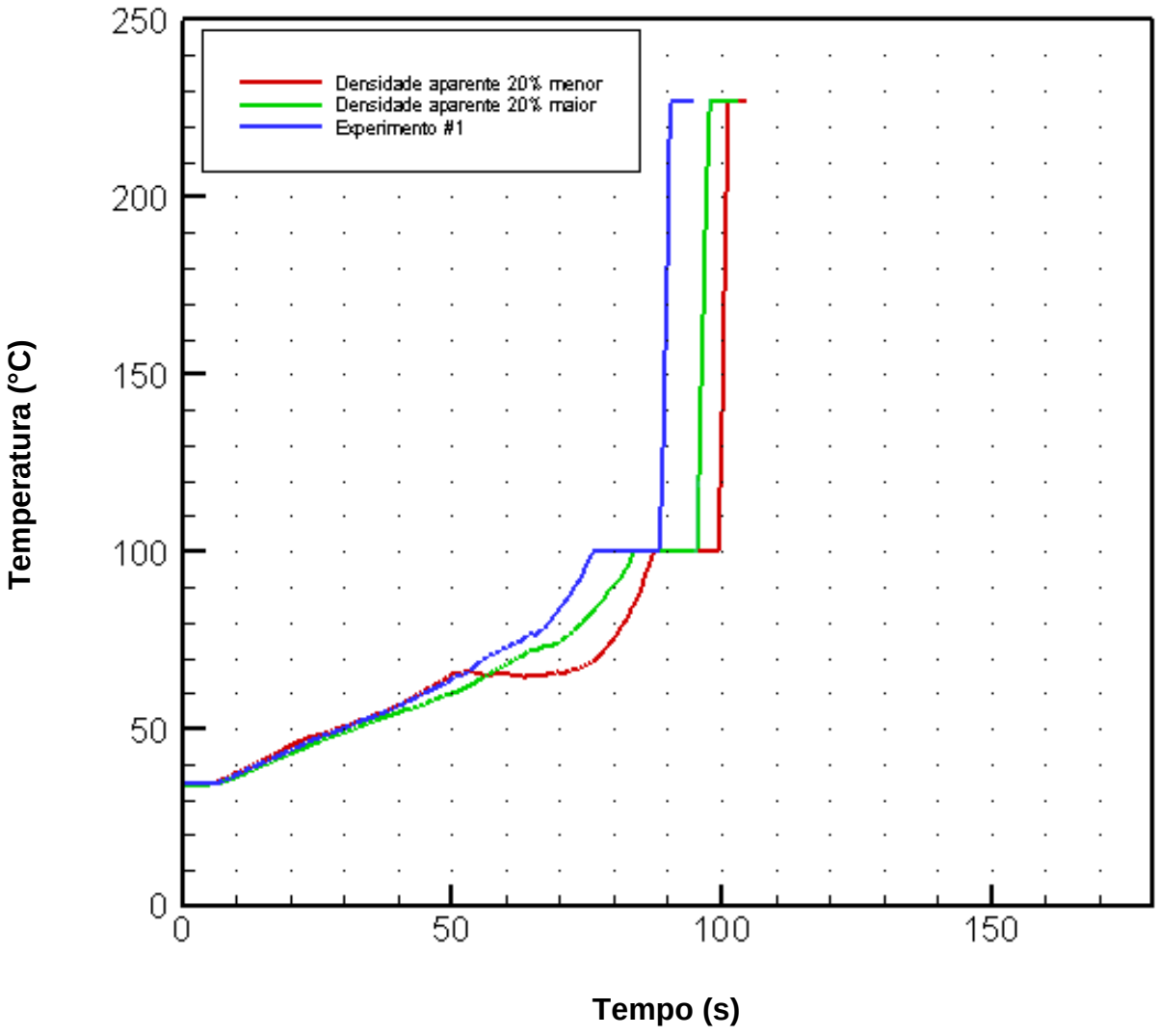

Figura 6.39 - Evolução temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na massa específica aparente da vegetação.

As curvas de temperatura são semelhantes para os três casos, e apenas para o caso em que a massa específica aparente da vegetação é 20% menor que o valor medido no experimento #1, é que se observou uma variação na curva devido ao

baixo fluxo líquido de energia proveniente da radiação (Figura 6.41) e da convecção (Figura 6.43).

Para os experimentos, a taxa no tempo de aumento da temperatura do elemento de combustível em análise é apresentada até 50 s de tempo real na Figura 6.40, que foi obtida a partir dos dados da Figura 6.39. Considerando para uma análise os dados das curvas desde o tempo 10 s até 45 s, nota-se que as variações mostradas para dT/dt ao longo dessa faixa de tempo não permitem que as curvas sejam aproximadas por uma reta horizontal.

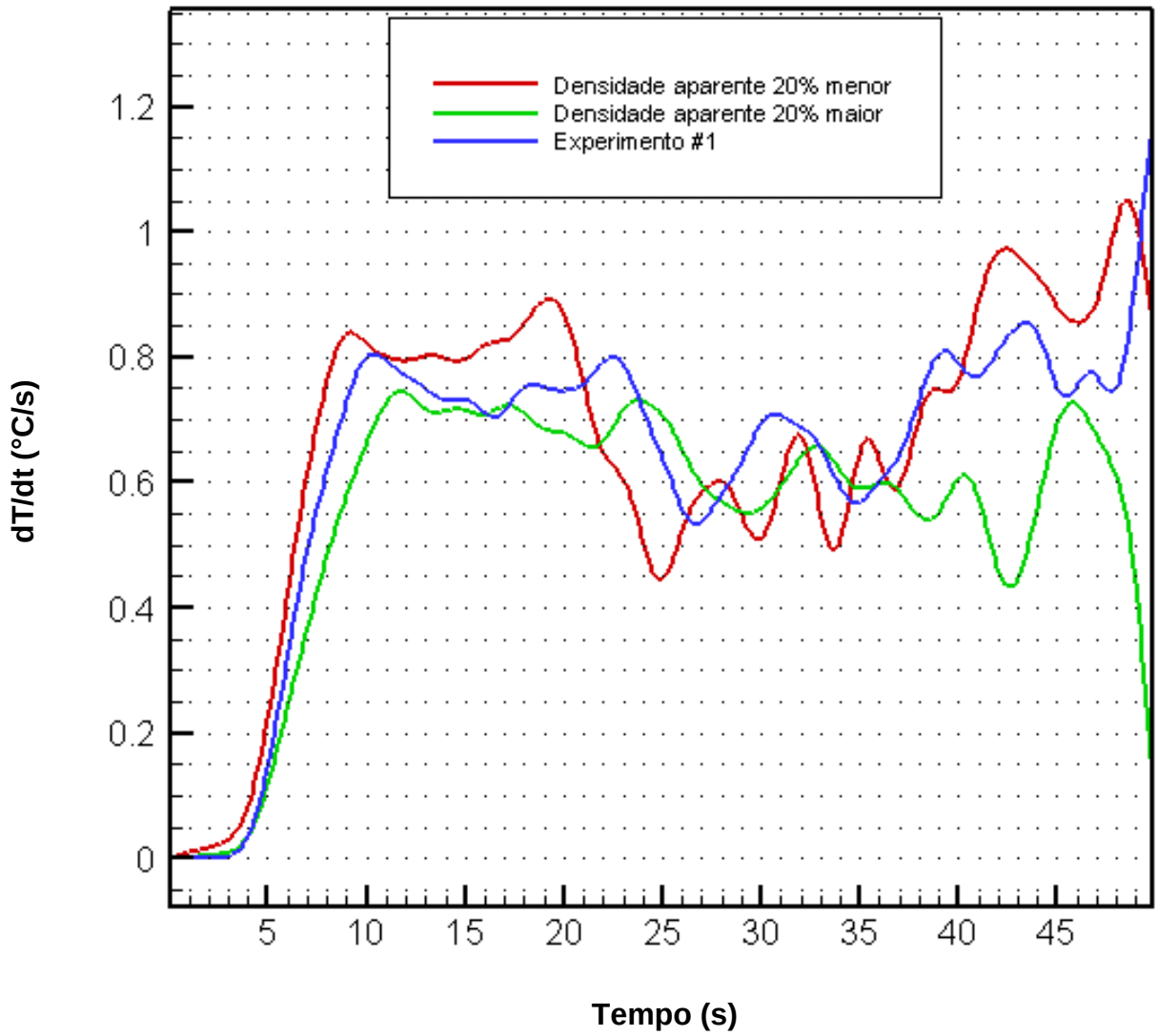

Figura 6.40 - Evolução da variação da temperatura no tempo para o ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na massa específica aparente da vegetação.

Os históricos temporais dos divergentes dos fluxos radiativo e convectivo sobre o elemento de combustível são apresentados nas Figuras 6.41 e 6.43, respectivamente. Pode ser visto a partir dos gráficos que o fluxo de calor por radiação é dominante sobre o fluxo de calor por convecção. Até quase a metade do processo de evaporação da umidade da vegetação, e para os dois casos analisados, o fluxo líquido de calor por radiação é o único processo disponível para o aquecimento do elemento de combustível. Nos dois casos analisados pode-se observar que a convecção fornece calor para o processo de evaporação da umidade apenas na sua fase final. Sua maior contribuição é para o processo de pirólise.

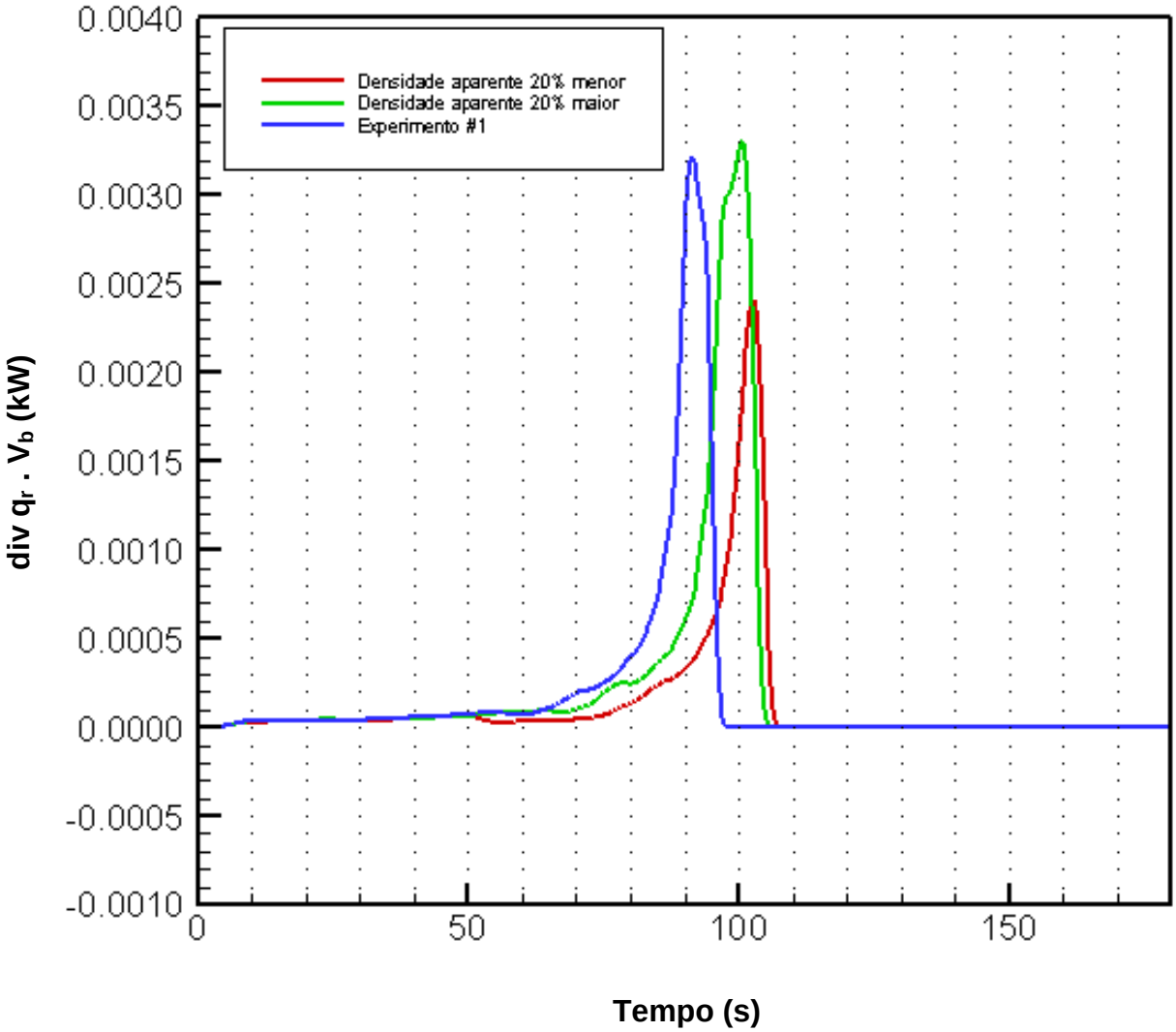

Figura 6.41 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na massa específica aparente da vegetação.

Uma análise mais detalhada dos 50 s iniciais do divergente do fluxo de radiação é mostrado na Figura 6.42. Pode-se perceber que as curvas possuem valores muito próximos do divergente do fluxo de radiação.

Uma mesma análise mais detalhada foi feita para os 50 s iniciais do divergente do fluxo de convecção, conforme mostrado na Figura 6.44. Os divergentes dos fluxos de convecção têm valores muito próximos. Entretanto, os valores são negativos, o que indica que o elemento de combustível em análise cede calor por convecção para a fase gasosa.

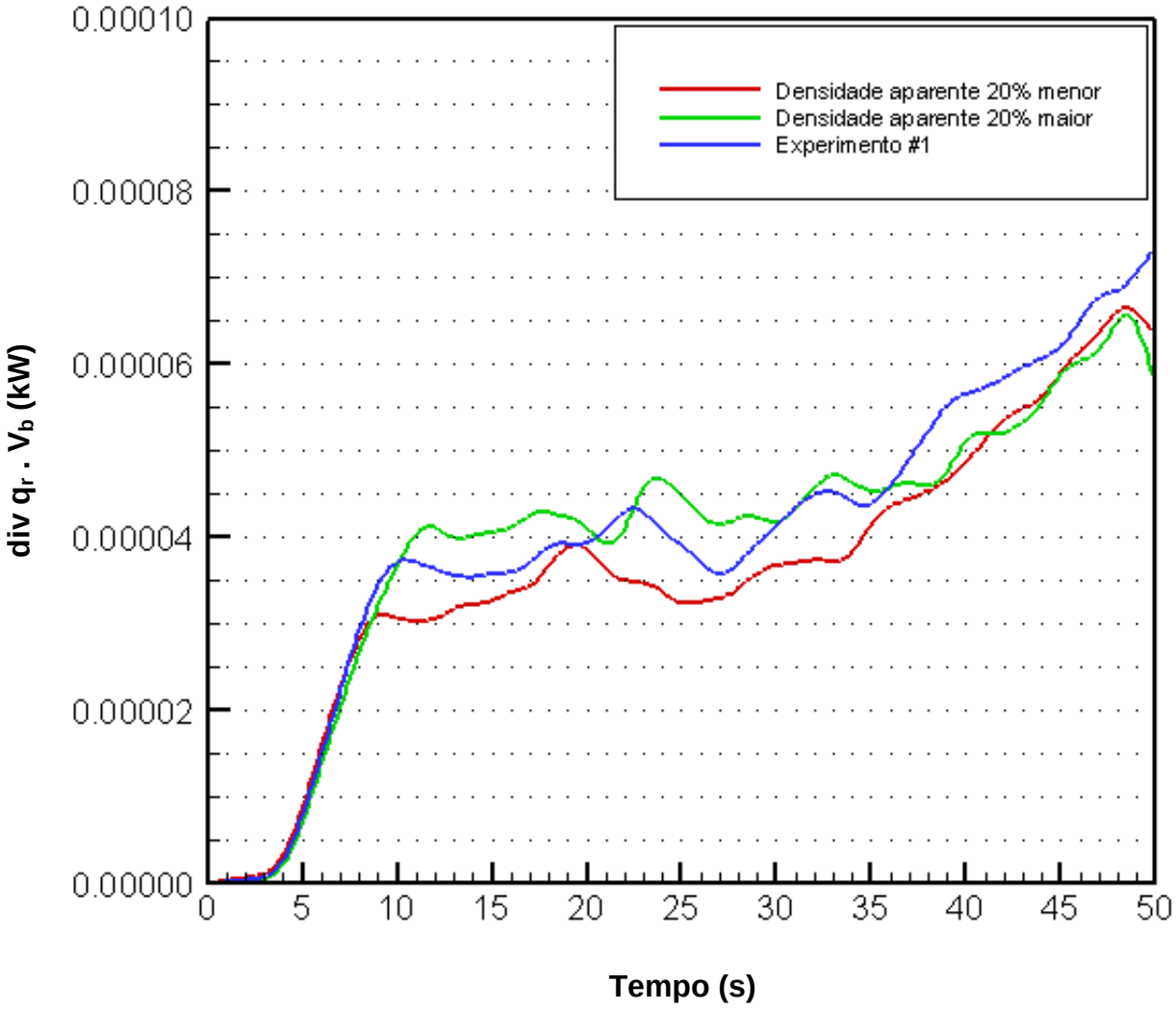

Figura 6.42 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume da vegetação.

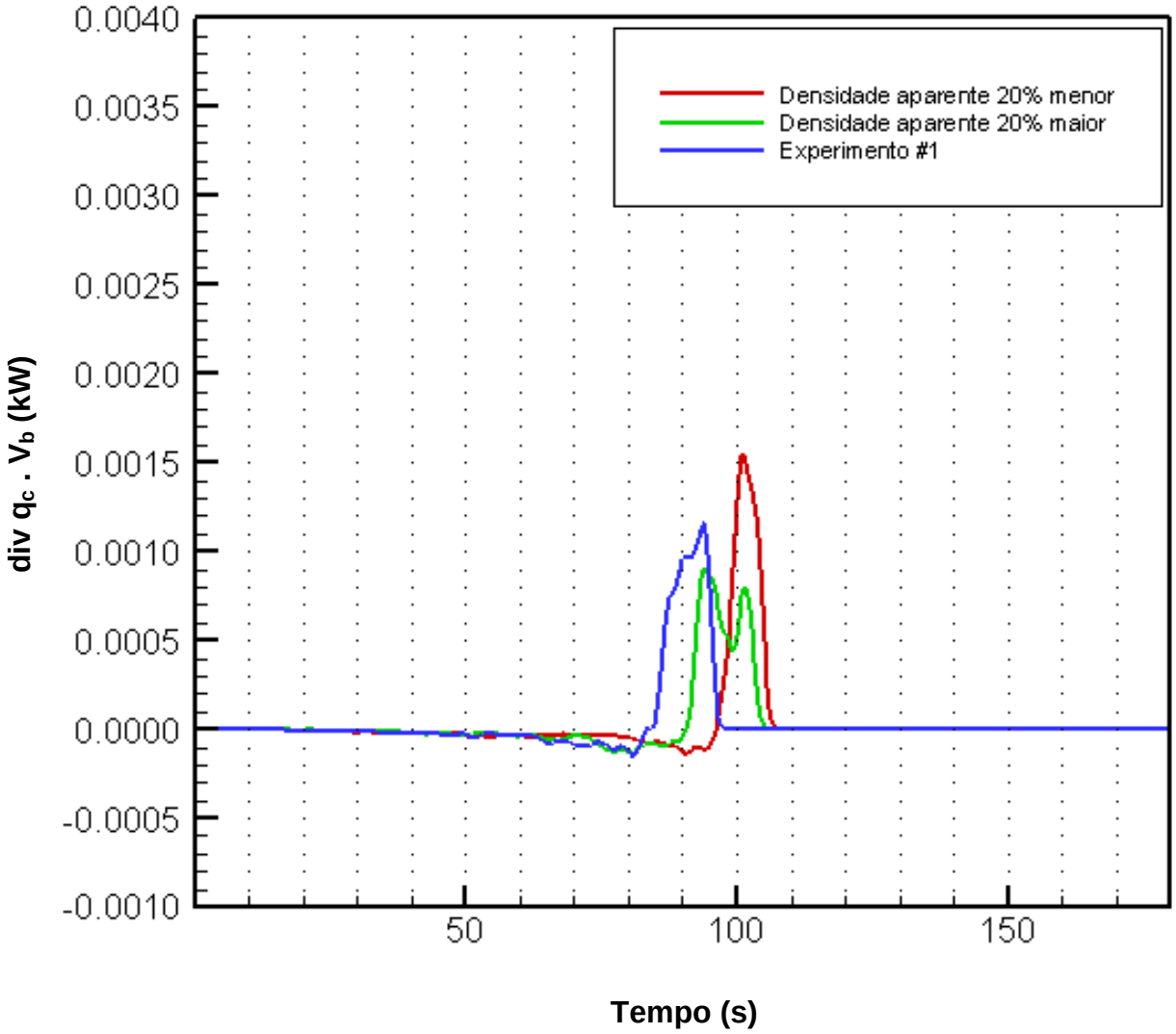

Figura 6.43 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na massa específica aparente da vegetação.

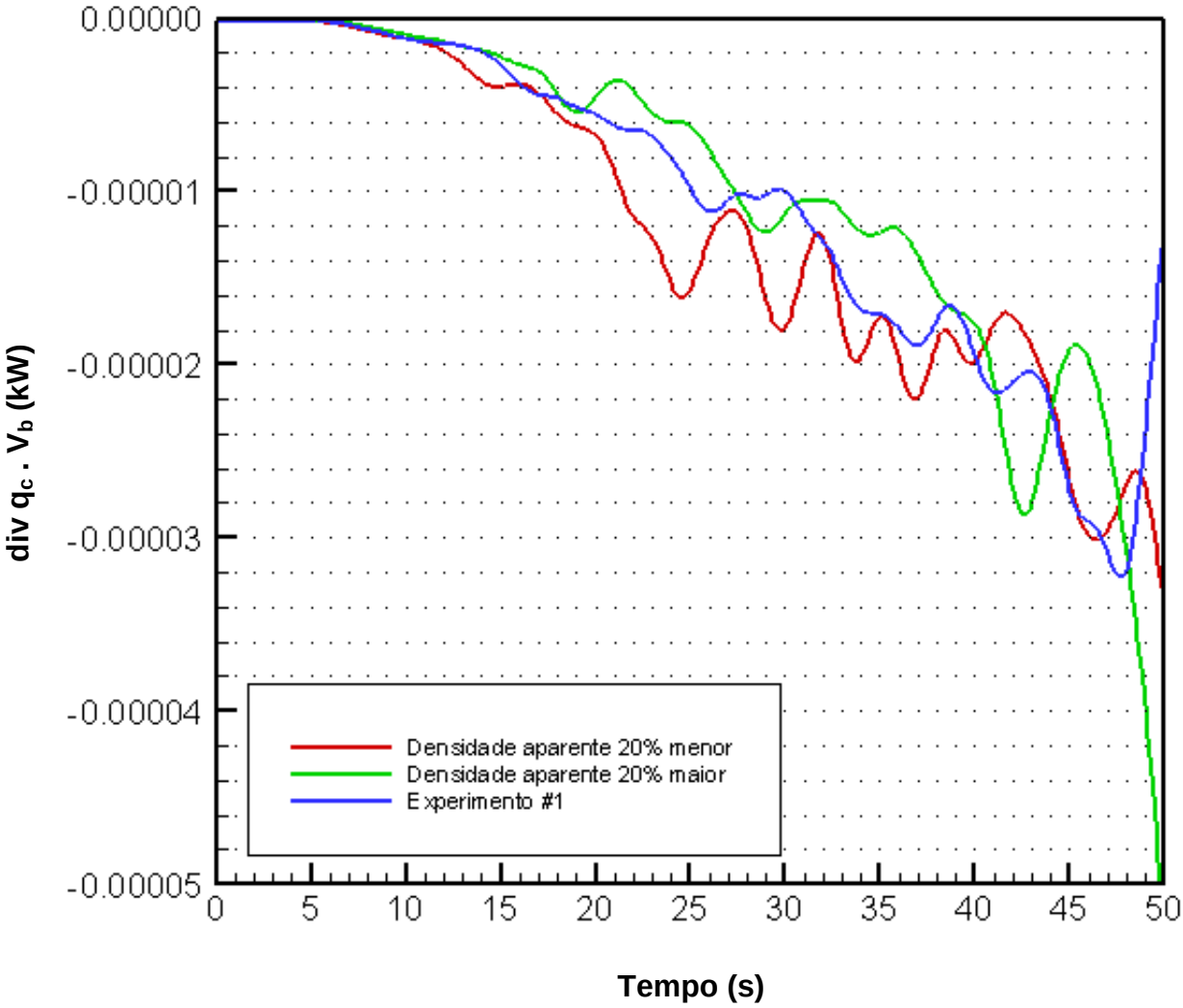

Figura 6.44 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na área superficial por volume da vegetação.

6.6 Variação da simulação do experimento #1 de Alta Floresta (MT): análise da temperatura inicial da vegetação

Nesta seção comparam-se duas simulações com o caso base descrito no experimento #1. A diferença entre as simulações está na variação da temperatura inicial da vegetação. As simulações avaliaram o que aconteceria caso a temperatura inicial da vegetação fosse 20% menor e 20% maior.

A ROS medida no campo e a ROS calculada pela simulação do experimento #1 foram de 0,21 m min^{-1}. A temperatura da vegetação não influencia a ROS na faixa de valores analisada (Tabela 6.19).

Tabela 6.19 – Valores da temperatura inicial e da taxa de propagação medida e simulada para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações paramétricas.

	Temperatura inicial da vegetação	ROS (m min^{-1})	Variação da ROS com relação ao experimento (m min^{-1})
Experimento #1	-----	0,21	-----
Simulação do experimento #1	34,1	0,21	0
Simulação com valor da temperatura inicial da vegetação 20% menor	27,3	0,21	0
Simulação com valor da temperatura inicial da vegetação 20% maior	40,9	0,21	0

Os históricos temporais para a perda de massa e taxa de perda de massa obtidos a partir da simulação do experimento #1 e suas variações são representados nas Figuras 6.45 e 6.46, respectivamente.

A massa seca inicial foi 0,30 kg para os três casos caindo depois de 180 s a 0,02 kg. As curvas para a massa da vegetação em função do tempo são iguais para todos os casos. A taxa de perda de massa atinge o seu máximo quando a frente do

fogo atinge os limites do domínio computacional. As três curvas para a taxa de perda de massa têm aproximadamente a mesma forma.

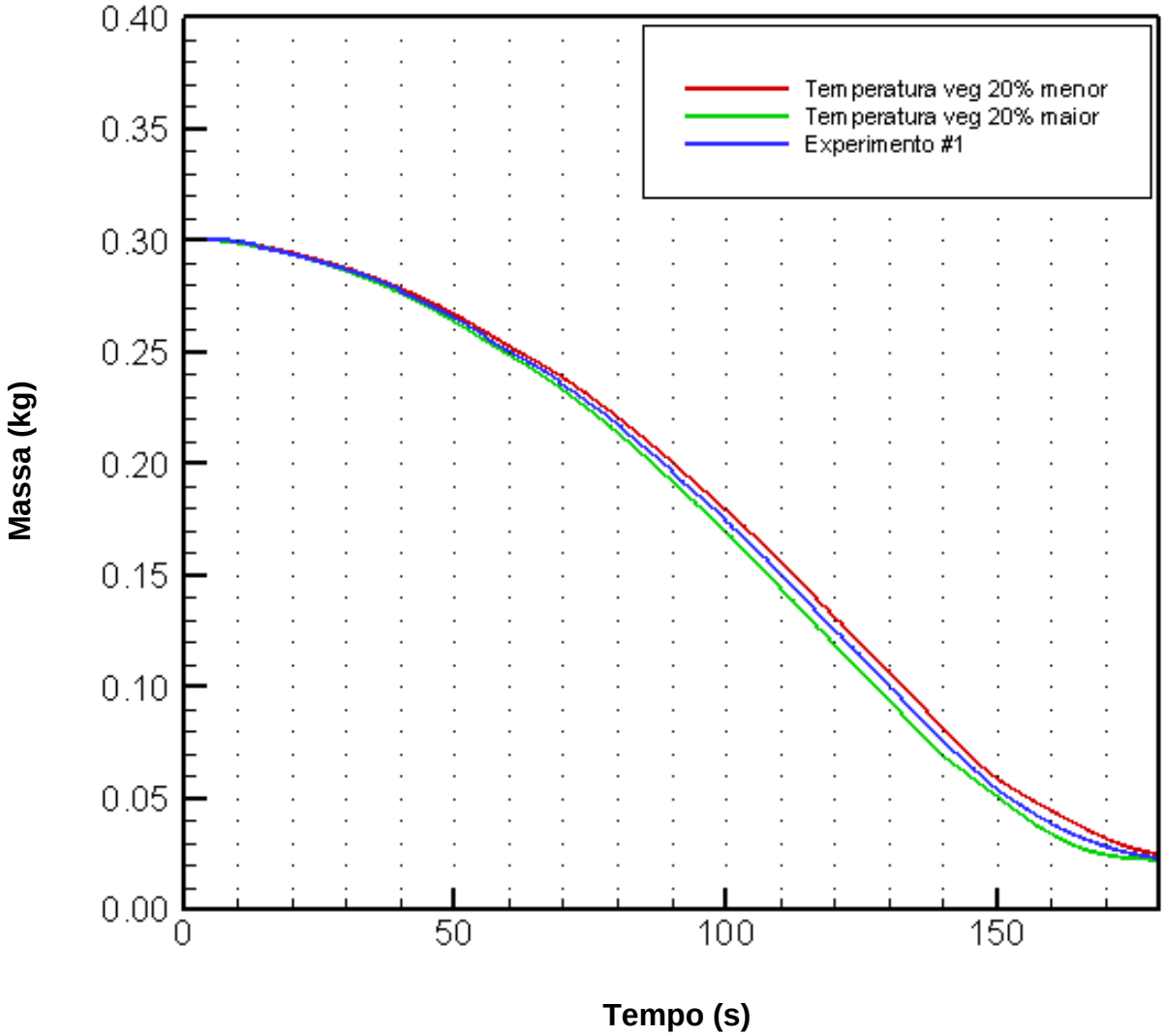

Figura 6.45 - Evolução temporal da massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na temperatura inicial da vegetação.

O histórico temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional é representado na Figura 6.47. As curvas de temperatura são praticamente as mesmas para os três casos estudados. Até mesmo o tempo que o elemento de combustível em estudo leva para ser removido do domínio computacional é bastante próximo para os três casos. Observa-se pela análise dos gráficos que o processo de secagem começa tão mais tarde quanto menor a temperatura inicial da vegetação, pois o elemento de combustível precisa receber

mais energia até chegar ao ponto de evaporação da umidade quando sua temperatura inicial é menor.

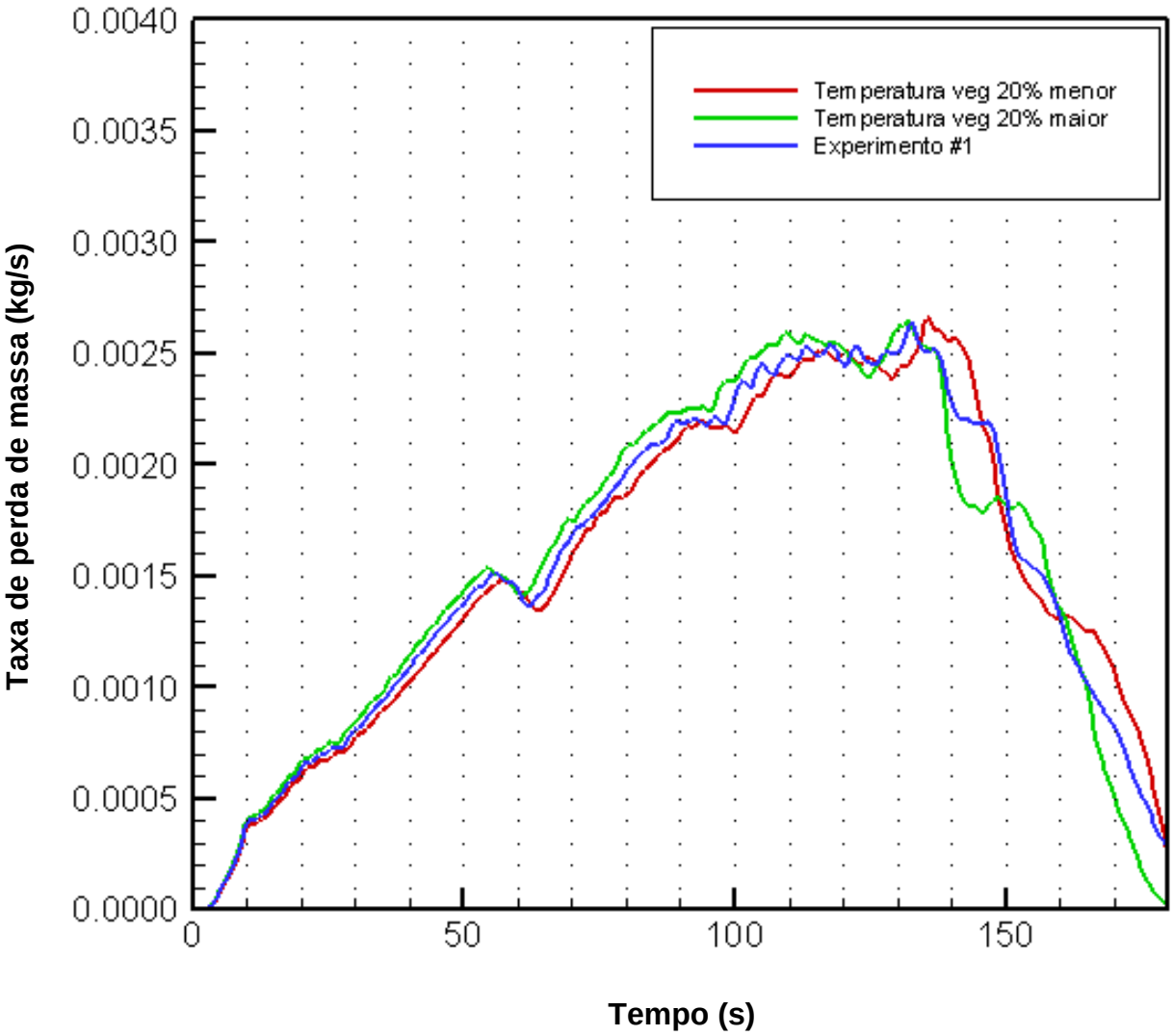

Figura 6.46 - Evolução temporal da taxa de perda de massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na temperatura inicial da vegetação.

A análise das Figuras 6.48 e 6.49 mostra que tanto o divergente do fluxo radiativo quanto o divergente do fluxo convectivo para todo o tempo de vida útil do elemento de combustível (até sua retirada do domínio computacional) são praticamente os mesmos e independem da temperatura inicial da vegetação (pelo menos na faixa de variação estudada).

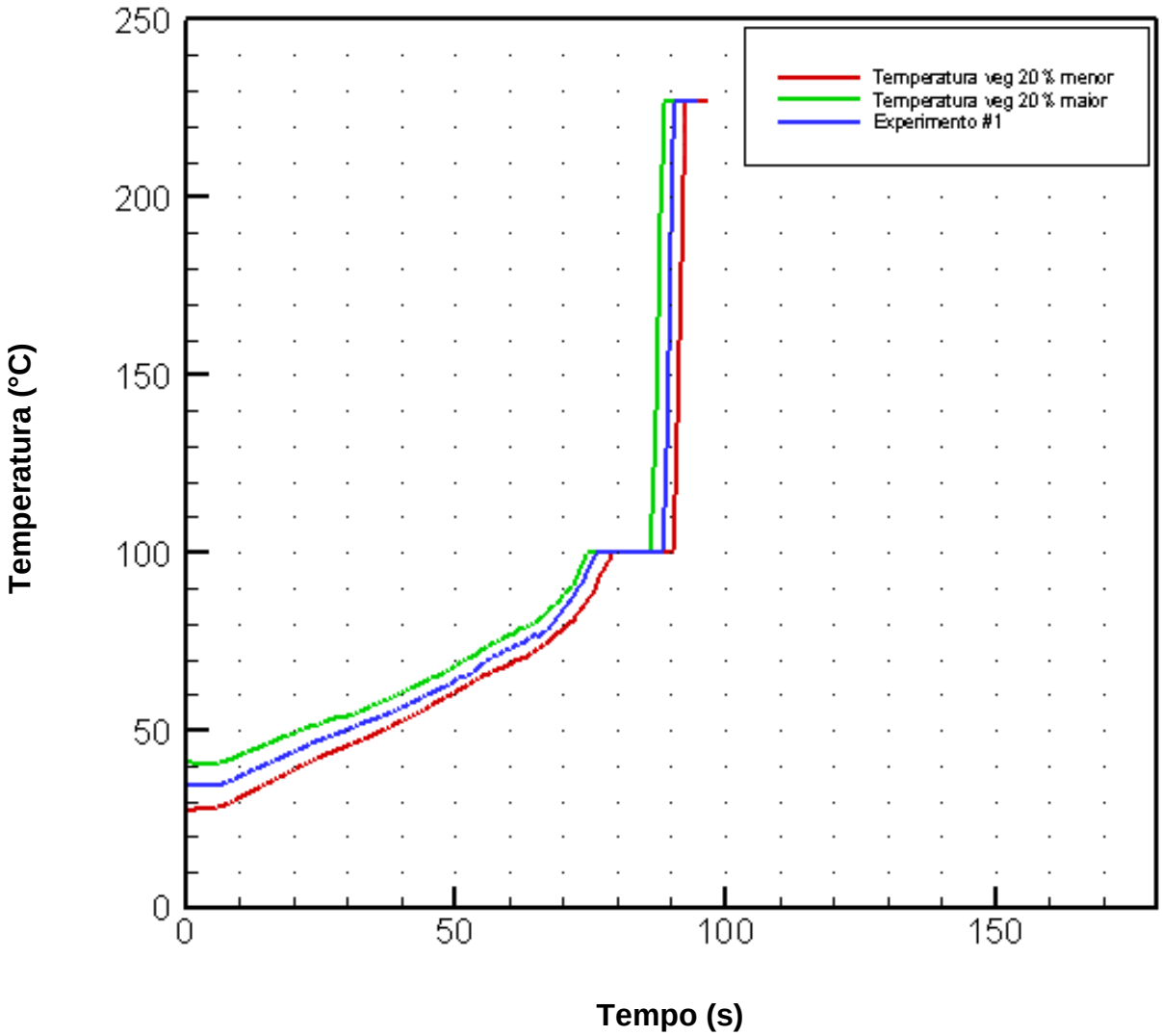

Figura 6.47 - Evolução temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na temperatura inicial da vegetação.

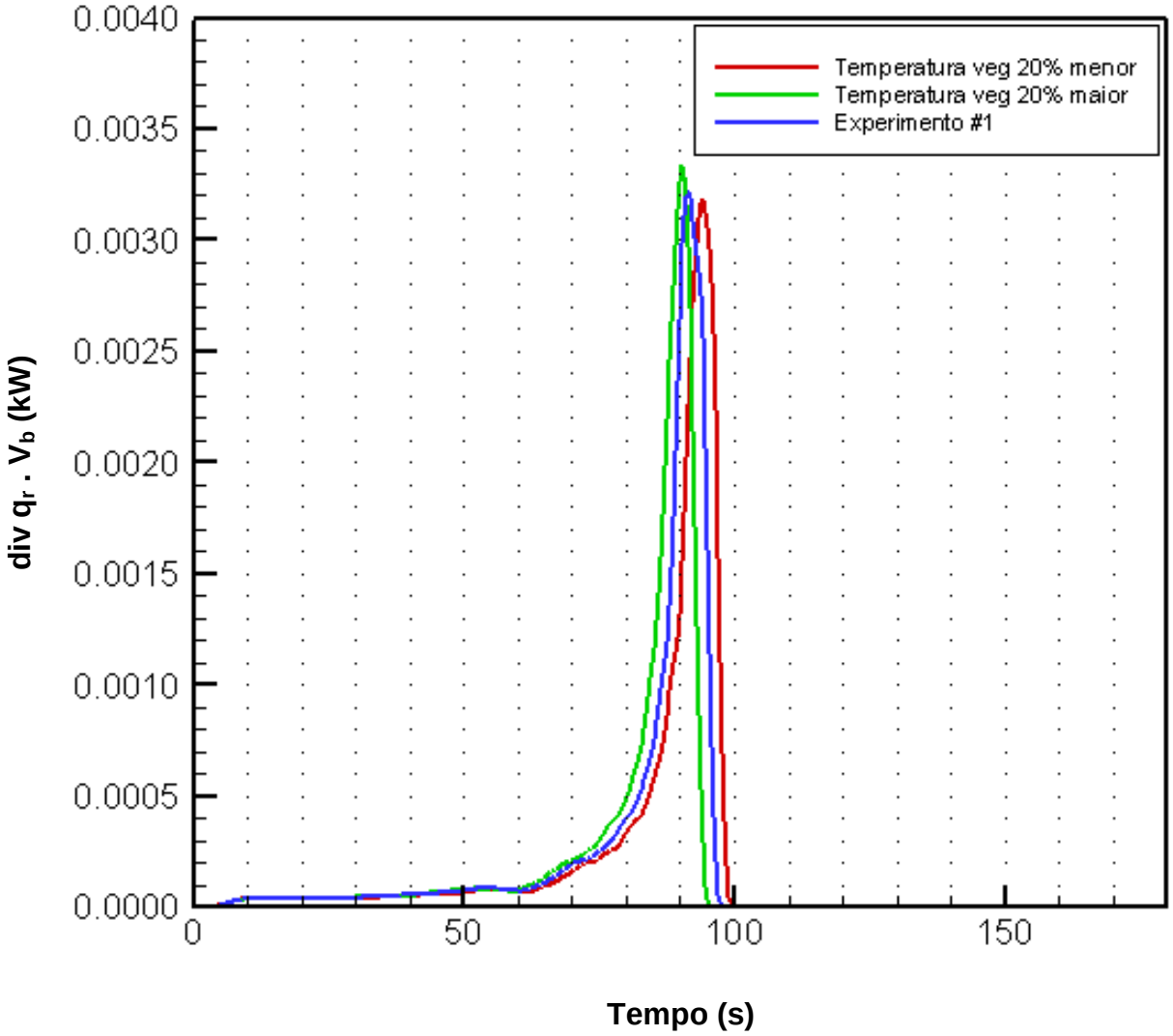

Figura 6.48 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na temperatura inicial da vegetação.

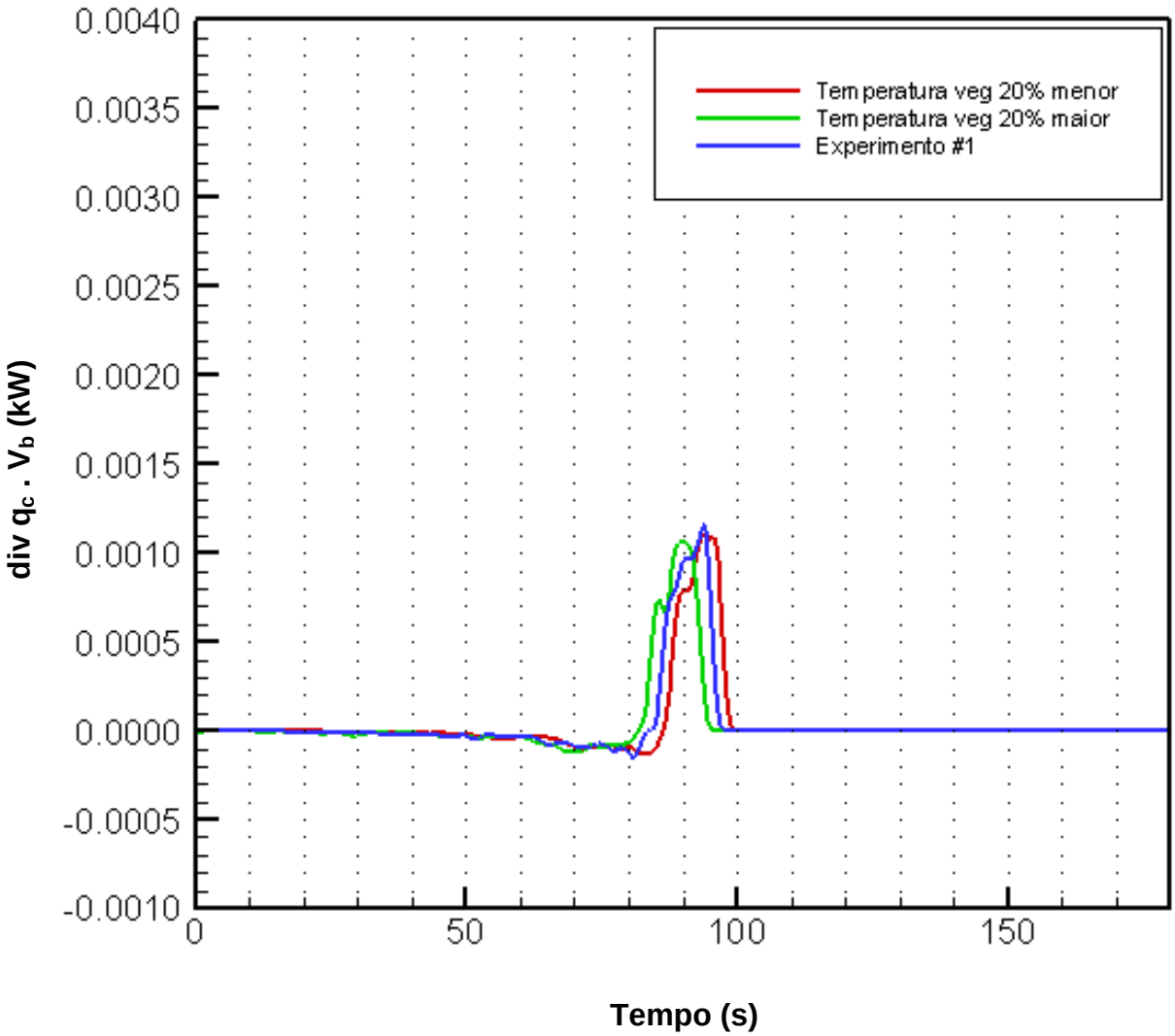

Figura 6.49 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na temperatura inicial da vegetação.

6.7 Variação da simulação do experimento #1 de Alta Floresta (MT): análise da umidade do ar

A umidade do ar é o último caso derivado do experimento #1 a ser analisado, e é o único que não se refere à vegetação. As simulações avaliaram o que aconteceria caso a umidade do ar fosse 20% menor e 20% maior. Os impactos dessa variação são descritos a seguir.

A ROS medida no campo e a ROS calculada pela simulação do experimento #1 foram de 0,21 m min^{-1}. Para os casos em que a umidade do ar é 20% menor e maior que o valor medido no experimento #1, a ROS calculada também é de 0,21 m min^{-1} (Tabela 6.20).

Tabela 6.20 – Valores da umidade do ar e da taxa de propagação medida e simulada para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações paramétricas.

	Umidade do ar	ROS (m min^{-1})	Variação da ROS com relação ao experimento (m min^{-1})
Experimento #1	-----	0,21	-----
Simulação do experimento #1	27,0	0,21	0
Simulação com valor da umidade do ar 20% menor	21,6	0,21	0
Simulação com valor da umidade do ar 20% maior	32,4	0,21	0

Os históricos temporais para a perda de massa e taxa de perda de massa obtidos a partir da simulação do experimento #1 e suas variações são representados nas Figuras 6.50 e 6.51, respectivamente. A massa seca inicial foi 0,30 kg para os três casos caindo depois de 180 s a valores iguais. As curvas de massa são praticamente iguais e as da taxa de perda de massa são muito similares.

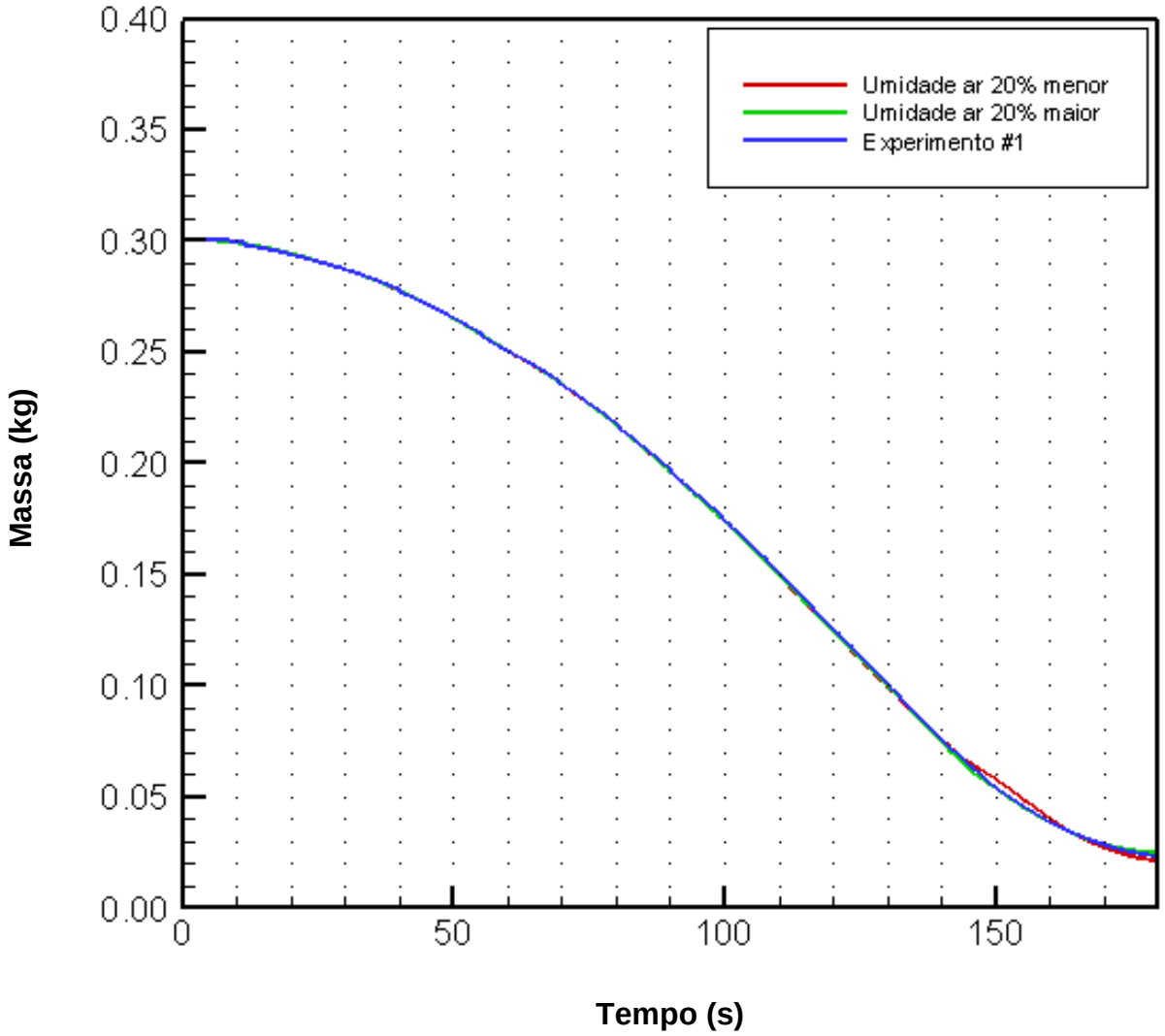

Figura 6.50 - Evolução temporal da massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na umidade do ar.

O histórico temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional é representado na Figura 6.52. As curvas de temperatura são praticamente as mesmas para os três casos estudados. O tempo que o elemento de combustível em estudo leva para ser removido do domínio computacional é o mesmo para os três casos. O processo de secagem começa no mesmo instante de tempo e dura o mesmo tempo em todos os casos. A umidade do ar não influencia as curvas de temperatura do elemento de combustível em estudo.

O histórico temporal do divergente do fluxo radiativo e do divergente do fluxo convectivo (Figuras 6.53 e 6.54) no ponto de análise da vegetação do domínio computacional mostram similaridade entre os três casos estudados. Para o caso em que a umidade do ar é 20% maior, e considerando o elemento de combustível em

análise, nota-se que o fluxo convectivo é menor que os demais e o fluxo radiativo é o maior de todos. Apesar de variações pequenas nos valores dos picos dos fluxos convectivos e radiativos, a ROS é a mesma para todos os casos, e a umidade do ar não afeta a ROS na variação paramétrica estudada.

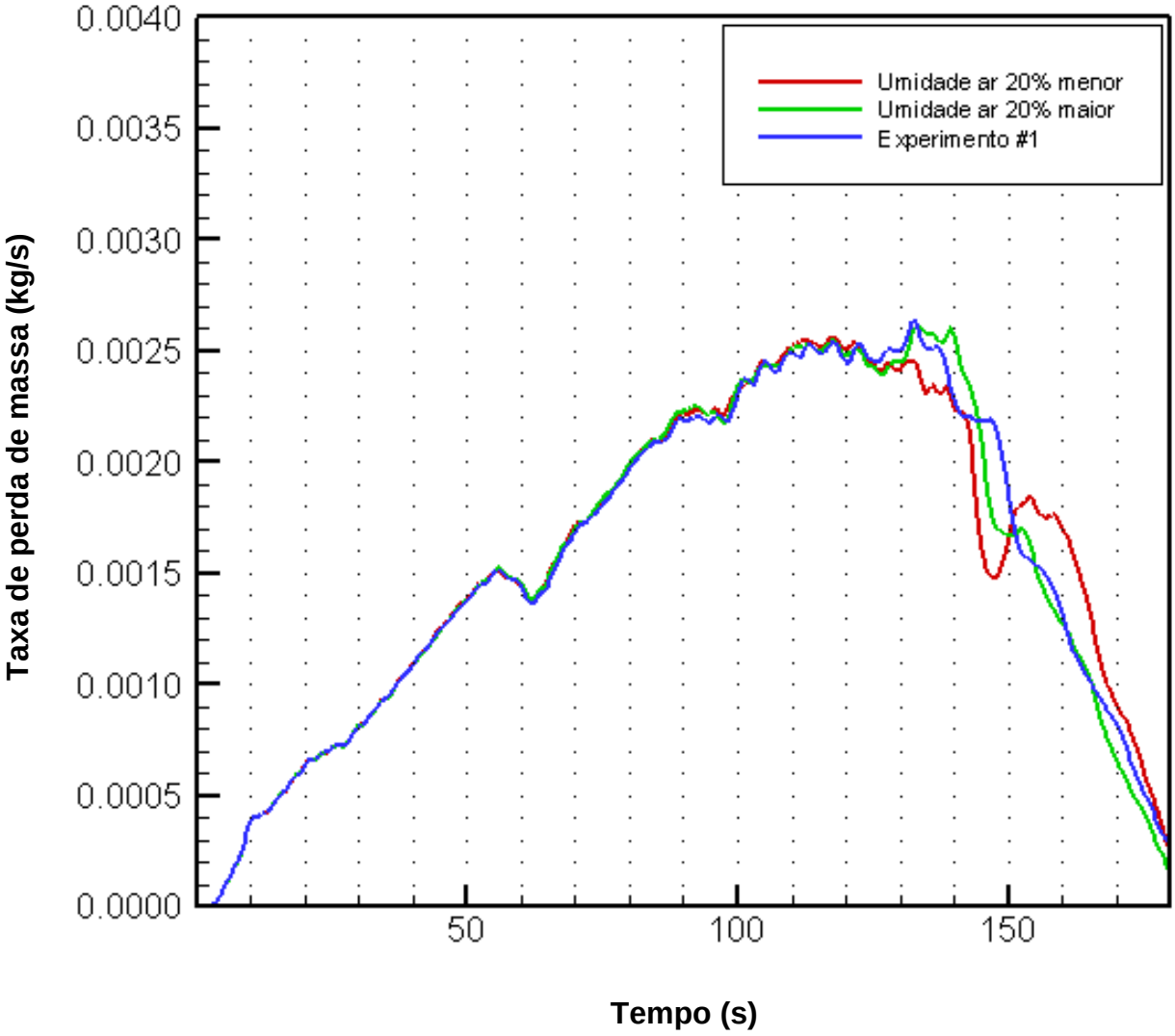

Figura 6.51 - Evolução temporal da taxa de perda de massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na umidade do ar.

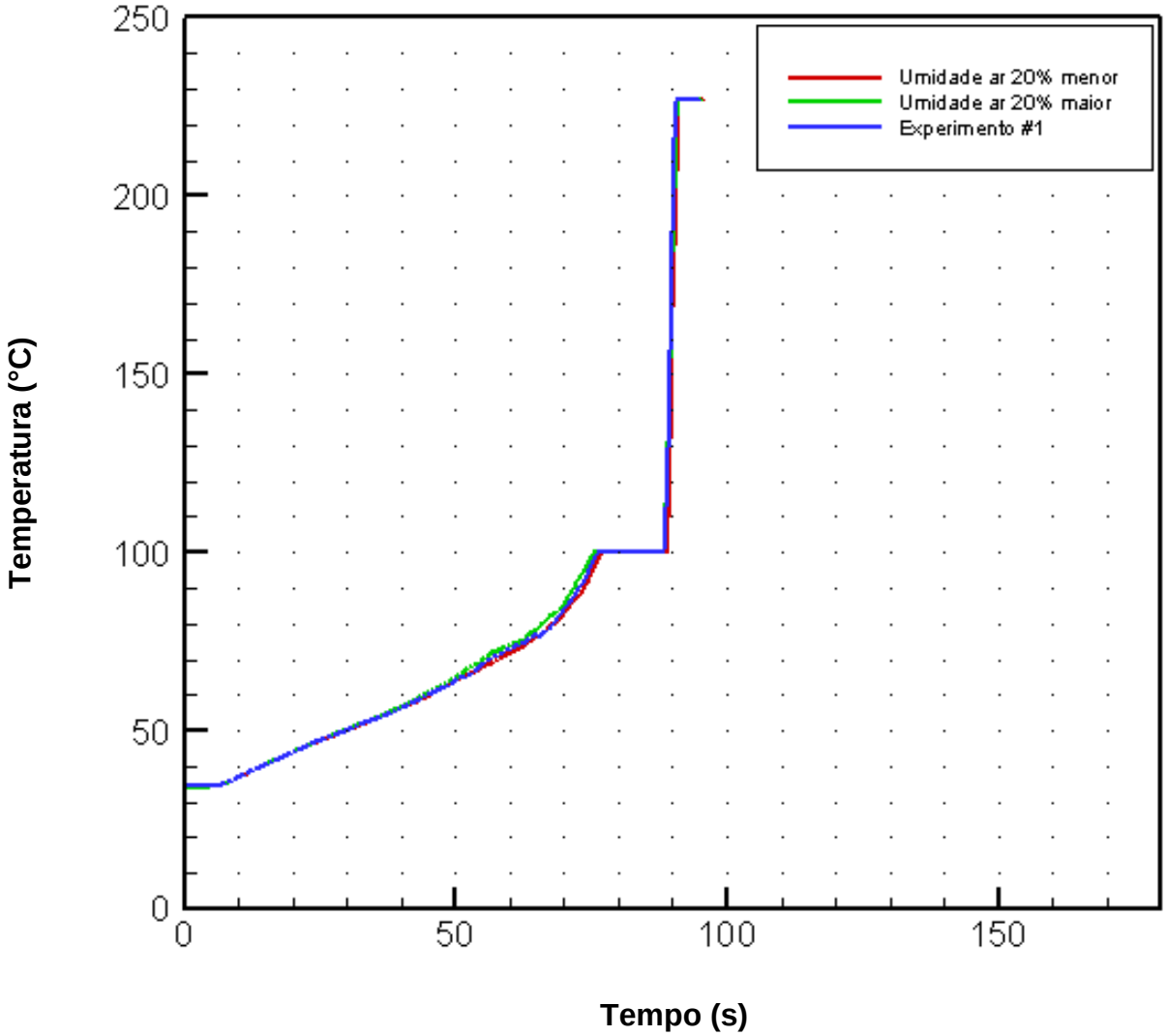

Figura 6.52 - Evolução temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na umidade do ar.

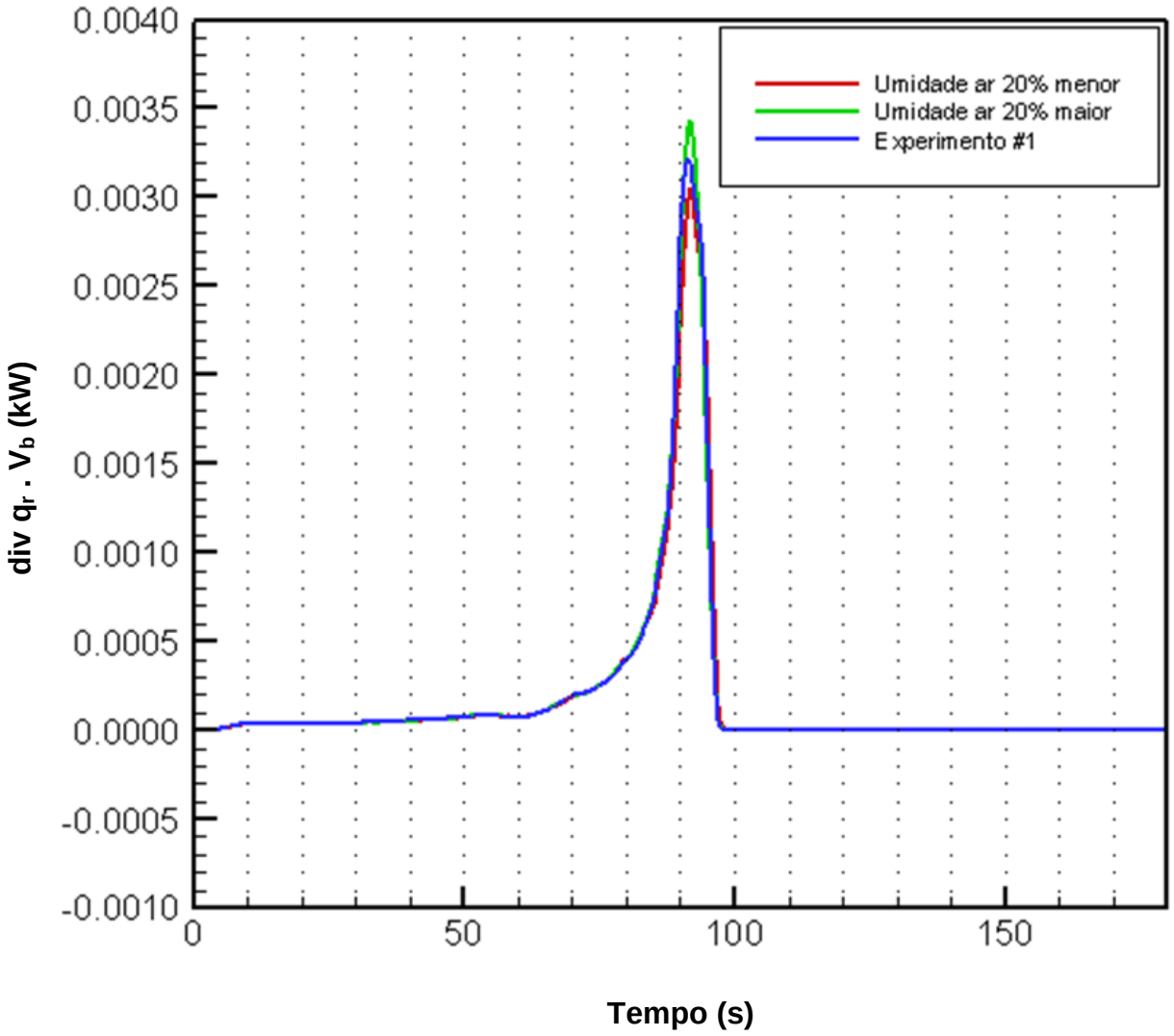

Figura 6.53 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na umidade do ar.

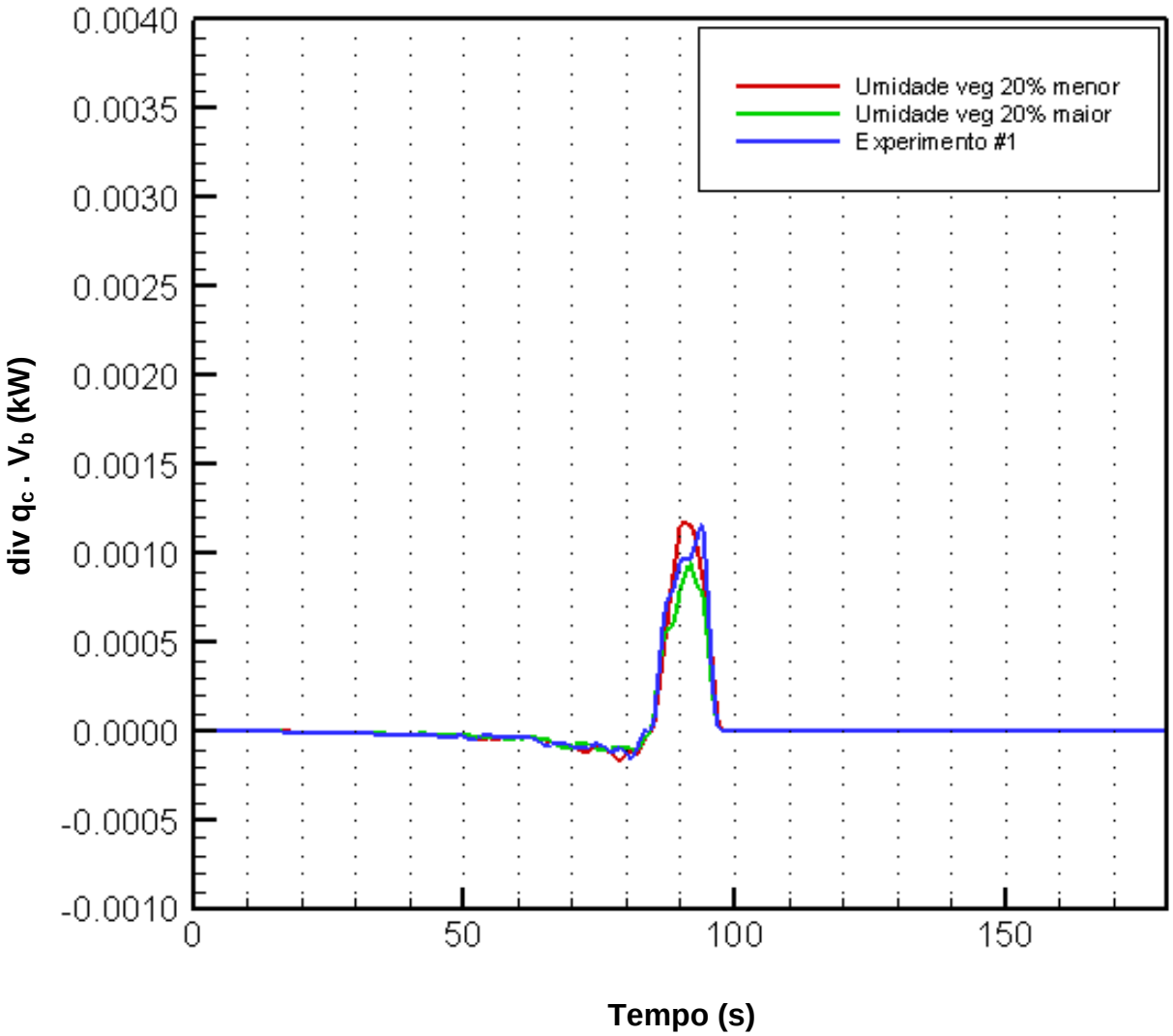

Figura 6.54 - Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variações na umidade do ar.

6.8 Variação da simulação do experimento #1 de Alta Floresta (MT): material carbonizado não é removido do domínio computacional

Este caso é o mesmo do experimento #1 (elemento carbonizado é removido do domínio computacional), com a única diferença que nesta simulação o material carbonizado não é removido do domínio computacional. Os impactos disso são descritos a seguir.

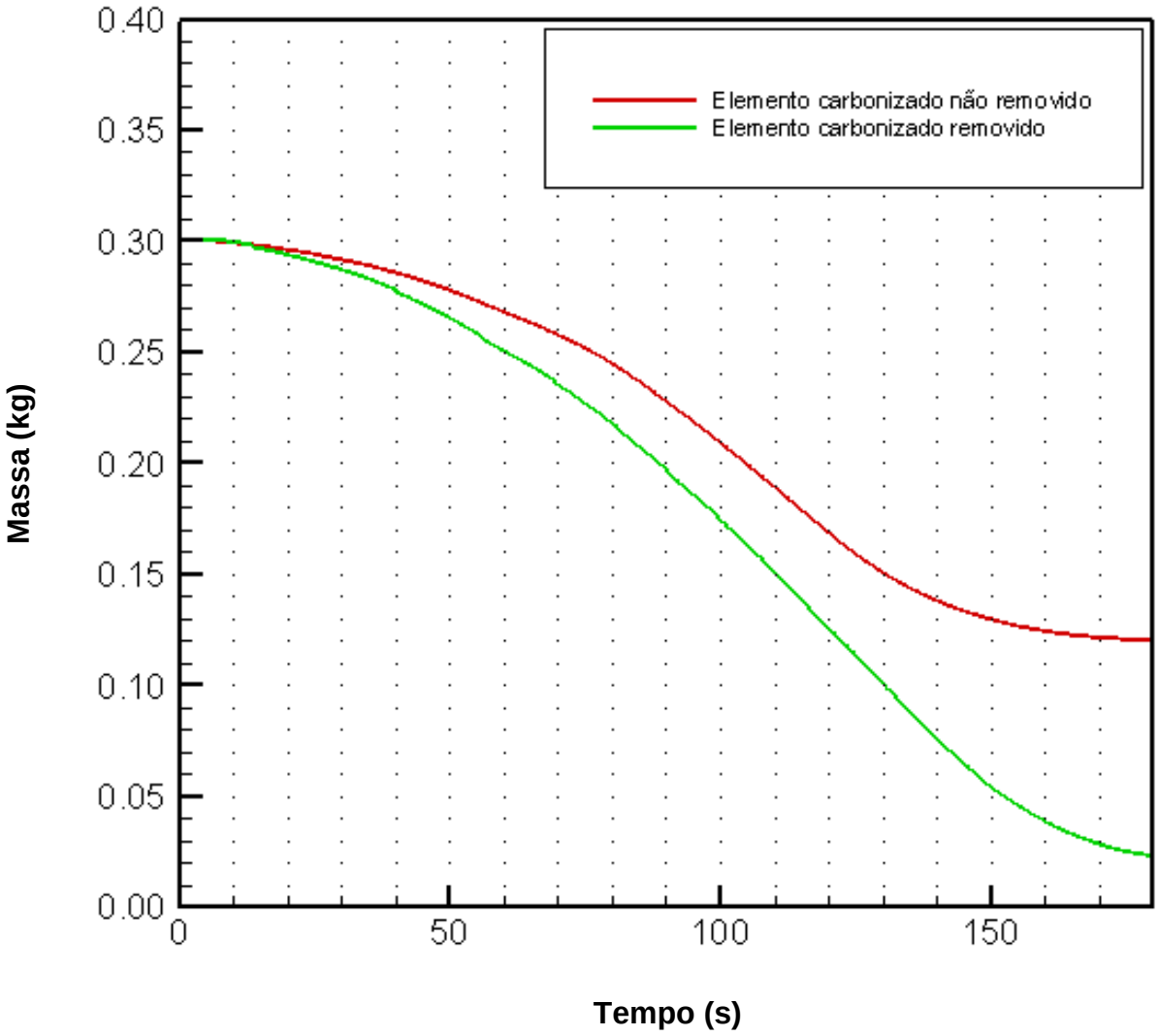

Figura 6.55 – Evolução temporal da perda de massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variação com o material carbonizado permanecendo no domínio computacional.

Os históricos temporais para a perda de massa e taxa de perda de massa obtidos a partir da simulação são representados nas Figuras 6.55 e 6.56, respectivamente.

A massa seca inicial na Figura 6.55 é a mesma que no caso do experimento #1, caindo depois de 180 s a 0,12 kg, o que representa seis vezes a massa final do caso em que o material carbonizado é retirado do volume computacional. A massa de 0,10 kg que é a diferença entre a massa residual entre esse caso e o do experimento #1 representa a massa de material carbonizado que agora permanece no domínio computacional, depois de 180 s de simulação.

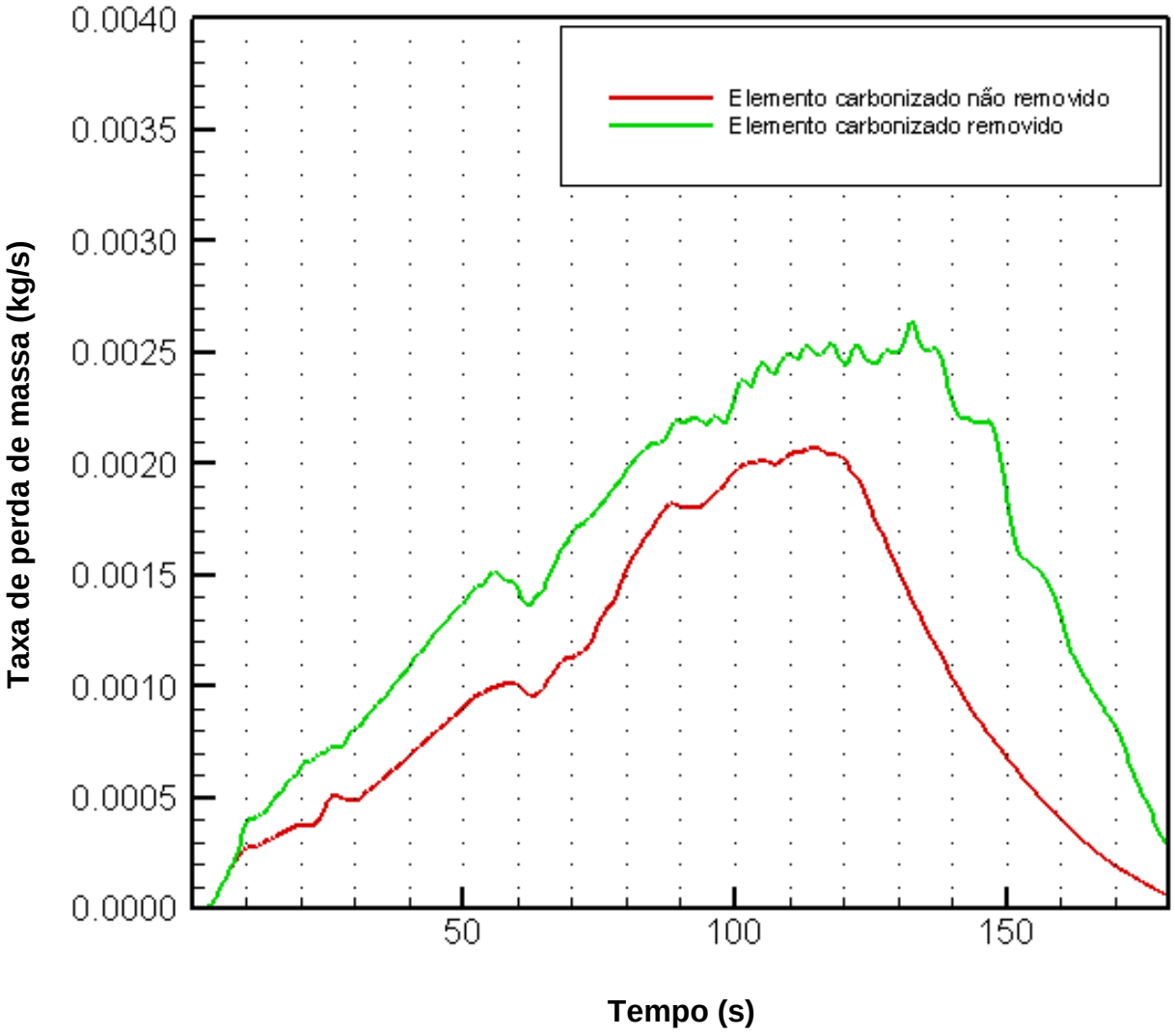

Figura 6.56 – Evolução temporal da taxa de perda de massa da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variação com o material carbonizado permanecendo no domínio computacional.

A taxa de perda de massa (Figura 6.56) atinge o seu máximo quando a frente do fogo atinge os limites do domínio computacional.

O histórico temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional é representado na Figura 6.57. Após o instante 95 s, a curva de temperatura para o caso em que o elemento carbonizado não é removido do domínio computacional é bem diferente que para o caso em que ele é removido, pois o material carbonizado continua no domínio e sua temperatura sobe além dos 227 ℃, que é a temperatura em que o elemento representativo da vegetação é retirado do domínio computacional no caso do experimento #1.

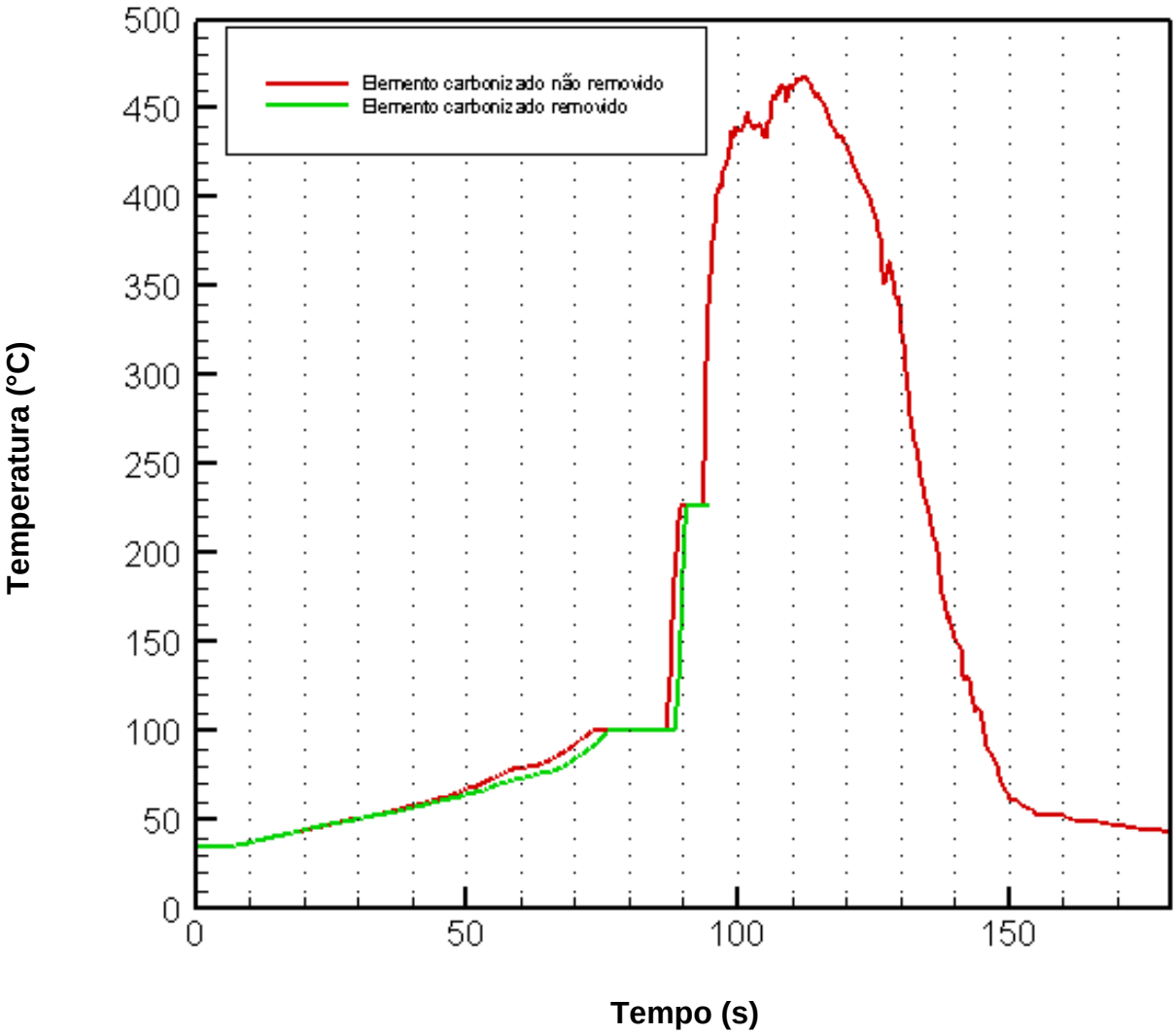

Figura 6.57 – Evolução temporal do perfil de temperatura no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variação com o material carbonizado permanecendo no domínio computacional.

Para o caso em que o elemento carbonizado não é removido do domínio computacional, depois de cerca de 5 s a temperatura do elemento de combustível começa a subir lentamente devido à transferência de calor por radiação (Figura 6.58). Neste momento, não há contribuição para a temperatura do elemento de combustível a partir da transferência de calor por convecção (Figura 6.59). A temperatura do elemento de combustível continua a aumentar até atingir a temperatura de evaporação da umidade em T_e = 100 ℃ e t = 73 s, quando o processo de secagem é iniciado. A secagem dura cerca de 13 s. Após o término da evaporação da umidade, T_e sobe rapidamente e em 3 s a volatilização começa em T_e = 127 ℃ e t = 87 s. A pirólise é completada em 7 s em t = 94 s. As durações dos processos de secagem da umidade e pirólise dos dois casos são praticamente os mesmos. Até o momento em que a pirólise termina, o perfil de temperatura em um ponto do domínio computacional não se altera se o material carbonizado é mantido ou removido da simulação. Entretanto, para o caso em que o material carbonizado é mantido, a partir do tempo de 94 s a temperatura continua a subir devido ao elemento vegetal agora carbonizado continuar a receber energia por radiação (Figura 6.58).

Pode ser visto a partir das Figuras 6.58 e 6.59 que o fluxo de calor por radiação é dominante sobre o fluxo de calor por convecção. Até aproximadamente 80 s do tempo de simulação, o fluxo de calor por radiação é o único processo disponível para o aquecimento do elemento de combustível, e é responsável por aumentar a sua temperatura até ao ponto em que se inicia a evaporação da umidade. A partir deste momento o fluxo de calor por convecção começa a fornecer energia adicional para o elemento de combustível, mas por aproximadamente 14 s apenas. No caso do experimento #1, devido à retirada do material carbonizado do domínio computacional, no tempo t = 95 s os dois fluxos de calor eram zero. Agora, os fluxos de calor existem no mesmo local do domínio por um tempo bem maior.

O pico do fluxo de calor radiativo é menor nesse caso quando comparados ao caso do experimento #1, enquanto que o fluxo de calor convectivo é praticamente o mesmo nos dois casos. Na curva do fluxo de calor por radiação, o pico no caso do experimento #1 é aproximadamente 23% maior que no caso em que o material carbonizado é mantido, mas ocorrem praticamente no mesmo instante de tempo. No

caso convectivo, os picos também ocorrem praticamente no mesmo instante de tempo.

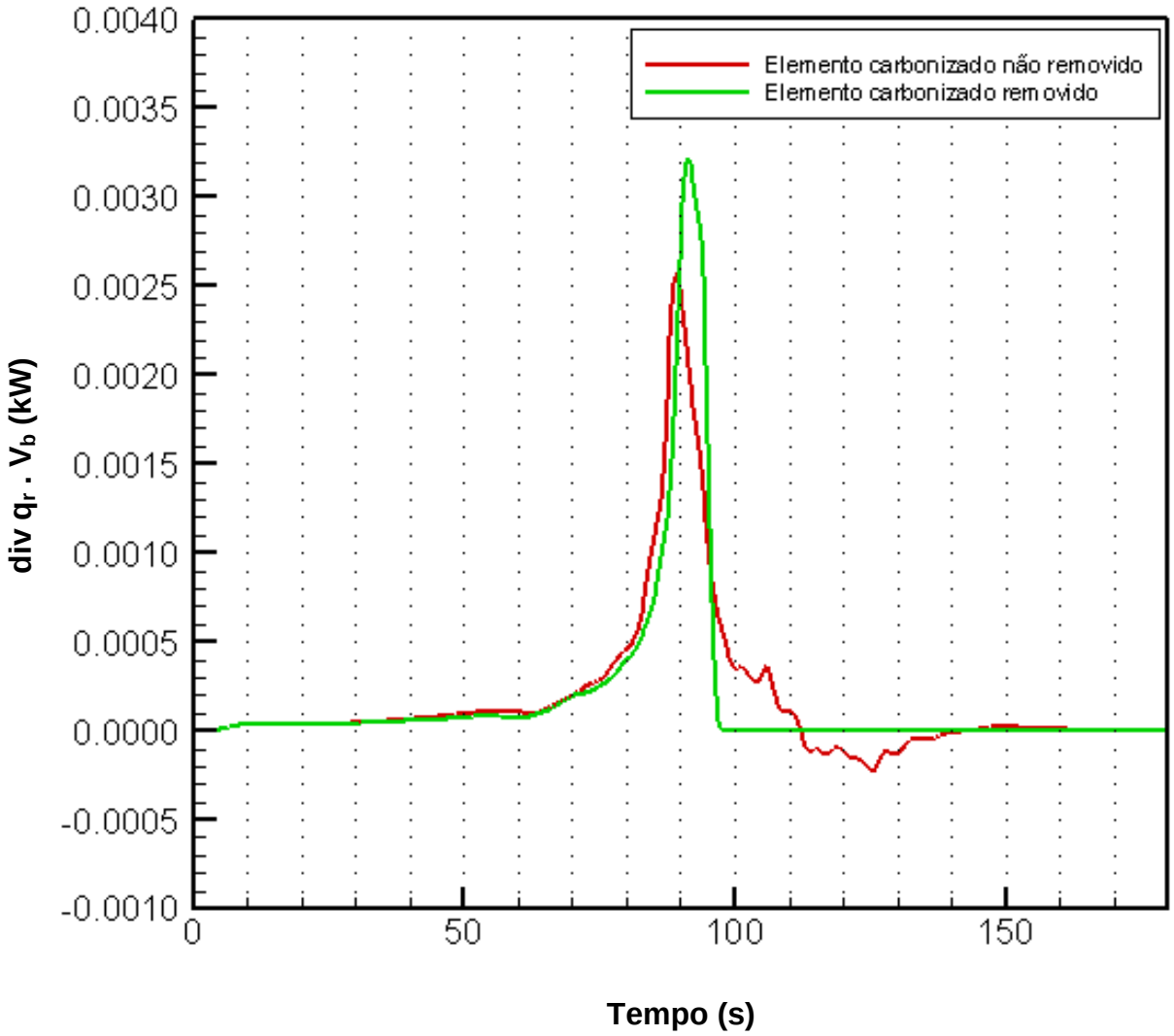

Figura 6.58 – Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variação com o material carbonizado permanecendo no domínio computacional.

Diferentemente do caso do experimento #1, e devido à presença do material carbonizado do domínio computacional, observa-se que o elemento de material carbonizado em estudo fornece calor por radiação para o meio entre os tempos t = 110s e t = 140 s aproximadamente (Figura 6.58), quando a frente de fogo já está adiante do elemento de material carbonizado e a região central do domínio está a uma temperatura mais baixa que ele.

Na maior parte do tempo de simulação, o fluxo de calor convectivo é negativo, indicando que o elemento de material carbonizado fornece energia para a fase gasosa circundante.

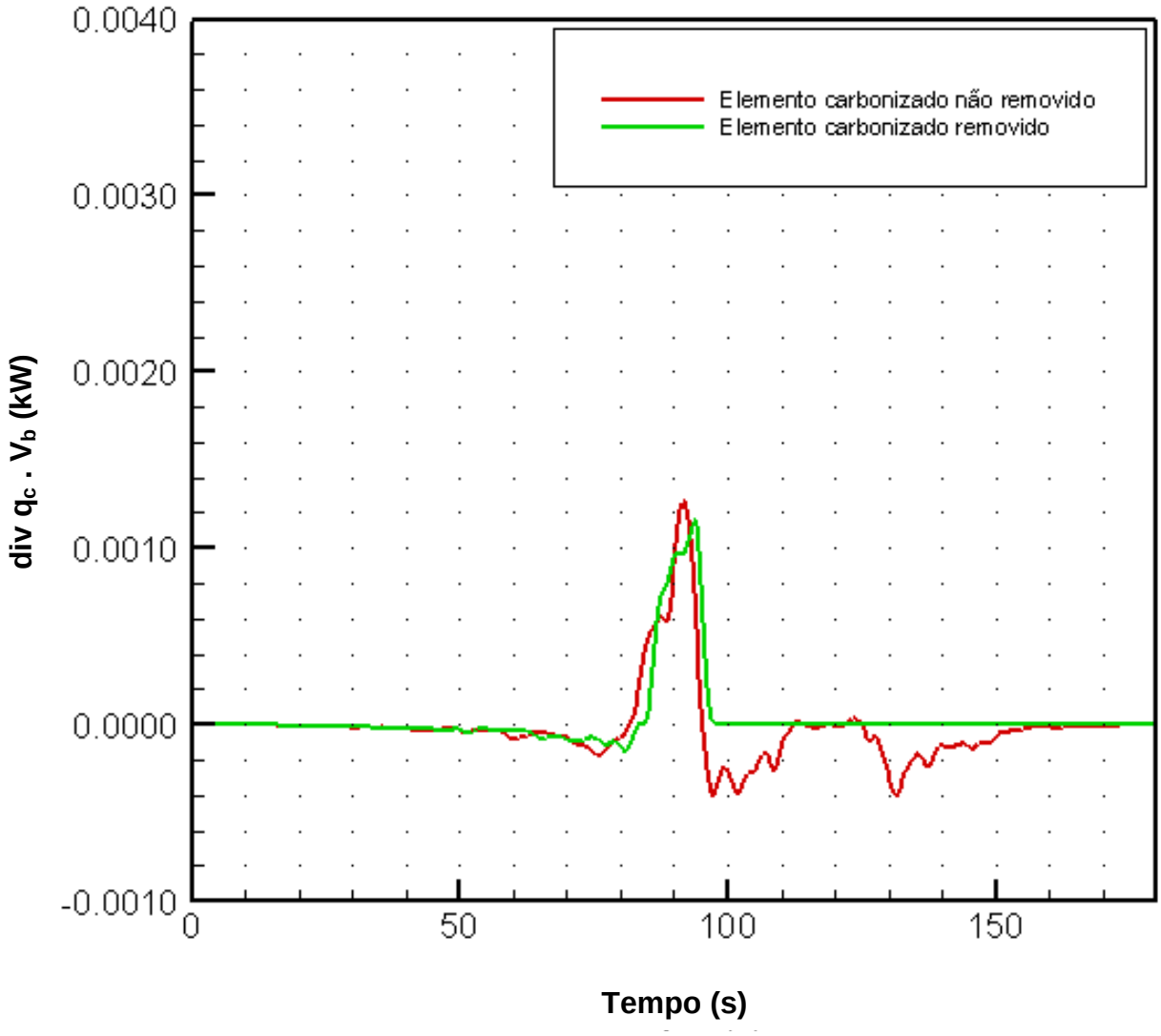

Figura 6.59 – Evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variação com o material carbonizado permanecendo no domínio computacional.

A ROS calculada para esta simulação foi de 0,23 m min^{-1}, enquanto que a ROS medida foi de 0,21 m min^{-1}, sendo que o fato do material carbonizado continuar no domínio computacional afetou a taxa de propagação do incêndio, que foi 9,5% maior que na simulação do experimento #1. Nas simulações deste trabalho o

elemento combustível foi removido do domínio, já que a combustão incandescente e os efeitos da presença de cinzas não foram considerados.

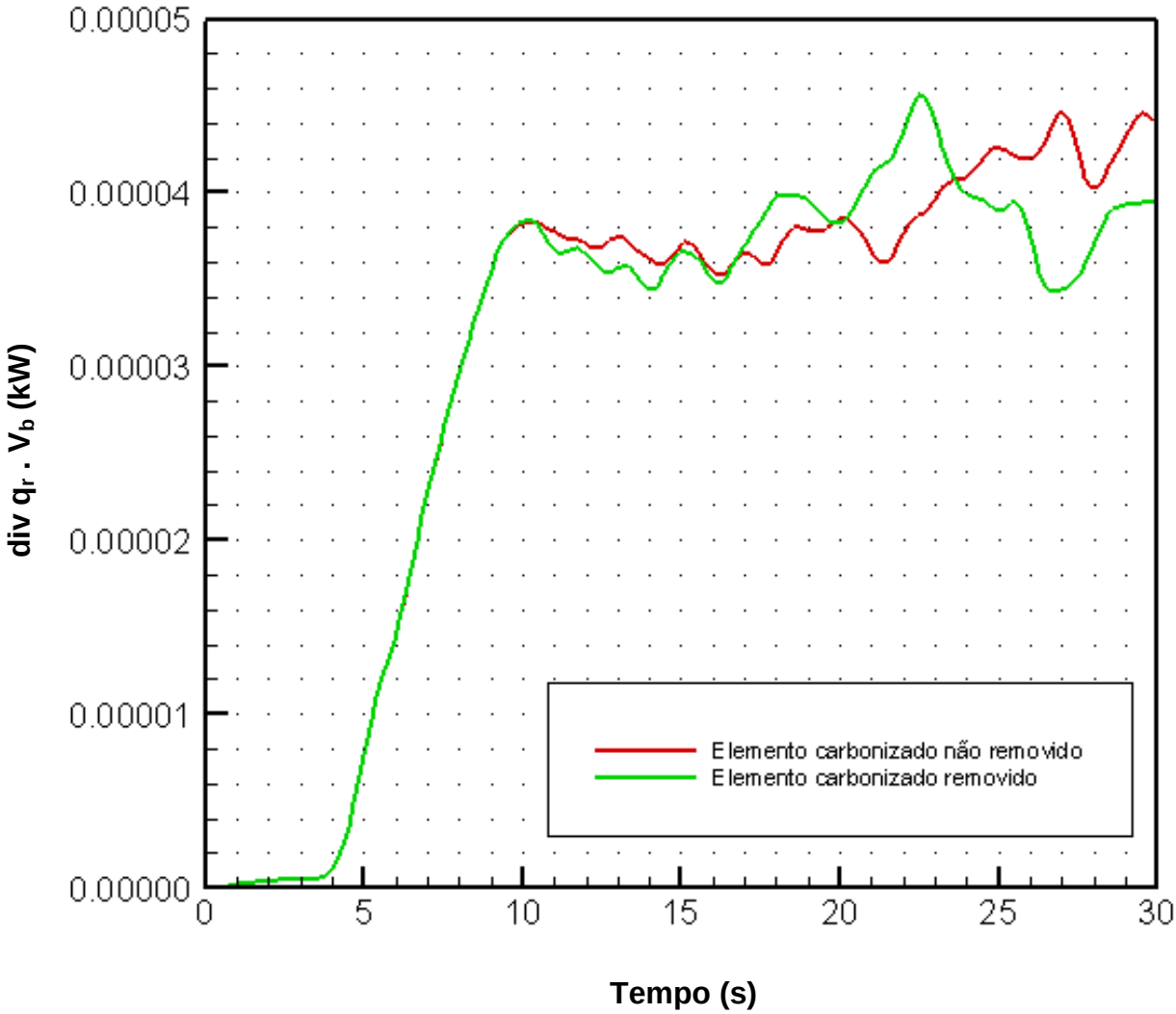

Figura 6.60 – Detalhe da evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variação com o material carbonizado permanecendo no domínio computacional.

Cabe uma análise das variações encontradas na Figura 6.57, entre os instantes de tempo 0 a 30 s e 50 s a 70 s. Para o primeiro instante de tempo, a Figura 6.60 mostra que ambas as curvas são idênticas até 10 s. Para a curva do elemento carbonizado não removido do domínio computacional, percebe-se um valor maior no divergente do fluxo de radiação a partir de 24 s, o que justifica uma maior temperatura a partir de 50 s (Figura 6.57) quando comparado à curva do elemento carbonizado não removido do domínio computacional.

Entre 50 s e 70 s, há uma variação na curva de temperatura (Figura 6.57). Esse comportamento não pode ser descrito unicamente pelo divergente do fluxo radiativo, pois o divergente do fluxo convectivo também é importante, conforme pode ser observado pelas Figuras 6.61, 6.62 e 6.63.

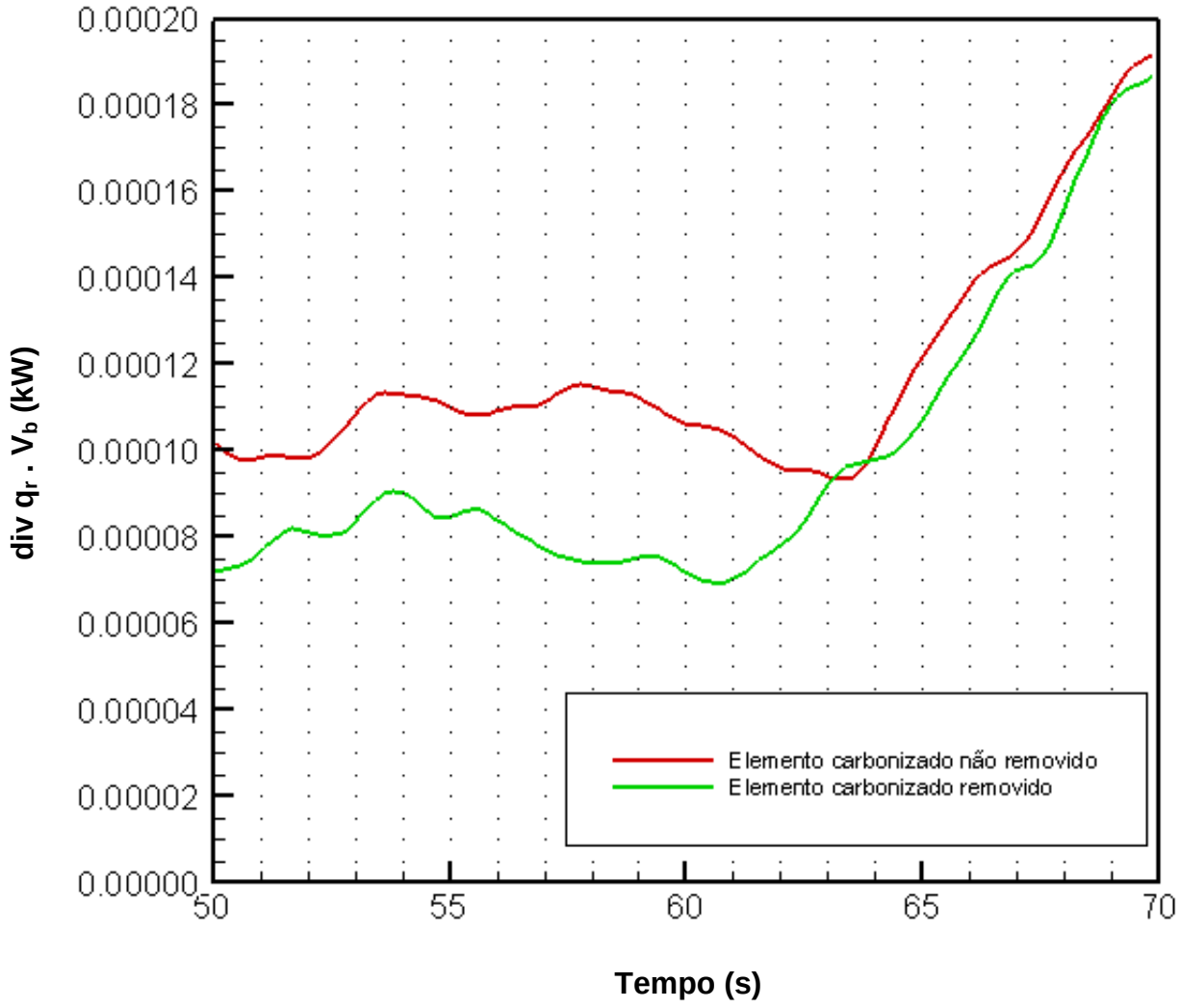

Figura 6.61 - Detalhe da evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de radiação multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variação com o material carbonizado permanecendo no domínio computacional.

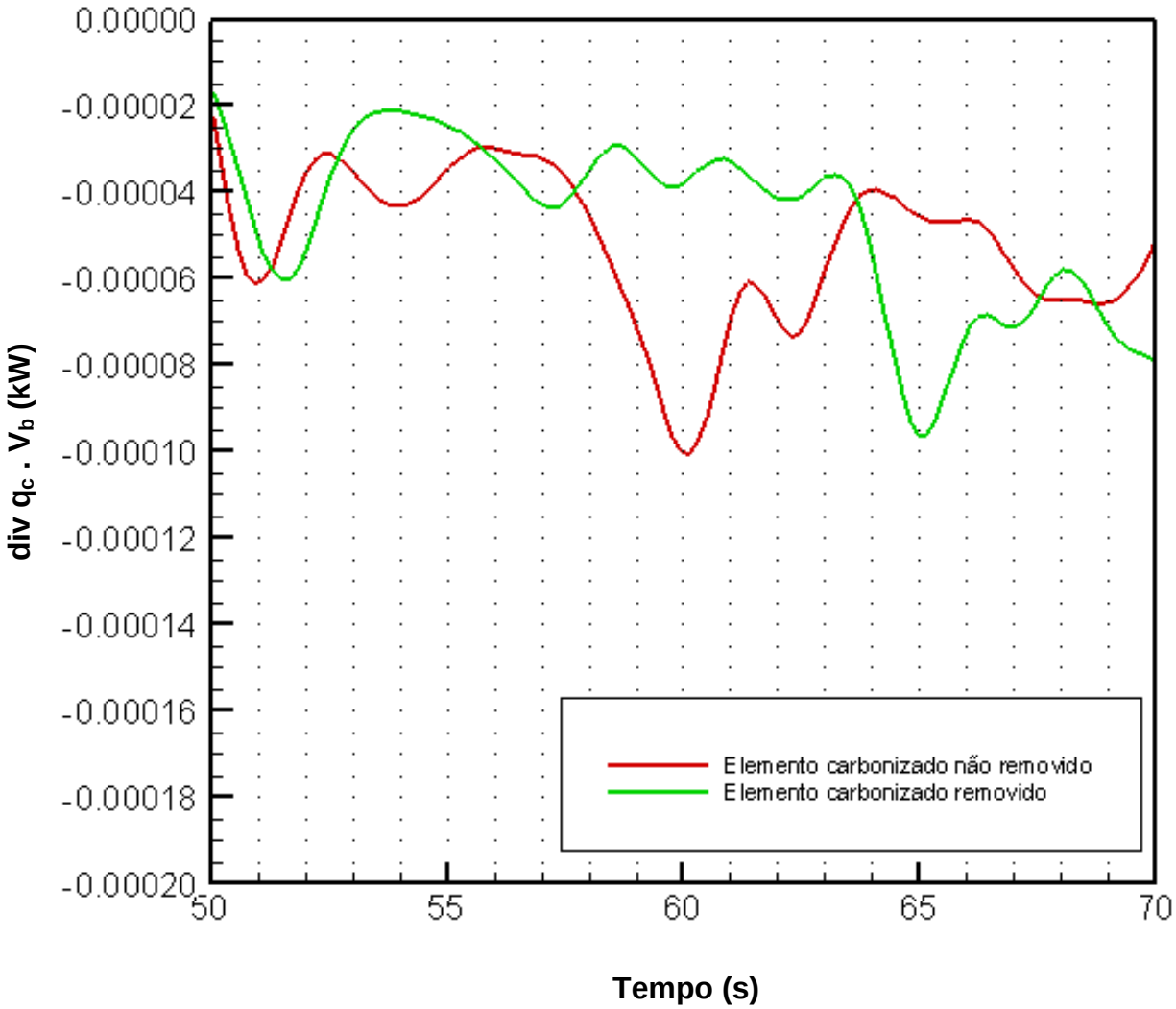

Figura 6.62 - Detalhe da evolução temporal do perfil do divergente do fluxo de convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variação com o material carbonizado permanecendo no domínio computacional.

Analisando-se a Figura 6.63, percebe-se que seus vales são os responsáveis pelas variações de inclinação na curva da (Figura 6.57). Para o elemento carbonizado não removido do domínio computacional, os vales em 50 s e 60 s na Figura 6.63 correspondem às mudanças observadas no mesmo instante de tempo na curva da temperatura (Figura 6.57). O mesmo se aplica para os vales em 51 s e 65 s na curva da Figura 6.63 para o elemento carbonizado removido do domínio computacional.

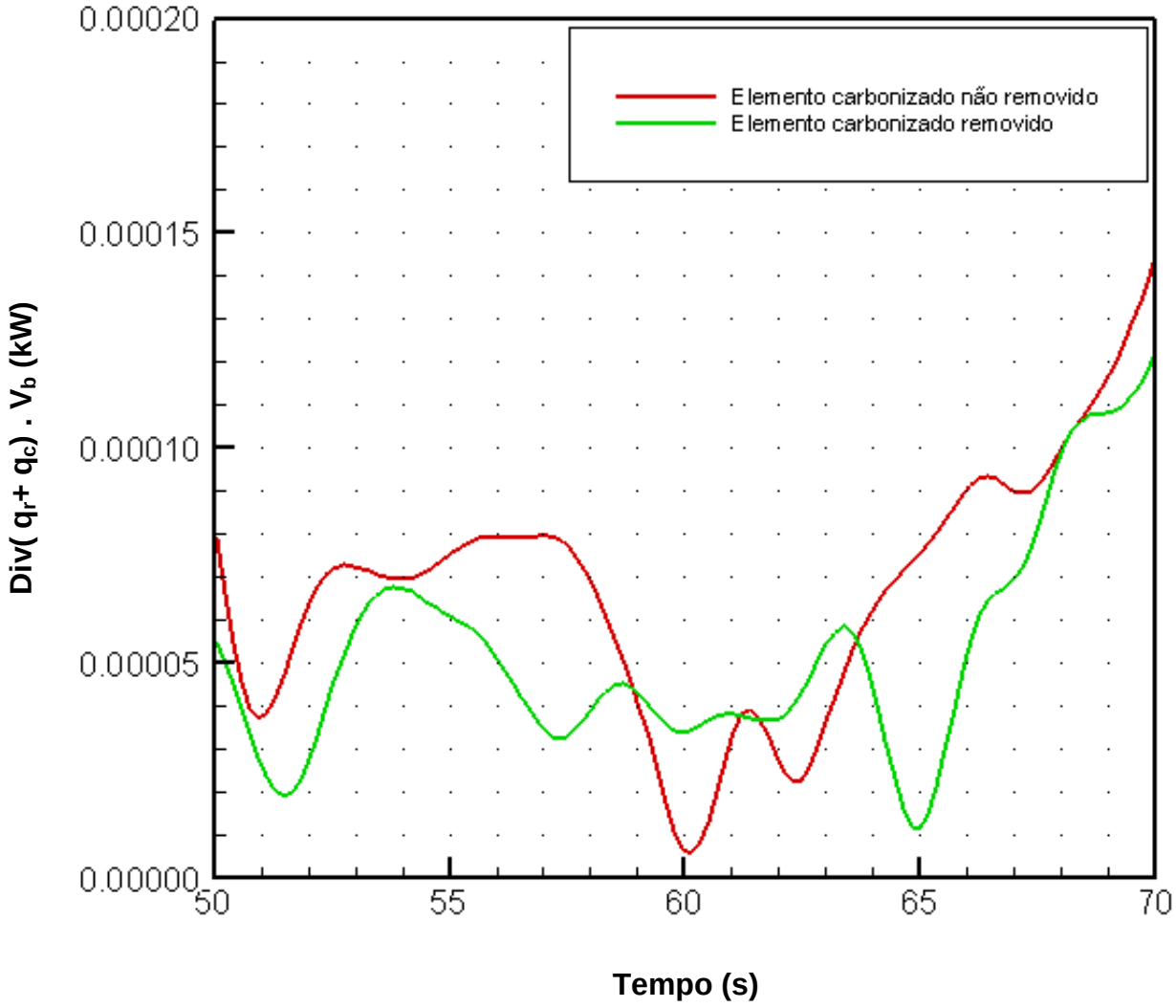

Figura 6.63 - Detalhe da evolução temporal do perfil do divergente dos fluxos de radiação e convecção multiplicado pelo volume da célula no ponto de análise da vegetação do domínio computacional para o experimento #1 de Alta Floresta (MT) e variação com o material carbonizado permanecendo no domínio computacional.

6.9 Comparação Experimento x Simulação

A ROS é o resultado final ou integral de todos os processos físicos do incêndio, em determinadas condições de contorno e iniciais. A comparação desse resultado, embora seja o de maior interesse prático, é difícil de ser feita de forma conclusiva.

Observando-se a Tabela 6.21 que compara as ROS numéricas e experimentais, verifica-se que mesmo considerando o desvio padrão dos resultados experimentais, somente em dois dos sete casos, os resultados coincidem. As razões para este afastamento podem ser várias, incluindo a não homogeneidade no experimento, erros de medição e limitações do modelo numérico.

Tabela 6.21 – Comparação entre a ROS experimental e a numérica para Alta Floresta (MT) e Cruzeiro do Sul (AC).

Experimento	Massa específica aparente de material combustível (kg/m^3)	Umidade da vegetação	ROS experimental (m/min)	ROS Numérica (m/min)
#1 Alta Floresta (MT)	9,20	0,14	0,21+/-0,04	0,21
#2 Alta Floresta (MT)	6,73	0,15	0,12+/-0,06	------
#3 Alta Floresta (MT)	11,84	0,14	0,35+/-0,07	0,20
#4 Alta Floresta (MT)	8,98	0,16	0,24+/-0,04	0,18
#1 Cruzeiro do Sul (AC)	11,86	0,10	0,17+/-0,03	0,23
#4 Cruzeiro do Sul (AC)	13,35	0,22	0,15+/-0,02	0,14
#6 Cruzeiro do Sul (AC)	12,55	0,14	0,14+/-0,02	0,19
#8 Cruzeiro do Sul (AC)	11,02	0,17	0,13+/-0,01	0,17

Buscou-se então verificar se há coerência da variação das ROS (experimental e numérica), tomando-se como base as tendências observadas na variação paramétrica das simulações em função da área superficial por volume, massa específica aparente, umidade e temperatura inicial para a vegetação, e umidade do

ar. Verificou-se nesse Capítulo 6 que os parâmetros mais significativos, por influenciarem direta e/ou indiretamente o fluxo liquido de calor por radiação, são a área superficial por volume, a massa específica aparente e indiretamente a umidade da vegetação. Como nos experimentos a área superficial por volume não varia (considerando-se a mesma vegetação média), investigou-se a coerência das ROS em função da massa específica aparente de material combustível e da umidade da vegetação.

Tabela 6.22 – Análise da ROS experimental e numérica em função da variação da massa específica aparente de material combustível e umidade da vegetação na comparação direta entre experimentos para Alta Floresta (MT) e Cruzeiro do Sul (AC).

Comparação entre experimentos	Massa específica aparente de material combustível (kg/m^3)	Umidade da vegetação	ROS experimental (m/min)	ROS Numérica (m/min)
Alta Floresta (MT)				
#1 e #3	Aumentou 29%	Igual	Aumentou	Diminuiu
#1 e #4	Diminuiu 2%	Aumentou 14%	Aumentou	Diminuiu
#3 e #4	Diminuiu 24%	Aumentou 14%	Diminuiu	Diminuiu
Cruzeiro do Sul (AC)				
#1 e #4	Aumentou 13%	Aumentou 120%	Diminuiu	Diminuiu
#1 e #6	Aumentou 6%	Aumentou 40%	Diminuiu	Diminuiu
#1 e #8	Diminuiu 7%	Aumentou 70%	Diminuiu	Diminuiu
#4 e #6	Diminuiu 6%	Diminuiu 36%	Diminuiu	Aumentou
#4 e #8	Diminuiu 17%	Diminuiu 23%	Diminuiu	Aumentou
#6 e #8	Diminuiu 12%	Aumentou 21%	Igual	Diminuiu

Na Tabela 6.22 comparou-se, dentro de cada localidade e entre experimentos, se as variáveis importantes na determinação da ROS, massa específica aparente de

material combustível e umidade da vegetação, aumentam, diminuem ou são iguais. Como visto nas simulações paramétricas, a ROS aumenta com a diminuição da massa específica aparente e da umidade da vegetação. A umidade da vegetação influencia a ROS duas vezes mais que a massa específica aparente de material combustível, para uma mesma variação percentual em cada uma das variáveis.

A Tabela 6.23 resume se os resultados das comparações na Tabela 6.22 são ou não coerentes.

Tabela 6.23 – Análise comparativa da ROS experimental e numérica quanto à sua coerência, em função da variação da massa específica aparente de material combustível e umidade da vegetação na comparação direta entre experimentos para Alta Floresta (MT) e Cruzeiro do Sul (AC).

Comparação entre experimentos	Análise da ROS experimental e numérica quanto à sua tendência esperada
Alta Floresta (MT)	
#1 e #3	Numérico é coerente, experimental não
#1 e #4	Numérico é coerente, experimental não
#3 e #4	Ambos são coerentes
Cruzeiro do Sul (AC)	
#1 e #4	Ambos são coerentes
#1 e #6	Ambos são coerentes
#1 e #8	Ambos são coerentes
#4 e #6	Numérico é coerente, experimental não
#4 e #8	Numérico é coerente, experimental não
#6 e #8	Numérico é coerente, experimental não

Observando-se a tendência da ROS em função da massa específica aparente de material combustível e da umidade nas nove combinações de casos, verifica-se que em quatro combinações as variações das ROS experimentais são coerentes. As simulações numéricas dos casos reais apresentam coerência em todas as nove combinações. Resumindo, pode-se afirmar que a simulação é capaz de prever a

ordem de grandeza da ROS dos experimentos e as tendências de variação da ROS com os parâmetros físicos mais importantes (massa específica aparente de material combustível e umidade da vegetação).

7 COMENTÁRIOS FINAIS

Um modelo numérico baseado na física (WFDS), transiente, tridimensional, com acoplamento entre a vegetação e o meio gasoso, para a simulação da propagação do incêndio através de combustíveis de superfície em terreno plano foi usado e testado contra as medições de experimentos de campo na Amazônia brasileira. Os incêndios de superfície na Amazônia foram escolhidos devido à sua importância para a floresta, já que esses incêndios podem matar árvores jovens e comprometer o ciclo de vida da floresta, são difíceis de gerir devido à impossibilidade de acesso a caminhões e veículos de bombeiros e eles não podem ser detectados por satélites (INPE 2010).

As condições de campo em Alta Floresta (MT) e Cruzeiro do Sul (AC) para a propagação do incêndio de superfície foram medidas e observou-se a ausência de ventos. Em tais condições, o comportamento do incêndio de superfície é mais sensível às características da vegetação local. Certamente, as hipóteses de propriedades constantes para a vegetação e vento nulo utilizadas nas simulações são altamente idealizadas para experimentos de campo. No entanto, apesar da idealização das condições de combustível, vento e as incertezas dos dados experimentais, as previsões do modelo estão na mesma ordem de grandeza dos experimentos. As taxas de propagação experimentais variam de 0,12 +/-0,06 a 0,35+/-0,07 m/min. Mesmo considerando-se o desvio padrão da taxa de propagação experimental, os valores das taxas simuladas numericamente ficaram dentro do erro experimental somente em dois de sete casos.

Na faixa de variação analisada, as simulações mostraram que os parâmetros importantes para o modelo são a área superficial por volume da vegetação, sua massa específica aparente e sua umidade. Como o coeficiente de absorção por radiação é função direta da massa específica aparente e da área superficial por volume da vegetação, esses parâmetros afetam o comportamento numérico do incêndio de superfície. De acordo com os resultados das simulações numéricas, a umidade da vegetação também tem importância no incêndio de superfície. A temperatura inicial da vegetação e a umidade do ar, na faixa de variação estudada, não influenciam a taxa de propagação do incêndio. As simulações também

mostraram que o processo de radiação é muito importante, e afeta diretamente todos os demais processos e a taxa de propagação. A convecção tem importância muito menor.

Como nos experimentos a área superficial por volume não varia (considerando-se a mesma vegetação média), investigou-se a coerência das taxas de propagação em função da massa específica aparente de material combustível e da umidade da vegetação. Observando-se a tendência de variação da taxa de propagação do incêndio para as nove combinações de casos, com base nos estudos de variação paramétrica, verifica-se que o modelo numérico é coerente em todas as combinações de casos. Já o experimento é coerente em quatro combinações. Nota-se que as taxas de propagação a partir das simulações numéricas foram mais coerentes que as experimentais.

Como pode ser visto a partir dos resultados, as medições de fluxo de calor por radiação são muito importantes na compreensão do processo global de evaporação da umidade da vegetação, sua pirólise e combustão das espécies pirolisadas, bem como na avaliação das previsões do modelo numérico. Por esta razão, nos próximos experimentos de campo, as medições dos fluxos de calor por radiação precisam ser feitas para compara-las com os valores das simulações numéricas, e medidas ambientais mais completas e abrangentes devem ser tomadas. A partir dos resultados numéricos e de campo, pode-se concluir que para a correta determinação da taxa de propagação dos incêndios de superfície, devem ser cuidadosamente anotadas as medições experimentais para determinados intervalos de tempo ou distância, principalmente quando o incêndio está em um estágio inicial e quando já se nota uma frente de fogo em forma de anel. Para melhor se caracterizar a taxa de propagação, é importante que a dimensão física do incêndio seja de pelo menos três metros a partir do ponto de ignição e que sejam tomadas medidas a meio metro, um metro, dois metros e três metros do ponto de ignição. É também importante investigar a representação do combustível vegetal no modelo numérico.

Modelos numéricos para a simulação de incêndios baseados na física, transientes e tridimensionais podem ser utilizados para estudar o comportamento dos incêndios de superfície, mas os recursos computacionais necessários não permitem previsões em tempo real nos dias de hoje. No entanto, uma vez que esses modelos sejam suficientemente validados, as previsões de fluxos de calor e

velocidade de propagação do incêndio podem ter valor para os problemas operacionais.

REFERÊNCIAS[1]

AGEE, J.K.; WAKIMOTO, R.H.; BISWELL, H.H. Fire and fuel dynamics of Sierra Nevada conifers, **Forest Ecology and Management**, v. 1, p. 255-265, 1978.

ÀGUEDA, A. et al. Experimental study of the emissivity of flames resulting from the combustion of forest fuels, **International Journal of Thermal Sciences**, v. 49, p. 543-554, 2010.

ALBINI, F.A. A model for the wind-blown flame from a line fire, **Combustion and Flame**, v. 43, p. 155-174, 1981.

_____. A model for fire spread in wildland fuels by radiation, **Combustion Science and Technology**, v. 42, p 229-258, 1985.

_____. Wildland fire spread by radiation – a model including fuel cooling by natural convection. **Combustion Science and Technology**, v. 45, p. 101–113, 1986.

ANDERSON, D.A.; TANNEHILL, J.C.; PLETCHER, R.H. **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**. 2nd ed. Philadelphia: Hemisphere Publishing Corporation, 1984.

ANDERSON, H.E. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior, **Unites States Department of Agriculture, Forest Service**, General Technical Report INT-122, 1982.

ANDREWS, P.L. BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System, **Unites States Department of Agriculture, Forest Service**, General Technical Report INT-194, 1986.

ANDREWS, P.L.; CHASE, C.H. BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System, **Unites States Department of Agriculture. Forest Service**, General Technical Report INT-260, 1989.

ARAÚJO, T.M. et al. A tropical rainforest clearing experiment by biomass burning in the state of Pará, Brazil, **Atmospheric Environment**, v. 33, p. 1991-1998, 1999.

1 De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

ARTEMOV, V. et al. A tribute to D.B. Spalding and his contributions in science and engineering, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 52, p. 3884-3905, 2009.

BALBI, J.H. et al. A 3D Physical Real-Time Model of Surface Fires Across Fuel Beds, **Combustion Science and Technology**, v. 179, p. 2511-2537, 2007.

_____. A physical model for wildland fires, **Combustion and Flame**, v. 156, p. 2217-2230, 2009.

BILBAO, R. et al. Experimental and theoretical study of the ignition and smoldering of wood including convective effects, **Combustion and Flame**, v. 126, p. 1363-1372, 2001.

BOBOULOS, M.; PURVIS, M.R.I. Wind and slope effects on ROS during the fire propagation in East-Mediterranean pine forest litter, **Fire Safety Journal**, v. 44, p. 764–769, 2009.

BUTLER, B.W. In 'Proceedings: 12th Conference of Fire and Forest Meteorology', p. 26, 1993.

CARVALHO, E.R.; VERAS, C.A.G.; CARVALHO JR., J.A. Experimental investigation of smouldering in biomass, **Biomass and Bioenergy**, v. 22, p. 283-294, 2002.

CARVALHO JR, J.A. et al. A tropical rainforest clearing experiment by biomass burning in the Manaus region, **Atmospheric Environment**, v. 29, p. 2301-2309, 1995.

_____. Fire spread around a forest clearing site in the Brazilian amazon region, **International Wildland Fire Ecology and Fire Management Congress**, 2003.

CHETEHOUNA, K.; SÉRO-GUILLAUME, O.; DEGIOVANNI, A. Identification of the upward gas flow velocity and of the geometric characteristics of a flame with a specific thermal sensor, **International Journal of Thermal Sciences**, v. 44, p. 966-972, 2005.

CLEMENTS, C.B. et al. Observing the dynamics of wildland grass fires: FireFlux - A Field Validation Experiment, **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 88, p. 1369 - 1382, 2007.

1 De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

COLMAN, J.J.; LINN, R.R. Separating Combustion from Pyrolysis in HIGRAD/FIRETEC, **International Journal of Wildland Fire**, v. 16, p. 493-502, 2007.

CONSALVI, J.L.; PORTERIE, B.; LORAUD, J.C. Model of radiative heat transfer in particulate medium, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 45, p. 2755–2768, 2002.

CUNNINGHAM, P.; LINN, R.R. Numerical simulations of grass fires using a coupled atmosphere-fire model: Dynamics of fire spread, **Journal of Geophysical Research**, v. 112, D5, 2007.

CURRY, J.R.; FONS, W.L. Rate of spread of surface fires in the Ponderosa pine type of California. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 57, p. 239–267, 1938.

DEARDORFF, J.W. A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 41, p. 453-480, 1970.

DEARDORFF, J.W. Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 18, p. 495-527, 1980.

DIMITRAKIPOULOS, A.P. Pyric properties of some dominant Mediterranean vegetation species, **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 60, p. 123, 2001.

DUPUY, J.L.; LARINI, M. Fire spread through a porous forest fuel bed - a radiative and convective model including fire-induced flow effects, **International Journal of Wildland Fire**, v. 9, p. 155–172, 1999.

DUPUY, J.L.; MARECHAL, J.; MORVAN, D. Fires from a cylindrical forest fuel burner: combustion dynamics and flame properties, **Combustion and Flame**, v. 135, p. 65-76, 2003.

FLEETER, R.D. et al. Laboratory facility for wind-aided firespread along a fuel matrix, **Combustion and Flame**, v. 57, p. 289-311, 1984.

FONS, W.L. Analysis of fire spread in light forest fuels. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 72, p. 93–121, 1946.

FRANDSEN, W.H. Fire spread through porous fuels from the conservation of energy, **Combustion and Flame**, v. 16, p. 9–16, 1971.

FRANDSEN, W.H; ROTHERMEL, R.C. Measuring the energy-release rate of a spreading fire, **Combustion and Flame**, v. 19, p. 17–24, 1972.

HAWLEY, L.F. Theoretical Considerations Regarding Factors Which Influence Forest Fires, **Journal of Forestry**, Bethesda, v. 24, p. 756 - 763, 1926.

HOUGH, W.A. Caloric Value of Some Forest Fuels of the Southern United States, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Res. Note SE-120, 6 páginas, 1969.

INPE. Disponível em: <http://sigma.cptec.inpe.br/queimadas>. Acesso em: 03 nov. 2010.

JAYALAKSHMY, M.S.; PHILIP, J. Thermophysical properties of plant leaves and their influence on the environment temperature. **International Journal of Thermophysics**, v. 31, p. 2295-2304, 2010.

KOSEKI, H.; MULHOOAND, G.W. The effect of diameter of the burning of crude oil pool fires, **Fire Technology**, v. 27, p. 54–65, 1991.

LABORATÓRIO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS. Disponível em: <http:// www.floresta.ufpr.br/firelab/incendios.html>. Acesso em: 11 abr. 2012.

LARINI, M. et al. A multiphase formulation for fire propagation in heterogeneous combustible media, **International Journal of Heat Mass Transfer**, v. 41, p. 881-897, 1998.

LINN, R.R. **A transport model for prediction of wildfire behavior**. 1997. 195 f. Ph.D. dissertation, New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico, 1997.

LINN, R.R.; CUNNINGHAM, P. Numerical simulations of grass fires using a coupled atmosphere–fire model: Basic fire behavior and dependence on wind speed, **Journal of Geophysical Research**, v. 110, D13107, 2005.

LINN, R.R. et al. Studying wildfire behavior using FIRETEC, **International Journal of Wildland Fire**, v. 11, p. 233-246, 2002.

MAGNUSSEN, B.F.; HJERTAGER, B.H. On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion, **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 16, p. 719-729, 1976.

MARGERIT, J.; SÉRO-GUILLAUME, O. Modelling forest fires. Part II: reduction to two-dimensional models and simulation of propagation, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 45, p. 1723-37, 2002.

MCDERMOTT, R.; MCGRATTAN, K.; MELL, W.E. Derivation of the velocity divergence constraint for low-Mach flow solvers. NIST Technical Note, p. 1487, 2007.

MCGRATTAN, K.B. et al. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide, Mathematical Model, vol. 1, Technical Report NISTIR Special Publication, 1018-5, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2012.

_____. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide, Validation, vol. 2, Technical Report NISTIR Special Publication, 1018-5, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2008.

MELL, W. et al. A Physics-Based Approach to Modelling Grassland Fires, **International Journal of Wildland Fire**, Collingwood, v.16, p. 1–22, 2007.

_____. Numerical simulation and experiments of burning douglas fir trees, **Combustion and Flame**, v. 156, p. 2023-2041, 2009.

MELL, W.; MANZELLO, S.L.; MARANGHIDES, A. Numerical Modeling of Fire Spread through Trees and Shrubs, **V International Conference on Forest Fire Research**, D. X. Viegas (Ed.), 2006.

MINDYKOWSKI, P. et al. Piloted ignition of wildland fuels, **Fire Safety Journal**, v. 46, p. 34-40, 2011.

MONOD, B. et al. Infrared radiative properties of vegetation involved in forest fires, **Fire Safety Journal**, v. 44, p. 88–95, 2009.

MORANDINI, F. et al. Fire spread experiment across Mediterranean shrub - Influence of wind on flame front properties, **Fire Safety Journal**, v. 41 p. 229–235, 2006.

MORANDINI, F.; SANTONI, P.A.; BALBI, J.H. Fire front width effects on fire spread across a laboratory scale sloping fuel bed, **Combustion Science and Technology**, v. 166, p. 67- 90, 2001a.

_____. The contribution of radiant heat transfer to laboratory-scale fire spread under the influences of wind and slope, **Fire Safety Journal**, v. 36, p. 519-543, 2001b.

MORO, C. Technical Report, INRA Equipe de Prédes Incendies de Forêt, 1997.

MORVAN, D.; DUPUY J.L. Modeling of fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formulation, **Combustion & Flame**, v. 127, p. 1981-1994 2001.

_____. Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation, **Combustion & Flame**, v. 138, p. 199-210, 2004.

MORVAN, D. et al. Multiphase formulation applied to the modeling of fire spread through a forest fuel bed, **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 28, p. 2803-2809, 2000.

MORVAN, D.; MÉRADJI, S.; ACCARY, G. Physical modelling of fire spread in Grasslands. **Fire Safety Journal**, v. 44, p. 50-61, 2009.

NMIRA, F. et al. Numerical study of wind effects on the characteristics of flames from non-propagating vegetation fires, **Fire Safety Journal**, v. 45, p. 129–141, 2010.

PARK, W.C.; ATREYA, A.; BAUM, H.R. Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis, **Combustion and Flame**, v. 157, p. 481-494, 2010.

PASTOR, E. et al. Mathematical models and calculations systems for the study of wildland fire behavior, **Progress in Energy and Combustion Science**, Great Britain, v.29, 139–153, 2003.

PÉREZ, Y. et al. Effect of wind and slope when scaling the forest fires rate of spread of laboratory experiments, **Centre d'Estudis del Risc Tecnològic (CERTEC)**, 2009.

POPE, S.B. Computations of turbulent combustion: progress and challenges, **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 30, p. 591-612, 1990.

POPE, S.B. Turbulent Flows, Cambridge University Press, 2000.

PORTERIE, B. et al. Wildfire propagation: a two dimensional multiphase approach **Combustion, Explosion and Shock Waves**, v. 34(2), p. 139–150, 1998.

_____. Firespread through fuel beds: modeling of wind-aided fires and induced hydrodynamics, Physics of Fluids, v. 12(7), p. 1762–1782, 2000.

QUINTIERE J.G. Principles of Fire Behavior, Delmar Publishers, Albany, 1997

RAMOS, P.C.M. Sistema nacional de prevenção e combate aos incêndios florestais. In: FÓRUM NACIONAL SOBRE INCÊNDIOS FLORESTAIS, 1., 1995, Piracicaba. Anais... Piracicaba: IPEF, 1995. p. 29-58.

REHM, R.G.; BAUM, H.R. The Equations of Motion for Thermally Driven, Buoyant Flows, **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, v. 83, p. 297-308, 1978.

RICHARDS, L.W. Effect of certain chemical attributes of vegetation on forest inflammability, **Journal of Agricultural Research**, v. 60, p. 833-838, 1940.

RITCHIE, S.J. et al. The effect of sample size on the heat release rate of charring materials. **International Association for Fire Safety Science**, March 3–7, p. 177–188, 1997.

ROE, P.L. Characteristics-based schemes for the Euler equations. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 18, p. 337-365, 1986.

ROTHERMEL, R.C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, **U.S. Department of Agriculture, Forest Service**, Research Paper INT-115, 1972.

ROTHERMEL, R.C.; RINEHART, G.C. Field Procedures for Verification and Adjustment of Fire Behavior Predicitions. **U.S. Department of Agriculture, Forest Service,** Research Paper INT-142, 1983.

SAASTAMOINEN, J.J. et al. Propagation of the ignition front in beds of wood particles, **Combustion and Flame**, v. 123, p. 214-226, 2000.

SAÂDAOUI, M. et al. Study of the behaviour of a flame resulting from the combustion of pine needles in a cylindrical basket, **International Journal of Thermal Sciences**, v. 47, p. 293-305, 2008.

SANTON, P.A. et al. Instrumentation of wildland fire - Characterisation of a fire spreading through a Mediterranean shrub, **Fire Safety Journal**, v. 41, p. 171–184, 2006.

SCOTT, J.; BURGAN, R. Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model, **USDA Forest Service Research**, General Technical Report RMRS-GTR-153, 2005.

SECRETARIA NACIONAL DE DEFESA CIVIL. Disponível em: <http:// www.defesacivil.gov.br/desastres/recomendacoes/incendio_florestal.asp>. Acesso em: 02 nov. 2010.

SÉRO-GUILLAUME, O.; MARGERIT, J. Modelling forest fires. Part I: a complete set of equations derived by extended irreversible thermodynamics, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 45, p. 1705-1722, 2002.

SILVA, R.G. **Manual de prevenção e combate aos incêndios florestais.** Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 1998.

SILVANI, X.; MORANDINI, F. Fire spread experiments in the field - Temperature and heat fluxes measurements, **Fire Safety Journal**, v. 44, p. 279–285, 2009.

SIMEONI, A. et al. Reduction of a multiphase formulation to include a simplified flow in a semi-physical model of fire spread across a fuel bed, **International Journal of Thermal Sciences**, v. 42 p. 95–105, 2003.

SOARES, R.V.; SANTOS, J.F. Comparação do perfil dos incêndios florestais em áreas protegidas nos períodos de 1983 - 1987 e 1994 – 1997. **Brasil Florestal**, Brasília, v. 23, n. 78, p.9-17, 2003.

SULLIVAN, A.L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models, **International Journal of Wildland Fire**, Collingwood, v.18, p. 349–368, 2009a.

_____. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models, **International Journal of Wildland Fire**, Collingwood, v.18, p. 369–386, 2009b.

_____. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 3: Simulation and mathematical analogue models, **International Journal of Wildland Fire**, Collingwood, v.18, p. 387–403, 2009c.

TIHAY, V. et al. Experimental study of laminar flames obtained by the homogenization of three forest fuels, **International Journal of Thermal Sciences**, v. 48, p. 488-501, 2009a.

USDA Forest Service (2006) 'Policy Implications of Large Fire Management - A Strategic Assessment of Factors Influencing Costs.' Disponível em: <http://www.fs.fed.us/fire/management/Large_Fire_Mgt.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2010.

WANG, Y.; CHATTERJEE, P.; DE RIS, J.L. Large eddy simulation of fire plumes, **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 33, pp. 2473–2480, 2011.

WEBER, R.O. Modelling fire spread through fuel beds, **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 17, p. 67–82, 1991.

WELLS, G. The Rothermel Fire-Spread Model: Still Running Like a Champ. Fire Science Digest. Issue 2, 2008

WILLIAMS, F.A. Urban and wildland fire phenomenology, **Progress in Energy and Combustion Science**, Great Britain, v. 8, p. 317–354, 1982.

ZHOU, X.; MAHALINGAM, S.; WEISE, D. Modeling of marginal burning state of fire spread in live chaparral shrub fuel bed, **Combustion and Flame**, v. 143, p. 183-198, 2005.

_____. Experimental study and large eddy simulation of effect of terrain slope on marginal burning in shrub fuel beds, **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 31, p. 2547-2555, 2007.

ZHOU, X.Y.; PEREIRA, J.C.F. A multidimensional model for simulating vegetation fire spread using a porous media sub-model, **Fire and Materials**, v. 24, p. 37-43, 2000.

ZHOU, X.; WEISE, D.; MAHALINGAM, S. Experimental measurements and numerical modeling of marginal burning in live chaparral fuel beds, **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 30, p. 2287-2294, 2005.

GLOSSÁRIO

Bioma	É um conjunto de vida (vegetal e animal) constituído pelo agrupamento de tipos de vegetação contíguos e identificáveis em escala regional, com condições geoclimáticas similares e história compartilhada de mudanças, o que resulta em uma diversidade biológica própria.
Coníferas	Caracterizam-se principalmente, por possuir folhas em forma de agulhas e frutos em forma de cones com sementes expostas. No Brasil, a conífera nativa mais conhecida é o pinheiro-do-paraná. Outros tipos são o pinus, o pinho-bravo, pinho-do-brejo e os ciprestes.
Fogo	De um modo geral, é o termo aplicado ao fenômeno físico resultante da rápida combinação entre o oxigênio e uma substância qualquer (madeira por exemplo), com produção de calor, luz e, geralmente, chamas. Fogo, ou mais precisamente combustão, é uma reação química de oxidação.
Incêndios de copa	São aqueles que se desenvolvem nas copas das árvores, onde a velocidade e a intensidade do fogo são maiores e mais rápidas, devido à grande circulação do vento nessas áreas. Por causa de sua rápida propagação, são os incêndios que mais causam danos à vida humana e silvestre bem como às construções rurais e campestres.
Incêndio florestal	É a propagação do fogo, em áreas florestais e de savana (cerrados e caatingas). Normalmente ocorre

	com frequência e intensidade nos períodos de estiagem e está intrinsecamente relacionada com a redução da umidade ambiental.
Incêndios de superfície	São caracterizados pela queima da vegetação morta e rasteira, como as herbáceas, da camada de folhas, galhos, etc. que se misturam com a terra que cobre o solo da mata, bem como dos troncos e, especialmente, de material que tenha sofrido decomposição (húmus). Estes incêndios não causam danos significativos em árvores de grande porte, porém são extremamente prejudiciais às vegetações rasteiras e plantas jovens, principalmente para sua regeneração.
Incêndios subterrâneos	São incêndios que se propagam debaixo da superfície terrestre, alimentados por matéria orgânica seca, raízes e turfas, bem compactadas, de combustão lenta e contínua. Ao contrário dos outros tipos de incêndio que se multiplicam com maior rapidez devido à presença de maior quantidade de oxigênio na combustão do material, este tipo de incêndio se espalha lentamente.
Modelos empíricos	Os modelos empíricos são compostos de correlações estatísticas extraídas a partir de experimentos ou estudos históricos dos incêndios florestais. Estes são apenas aplicáveis aos sistemas em que as condições são idênticas às utilizadas na formulação e teste dos modelos.
Modelos físicos	Os modelos físicos são gerados a partir das leis que regem a mecânica dos fluidos, combustão e

	transferência de calor. A validação destes tipos de modelos é extremamente difícil, embora possam ser extrapolados para uma ampla variedade de situações de incêndio.
Modelos semi-empíricos	Os modelos semi-empíricos são formulados a partir de expressões teóricas, gerais e simples, e finalizadas por meio da experimentação. Sua extrapolação é adequada em situações similares às utilizadas na obtenção de dados experimentais. A dificuldade na validação destes modelos é menor do que em modelos físicos, embora ainda assim esta dificuldade seja significativa.
Queimada	A queimada é uma antiga prática agropastoril ou florestal que utiliza o fogo de forma controlada para viabilizar a agricultura ou renovar as pastagens.
Termicamente fino ou espesso	Um material é termicamente fino quando as ondas térmicas se propagam significativamente através dele, e é termicamente espesso quando as ondas térmicas são significativamente atenuadas dentro do próprio material.
Vegetação herbácea	Formação composta por gramíneas, geralmente rasteiras.