



Radiopropagação em Vegetação na Presença de Cortinas de Fogo

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica

Alexandre José Paulo Lourenço

Leiria, abril de 2020



Radiopropagação em Vegetação na Presença de Cortinas de Fogo

Mestrado em Engenharia Eletrónica

Alexandre José Paulo Lourenço

Dissertação sob a supervisão dos Professores Rafael Ferreira da Silva Caldeirinha, Telmo Rui Carvalhinho Cunha Fernandes e Nuno Ricardo Cordeiro Leonor.

Leiria, abril de 2020

Originalidade e Direitos de Autor

Este relatório de dissertação é original, elaborado apenas para esse fim, e todos os autores cujos estudos e publicações mencionados são devidamente reconhecidos. É autorizada a reprodução parcial deste documento, desde que mencionado explicitamente o autor, bem como o ciclo de estudos, ou seja, mestrado em Engenharia Eletrotécnica, do ano letivo de 2019/2020, da Escola de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, e a data da apresentação pública deste trabalho.

Agradecimentos

Agradeço aos Professores Rafael Caldeirinha, Telmo Fernandes e Nuno Leonor, por terem proposto e aceite a orientação desta dissertação, pelas suas preciosas sugestões, pela competência e disponibilidade sempre demonstradas.

Agradeço também à Stefânia, pela partilha de ideias, conhecimentos e sugestões no âmbito do projeto RESCuE-TOOL (PCIF/SSI/0194/2017).

Gostaria também de agradecer à Escola de Tecnologia e Gestão de Leiria e ao Instituto de Telecomunicações de Leiria (IT- Leiria) pelo acesso que me foi concedido às instalações físicas, equipamentos e laboratórios, estendendo esse agradecimento aos elementos do (IT - Leiria) com os quais privei pelo seu apoio, partilha de conhecimentos e encorajamento.

Agradeço à minha família, em especial à Carla, pelo estímulo e incentivo e pela forma carinhosa com que me acompanham ao longo da minha vida.

Resumo

Este estudo centra-se na problemática que afeta as comunicações dos sistemas de emergência rádio quando o fogo está presente. Tem como principais objetivos analisar os efeitos dinâmicos na propagação de ondas de rádio na presença de cortinas de fogo e determinar quais os fatores de propagação que afetam as comunicações quando estamos perante um cenário de incêndio. Pretende-se também aplicar um modelo numérico que caracterize a propagação na presença de plasma formado por incêndios e validar o modelo através de simulações usando o software *Fire Dynamics Simulator* (FDS).

O FDS foi usado para conceber e simular diferentes cenários, variando os parâmetros que caracterizam a vegetação, designadamente, a composição química da espécie, o calor de combustão e a sua densidade. Parâmetros como a temperatura, densidades de gases, vapor de água e do combustível são posteriormente utilizados como entrada no modelo numérico de forma a calcular a densidade de eletrões e a frequência de colisão. Para o cálculo da densidade de eletrões foi necessário definir a percentagem dos materiais alcalinos (potássio, cálcio e magnésio) que depende da espécie de vegetação. Através dos valores da temperatura obtidos, da densidade de eletrões e da frequência de colisão, calcula-se a atenuação e o desvio de fase. Os resultados mostram que a atenuação tem uma forte dependência com a densidade de eletrões, sendo esta influenciada pelo aumento da temperatura e pela presença de elementos alcalinos na vegetação. Observa-se que o aumento da temperatura e a consequente diminuição da frequência de colisão leva a um aumento do desvio de fase. Utilizando-se um modelo de um incêndio a uma pequena escala, verificou-se que para uma temperatura de 1322 K, foi atingida uma atenuação de 4.93 dB/m. A atenuação total ao longo do percurso pode atingir os 14 dB.

Palavras-chave: incêndios, propagação de ondas de rádio, *fire dynamics simulator*, atenuação, frequência de colisão, densidade de eletrões.

Abstract

This study focuses on the problem that affects emergency radio communications systems when fire is present. Its main objectives are to analyze the dynamic effects on the propagation of radio waves in the presence of fire curtains, to determine which propagation factors affect communications when a fire scenario is involved. Additionally, the application of a numerical model that characterises the propagation in plasma environments formed by fires and its validation through simulations using of the software *Fire Dynamics Simulator* (FDS), is envisaged.

The FDS was used to design and simulate different scenarios, with varying parameters that characterize the vegetation, namely, the chemical composition of the species, the heat of combustion, and its density. Parameters such as temperature, gas densities, water vapor and fuel are later used as input into the numerical model applied to calculate the electron density and the collision frequency. To calculate the electron density, it is necessary to define the percentage of alkaline materials (potassium, calcium and magnesium) that depends on the vegetation's specie. Using the temperature values obtained, the electron density and the collision frequency, the attenuation and phase shift are calculated. Results show that the attenuation has a strong dependence on the electron density, which is influenced by the increase in temperature and the presence of alkaline elements in the vegetation. It is observed that the increase in temperature and the consequent decrease in the collision frequency leads to an increase in phase shift. Using a model of a small scale fire, a temperature of 1322 K was found and an attenuation of 4.93 dB / m was achieved. A total attenuation along the way can reach 14 dB.

Keywords: fire, radio wave propagation, fire dynamics simulator, attenuation, collision frequency, electron density.

Índice

Originalidade e Direitos de Autor	iii
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Abreviaturas e Acrónimos	xiv
1. Introdução.....	1
1.1 Motivação e objetivos do estudo	2
1.2 Estrutura da dissertação	3
1.3 Principais contribuições da dissertação	4
2. Propagação de ondas eletromagnéticas em plasmas.....	5
2.1 Introdução	5
2.2 Propagação de ondas eletromagnéticas.....	5
2.3 Fenómeno de refração.....	6
2.4 Fenómeno de Dispersão.....	8
2.5 Fenómeno da Difração.....	9
2.6 Ionização na zona de combustão	9
2.7 Frequência do plasma	10
2.8 Frequência de colisão.....	11
2.9 Constante complexa de propagação.....	11
2.10 Conteúdo alcalino das plantas.....	13
2.11 Conclusões interinas	13
3. Revisão da Literatura	15

3.1	Introdução.....	15
3.2	Modelo de radiopropagação em ambientes onde existe a presença de fogo	15
3.2.1	Fire Dynamics Simulator	15
3.2.2	Modelo do índice de refração numa atmosfera de fogo.....	17
3.2.3	Ionização térmica	18
3.2.4	Velocidade de colisão	20
3.3	Modelo de propagação de ondas de rádio em incêndios florestais	22
3.3.1	Determinação da densidade de eletrões	22
3.3.2	Estimativa da frequência de colisão entre eletrões e partículas neutras	23
3.3.3	Cálculo da atenuação	23
3.4	Estudos experimentais	26
3.4.1	Incêndios experimentais em pequena escala	26
3.4.2	Medições de propagação em microondas num incêndio em vegetação rasteira.....	29
3.4.3	Medições de propagação em microondas num incêndio num terreno agrícola	30
3.4.4	Atenuação em micro-ondas em chamas que utilizam restolho florestal como combustível.....	30
3.5	Conclusões interinas	31
4.	Aplicação do modelo.....	33
4.1	Introdução.....	33
4.2	FDS.....	33
4.2.1	Cenário de pequena escala tronco de madeira	37
4.2.2	Cenário de pequena escala árvore.....	41
4.3	Estimativa da densidade de eletrões	42
4.3.1	Determinação da densidade de cada elemento	42
4.3.2	Densidade Eletrónica	43
4.4	Cálculo da frequência de colisão.....	44
4.5	Cálculo da atenuação e desvio de fase	45
4.6	Processamento dos dados	48
4.6.1	Cálculo da atenuação	51
4.6.2	Cálculo do desvio de fase	52

4.7 Conclusões interinas	52
5. Apresentação e Análise de Resultados	55
5.1 Introdução	55
5.2 Influência da temperatura na atenuação.....	55
5.3 Variação da densidade de eletrões	57
5.4 Variação da frequência de colisão	58
5.5 Variação do calor de combustão	59
5.6 Variação da quantidade de metais alcalinos	66
5.7 Modificação do tipo de pirólise	68
5.8 Variação da frequência	68
5.9 Variação da taxa de libertação de calor	69
5.10 Variação da densidade da vegetação	71
5.11 Cálculo da atenuação total	72
5.12 Análise Estatística através da Função Distribuição Acumulada.....	75
5.13 Conclusões interinas	76
6. Conclusões.....	79
6.1 Introdução	79
6.2 Resumo dos resultados.....	79
6.3 Limitações do estudo e trabalho futuro.....	80
Bibliografia.....	83

Lista de Figuras

Figura 2.1 : Esquema de refração entre dois meios.....	6
Figura 2.2: Refração em dois meios com densidades distintas.	7
Figura 2.3: Refração das ondas rádio: a) Atmosfera sem fogo; b) Atmosfera na presença de fogo. Adaptado de [5].....	7
Figura 2.4: Difração das ondas de rádio. Adaptado de [5].	9
Figura 2.5: Ionização na zona fogo. Adaptado de [5].	10
Figura 3.1: Esquema do modelo utilizado para obtenção de resultados do FDS [5].	16
Figura 3.2: Sistema de medição de incêndios de pequena escala.....	27
Figura 3.3: Dimensões do fogo. Adaptado de [5].	28
Figura 3.4: Leitura dos parâmetros S utilizando um queimador.	31
Figura 4.1: Parâmetros de entrada e saída FDS.....	34
Figura 4.2: Cenário de uma árvore, com visualização gerado pelo <i>Smokeview</i>	35
Figura 4.3: Valores de temperatura para um termopar colocado a uma altura de 3m do solo (considerando 14 dimensões de células).....	36
Figura 4.4: Valores de temperatura para um termopar colocado a uma altura de 3m do solo (considerando 7 dimensões de células).....	36
Figura 4.5: Suavização das curvas de temperatura – Método Loess.	37
Figura 4.6: Suavização das curvas de temperatura – Método RLoess.	37
Figura 4.7: Tronco de madeira em chamas.	39
Figura 4.8: Temperatura.....	40
Figura 4.9: Celulose.	40
Figura 4.10: Vapor de água.....	40
Figura 4.11: Nitrogênio.....	40
Figura 4.12: Oxigênio.	41
Figura 4.13: Dióxido de Carbono.....	41
Figura 4.14: Cenário de pequena escala – árvore.....	41
Figura 4.15: Parâmetros necessários para determinar a densidade de elétrons.	42
Figura 4.16: Diagrama de dados utilizado para calcular a velocidade de colisão.	44
Figura 4.17: Atenuação calculada a partir da expressão (3.33) [16].	45

Figura 4.18: Atenuação através da expressão (3.33), variando a velocidade de colisão.	46
Figura 4.19: Atenuação através da expressão (4.6), variando a frequência de colisão.	46
Figura 4.20: Atenuação através da expressão (3.33), variando a densidade de elétrons.	47
Figura 4.21: Atenuação através da expressão (4.6), variando a densidade de elétrons.	47
Figura 4.22: Valores médios – temperatura até 1300 K.	49
Figura 4.23: Valores médios – temperatura superior a 1600 K.	49
Figura 4.24: Vários <i>slices</i> espaciais no plano XZ.	50
Figura 4.25: Dimensões do cenário – bloco de madeira.	50
Figura 4.26: Número de <i>slices</i> com a atenuação ao longo do tempo.	51
Figura 4.27: <i>Slices</i> na zona de combustão ao longo do tempo de simulação.	52
Figura 5.1: Temperatura máxima obtida a partir do <i>slice</i> número 40.	56
Figura 5.2: Influência da temperatura na atenuação.	56
Figura 5.3: Densidade de elétrons obtida a partir do <i>slice</i> número 40.	57
Figura 5.4: Densidade de elétrons em função da temperatura.	58
Figura 5.5: ϕ_{eff} máxima e ϕ_{eff} em função da temperatura máxima do <i>slice</i> número 40.	59
Figura 5.6: Frequência de colisão em função do valor da temperatura.	59
Figura 5.7: Atenuação máxima por <i>slice</i> com um Calor de Combustão: 11020 kJ/kg.	60
Figura 5.8: Atenuação máxima no plano XZ com um Calor de Combustão: 11020 kJ/kg.	61
Figura 5.9: Calor de Combustão de 11020 kJ/kg no <i>slice</i> número 40.	61
Figura 5.10: Atenuação máxima por <i>slice</i> com um Calor de Combustão de 12600 kJ/kg.	62
Figura 5.11: Calor de Combustão de 12600 kJ/kg.	63
Figura 5.12: Atenuação máxima por <i>slice</i> com um Calor de Combustão: 15000 kJ/kg.	63
Figura 5.13: Calor de Combustão de 15000 kJ/kg.	64
Figura 5.14: Calor de Combustão de 17700 kJ/kg.	64
Figura 5.15: Variação da atenuação em função do calor de combustão – <i>slice</i> 40.	65
Figura 5.16: Atenuação em função da variação do potássio (K).	67
Figura 5.17: Atenuação em função da variação do Cálcio (Ca).	67
Figura 5.18: Atenuação em função da variação do Magnésio.	67
Figura 5.19: Atenuação e tipo de pirólise.	68
Figura 5.20: Variação da taxa de libertação de calor (taxa máxima de 350 kW/m ²) - <i>slice</i> 40.	69

Figura 5.21: Calor de Combustão 17700 kJ/kg e taxa de libertação de calor por unidade de área de 2500 kW/m ²	69
Figura 5.22: Temperatura máxima em função da taxa de libertação de calor (taxa máxima de 2500 kW/m ²).70	
Figura 5.23: Temperatura máxima em função da taxa de libertação de calor (taxa máxima de 350 kW/m ²). .71	
Figura 5.24: Atenuação total para um calor de combustão de 11020 kJ/kg.	72
Figura 5.25: Atenuação total para um calor de combustão de 12600 kJ/kg.	73
Figura 5.26: Atenuação total máxima ao longo do tempo – <i>slice</i> número 40.	73
Figura 5.27: Atenuação total para um calor de combustão de 15000 kJ/kg.	74
Figura 5.28: Atenuação total para um calor de combustão de 17700 kJ/kg.	74
Figura 5.29: Função distribuição acumulada – mediana.	75
Figura 5.30: Função distribuição acumulada – média.	75
Figura 5.31: Função distribuição acumulada – 3dB.	76

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Parâmetros e os seus extremos [5].....	17
Tabela 3.2: Energia de ionização dos sais alcalinos de interesse.....	19
Tabela 3.3: Frequência de colisão efetiva $V_{eff} N \times 10 - 8sec - 1 cm^3$ para campo elétrico alternado. [17]	21
Tabela 3.4: Resultados Boan [5] - Planta Eucalipto (0.9%K, 0.82%Ca, 0.28%Mg) – Pirólise rápida (II K = 100% II Ca = 20% II Mg = 40%).....	22
Tabela 3.5: Dimensões do fogos A, B e C.....	28
Tabela 3.6: Atenuação máxima medida [5].....	29
Tabela 4.1: Tamanhos de células utilizadas nas simulações.....	35
Tabela 4.2: composição do combustível.....	38
Tabela 4.3: Definição das propriedades do material combustível	38
Tabela 4.4: Propriedades da superfície.....	39
Tabela 4.5: Tipos de pirólise	43
Tabela 4.6: JANAF – NIST Thermo-chemical Data	44
Tabela 4.7: Frequência de Colisão Efetiva.....	45
Tabela 4.8: Configuração no plano Y para exportação dos parâmetros ficheiros .sf.....	51
Tabela 5.1: Diferentes valores para o calor de combustão.	60
Tabela 5.2: Valores máximos obtidos para o slice nº40	65
Tabela 5.3: Valores obtidos Atenuação da Temperatura, Ne, φ_{eff} , desvio de fase	66
Tabela 5.4: Resultados Boan [5] para uma φ_{eff} de 1×10^{11} – Planta Eucalipto (0.9% K, 0.82% Ca, 0.28% Mg) – Pirólise rápida (II K = 100% II Ca = 20% II Mg = 40%).....	66
Tabela 5.5: Atenuação em função da frequência.....	68
Tabela 5.6: Atenuação em função da densidade e composição química da vegetação.....	72

Lista de Abreviaturas e Acrónimos

ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
eV	Electron Volt
FDTD	Finite Difference Time Domain
FDS	Fire Dynamics Simulator
GSM	Global System for Mobile Communication
GUI	Graphical User Interface
HRR	Heat Release Rate
HRRPUA	Heat Release Rate Per Unit Area
LTE	Long Term Evolution
NIST	National Institute of Standards and Technology
RX	Receiver
SIRESP	Sistema Integrado de Redes de Emergência e Segurança de Portugal
TX	Transmitter
UHF	Ultra high frequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunications Service
VHF	Very high frequency
WFDS	Wildland Urban Interface Fire Dynamics Simulator

1. Introdução

As mudanças climáticas são notórias nos incêndios atuais uma vez que nos últimos anos se verifica uma tendência crescente para o aumento do número e dimensão dos fogos. No espaço de duas décadas a área ardida em Portugal aumentou significativamente. Nos trágicos incêndios de junho e outubro de 2017 foram visíveis as marcas das alterações climáticas. Estas irão atuar presumivelmente no sentido de favorecer condições pirometeorológicas conducentes ao aumento da incidência e gravidade dos fogos florestais. Esperam-se acréscimos na frequência e magnitude de fenómenos extremos com influência no comportamento do fogo, nomeadamente temperaturas mais elevadas, períodos de seca mais severos e prolongados e maior instabilidade atmosférica [1].

Apesar de existirem estudos que referem as alterações climáticas como sendo o elemento primordial para o desencadeamento de incêndios, as alterações socioeconómicas nas populações, bem como o coberto vegetal também são fatores que contribuem para o risco de incêndio.

O incêndio ocorrido no dia 17 de junho de 2017 no concelho de Pedrógão Grande foi o mais mortífero de sempre em Portugal, tendo sido contabilizado um total de 66 mortos, mais de 500 casas destruídas e cerca de 53 mil hectares de território atingidos pelo fogo [2]. No dia 15 de outubro desse mesmo ano ocorreram vários incêndios que afetaram a região centro e provocaram 45 mortos, destruíram mais de 800 habitações e quase 500 instalações empresarias foram danificadas. Acresce a tudo isto, a extensa área florestal ardida e bens destruídos [3].

Para além da enorme destruição provocada pelos incêndios, as forças de combate ao fogo colocam as suas vidas em perigo ao tentarem proteger pessoas e bens.

Os sistemas de comunicação ao dispor da proteção civil permitem que comuniquem e coordenem as ações e esforços com o intuito de extinguir os incêndios. Contudo, desde a introdução de sistemas de rádio comunicação nos serviços de emergência, pouca atenção tem sido prestada à propagação de ondas de rádio em ambientes de fogo extremo mesmo que os bombeiros tenham testemunhado que as comunicações rádio podem ser severamente degradadas nesses ambientes [4]. Têm-se verificado situações onde apesar de as pessoas estarem em linha de vista não conseguem sequer comunicar entre si [5].

A propagação de ondas de rádio é influenciada pela frequência, características do solo, atmosfera e vegetação envolvente (espécie, densidade e distribuição). Existem problemas com as comunicações rádio quando a presença de fogo e fumo interfere no percurso da radiopropagação [6].

O presente estudo emerge da necessidade de compreender os fenómenos que afetam a propagação de ondas de rádio em cenários de incêndios florestais.

A atmosfera que envolve um incêndio é constituída por um conjunto de gases ionizados e partículas carregadas, iões e eletrões a que se designa plasma.

Pretende-se apresentar um modelo numérico que caracterize a propagação em ambientes onde exista a presença de plasmas. A validação do modelo desenvolvido será efetuada com recurso ao software de simulação *Fire Dynamics Simulator* [7].

1.1 Motivação e objetivos do estudo

A introdução de sistemas de comunicação de rádio no apoio ao combate de fogos florestais tem ajudado os bombeiros na coordenação de recursos e difusão da informação [8]. No entanto, estes sistemas, por vezes, apresentam falhas.

Os incêndios florestais poderão originar zonas de sombra de cobertura rádio num teatro de operações, o que, no caso do incêndio de Pedrógão Grande, se traduziria numa redução de probabilidade de cobertura rádio da rede rádio de emergência SIRESP. A tecnologia utilizada no segmento de rádio da Rede SIRESP é a tecnologia TETRA sendo diferente e incompatível com a tecnologia habitualmente usada em redes móveis celulares públicas (GSM, UMTS, LTE, etc.) O SIRESP deverá acautelar as perdas adicionais induzidas pela presença de fumo e/ ou chama, sobretudo em sede da definição margem de desvanecimento necessária ao bom funcionamento desta rede rádio, particularmente em situações de incêndios florestais [9].

Neste contexto há necessidade de um estudo detalhado sobre os efeitos dinâmicos na cobertura rádio em teatros de operação de incêndios florestais, sobretudo na propagação de ondas rádio em espécies autóctones de Portugal. Importa ainda o estudo dos mecanismos de subrefração na propagação de ondas de rádio por efeito do aumento do coeficiente de refração na presença de calor intenso (devido às chamas), com maior incidência em frequências acima dos 450 MHz, com particular relevância para a rede rádio do SIRESP.

Os objetivos deste estudo passam por analisar os efeitos dinâmicos na propagação das ondas de rádio na presença de cortinas de fogo, com validação através do uso de software de simulação de cenários de incêndio. Além disso pretende-se identificar os fatores de propagação que afetam as comunicações rádio.

Trata-se de um tema revelante, uma vez que as falhas nos sistemas de comunicação rádio durante os incêndios, podem colocar em causa uma resposta eficaz por parte dos agentes que combatem os fogos florestais. Determinar a atenuação gerada por um incêndio, é um fator crucial para colmatar as falhas nesses sistemas.

É intuito deste estudo aplicar um modelo numérico que caracterize a propagação em plasmas e determinar quais os fatores que afetam a atenuação das ondas de rádio e o desvio de fase.

1.2 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos. No primeiro capítulo apresenta-se um enquadramento geral do estudo, através da contextualização do problema, das questões de investigação e objetivos e discussão da sua relevância.

O segundo capítulo é dedicado à teoria que envolve a propagação de ondas eletromagnéticas em ambientes onde exista a formação de plasma. São enunciados os fenómenos que afetam as ondas eletromagnéticas quando atravessam zonas ionizadas, que podem surgir quando ocorre um incêndio. Neste capítulo é apresentada a teoria que permite determinar a densidade de eletrões e a velocidade de colisão entre os eletrões e partículas neutras do plasma, já que são estes os fatores determinantes para o cálculo da atenuação e desvio de fase.

O terceiro capítulo é dedicado à apresentação de modelos numéricos e empíricos implementados por Boan [5] e Mphale [10], nomeadamente no que se refere aos procedimentos utilizados para calcular a densidade de eletrões, frequência de colisão, atenuação e desvio de fase. É dada particular ênfase ao modelo de incêndio de pequena escala implementado por Boan, com recurso à ferramenta de simulação FDS.

O quarto capítulo é dedicado à aplicação do modelo. São descritos os procedimentos levados a cabo para simular diversos cenários no FDS. A partir dos dados obtidos são calculados os valores para a atenuação e desvio de fase, utilizando o modelo aplicado.

No quinto capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos, e estudados os impactos que as variações nos parâmetros de entrada têm no resultado final ao nível da atenuação e desvio de fase.

Por fim, no sexto capítulo, são efetuados comentários e conclusões deste estudo. São também indicadas as limitações e apontadas sugestões para trabalho futuro.

1.3 Principais contribuições da dissertação

O trabalho realizado nesta dissertação permitiu desenvolver numa *framework* uma metodologia que permite simular e caracterizar os fatores que contribuem para a propagação de ondas de rádio num cenário de presença de fogo. Foi feito o levantamento dos parâmetros que compõem a vegetação, assim como a recriação de um cenário de incêndio. Foi aplicado um modelo numérico que calcula a atenuação e o desvio de fase de ondas eletromagnéticas na presença de plasmas formados por um incêndio.

2. Propagação de ondas eletromagnéticas em plasmas

2.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos relacionados com a propagação de ondas eletromagnéticas em ambientes onde exista a presença de fogo e fumo, e dos fenômenos decorrentes da ionização. Para esse efeito é abordada a propagação de ondas eletromagnéticas em meios com diferentes características. No subcapítulo 2.3, evidencia-se o modo como a refração afeta as ondas eletromagnéticas, dando importância à variação do índice de refração em função da pressão parcial de cada gás que constitui a atmosfera. Nos seguintes 2.4 e 2.5, descreve-se os fenômenos de propagação relacionados com a dispersão e difração de ondas eletromagnéticas. Em 2.6, refere-se que a combustão de vegetação leva a que elétrons livres sejam colocados na zona da chama. No 2.7, apresenta-se a expressão para cálculo da frequência do plasma. No subcapítulo 2.8, descreve-se os fatores que influenciam a frequência de colisão. Em 2.9, são apresentadas as expressões para calcular a atenuação e o desvio de fase. No subcapítulo 2.10, pretende-se enunciar que a presença de metais alcalinos nas plantas contribui para a formação da densidade de elétrons. Por fim, são apresentadas as conclusões interinas do capítulo 2.

2.2 Propagação de ondas eletromagnéticas

A radiação eletromagnética abrange uma grande variedade de fenômenos, desde as ondas de rádio, micro-ondas, passando pela luz visível, até aos raios X e radiação gama. Todas essas formas de radiação eletromagnética obedecem às equações de Maxwell [5]. As ondas eletromagnéticas consistem num campo elétrico e magnético que estão acoplados um ao outro, e que oscilam no tempo (frequência) e no espaço (comprimento da onda). No vácuo, o resultado do produto do comprimento da onda e frequência é a velocidade da luz ($c=\lambda f$). A velocidade da luz num meio está relacionada com as características do material ($v_p=1/\sqrt{\mu\epsilon}$), onde μ é a permeabilidade magnética (A/m) e está relacionada com as características do meio e ϵ é a permitividade elétrica (F/m) e representa a capacidade de um material para armazenar cargas elétricas. Quando um meio muda devido a alterações

repentinamente, tais como a presença de objetos, mudanças de temperatura e/ou pressão atmosférica, a propagação de ondas eletromagnéticas também sofre alterações.

2.3 Fenómeno de refração

A refração é o fenômeno que ocorre quando uma onda eletromagnética transita de um meio para outro com características distintas, sendo que a sua direção é alterada. A frequência da onda não é alterada, mas a sua velocidade de propagação e comprimento da onda podem ser afetados. A refração obedece a dois pressupostos. O primeiro enuncia que o raio incidente (RI), o raio refratado (RR) e a reta normal ao ponto de incidência (N) estão contidos no mesmo plano. A Figura 2.1 mostra-nos dois meios distintos em que i corresponde ao ângulo do raio incidente e r o ângulo do raio refratado.

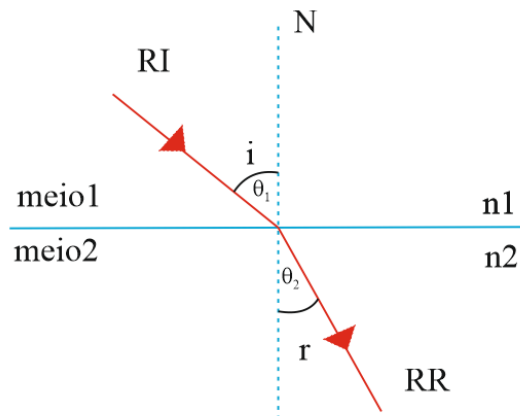


Figura 2.1 : Esquema de refração entre dois meios.

O segundo pressuposto da refração corresponde à Lei de Snell:

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}, \quad (2.1)$$

sendo que θ corresponde ao ângulo a partir da reta normal, v representa a velocidade da luz no meio respectivo (m/s) e λ , representa o índice de refração do meio.

A lei de Snell pode também ser escrita da seguinte forma:

$$n_1 \cdot \sin(i) = n_2 \cdot \sin(r), \quad (2.2)$$

em que i e r , são os ângulos de incidência e refração, respectivamente, e n_1 e n_2 , são os índices de refração dos dois meios.

Na equação 2.2, se levarmos em consideração que $n_2 > n_1$, então $\sin(r) < \sin(i)$ e $r < i$. Sendo assim, quando uma onda eletromagnética passa de um meio menos denso para um meio mais denso, a velocidade da luz diminui e o raio refratado aproxima-se da reta normal. Na Figura 2.2 é possível visualizar que o ar é um meio menos denso que a água, então o índice de refração será mais elevado para a água em relação ao ar.

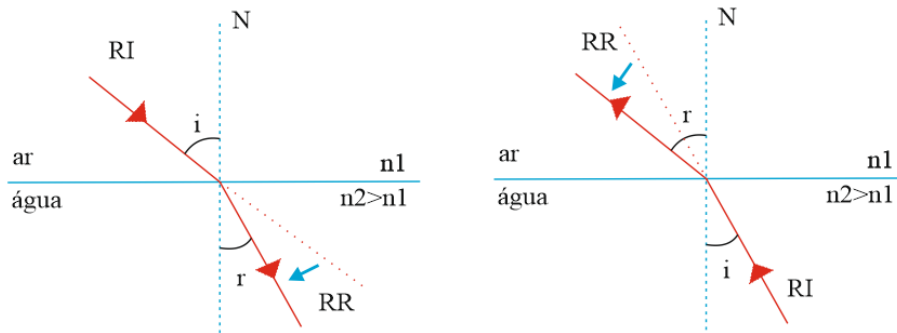


Figura 2.2: Refração em dois meios com densidades distintas.

Num ambiente onde exista a presença de fogo, as ondas eletromagnéticas não se propagam na atmosfera estática, mas através de um meio que está em constante alteração ou turbulência. Em condições atmosféricas normais é comum as ondas sofrerem uma ligeira curva em direção à superfície terrestre. Esta situação deve-se ao gradiente de pressão atmosférica e ao perfil de temperatura que causa um índice de refração n (uma medida das características eletromagnéticas) mais elevado ao nível do solo. O calor gerado pelas regiões onde há presença de fogo, leva a que existam alterações na temperatura da atmosfera e na composição dos gases. À medida que a temperatura aumenta, o índice de refração baixa. Devido ao facto de as partes mais quentes da atmosfera estarem junto ao nível do solo o índice de refração aumenta com a altura. Este fenómeno é caracterizado pela existência de condições subrefrativas e leva a que as ondas de rádio se afastem do solo, diminuindo assim a potência do sinal disponível ao nível do recetor. Este fenómeno pode ser ilustrado pela Figura 2.3 b).

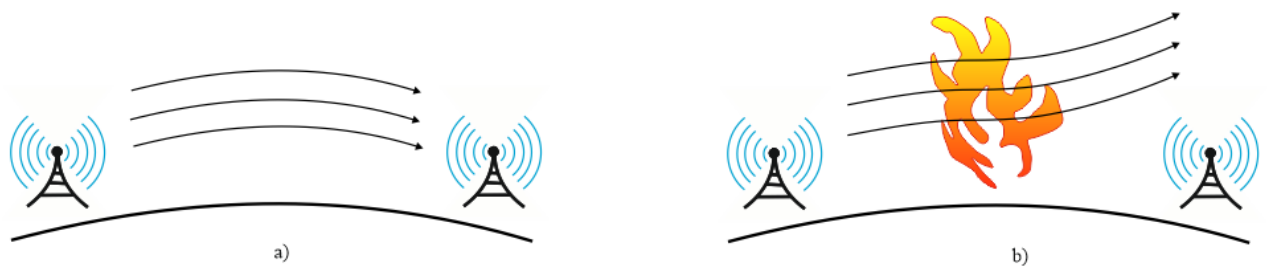


Figura 2.3: Refração das ondas rádio: a) Atmosfera sem fogo; b) Atmosfera na presença de fogo. Adaptado de [5].

É necessária uma certa distância para que os efeitos refrativos sejam visíveis. Para comprimentos de onda menores, ou seja, para frequências mais elevadas, os efeitos refrativos são mais proeminentes [5].

As formulações para o índice de refração da atmosfera terrestre consideram as alterações na temperatura, pressão e humidade. A expressão matemática para calcular o índice de refração para as condições gerais atmosféricas é a equação de Debye [11]:

$$N_r = (n_r - 1) \times 10^6 \\ = 77.695 \frac{P_{Dry}}{T} + 71.97 \frac{P_{H_2O}}{T^2} + 375406 \frac{P_{H_2O}}{T}, \quad (2.3)$$

onde N_r é a refratividade, n_r é o índice de refração, T é a temperatura em Kelvin, P_{Dry} é a pressão parcial dos gases que formam a componente de 'ar seco' presentes na atmosfera, designadamente nitrogénio, oxigénio, dióxido de carbono e os gases remanescentes incluindo Hélio (He), Argon (Ar), Hidrogénio (H) e Sódio (Na) e P_{H_2O} é a pressão parcial do vapor de água em hPa.

Em alternativa, podemos separar o dióxido de carbono da componente de ar seco. A fórmula geral que separa o termo relativo ao CO₂ é mostrada na equação 2.4 [12].

$$N_r = K_1 \frac{P_{Dry-CO_2}}{T} + K_2 \frac{P_{H_2O}}{T^2} + K_3 \frac{P_{H_2O}}{T^2} + K_4 \frac{P_{CO_2}}{T}, \quad (2.4)$$

onde $K_1=77.64^\circ\text{K/hPa}$, $K_2=71.97^\circ\text{K/hPa}$, $K_3=375406^\circ\text{K/hPa}$ e $K_4=133.484^\circ\text{K/hPa}$ são constantes obtidas a partir de medidas experimentais [13] e P_{Dry-CO_2} corresponde à pressão parcial da componente de ar seco sem o dióxido de carbono. É perceptível que o índice de refração é sensível à pressão parcial de cada gás que constitui a atmosfera.

Numa atmosfera de fogo, a concentração dos gases muda à medida que a combustão ocorre.

O índice de refração está dependente da concentração e pressão dos gases que envolvem o ambiente de fogo. A variação da concentração de oxigénio, do dióxido de carbono e do vapor de água gerado pela combustão influenciam o índice de refração.

2.4 Fenómeno de Dispersão

Mudanças súbitas no meio de propagação podem causar dispersão. Estas mudanças levam a que a energia das ondas de rádio seja dispersada em todas as direções. Em ambientes de

fogo, a dispersão de partículas nas plumas, ou das partículas varridas pode ocorrer por correntes convectivas a partir da região de combustão. Outra forma de dispersão está relacionada com o ar que rodeia a atmosfera do fogo que está em constante movimento, levando a que exista dispersão.

2.5 Fenómeno da Difração

Quando um objeto bloqueia uma onda eletromagnética, cria uma região de sombra atrás de si mesmo. No entanto, mesmo que a linha de vista esteja obstruída, poderá continuar a existir energia rádio se existir difração. Este fenómeno é proporcional ao comprimento de onda, tal que ondas de maior comprimento têm uma maior difração na região de sombra do objeto. É deste modo que baixas frequências são utilizadas para comunicação a longas distâncias, pois o ângulo de refração é diretamente proporcional ao comprimento de onda. A difração é um fenómeno importante, porque quando o cenário de propagação é obstruído por uma árvore, ou incêndio, as ondas continuam a propagar-se para a região de sombra, tal como exemplificado na Figura 2.4.

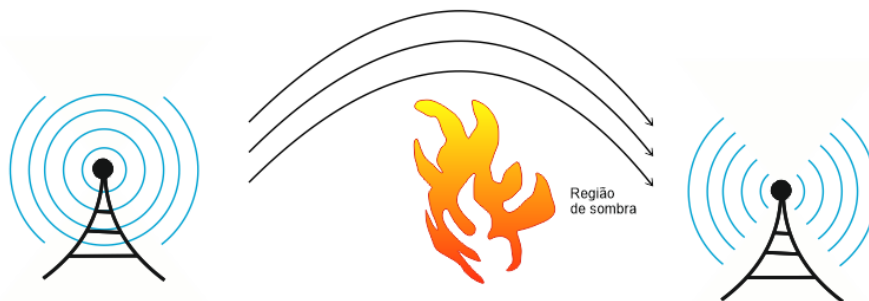


Figura 2.4: Difração das ondas de rádio. Adaptado de [5].

2.6 Ionização na zona de combustão

Em [8] é referido que as propriedades elétricas das chamas são conhecidas há mais de um século [14]. Diversos estudos mostram que as chamas são condutoras, possuindo partículas carregadas, que são formadas a partir da combustão.

Em vários estudos anteriores [5] [15] [16], demonstrou-se que a ionização é um dos principais mecanismos apontados à degradação do sinal de rádio. A ionização leva a que existam eletrões livres na zona de combustão, levando a que a radiação seja absorvida.

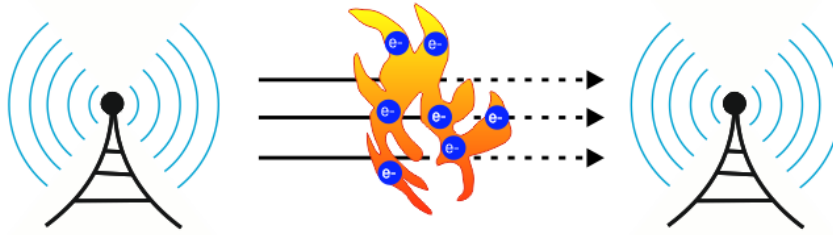


Figura 2.5: Ionização na zona fogo. Adaptado de [5].

O tamanho da população de elétrons é determinado pela densidade do material ionizável presente na zona de combustão, destacando-se particularmente o potássio como sendo o metal alcalino presente nas plantas com menor potencial de ionização [16]. Quanto menor for o potencial necessário para a ionização, mais fácil será a libertação de elétrons livres para a zona de combustão. Os elétrons ionizados interferem com as micro-ondas causando absorção e dispersão [8].

Alguns estudos utilizam a equação de Saha (3.9) para prever a abundância de elétrons num determinado volume, estando relacionada com a densidade, temperatura e as propriedades químicas do elemento.

2.7 Frequência do plasma

O plasma é um estado da matéria que contém partículas carregadas que se movem livremente. A frequência do plasma mede a oscilação da densidade dos elétrons do plasma. Quando uma onda eletromagnética atravessa o plasma, parte da energia da mesma é transmitida às partículas, afetando a amplitude da onda. Parte da energia eletromagnética é dissipada, resultando em atenuação. Quanto maior for a densidade das partículas, mais energia é acoplada ao plasma. A combustão gera elétrons livres e partículas carregadas na região da chama [5].

A frequência do plasma está relacionada com a raiz quadrada da densidade de elétrons. Pode ser calculada utilizando a equação 2.5.

$$\omega_p = \left(\frac{Nq_e^2}{M_e \epsilon_0} \right)^{1/2}, \quad (2.5)$$

onde ϵ_0 é a permissividade do espaço livre, N é a densidade de elétrons livres, q_e e M_e são respectivamente a carga e a massa do elétron.

2.8 Frequência de colisão

O número de colisões por segundo dos elétrons livres com as partículas neutras do plasma é designado de frequência de colisão. Essa frequência é bastante elevada devido à pressão atmosférica, temperatura e à constituição dos gases [8].

Itikawa [17] apresenta sob a forma de tabela os valores aproximados para a frequência de colisão, sendo esta designada de frequência de colisão efetiva (V_{eff}) para vários tipos de gases conhecidos e para temperaturas compreendidas entre 100 e 5000 K.

2.9 Constante complexa de propagação

A propagação de ondas eletromagnéticas em plasmas é determinada pelo valor da função do dielétrico. Akhtar, Scharer, Tysk e Kho [18] assumiram um modelo de aproximação de plasma. Para a maioria das aplicações, se for ignorado o movimento térmico das partículas, a velocidade da fase da onda é muito maior que a velocidade dos elétrons, e a interação entre os elétrons é apenas efetuada através das forças de carga espacial coletiva. Para além disso assume-se que os iões estão estacionários. Na ausência de campo magnético, a equação de movimento para elétrons no plasma é escrita do seguinte modo:

$$m\ddot{r} = -eE - v_{eff}m\dot{r}, \quad (2.6)$$

onde r é o vetor de deslocamento de elétrons, E representa o campo eletromagnético e v_{eff} a frequência de colisão efetiva do momento de transferência. Se o campo elétrico varia em função de $\exp(j\omega t)$, o vetor de deslocamento r é dado por:

$$r = \frac{eE}{m\omega(\omega - jv_{eff})}; \dot{r} = \frac{-eE}{m} \frac{(v_{eff} - j\omega)}{(\omega^2 + v_{eff}^2)} \quad (2.7)$$

A condutividade complexa σ , é dada por:

$$\sigma \equiv \sigma_r + j\sigma_i = \frac{n_e e \dot{r}}{E} = \frac{n_e e^2}{m} \frac{(v_{eff} - j\omega)}{(\omega^2 + v_{eff}^2)}, \quad (2.8)$$

e a constante dielétrica relativa complexa para um meio linear é dada por:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = k = k_{r+}jk_i = 1 - j\frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v_{eff}^2} \left(1 + j\frac{v_{eff}}{\omega}\right), \quad (2.9)$$

enquanto que ω_p é a frequência de colisão do plasma e ε_0 é a permissividade do espaço livre.

O índice de refração complexo e a constante complexa de propagação são dados por:

$$n = \frac{c}{v} = \mu_r - j\chi = k^{\frac{1}{2}}, \quad (2.10)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \frac{\omega}{c} (j\mu) = \frac{\omega}{c} \sqrt{k}, \quad (2.11)$$

$\alpha = \chi \omega/c$, representa a constante de atenuação em Np/m e $\beta = \mu_r \omega/c$ é a constante de fase em rad/m. As soluções para a constante de fase e de atenuação, são as seguintes:

$$\begin{aligned} \beta_p = \frac{\omega}{c} & \left\{ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v_{eff}^2} \right) \right. \\ & + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v_{eff}^2} \right)^2 \right. \\ & \left. \left. + \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v_{eff}^2} \frac{v_{eff}}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \alpha_p = \frac{\omega}{c} & \left\{ -\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v_{eff}^2} \right) \right. \\ & + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v_{eff}^2} \right)^2 \right. \\ & \left. \left. + \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v_{eff}^2} \frac{v_{eff}}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Assumindo uma fatia de plasma com um perfil uniforme e uma densidade média, as variações de fase e amplitude para o sinal transmitido são dadas por:

$$\Delta\varphi = \int_0^d (\beta_0 - \beta_p) dr; \quad \Delta A = \int_0^d (\alpha_0 - \alpha_p) dr \quad (2.14)$$

onde β_0 e α_0 são os valores do espaço livre e β_p e α_p são valores do plasma.

2.10 Conteúdo alcalino das plantas

Heron, M.L e Mphale, K. [15], estenderam a teoria da radio propagação em ambientes de fogo, à vegetação, argumentado que quantidades suficientes de sais alcalinos presentes nas mesmas geram uma quantidade significativa da densidade de elétrons que afetam as comunicações rádio VHF e UHF. Os metais alcalinos existem como elementos nas plantas, sendo vitais para o seu crescimento e contribuem para que as mesmas se mantenham saudáveis. Nos eucaliptos, a concentração de metais alcalinos é maior nas extremidades da planta, como na casca, folhas e na estrutura dos ramos [19]. Uma vez que essas extremidades são dos primeiros componentes a serem queimados, esses minerais serão facilmente transportados para a zona de combustão. O ambiente que envolve o fogo também contribui para a propagação das ondas de rádio. Gradientes elevados de temperatura e mudanças nos gases que compõem a atmosfera afetam dramaticamente o índice de refração. As condições subrefrativas provocam o afastamento das ondas de rádio do solo, reduzindo a potência do sinal recebido. Para um coberto vegetal de eucalipto, a concentração dos metais alcalinos (potássio, magnésio e cálcio) pode levar a que temperatura atinja valores entre 1300 K e 1600 K na zona de combustão e a concentração de elétrons pode atingir valores a ordem de 10^{15} m^{-3} a 10^{16} m^{-3} [5].

2.11 Conclusões interinas

Neste capítulo foram abordados os fenômenos que afetam as ondas de rádio quando propagam através das lavaredas. O fogo é um meio turbulento, em constante evolução, o que provoca mudanças no índice de refração, no ângulo de difração e na dispersão, tendo como consequência a diminuição da potência do sinal recebido.

A absorção de energia eletromagnética pelos elétrons presentes nas chamas pode resultar em perdas de sinal consideráveis nas ondas de rádio que se propagam através das mesmas.

Quando uma chama é ligeiramente ionizada e iluminada por ondas eletromagnéticas, os elétrons são acelerados pelo campo elétrico das ondas incidentes. Gases ligeiramente ionizados à pressão atmosférica podem efetivamente absorver ondas eletromagnéticas. A taxa de absorção está diretamente relacionada com a expressão N_e/φ_{eff} , em que N_e é a densidade de elétrons e φ_{eff} é a frequência de colisão entre os elétrons livres e as partículas neutras do plasma [10].

A densidade de elétrons, conjuntamente com a velocidade de colisão dos elétrons com as partículas neutras do plasma, são os fatores que mais contribuem para a atenuação do sinal. Foram também apresentados neste capítulo os conceitos teóricos que permitem calcular a constante complexa de propagação, a atenuação e a constante de fase.

O conteúdo alcalino das plantas pode levar a temperatura bastante elevadas e à formação de uma grande quantidade de elétrons na zona de combustão.

3. Revisão da Literatura

3.1 Introdução

Neste capítulo descreve-se os modelos numéricos e empíricos implementados por Jonathan Alexander Boan [5] e Kgakgamatso Marvel Mphale [16]. Primeiramente é descrita a metodologia utilizada por Boan para o modelo de combustão de plasma induzido, utilizado para estimar a densidade de elétrons e frequência de colisão. Apresenta-se a expressão para calcular a constante complexa de propagação, a atenuação e o desvio de fase. Seguidamente, é descrito o modelo numérico utilizado por Mphale para determinar a atenuação e o desvio de fase em incêndios florestais. De seguida são apresentados alguns exemplos de medições através de casos práticos experimentais, no terreno, de incêndios controlados, e medidos os valores da temperatura, atenuação e desvio de fase de sinais rádio. Por último, são apresentadas as conclusões finais do capítulo.

3.2 Modelo de radiopropagação em ambientes onde existe a presença de fogo

No trabalho apresentado em [5], Boan, elaborou um modelo de radiopropagação utilizando o *Fire Dynamics Simulator* [7] para simular ambientes com presença de fogo. Nos subcapítulos seguintes estão descritos os passos que efetuou para determinar os valores da densidade de elétrons, da frequência de colisão e calcular a partir daí a atenuação de sinais rádio.

3.2.1 Fire Dynamics Simulator

O *Fire Dynamics Simulator* (FDS) foi desenvolvido pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST), tendo sido utilizado por Boan [5] para simular as condições de fogo em vegetação. O FDS permite resolver situações que envolvem a termodinâmica inerente a problemas relacionados com o fogo, incluindo a modelação da combustão. Este software pode ser descarregado a partir do site do NIST [7]. O FDS modeliza a fase sólida de pirólise e a fase de combustão dos gases em passos finitos no tempo. Boan utilizou o FDS para construir uma imagem espacial do fogo e gases envolvidos de forma a construir um modelo

de propagação. O FDS usa uma atmosfera composta por nitrogénio (N_2), oxigénio (O_2), água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2) e monóxido de carbono (CO). Todos estes gases contribuem para o valor do índice de refração e para a frequência de colisão do modelo de plasma.

O FDS permite testar vários cenários e extrair os parâmetros necessários a utilizar posteriormente como entrada no modelo de propagação de forma a efetuar o cálculo da densidade de eletrões, frequência de colisão e atenuação. Cada cenário é construído através de um ficheiro “.fds” onde são definidos os parâmetros de entrada relativamente aos gases da combustão, à vegetação, condições do fogo, e os parâmetros de saída que se pretendem calcular, bem como a posição no cenário onde são obtidos. Na Figura 3.1, está representado o diagrama de dados que ilustra o modo como Boan usou o FDS para construir um modelo de plasma. No digrama da Figura 3.1 os blocos retangulares correspondem aos modelos utilizados, os blocos triangulares correspondem aos parâmetros de saída dos modelos, e os círculos correspondem aos parâmetros de entrada para os modelos. O FDS recebe como parâmetros de entrada a configuração do cenário do incêndio e as características do combustível e permite extrair os valores da temperatura, dos gases e do combustível utilizados pelos modelos de ionização, frequência de colisão e índice de refração para se obterem o perfil de plasma e do índice de refração.

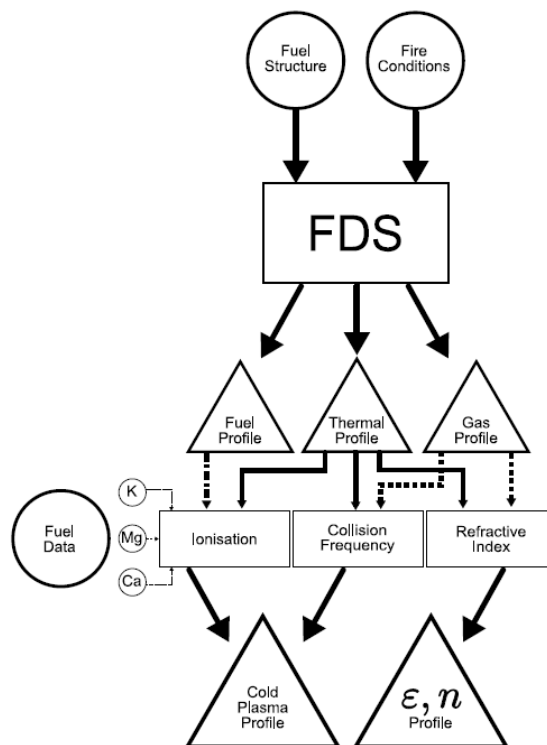


Figura 3.1: Esquema do modelo utilizado para obtenção de resultados do FDS [5].

3.2.2 Modelo do índice de refração numa atmosfera de fogo

Boan [5] verificou que existem vários modelos para representar o índice refrativo na atmosfera terrestre. O índice de refração resulta do somatório da contribuição dos vários gases existentes. No entanto, em aplicações onde existam atmosferas de fogo, os modelos de atmosfera existentes têm algumas limitações. Num ambiente sem fogo, a componente de ar seco assume uma pressão parcial constante para o oxigénio de aproximadamente (20%) e nitrogénio (70%-80%). É também assumido que a concentração de dióxido de carbono é constante. Num ambiente onde exista a presença de fogo, pode-se verificar que na Tabela 3.1, que os valores dos gases não permanecem constantes ao longo de uma simulação.

Tabela 3.1: Parâmetros e os seus extremos [5].

Variable	Min	Max	Unit
Temperature	288	1008	K
Oxygen O ₂	0.09	0.19	mol/mol
Nitrogen N ₂	0.70	0.80	mol/mol
Carbon Dioxide CO ₂	0.00	0.09	mol/mol
Water H ₂ O	0.00	0.09	mol/mol
Fuel	0.00	0.06	mol/mol
Density	0.39	1.24	Kg/m ⁻³

Para o cálculo do índice de refração, através do modelo Lorentz-Lorenz, considera-se a contribuição individual de cada gás separadamente. Somando a contribuição individual de cada gás através da relação de Lorentz-Lorenz, consegue-se obter o índice de refração global. Considerando-se cada gás separadamente, o índice de refração pode ser descrito pela relação de Lorentz-Lorenz mostrada na equação (3.1).

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} = \frac{4\pi N_A}{3 M \alpha \rho}, \quad (3.1)$$

onde N_A é o número de Avogadro, M é a massa molar do gás considerado, ρ é a densidade do gás e α é a refratividade molar do gás, sendo um valor dependente do material. Num ambiente onde existam múltiplos gases, o índice de refração calcula-se pela soma de cada gás através da expressão (3.2).

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} = \sum_i R_i \rho_i, \quad (3.2)$$

onde $R_i \rho_i = \frac{4\pi}{3} N_A / M_i \alpha_i$. Uma vez que R_i é uma função de constantes moleculares e assumindo que α_i não varia com a frequência nem com as condições atmosféricas, não é necessário encontrar R_i explicitamente, mas pode ser usado o procedimento seguinte. Ciddor [20] resolve este problema para determinada refração específica, conhecendo-se uma refração de referência sob condições controladas, e em seguida, contabiliza a variação na densidade real de cada gás.

$$L = \sum_i \left(\frac{\rho_i}{\rho_{is}} \right) \frac{n_{is}^2 - 1}{n_{is}^2 + 2}, \quad (3.3)$$

onde ρ_i é a densidade de cada gás 'i', ρ_{is} é a densidade para um padrão de referência conhecido de índice de refração, e n_{is} é o índice de refração de referência para um gás com um padrão individual conhecido.

Para uma atmosfera composta por múltiplos gases, utiliza-se a equação (3.4).

$$n_{LL} = \sqrt{\frac{1 + 2L}{1 - L}} \quad (3.4)$$

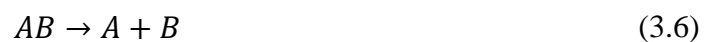
Para o cálculo da densidade de cada gás, pode ser utilizada a lei dos gases ideais.

$$PV = nRT Z, \quad (3.5)$$

onde R é a constante de gás ideal $8.314472 \text{ m}^3 \text{ Pa K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$, T é a temperatura em Kelvin e Z a compressibilidade do gás.

3.2.3 Ionização térmica

Se um metal alcalino estiver ligado a outro elemento, são necessários dois passos para um elétron ser ionizado. Num primeiro passo ocorre o processo de dissociação demonstrado na expressão (3.6), e no passo seguinte ocorre o processo de ionização demonstrado na equação (3.8) [5].



Em [5] é referido que o processo de dissociação pode ser modelado usando a relação de *Guldber-Waage*, que se mostra na equação (3.7).

$$\frac{N_A N_B}{N_{AB}} = \frac{P_A P_B}{P_{AB}} \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{3/2} \left(\frac{m_A m_B}{m_{AB}} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{-E_d}{kT}\right), \quad (3.7)$$

onde N_X é a densidade do produto X, P_X é a função de partição interna de elementos X, m_X é a massa do elemento X, k é a constante de Boltzmann, h , é a constante de Planck, T , é a temperatura absoluta em K, e E_d é a energia de dissociação. Boan [5] menciona que os valores típicos de energia de dissociação requerida para os sais de potássio variam de 0.75eV a 4.51eV [21].

Heron, M.L e Mphale, K. [16] estimam que todos os compostos irão dissociar-se sem que seja necessária uma grande quantidade de energia e assumem uma dissociação por completo. Uma vez que o elemento alcalino esteja na sua forma elementar poderá sofrer ionização. Os cálculos para que a ionização ocorra envolvem o processo mostrado na expressão (3.8), os quais podem ser modelados utilizando a equação de Saha mostrada em (3.9).



$$\frac{n_e n_i}{n_0} = 2 \frac{g_i}{g_0} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{-eV_i}{kT}\right), \quad (3.9)$$

onde n_e, n_i e n_0 são densidades por centímetro cúbico, g_i e g_0 são pesos estatísticos, h a constante de Plank, e os índices e, i e 0 correspondem a eletrões, iões e átomos neutros, respetivamente. A carga do eletrão é representada por e , V_i é o potencial de ionização e k representa a constante de *Boltzmann*. Os valores típicos de potencial de ionização dos elementos de interesse são mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Energia de ionização dos sais alcalinos de interesse.

Elemento	Energia de ionização
Potássio (K)	4.34eV
Cálcio (Ca)	6.11eV
Magnésio (Mg)	7.64eV

Para calcular a população de elétrons a partir da equação de *Saha*, Frost [22] sugere que a expressão (3.10) é uma boa aproximação.

$$n_e = \sqrt{K_1 N_a} \left[\sqrt{1 + \frac{K_1}{4N_a}} - \sqrt{\frac{K_1}{4N_a}} \right], \quad (3.10)$$

onde N_a engloba o número total de átomos presentes, sendo eles neutros, ionizados, ou partículas de metais alcalinos e K_1 representa o membro direito da equação de *Saha* (3.9).

A função de partição interna (g) é calculada utilizando a equação (3.11).

$$g = \sum_j \omega_j \exp \frac{-E_j}{kT}, \quad (3.11)$$

onde ω_j é o coeficiente de ponderação para cada estado j e E_j é o nível de energia para o estado, os dados para o cálculo de cada passo da equação (3.11), podem ser encontrados nas tabelas termoquímicas [23].

Frost [22] refere, no entanto, que para metais alcalinos, $g_i/g_0 = 1/2$. Resolvendo a equação (3.9) para n_e , notando-se que a neutralidade da carga espacial requer $n_e = n_i$ para um certo nível de aproximação, temos:

$$N_a = n_e + n_0 = 7.335 \times \frac{10^{21} \delta}{T} \text{ cm}^{-3}, \quad (3.12)$$

onde δ é a pressão “em atmosferas” de um metal alcalino adicionado. Geralmente $\delta \ll 0$.

3.2.4 Velocidade de colisão

A frequência de colisão média depende da seção transversal do momento de transferência e esta varia com a velocidade dos elétrons. Também depende da composição química, da função estatística de distribuição e da temperatura. Num cenário de incêndio [15] é expectável que a densidade de elétrons seja muito menor que a densidade de outras partículas (definição de meio ligeiramente ionizado). Itikawa [17] calculou um conjunto de frequências de colisão que podem ser utilizadas em várias condições de transporte de gases. Para essas frequências de colisão “efetivas”, Itikawa utilizou a seção de transferência de momento transversal a partir de várias fontes. Itikawa [17] utilizou a relação (3.13) para calcular a frequência de colisão efetiva média para um campo elétrico alternado.

$$\langle V_{eff} \rangle = \frac{8}{3\pi^{1/2}} n \left(\frac{m_e}{2kT_e} \right)^{5/2} \int_0^\infty u^5 Q^{(m)}(u) \exp\left(-\frac{m_e u^2}{2kT_e}\right) du \quad (3.13)$$

onde n é a densidade de partículas neutras, k , é a constante de Boltzmann, T_e , é a temperatura a que estão sujeitos os elétrons, m_e é a massa do elétron, u é a velocidade dos elétrons, e $Q^{(m)}$ é a seção transversal de transferência do momento.

Heron e Mphale [15] utilizaram os cálculos de Itikawa [17], a diferentes temperaturas, para interpolar as frequências de colisão efetivas a serem utilizadas para o cálculo da constante de propagação, atenuação e desvio de fase. Os valores para os principais gases que constituem a atmosfera calculados por Itikawa, são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Frequência de colisão efetiva $\langle V_{eff} \rangle / N \times 10^{-8} \text{sec}^{-1} \text{cm}^3$ para campo elétrico alternado. [17]

T_e (K)	N_2	O_2	CO	H_2O	CO_2
100	0.255	0.123	0.532	158	10.1
200	0.491	0.237	0.712	107	10.1
300	0.723	0.335	0.950	84.9	10.1
400	0.948	0.425	1.21	71.5	9.96,
500	1.17	0.512	1.48	62.3	9.76
1000	2.11	0.956	2.79	39.3	8.04
1500	2.86	1.41	3.99	29.3	6.45
2000	3.49	1.87	5.18	23.7	5.34
2500	4.08	2.32	6.41	20.1	4.61
3000	4.72	2.72	7.66	17.6	4.14

Boan [5] refere que Vidmar [24] demonstra que na atmosfera terrestre, a frequência de colisão pode ser calculada utilizando os dados de Itikawa. Em [5] é também mencionado que os gases com maior contributo para o cálculo da frequência de colisão são a água (H_2O) e o dióxido de carbono (CO_2), e que para chamas de oxigénio puro, as condições atmosféricas são formadas por 50% de oxigénio (O_2), 25% água (H_2O) e 25% de dióxido de carbono (CO_2).

Heron e Mphale [15] utilizaram os dados de Itikawa com uma interpolação para a temperatura, e aplicaram pesos em função do número de partículas de cada gás constituinte da atmosfera.

Dos dados retirados da Tabela 3.3, N representa a densidade do gas em cm^3 e T_e é a temperatura dos elétrons em Kelvin (K).

No modelo numérico implementado por Boan e considerando uma frequência de colisão de $1 \times 10^{11} \text{s}^{-1}$, foram obtidos os resultados presentes na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Resultados Boan [5] - Planta Eucalipto (0.9%K, 0.82%Ca, 0.28%Mg) – Pirólise rápida (II K = 100% II Ca = 20% II Mg = 40%)

Temperatura	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700
Ne x 10 ¹⁵ m ⁻³	0.13	0.95	5.0	21.5	75.1	225	595
Atenuação (dB m ⁻¹)	0.06	0.4	2.3	9.8	33.4	84	159

3.3 Modelo de propagação de ondas de rádio em incêndios florestais

Mphale [16] conduziu vários estudos sobre o fenómeno de propagação de ondas em incêndios florestais. Estes incidiram na previsão e medição da densidade de eletrões, frequência de colisão em meios ligeiramente ionizados. Nos cenários experimentais mediu a atenuação e a partir daí calculou os valores da densidade de eletrões e frequência de colisão.

3.3.1 Determinação da densidade de eletrões

Para determinar a densidade de eletrões Mphale [16] utilizou a aproximação de Frost (3.10) e a equação de Saha (3.9), sendo que para calcular o número de partículas ionizadas de potássio em m⁻³ foi utilizada a expressão (3.14).

$$N_p = \frac{7.335 \times 10^{21} \tau}{T}, \quad (3.14)$$

onde τ corresponde à densidade numérica dos átomos de potássio presentes na zona de combustão, calculada a partir da expressão (3.15).

$$\tau = \frac{P_{mass} \times A_v}{0.03903}, \quad (3.15)$$

sendo P_{mass} a massa de potássio colocada na zona de combustão por unidade de tempo e A_v o número de Avogadro. P_{mass} pode ser obtido a partir de

$$P_{mass} = \frac{K_p \times V_f}{V_v} (kg), \quad (3.16)$$

onde K_p refere-se à percentagem de potássio na espécie, V_f representa o fluxo volátil do metal alcalino e V_v a velocidade vertical.

3.3.2 Estimativa da frequência de colisão entre eletrões e partículas neutras

Em [16] calculou-se a frequência de colisão a partir dos valores obtidos das tabelas de Itikawa, contudo também é apresentada uma alternativa em [25]. A frequência de colisão do momento de transferência (ν) de plumas de fogo pode ser estimada a partir de

$$\nu = P \cdot d^2 \cdot \left\{ \frac{\pi}{2 \cdot k \cdot Me \cdot T} \right\}^{1/2}, \quad (3.17)$$

onde P e d são a pressão e diâmetro da molécula de ar, respetivamente. O diâmetro da molécula de ar varia entre 0.2-0.3nm. Usando a expressão (3.17), para um fogo que se encontra à pressão atmosférica, a frequência de colisão é estimada variar entre $4.26 \times 10^{10} \text{s}^{-1}$ e $9.59 \times 10^{10} \text{s}^{-1}$.

Em [10] é também apresentada outra expressão (3.18) para o cálculo da frequência de colisão,

$$\nu = 7.33 \times 10^3 N_m a^2 \sqrt{T}, \quad (3.18)$$

onde N_m representa a densidade numérica das moléculas do ar, a consiste no raio de uma molécula do ar e T a temperatura.

3.3.3 Cálculo da atenuação

Em [16] calculou-se a atenuação a partir das formulações da teoria da física clássica, a seguir apresentada, tendo sido adaptada a situações de rádio propagação num meio ionizado. Este método tem por objetivo demonstrar como podem ser calculados o número de onda e a atenuação da mesma quando se propaga num meio onde existam cortinas de fogo.

A rádio propagação num meio onde existam plasmas ligeiramente ionizados é uma situação que pode ser descrita em termos do uso das equações de Maxwell, e que leva à equação:

$$\nabla^2 E = \sigma \mu \dot{E} + \epsilon \mu \ddot{E}, \quad (3.19)$$

onde ε é a permissividade elétrica, μ é a permeabilidade magnética, e σ a condutividade. Heron, M.L e Mphale, K. [15] assumiram uma equação simplificada, adotando uma forma de onda de frequência ω , que se propaga na direção x , com um número de onda β e uma constante de atenuação α , de acordo com

$$E_y(x, t) = E_0 e^{-\alpha x} e^{i(\beta x - \omega t)} \quad (3.20)$$

Para a condutividade [15] foram investigados os mecanismos do movimento individual dos elétrons com um momento p em resposta ao campo elétrico, que pode ser obtido através de

$$p = -eE = m\ddot{y} + m\dot{y}v, \quad (3.21)$$

onde v é a frequência de colisão entre os elétrons e as partículas neutras do plasma.

O uso da expressão $E = J/\sigma$, onde J é a densidade de corrente dada por $J = -Ne\dot{y}$. Em [15] é referido que a condutividade pode ser mostrada em [26]:

$$\sigma = \frac{Ne^2}{m(v + i\omega)}, \quad (3.22)$$

onde N é densidade de elétrons livres, e é a carga do elétron, m é a massa do elétron, v é frequência de colisão entre elétrons e as partículas neutras, e ω é a frequência de propagação. A frequência de colisão, entre os elétrons e as partículas neutras v , pode ser entendida em termos de cinética de um plasma ligeiramente ionizado. Heron, M.L e Mphale, K., [15] procederam do seguinte modo para estimar o coeficiente de atenuação, α .

A equação (3.23) pode ser reescrita como:

$$E_y(x, t) = E_0 e^{i(\gamma x - \omega t)} \quad (3.23)$$

onde $\gamma = i\alpha + \beta$ é a constante de propagação complexa. Igualando a equação (3.23) com equação (3.19) resulta

$$\gamma^2 = i\sigma\mu\omega + \omega^2\varepsilon\mu \quad (3.24)$$

da qual

$$\beta + i\alpha = [\omega^4\varepsilon^2\mu^2 + \omega^4\sigma^2\mu^2]^{1/4}(\cos \phi + i \sin \phi) \quad (3.25)$$

e o desvio de fase é igual a:

$$\varnothing = 0.5 \tan^{-1} \left(\frac{|\sigma|}{\omega \varepsilon} \right) \quad (3.26)$$

O desvio de fase \varnothing é medido em radianos por metro.

Portanto, para a propagação da onda, o número da onda é dado pela expressão:

$$\beta = [\omega^4 \varepsilon^2 \mu^2 + \omega^4 \sigma^2 \mu^2]^{1/4} \left(1 + \frac{\sigma^2}{4\omega^4 \varepsilon^2} \right)^{-1/2}, \quad (3.27)$$

e o coeficiente de atenuação é dado por:

$$\alpha = [\omega^4 \varepsilon^2 \mu^2 + \omega^2 \sigma^2 \mu^2]^{1/4} \frac{|\sigma|}{\omega \varepsilon} \left(1 + \frac{\sigma^2}{4\omega^4 \varepsilon^2} \right)^{-1/2} \quad (3.28)$$

Nas equações (3.27) e (3.28), Heron, M.L e Mphale, K. [15] utilizaram as seguintes equações:

$$\tan \varnothing = \frac{\omega \varepsilon}{|\sigma|} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\sigma^2}{\omega^2 \varepsilon^2} \right)^{1/2} \right\} \quad (3.29)$$

$$= \frac{|\sigma|}{2\omega \varepsilon} \text{ para ângulos pequenos, então:}$$

$$\cos \varnothing = \left(1 + \frac{\sigma^2}{4\omega^2 \varepsilon^2} \right)^{-1/2}, \quad (3.30)$$

e

$$\sin \varnothing = \frac{|\sigma|}{2\omega \varepsilon} \left(1 + \frac{\sigma^2}{4\omega^2 \varepsilon^2} \right)^{-1/2} \quad (3.31)$$

Num meio relativamente pouco ionizado a atenuação do sinal também pode ser matematicamente extraída a partir da constante de propagação para fogos em vegetação [16]. A constante de propagação (γ) de um meio dielétrico tal como chamas ionizadas é dada pela relação seguinte [27]:

$$\gamma = \alpha_f + i\beta_f, \quad (3.32)$$

onde α_f e β_f são a atenuação e o coeficiente de fase.

Uma aproximação da atenuação para uma faixa de microondas é dada por:

$$\alpha_f = \frac{\varphi_{eff}}{2c} \left[\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \varphi_{eff}^2} \right], \quad (3.33)$$

onde φ_{eff} é a frequência de colisão entre elétrons e partículas neutras. A frequência de colisão do plasma é dada por:

$$\omega_p = \left(\frac{Nq_e^2}{M_e \epsilon_0} \right)^{1/2}, \quad (3.34)$$

onde ϵ_0 é a permissividade do espaço livre, N é a densidade de elétrons livres, q_e e M_e são respectivamente a carga e a massa do elétron.

O coeficiente de atenuação, α , tem uma forte dependência da condutividade, σ , que por sua vez é controlada pela frequência de colisão, ν , entre os elétrons e as partículas neutras (demonstrado na equação (3.22)).

O desvio de fase para uma faixa de microondas é dado pela expressão (3.35).

$$\beta_f = \frac{\omega}{c} \left[1 + \frac{\omega_p^4}{8(\omega^2 + \varphi_{eff}^2)^2} \frac{\varphi_{eff}^2}{\omega^2} \right] \quad (3.35)$$

No modelo numérico definido em [16], considerando um meio ligeiramente ionizado, como por exemplo uma fogueira que utiliza erva como combustível, a densidade de elétrons pode adquirir um valor entre 10^{14} m^{-3} e 10^{17} m^{-3} . Atingindo temperaturas de 1200 K, com a densidade de elétrons na ordem de 10^{17} m^{-3} e uma velocidade de colisão de 10^{12} s^{-1} , a atenuação calculada foi de 11.43 dB/m.

3.4 Estudos experimentais

3.4.1 Incêndios experimentais em pequena escala

Boan [5] realizou estudos experimentais com incêndios de escala pequena, tipicamente entre 1 e 10 m de altura. O seu objetivo seria estudar a propagação de ondas eletromagnéticas em

incêndios tendo em vista o uso de frequências abaixo de 1 GHz. Nesta gama de frequências estão englobados os sistemas de serviços de emergência. Foi prestado um principal interesse para as bandas de frequência VHF (100-180 MHz), banda de frequência UHF (400-500 MHz) e para as bandas de frequências de comunicações móveis (800-1000 MHz). Foi utilizado equipamento de banda larga consistindo num transmissor e recetor capazes de varrer uma larga gama de frequências. O analisador espectral utilizado foi o HAMEG HM5014, que vem com um gerador de sinal incorporado. Foi utilizado um amplificador de potência para aumentar o sinal à saída do gerador, e deste modo aumentar a potência na antena. Foram utilizadas antenas discone para o transmissor e recetor e que operam em frequências entre 100MHz e 480MHz. A configuração do sistema está ilustrada na Figura 3.2.

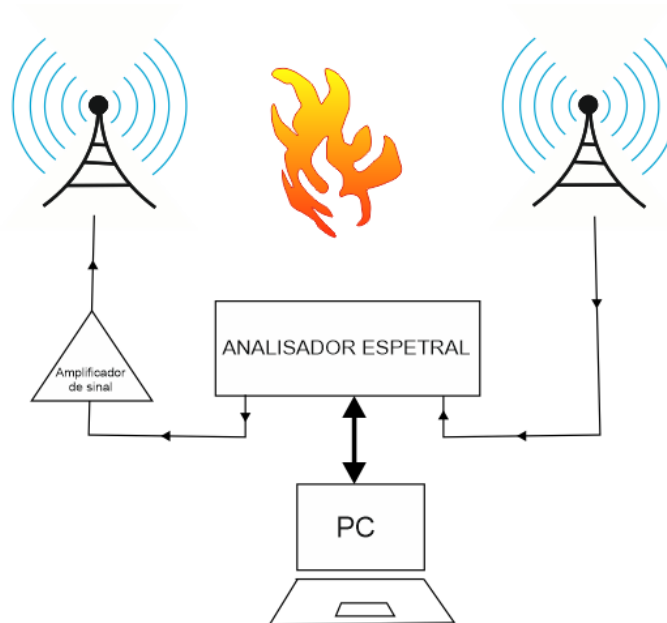


Figura 3.2: Sistema de medição de incêndios de pequena escala.

Após a propagação do sinal pelo fogo, o sinal recebido na antena recetora é analisado no analisador espectral e os resultados processados pelo Matlab instalado no computador, tendo sido obtida uma amostra a cada 7-12 segundos na frequência de 100 MHz a 1 GHz com uma resolução de 0.5 MHz. Ao mesmo tempo foram capturadas imagens do desenrolar do fogo com recurso a uma câmara fotográfica a cada 1-2 segundos. Essas ajudaram a identificar os eventos físicos que possam estar correlacionados com os eventos da propagação. Foi utilizada uma interface gráfica (GUI) no Matlab para mostrar as imagens e os valores de propagação obtidos.

Foram realizados 3 fogos denominados de A, B e C, e analisadas três bandas de frequência. A banda 1 representa uma banda de comunicações típica VHF, abrangendo frequências de 160 MHz a 180 MHz, a banda 2 representa a banda de comunicações UHF e abrange frequências que vão de 400 MHz a 450 MHz e a banda 3 abrange as frequências utilizadas em comunicações móveis que vão dos 800 MHz a 950 MHz.

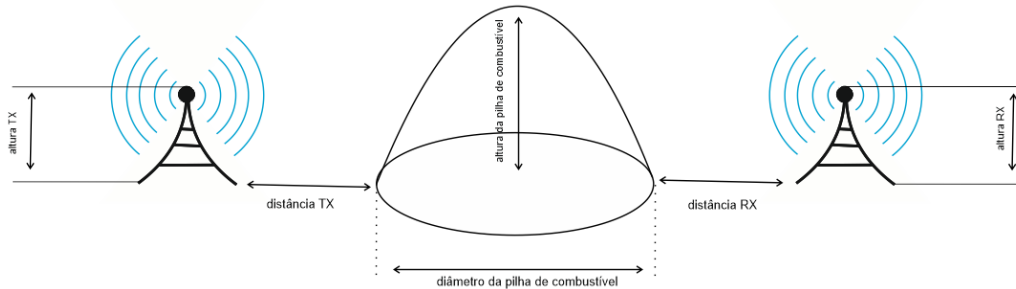


Figura 3.3: Dimensões do fogo. Adaptado de [5].

As dimensões dos fogos podem ser visualizadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Dimensões dos fogos A, B e C.

	Altura TX/RX	Distância TX/RX	Altura da Pilha	Diâmetro da Pilha	Aditivos
Fogo A	1.6 m	1.5 m	1.5 m	3.0 m	
Fogo B	1.8 m	5.0 m	3.6 m	7.5 m	
Fogo C	1.8 m	5.0 m	2.8 m	7.0 m	K ₂ SO ₄

O fogo A foi realizado para uma temperatura ambiente de 16 °C, com a presença mínima de vento. A pilha de combustível era essencialmente constituída por folhas e ramos de eucalipto da área circundante à zona de combustão. Uma acendalha foi utilizada para ajudar na ignição da pilha de combustível.

O fogo B foi o maior de todos, a pilha de combustível era composta por ramos e folhas de eucalipto na área circundante. O solo à volta da pilha de combustível foi raspado e preparado adequadamente. As regiões envolvendo o equipamento foram molhadas com água para ajudar a protegê-lo. Apesar de não ter sido utilizado um acelerador de combustão, foi utilizado uma tocha em chama para ignição da pilha de combustível.

O fogo C foi realizado nas mesmas condições que o fogo B. A pilha de combustível consistiu em ramos de eucaliptos e folhas, embora após a ignição tenha sido observado que o fogo continha um número mais elevado de troncos grossos na base da pilha de combustível. Foi adicionado um aditivo de 2.5 kg de K₂SO₄ sob a forma de pequenos *pellets* de forma a

aumentar a concentração de potássio. Desta forma aumenta-se a concentração de elétrons e a frequência do plasma nas chamas. Como tal, providenciar-se-ia um meio para investigar o efeito da ionização na propagação. Devido às similaridades com o fogo B, o fogo C oferece um meio de observação direta dos efeitos no aumento da ionização sem necessidade de ajustar outros parâmetros.

Os resultados experimentais levados a cabo por Boan permitem constatar que todos os cenários sofrem atenuação causada pelo fogo. Para as bandas 1 e 2, registou-se uma queda acentuada na potência do sinal recebido após a ignição, que continua até atingir o ponto máximo da atenuação.

Tabela 3.6: Atenuação máxima medida [5].

	Fogo A	Fogo B	Fogo C
Banda 1	3.30 dB (180 MHz)	3.70 dB (180 MHz)	6.00 dB (180 MHz)
Banda 2	12.5 dB (418 MHz)	14.4 dB (446 MHz)	15.4 dB (408 MHz)
Banda 3	0.70 dB (947 MHz)	4.70 dB (921 MHz)	7.20 dB (874 MHz)
Pior cenário	17.7 dB (577 MHz)	17.0 dB (497 MHz)	21.4 dB (309 MHz)

3.4.2 Medições de propagação em microondas num incêndio em vegetação rasteira

Kgakamastso Mphale [16] efetuou um conjunto de medições num ambiente de fogo controlado. O combustível utilizado consistiu em vegetação rasteira, designadamente erva e as temperaturas registadas variaram em torno dos 900° C. Foram medidas densidades de elétrons na ordem de 10^{15} m^{-3} . A omnipresença de potássio na vegetação aparenta ser a maior causa da ionização quer na erva, quer em incêndios florestais [10]. Neste cenário Mphale pretendeu analisar a atenuação e a mudança de fase num fogo moderado e controlado. Essa análise foi efetuada com recurso a um interferómetro de ondas de rádio, tendo sido realizado na Universidade de James Cook. Foram colocados vários termopares à distância de 25 cm, 50 cm, 75 cm e 100 cm do solo. A temperatura máxima observada foi de 899 K a 75 cm do solo.

A atenuação observada para a frequência de 30 MHz foi de 0.03 dB e para a frequência de 151.3 MHz foi de 0.05 dB. A partir dos resultados obtidos, Mphale constatou que a mudança de fase a 30 MHz foi significativa, tendo o máximo de 3.08°. Com o valor da mudança de fase obtida, foi estimado que a densidade de elétrons nas chamas seria de 5.29

$\times 10^{15} \text{ m}^{-3}$. A velocidade de colisão assumida para temperatura até 900 K, foi interpolada a partir das tabelas de Itikawa, tendo considerado o valor de $1 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$.

3.4.3 Medições de propagação em microondas num incêndio num terreno agrícola

As medições efetuadas foram efetuadas num terreno agrícola, onde o combustível consistia em canas de açúcar. O conteúdo de potássio em cana de açúcar é de 2.2%. A distância entre a antena emissora e recetora foi de 582 m.

O processo de medições foi levado a cabo por Mphale através da utilização de um interferómetro de ondas de rádio. No entanto, uma vez que o cenário de simulação era muito extenso não foi possível medir o desvio de fase, apenas os valores da atenuação. Foram utilizados termopares para medir os diferentes valores de temperatura. As temperaturas máximas foram observadas a 6 m acima do nível do solo, e foram de 904 K. A atenuação total foi de 0.43 dB, sendo que a frente de fogo tinha uma extensão de 13.4 m, o que perfaz uma atenuação de 0.03 dB/m, para uma frequência de 151.3 MHz.

3.4.4 Atenuação em micro-ondas em chamas que utilizam restolho florestal como combustível

Utilizando o queimador cilíndrico representado na Figura 3.4, Mphale [16], realizou um conjunto de experimentos de queima de material constituído por restolho de floresta. Utilizou um analisador espectral programado para fazer o varrimento de frequência de 50 MHz a 40 GHz, medindo os parâmetros S ao longo do tempo em que o incêndio se mantinha ativo. Foram realizadas pequenas queimadas cujo material consistia em caruma, erva e folhas de eucalipto. Foram utilizados termopares para efetuar a leitura dos valores da temperatura, sendo que a caruma atingiu a temperatura máxima de 1069 K, o incêndio que utilizou erva como combustível, atingiu uma temperatura máxima de 931 K, e as folhas de eucalipto atingiram uma temperatura máxima de 1035 K.

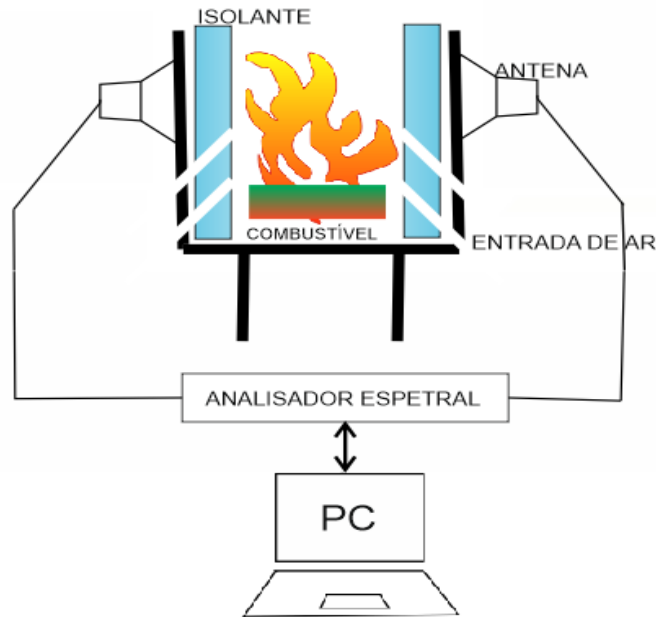


Figura 3.4: Leitura dos parâmetros S utilizando um queimador.

A densidade de elétrons nas chamas cujo combustível é restolho de florestas, varia entre 0.32 a $3.21 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$. A velocidade de colisão varia entre $1.1 - 4.0 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$. A atenuação para a banda X varia entre $1.0 - 4.5 \text{ dB/m}$. O desvio de fase varia entre $29.3 - 6$ graus/m.

Utilizando o mesmo procedimento enunciado na Figura 3.4, Mphale K., Jacob M. e Heron M. [10] realizaram fogos controlados cujo combustível consistia em caruma de pinheiro. A temperatura máxima atingida foi de 1080 K .

Com base na atenuação obtida entre os valores de 1.6 e 5.8 dB , numa distância de 50 cm (diâmetro do queimador), na frequência de $8-15 \text{ GHz}$, foram calculadas a densidade de elétrons entre os valores $0.51 - 1.35 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ e a velocidade de colisão entre os valores $3.43-5.97 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$.

3.5 Conclusões interinas

Neste capítulo foram apresentados os modelos numéricos e os ensaios experimentais utilizados por Boan e Mphale para o cálculo da atenuação das ondas de rádio. Boan utilizou o simulador FDS para modelação da combustão. Com base nos parâmetros retirados do FDS, implementou um modelo para cálculo da densidade de elétrons, da frequência de colisão e do índice de refração. A densidade de elétrons foi calculada a partir da equação de Saha (3.9). A velocidade de colisão foi calculada a partir da concentração dos gases obtidos do

FDS e interpolada a partir das tabelas de Itikawa [17]. No modelo numérico em que se obteve a densidade de eletrões esta varia entre $1.3 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ e $5.95 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ para temperaturas compreendidas entre 1100 K e 1700 K. Ao considerar uma frequência de colisão correspondente a $1 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ para todos os valores da temperatura, obteve um valor de atenuação que varia entre 0.06 dB/m e 159 dB/m.

A nível experimental Boan realizou incêndios em escala pequena e com recurso a um analisador espectral mediu os valores da atenuação, tendo esta variado entre o valor mínimo de 0.70 dB e valor máximo de 21.4 dB.

Mphale concebeu um modelo numérico para o estudo da propagação de ondas de rádio em incêndios florestais. Para prever a densidade de eletrões utilizou a equação de *Saha* e a aproximação de *Frost*. Para meios ligeiramente ionizados a densidade de eletrões atinge valores entre 10^{14} m^{-3} e 10^{17} m^{-3} . Para um valor de temperatura de 1200 K e com uma densidade de eletrões na ordem de 10^{17} m^{-3} e a velocidade de colisão com um valor próximo de $1 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ a atenuação é de cerca 11.43 dB/m. A nível experimental realizou um conjunto de medições em vários cenários, nomeadamente em vegetação rasteira, em terrenos agrícolas e utilizando um queimador e um analisador espectral em chamas que utilizam restolho florestal como combustível. A atenuação máxima obtida foi de 1 a 4.5 dB/m. Isto deve-se ao facto de as temperaturas atingidas terem um máximo de apenas 1069 K.

4. Aplicação do modelo

4.1 Introdução

Neste capítulo descreve-se e fundamenta-se a metodologia utilizada na investigação, estando organizado em cinco subcapítulos. No subcapítulo, 4.2, apresentam-se as configurações realizadas com a ferramenta FDS para a simulação de vários cenários de incêndio e extração dos parâmetros utilizados para o cálculo da densidade de elétrons e frequência de colisão. Seguidamente, em 4.3, calcula-se a densidade de elétrons a partir da densidade do combustível, aplica-se a equação de *Saha* para determinar a quantidade de elétrons presentes na zona de combustão. Essa densidade depende do metal alcalino presente na vegetação: potássio, cálcio e magnésio. Em 4.4, a partir dos valores obtidos para a temperatura, densidades de vapor de água e dióxido de carbono é interpolada a frequência de colisão a partir da tabela de Itikawa. No subcapítulo 4.5, são referidas as expressões utilizadas para o cálculo da atenuação e do desvio de fase. Em 4.6, apresentam-se os passos necessários para a importação, processamento e apresentação dos dados. Por fim, são apresentadas as conclusões interinas do capítulo 4.

4.2 FDS

No FDS definiram-se as propriedades dos materiais que são utilizados como combustível, as propriedades e localização das superfícies que são colocadas no cenário, as configurações do incêndio, nomeadamente a localização, a dimensão, a taxa de libertação de calor por unidade de área (HRRPUA), as condições de fronteira, a velocidade do vento e as características da vegetação. Definiram-se ainda, os parâmetros de saída de interesse, nomeadamente a temperatura, as densidades de vapor de água, dióxido de carbono, oxigénio, nitrogénio e combustível. Todas esses parâmetros são definidos no ficheiro de configuração de parâmetros de entrada e saída utilizado pelo FDS.

Os parâmetros podem ser visualizados através da ferramenta *Smokeview* [28], sendo um exemplo mostrado na Figura 4.2. Esta ferramenta serve para visualizar os cálculos numéricos gerados pelos modelos de incêndio obtidos através do FDS, quer de forma dinâmica, quer estática. Permite visualizar o fumo, a chama, o fluxo de gases, a temperatura e combustível em formato 2D ou 3D. O *Smokeview* também permite mostrar os atributos de fogo de forma

animada e realista ao longo do tempo. Isso é feito mostrando uma série de planos determinados a partir das densidades calculadas pelo FDS.

Na Figura 4.1, os círculos correspondem aos parâmetros de entrada, os quais configuráveis no ficheiro “.fds”. As características do cenário permitem definir as dimensões ($c \times l \times a$), o número de células utilizadas, a localização do combustível e as condições de fronteira. Nas características da vegetação são definidas a espécie, a composição e a sua densidade. As condições de fogo permitem definir a localização, a dimensão, o tempo de duração, a taxa de libertação de calor por unidade de área e a taxa de propagação do fogo. Os parâmetros de saída estão representados nos retângulos que saem do FDS. A temperatura é expressa em $^{\circ}\text{C}$, enquanto que os restantes parâmetros estão expressados em densidade ρ (kg/m^3).

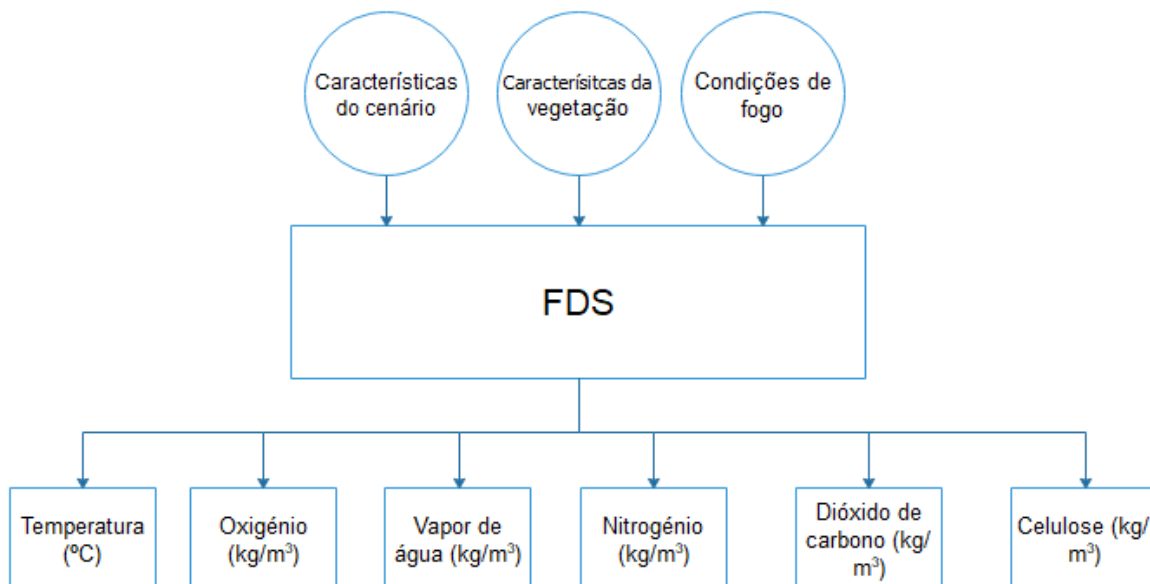


Figura 4.1: Parâmetros de entrada e saída FDS.

Inicialmente foi utilizado o *Wildland-Urban Fire Dynamics Simulator* (WFDS) [29], uma extensão da versão 6 do FDS que privilegia a utilização de vegetação como combustível, para a criação e simulação de vários cenários. Posteriormente, importaram-se os dados para o Matlab e foram efetuados os cálculos para determinar a densidade de eletrões, a frequência de colisão e a atenuação. Por forma a determinar qual a dimensão adequada das células do simulador, realizaram-se várias simulações à medida que se reduziam o tamanho das células. Apesar de células de menor dimensão permitirem obter uma maior precisão, estas comprometem, no entanto, o tempo de simulação do cenário, bem como o espaço em disco ocupado pela simulação.

O primeiro cenário criado consistiu numa única árvore colocada no ponto central do ambiente (Figura 4.2). Para este cenário foi definido um volume de 4 x 4 x 8 m (c x l x a). Ao dividir os 4m de comprimento em 20 células, obtém-se células com 20 cm de comprimento. Serão utilizadas células cúbicas com mesmas dimensões, ou seja, a largura deve ser igual ao comprimento e à altura. O tempo de simulação deste cenário foi de 25 s.

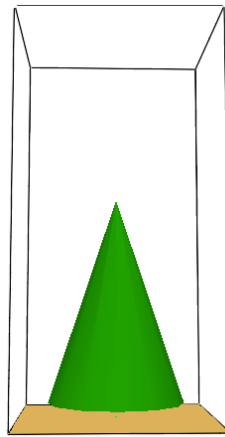


Figura 4.2: Cenário de uma árvore, com visualização gerado pelo *Smokeview*.

Para que todas as células apresentem dimensões cúbicas ($c = l = a$) e uma vez que a altura do cenário da Figura 4.2 tem o dobro dos metros do comprimento ou da largura, considerou-se que na altura do cenário existem o dobro das células do comprimento ou largura. Deste modo, se dividirmos o comprimento e largura em 50 células, teremos de dividir a altura em 100 células para que as mesmas tenham o mesmo comprimento, altura e largura. Assim, considerando um cenário de 4 x 4 x 8m, e dividindo o mesmo em 50 x 50 x 100 células, obtêm-se células de comprimento, largura e altura igual a 8 cm.

Tabela 4.1: Tamanhos de células utilizadas nas simulações.

20 x 20 x 40 = 20 cm	24 x 24 x 48 = 16,7 cm	25 x 25 x 50 = 16 cm	27 x 27 x 54 = 14,8 cm
30 x 30 x 60 = 13,3 cm	32 x 32 x 64 = 12,5 cm	36 x 36 x 72 = 11,1 cm	40 x 40 x 80 = 10 cm
45 x 45 x 90 = 8,9 cm	48 x 48 x 96 = 8,3 cm	50 x 50 x 100 = 8 cm	54 x 54 x 108 = 7,4 cm
60 x 60 x 120 = 6,7 cm	64 x 64 x 128 = 6,25 cm		

Na Figura 4.3 representam-se diferentes valores para a temperatura em função da dimensão das células. É possível observar que os valores da temperatura convergem para um valor estável à medida que o tamanho da célula diminui. Atendendo aos valores presentes na Tabela 4.1, e tendo presente o cenário da Figura 4.2, o tamanho da células que satisfazem um valor ótimo para a convergência da temperatura será o cenário cujas células têm a dimensão de 8,9 cm (45 x 45 x 90). Essa convergência é tanto melhor quanto menor for a

dimensão das células, sendo ideal quando as células têm 6,25 cm (64 x 64 x 128). No entanto, esse tamanho reduzido implica que o tempo de simulação aumente drasticamente.

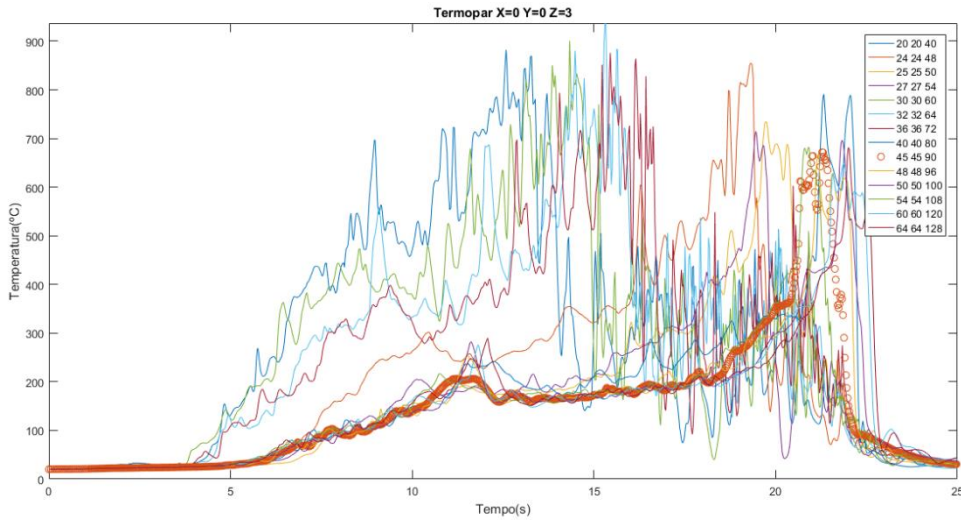


Figura 4.3: Valores de temperatura para um termopar colocado a uma altura de 3m do solo (considerando 14 dimensões de células).

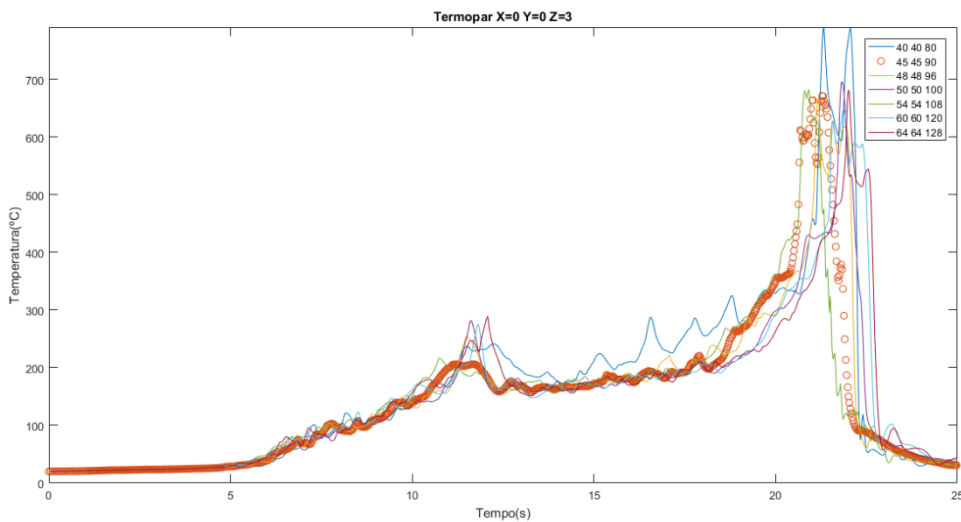


Figura 4.4: Valores de temperatura para um termopar colocado a uma altura de 3m do solo (considerando 7 dimensões de células).

Para uma melhor percepção dos resultados, optou-se por fazer uma suavização das curvas da temperatura, utilizando o método Loess, cujo resultado é ilustrado na Figura 4.5, e também uma suavização através do método RLoess conforme é apresentado na Figura 4.6.

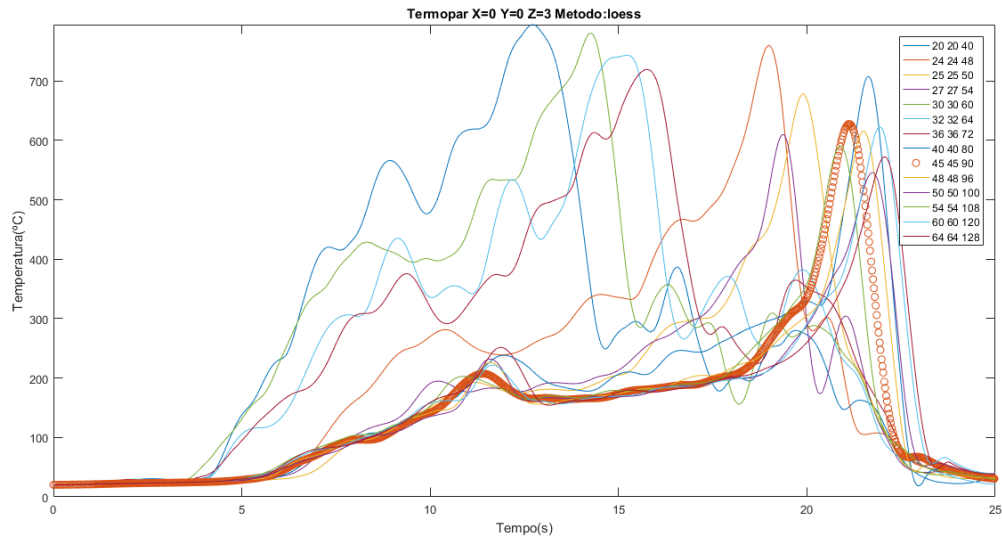


Figura 4.5: Suavização das curvas de temperatura – Método Loess.

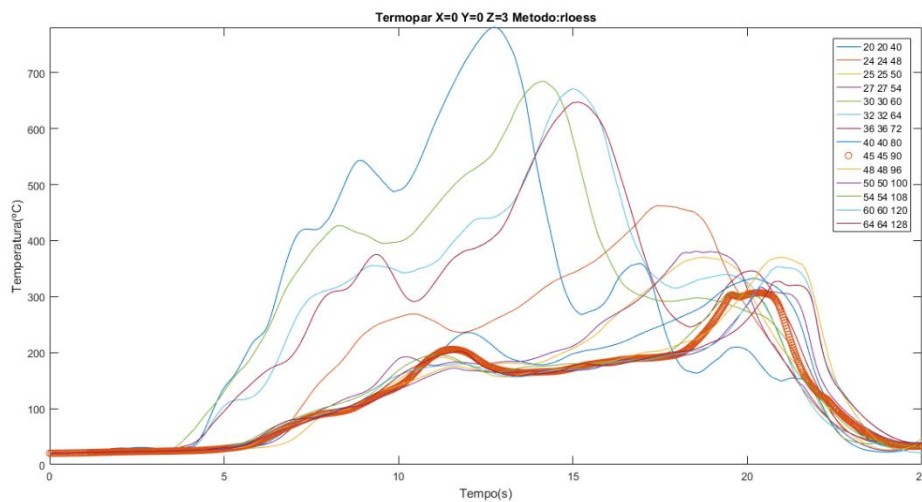


Figura 4.6: Suavização das curvas de temperatura – Método RLoess.

Para o cenário de 4 m x 4m x 8m, e tendo em conta o tempo de simulação, o ideal seria dividir o mesmo em 45 células x 45 células x 96 células. Apesar do WFDS simular um determinado cenário num período de tempo mais reduzido que o FDS, a distribuição da temperatura apresenta uma maior convergência com os resultados obtidos por Boan quando se utiliza o FDS.

4.2.1 Cenário de pequena escala tronco de madeira

Para o cenário definido por Boan [5], foi necessário utilizar o software de simulação FDS em detrimento do WFDS [29]. O cenário foi criado com as dimensões de 20 m x 20 m x 60 m de comprimento, largura e altura, respetivamente. O cenário foi dividido em 80 células x 80

células x 240 células. Assim cada célula terá um tamanho de 25 cm x 25 cm x 25 cm de comprimento, largura e altura respetivamente. Neste cenário foi definido um simples bloco de combustível formado por um tronco de madeira, com as dimensões de 7 m x 7 m x 3.5 m. A ignição é ativada durante os primeiros 30 s, através de uma abertura pela qual entra o calor e a chama, e que está colocado imediatamente por baixo do bloco de madeira, sendo posteriormente desativada, e assim permanece até ao final da simulação. Os parâmetros que definem o combustível são os presentes na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: composição do combustível

FUEL	CELLULOSE
SOOT_YIELD	0.1
O	2.5
C	3.4
H	6.2
HEAT_OF_COMBUSTION	12600.0

No ficheiro de configurações do FDS são definidas as propriedades do material combustível. Foi criado um material do tipo TREE, que é constituído por celulose e água, sendo que as percentagens dos constituintes são 0.97 de celulose e 0.01 de água [5].

Tabela 4.3: Definição das propriedades do material combustível

MATL ID	'TREE'
N_REACTIONS	1
SPEC_ID(1:2,1)	'CELLULOSE', 'WATER'
NU_SPEC(1:2,1)	0.97, 0.01
CONDUCTIVITY	0.17
SPECIFIC_HEAT	2.45
DENSITY	600.0
REFERENCE_TEMPERATURE(1)	300.0
HEAT_OF_REACTION(1)	300.0

A Tabela 4.4 apresenta as propriedades da superfície tronco de madeira, que é constituída pelo material Tree.

Tabela 4.4: Propriedades da superfície

SURF ID	'TRUNK'
COLOR	'BROWN'
MATL_ID	'TREE'
BURN_AWAY	.TRUE.
THICKNESS	0.028
BACKING	'EXPOSED'



Time: 77.4



Figura 4.7: Tronco de madeira em chamas.

A Figura 4.7 mostra a visualização, no *Smokeview*, do cenário cujo material combustível é um tronco de madeira, com as dimensões de 7 m x 7 m x 3.5 m. Ao invés de ser um bloco compacto, o mesmo é atravessado por vários buracos, quer ao nível longitudinal, quer ao nível latitudinal. Nesta simulação foi definido um tempo de duração de 150 s.

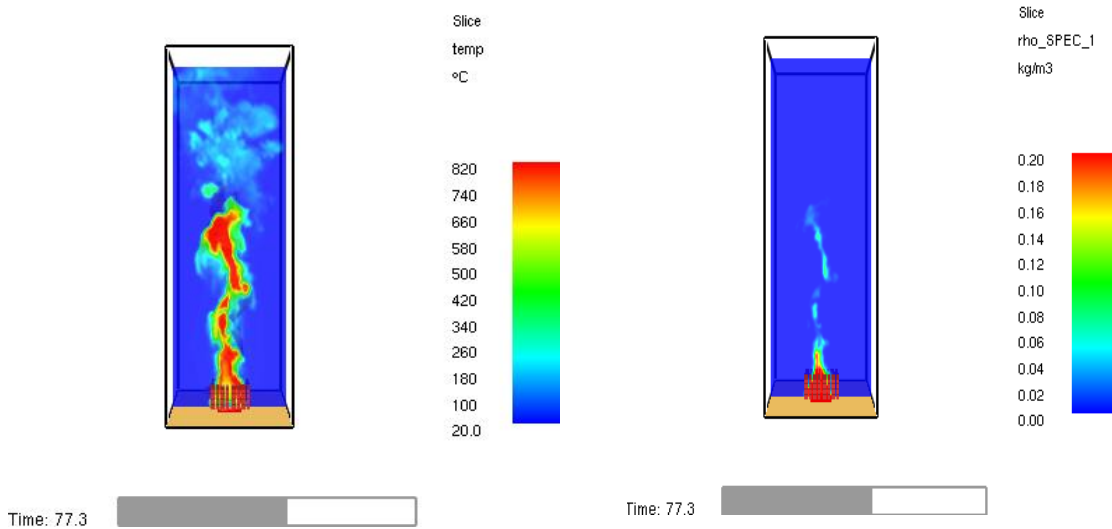


Figura 4.8: Temperatura.

Figura 4.9: Celulose.

Na Figura 4.8 está presente o valor para um *slice* no plano XZ e na coordenada $y=0$ referente ao valor da temperatura.

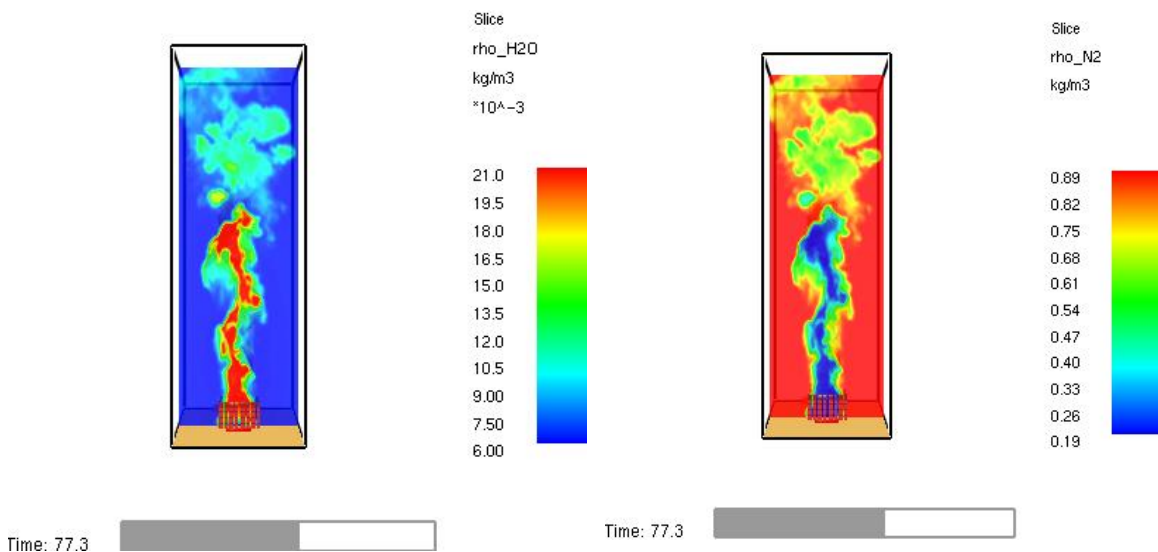


Figura 4.10: Vapor de água.

Figura 4.11: Nitrogênio.

O aumento da temperatura provoca um aumento na concentração do vapor de água (Figura 4.10), diminuição da concentração de nitrogênio (Figura 4.11), diminuição da densidade de oxigênio (Figura 4.12) e aumento da densidade de dióxido de carbono (Figura 4.13). Para o cálculo da frequência de colisão dos elétrons, os gases que têm maior contribuição são a água (H₂O) e o dióxido de carbono (CO₂) [5].

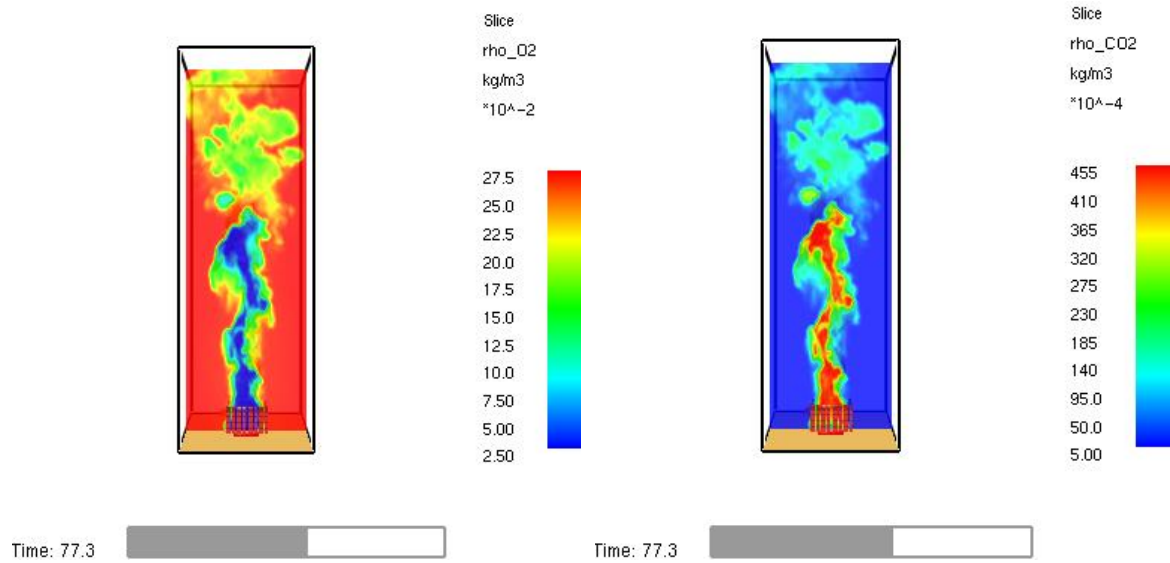


Figura 4.12: Oxigênio.

Figura 4.13: Dióxido de Carbono.

4.2.2 Cenário de pequena escala árvore

A Figura 4.14, consiste num pequeno cenário, na tentativa de reproduzir um ambiente que incluiu relva e uma árvore formada por um tronco e folhas, utilizando as configuração utilizadas por Boan. Considerou-se que a relva e as folhas da árvore possuem uma menor densidade de celulose e maior densidade de água em relação ao tronco. Verificou-se que o fogo não se propagou às folhas da árvore.

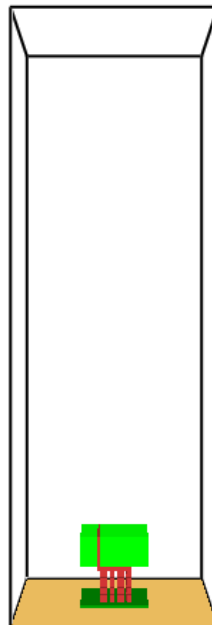


Figura 4.14: Cenário de pequena escala – árvore.

4.3 Estimativa da densidade de eletrões

A densidade de eletrões é calculada através da equação de *Saha* (3.9), sendo necessário utilizar os valores obtidos a partir do FDS, nomeadamente a temperatura (°C) e da densidade de celulose em ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), tal como apresentado na Figura 4.15. Os metais alcalinos considerados para a determinação da densidade de eletrões são o potássio, magnésio e o cálcio. É necessário conhecer a percentagem de metais alcalinos presentes na vegetação, bem como o coeficiente de pirólise [5].

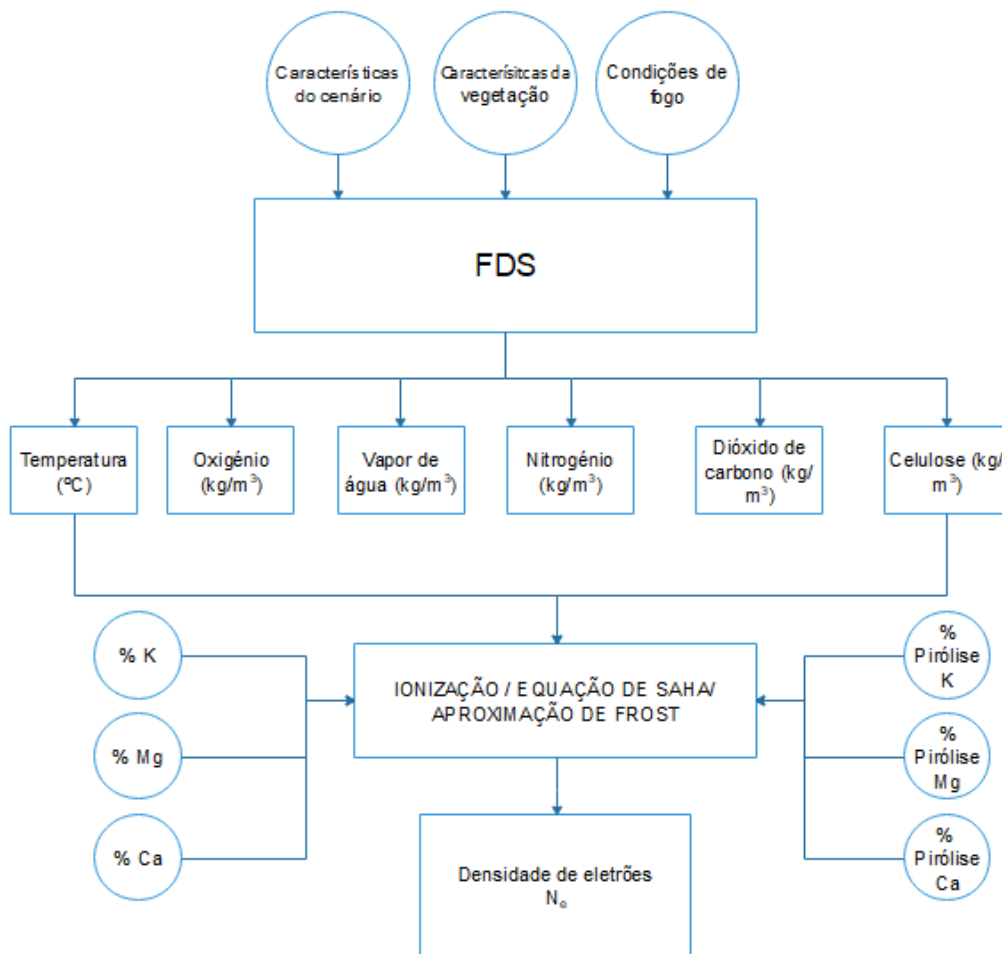


Figura 4.15: Parâmetros necessários para determinar a densidade de eletrões.

4.3.1 Determinação da densidade de cada elemento

A partir da densidade de celulose obtida através do FDS em ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), é possível calcular qual a quantidade de cada elemento através do uso da seguinte expressão (4.1):

$$N_X = \rho C \cdot P_X \cdot II_X, \quad (4.1)$$

onde ρC , representa a densidade de celulose dada pelo FDS, P_X , representa a percentagem de cada elemento (K, Mg, Ca) presente na planta que é queimada. II_X , é o coeficiente de pirólise cada elemento. Sendo que Boan [5] considera dois tipos de pirólise, uma rápida e outra lenta, que determinam a concentração do elemento presente na zona de combustão.

Tabela 4.5: Tipos de pirólise

Elemento	II		
	K	Mg	Ca
Pirólise Rápida	100%	40%	20%
Pirólise Lenta	60%	20%	10%

4.3.2 Densidade Eletrónica

A densidade numérica é o número de objetos especificados por unidade de volume.

$$n = \frac{N}{V}, \quad (4.2)$$

onde N é o número total de elementos num volume V.

A densidade de um material é dada pela expressão:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.3)$$

Para átomos e moléculas de uma conhecida massa molar M (em kg/mol), a densidade numérica pode ser expressa em termos da sua densidade de massa ρ (em kg/m³) como sendo:

$$n = \frac{N_A}{M} \rho_m, \quad (4.4)$$

onde, N_A , é o número de *Avogadro*, M, a massa molar. Este valor é conhecido a partir da tabela periódica, e, ρ_m , a densidade da celulose, dada pelo FDS. A relação M/N_A é a massa de um átomo ou molécula em kg.

O valor de n , corresponde ao número de átomos de um determinado elemento (K, Mg, Ca) presentes na zona de combustão, sendo neutros ou ionizados. Aplicando a equação de *Saha* (3.9), tendo presente os valores de g_i e g_o presentes na Tabela 4.6., e de seguida aplicando-se a equação (3.10) obtém-se o número de eletrões de um determinado elemento (potássio, magnésio, cálcio). A soma de todos esses elementos dá origem à densidade total de eletrões presentes na zona de combustão.

Tabela 4.6: JANAF – NIST Thermo-chemical Data.

	K	Mg	Ca
gi	1	2	2
go	2	1	1

4.4 Cálculo da frequência de colisão

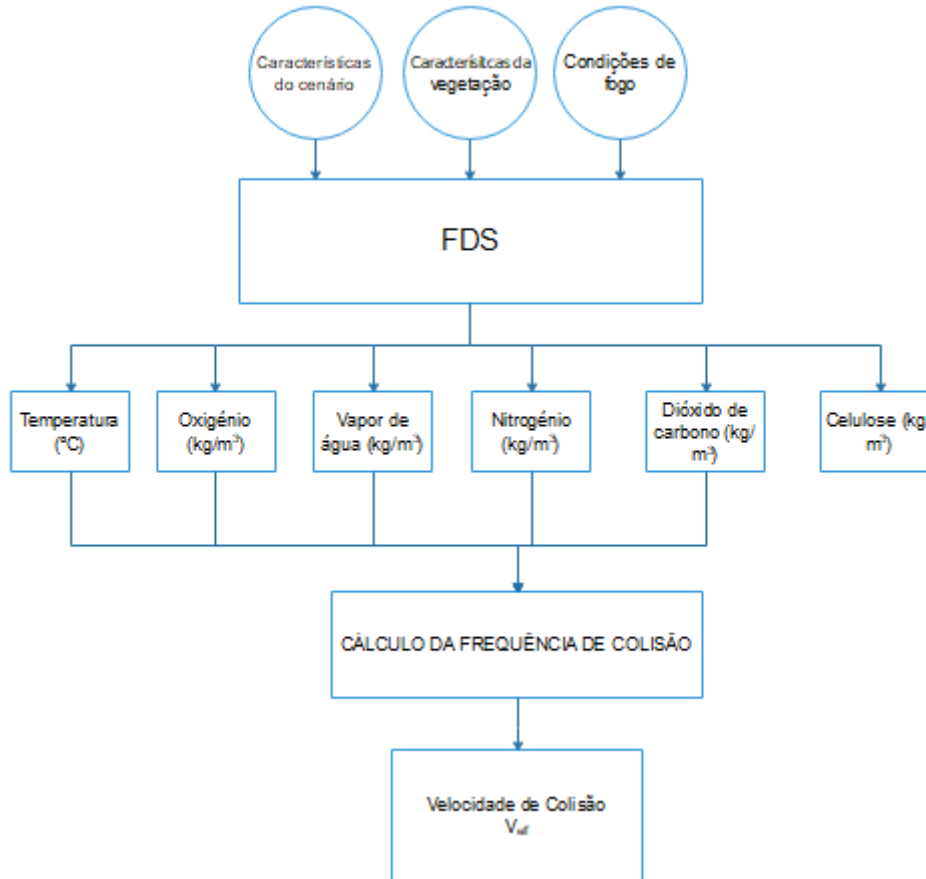


Figura 4.16: Diagrama de dados utilizado para calcular a velocidade de colisão.

Para o cálculo da frequência de colisão é necessário converter os valores da temperatura em Kelvin. Os valores da frequência de colisão efetiva (4.5) são retirados a partir da tabela de Itikawa [17] através da interpolação do valor da temperatura [5]. Apenas são considerados os gases referentes ao vapor de água (H_2O) e (CO_2), uma vez que estes são os que tem maior contribuição para a velocidade de colisão, tal como está presente na Tabela 4.7. O valor de N é calculado utilizando a expressão de densidade numérica (4.4).

$$\langle V_{eff} \rangle / N \times 10^{-8} \text{sec}^{-1} \text{cm}^3 \quad (4.5)$$

Tabela 4.7: Frequência de Colisão Efetiva.

Gas	Frequência Efetiva de Colisão		
	300 K	1000 K	1500 K
H ₂	1.39	3.27	4.40
O ₂	0.335	0.956	1.41
CO	0.950	2.79	3.99
H₂O	84.9	39.3	29.3
CO₂	10.1	8.04	6.45

Para chamas de oxigênio puro as condições atmosféricas são de 50% de O₂, 25% de H₂O e 25% de CO₂ [5].

4.5 Cálculo da atenuação e desvio de fase

Numa primeira fase, foram reproduzidos os resultados calculados por Mphale [16] para o coeficiente de atenuação, tendo sido obtidos valores idênticos para a atenuação e para o desvio de fase. Foi considerado que a frequência de elétrons se mantém em $1 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$, variando apenas a densidade de elétrons. O cálculo da atenuação foi efetuado com recurso à expressão (3.33), tendo sido necessário efetuar a respetiva conversão de Neper para dB.

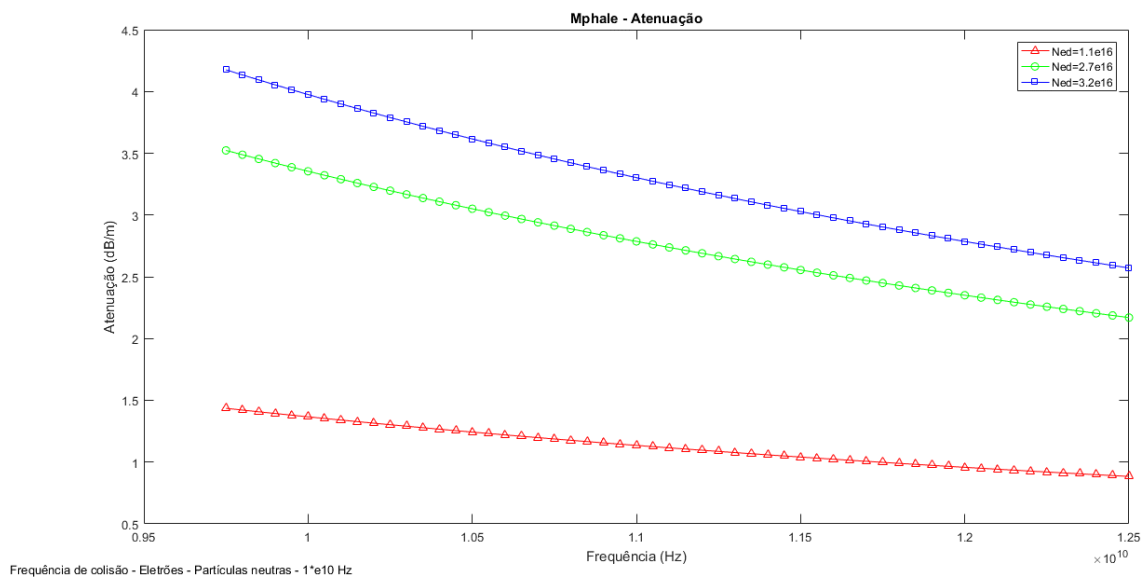


Figura 4.17: Atenuação calculada a partir da expressão (3.33) [16].

No entanto, o uso da expressão (3.33), referente ao cálculo de atenuação, apenas resulta para frequências bastante elevadas. Neste caso Mphale [16], utilizou esta expressão para o cálculo da atenuação na Banda X (9.75 GHz a 12.5 GHz). Para gamas de frequência mais baixas, a mesma deixa de ser válida, como pode ser comprovado pelas Figura 4.18 e Figura 4.20.

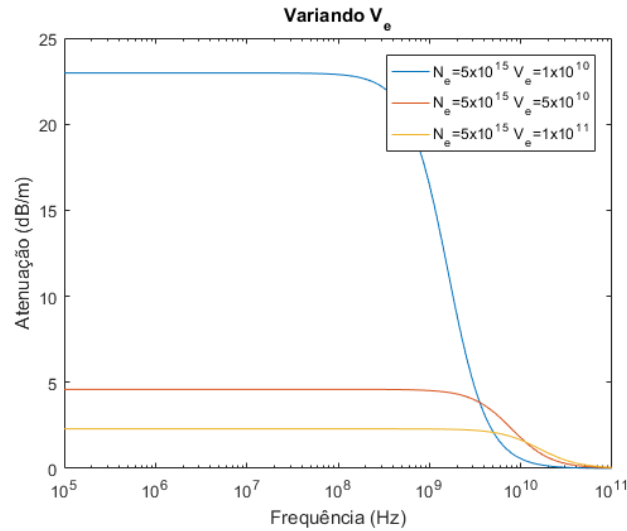


Figura 4.18: Atenuação através da expressão (3.33), variando a velocidade de colisão.

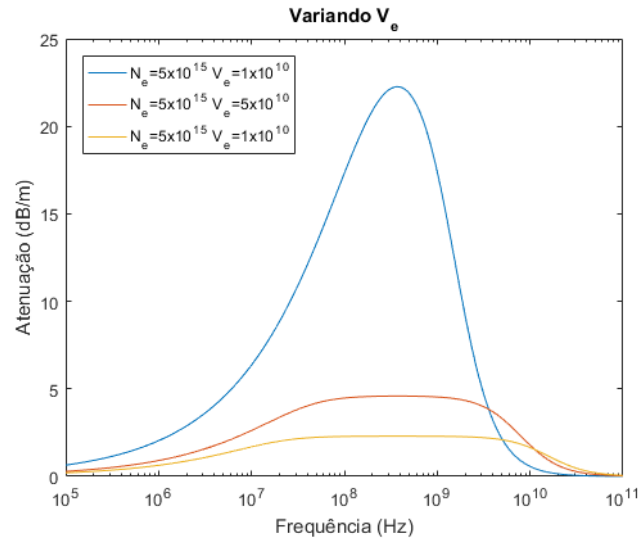


Figura 4.19: Atenuação através da expressão (4.6), variando a frequência de colisão.

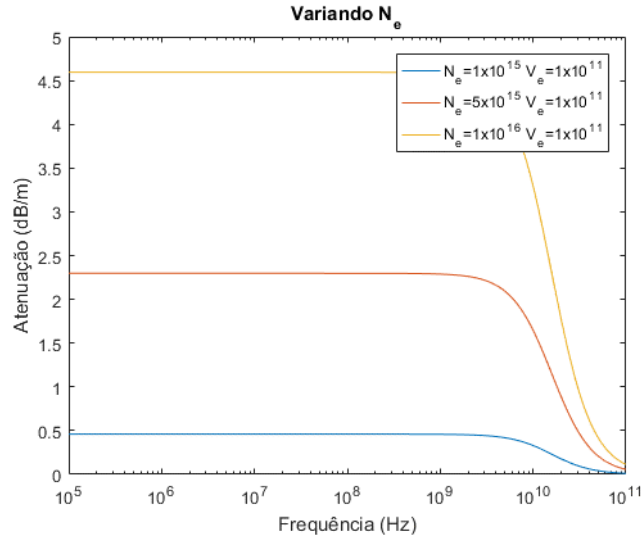


Figura 4.20: Atenuação através da expressão (3.33), variando a densidade de elétrons.

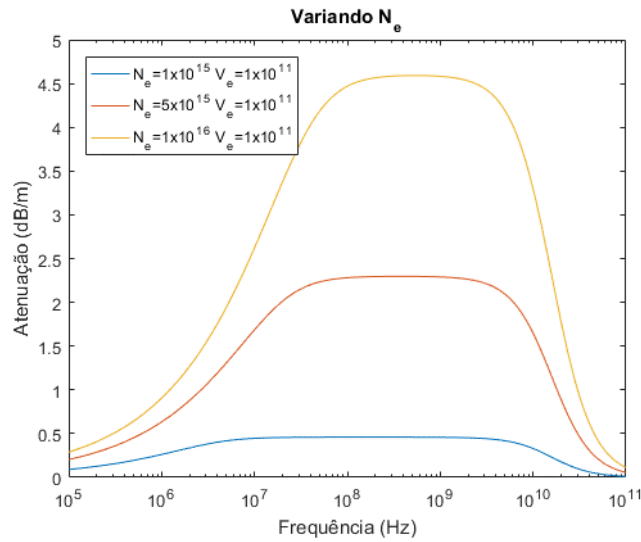


Figura 4.21: Atenuação através da expressão (4.6), variando a densidade de elétrons.

Deste modo, para cobrir as gamas de frequências mais baixas (Figura 4.19 e Figura 4.21), foi necessário utilizar a expressão (4.6) para cálculo da atenuação [30].

$$\alpha_p = \frac{\omega}{c} \left\{ -\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v_{eff}^2} \right) + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v_{eff}^2} \right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v_{eff}^2} \frac{v_{eff}}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2} \quad (4.6)$$

Para calcular a atenuação por metro, basta fazer a conversão de Neper para dB, conforme a expressão (4.7).

$$\alpha = \alpha_p \times 8.685889638 \quad (4.7)$$

O cálculo total da atenuação ao longo do percurso é a integração da atenuação ao longo desse intervalo [31]. É necessário multiplicar a atenuação obtida pela dimensão da célula e somar todos os valores ao longo do intervalo para obter a atenuação total.

$$\alpha_{TOTAL} = \int_a^b \alpha(r) dr \quad (4.8)$$

O desvio de fase foi calculado através da expressão (2.12).

4.6 Processamento dos dados

O FDS permite a exportação de dados através de um ficheiro .csv, que guarda os valores médios da temperatura obtidos na simulação, assim como a densidade média dos elementos que se pretendem extrair, designadamente a densidade de vapor de água, dióxido de carbono, oxigénio, nitrogénio e do combustível. Os dados foram subsequentemente carregados para a plataforma *Matlab* para o devido processamento. Os valores médios obtidos no ponto $y=0$ do plano XZ, para a temperatura ao longo do tempo de simulação podem ser observados na figuras: 4.22 e 4.23. A temperatura máxima obtida na Figura 4.22 foi de 1300 K e na Figura 4.23 a temperatura máxima obtida é superior a 1600 K. A partir desses valores são calculados os restantes dados pretendidos: frequência de colisão, densidade de elétrões, atenuação e desvio de fase. Esta abordagem, apesar de não permitir obter a temperatura máxima, mas sim o seu valor médio, prova que a temperatura tem influência direta na densidade de elétrões, e que a densidade de elétrões afeta claramente a atenuação, e o desvio de fase é afetado pela temperatura e velocidade de colisão. Podemos verificar que a frequência de colisão aumenta com o fogo. Esta é uma observação importante, pois geralmente o aumento da temperatura causará uma diminuição na frequência de colisão. No entanto, no incêndio, a pressão não é constante, mas aumenta à medida que a combustão se desenvolve [5].

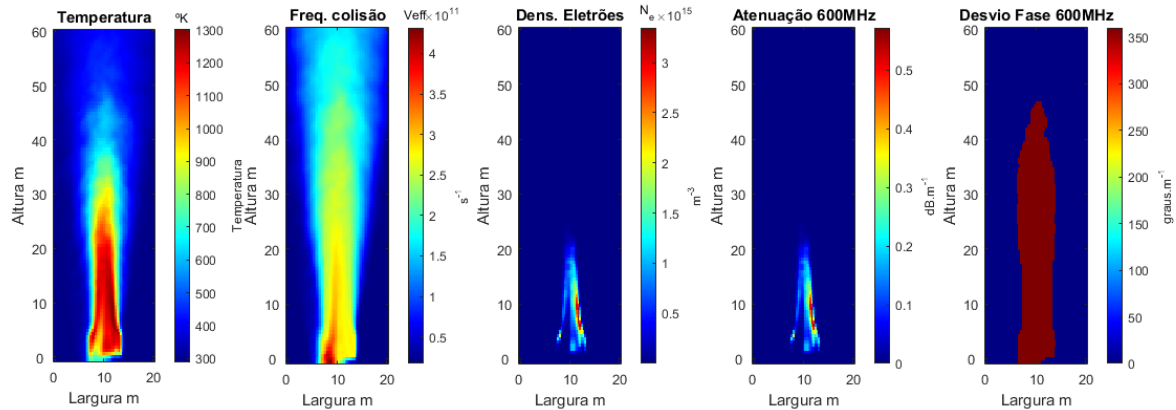


Figura 4.22: Valores médios – temperatura até 1300 K.

Comparando a Figura 4.22 com a Figura 4.23, verifica-se que o aumento da temperatura de 1300 K para 1600 K, conduz a um aumento significativo da densidade de eletrões assim como influencia o valor da atenuação. À medida que a temperatura aumenta, a frequência de colisão diminui, ainda que de forma ligeira.

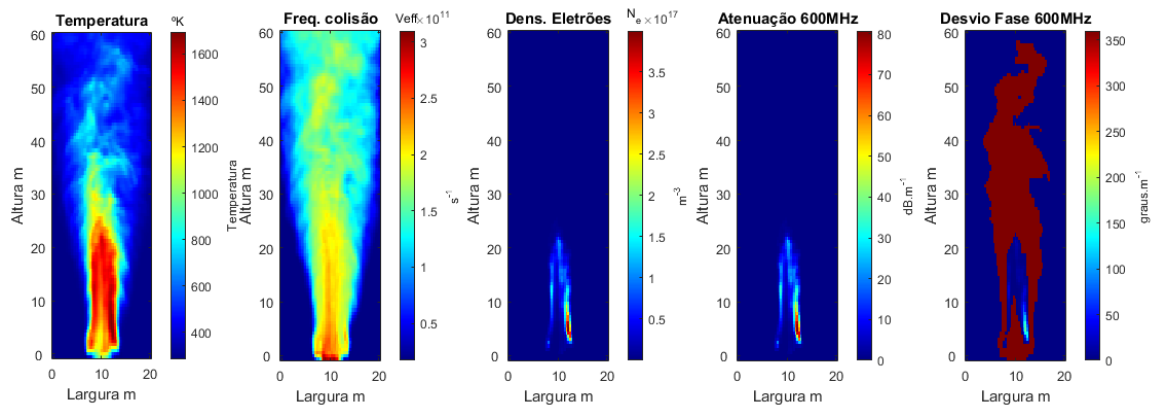


Figura 4.23: Valores médios – temperatura superior a 1600 K.

O FDS exporta os vários *slices* que foram definidos no ficheiro de configurações. Os intervalos de tempo de aquisição dos valores são definidos automaticamente pelo FDS, contudo não são intervalos regulares. Em cada coordenada y do cenário são definidos os valores que serão exportados: a temperatura, as densidades de oxigénio, do vapor de água, do dióxido de carbono, da celulose e do nitrogénio. Os primeiros cinco elementos referidos são necessários para cálculo da densidade de eletrões e velocidade de colisão.

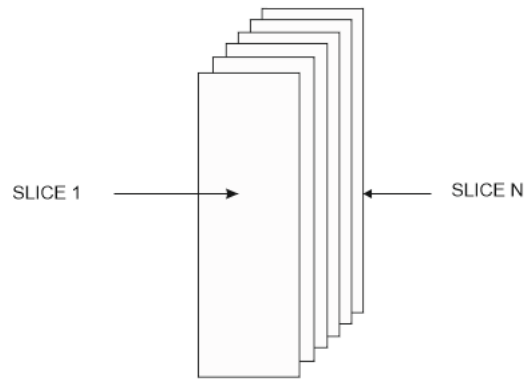


Figura 4.24: Vários *slices* espaciais no plano XZ.

Tomando como exemplo o cenário da Figura 4.7, cujas dimensões são de 20 m x 20 m x 60 m, e tendo sido definidas 80 células ao longo do eixo do x, 80 células no eixo do y, e 240 no eixo do z.

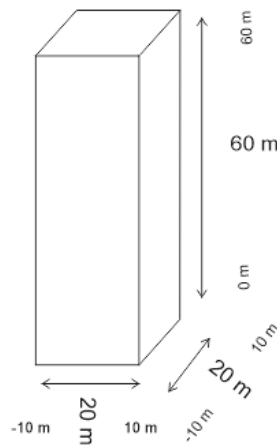


Figura 4.25: Dimensões do cenário – bloco de madeira.

Cada célula terá a dimensão de 25 cm x 25 cm x 25 cm. Em cada coordenada y, são exportados seis ficheiros correspondendo a temperatura, oxigénio, vapor de água, nitrogénio, dióxido de carbono e celulose), conforme apresentado na Tabela 4.8. Foi definido que os *slices* são extraídos a partir do centro da célula. Se considerarmos como exemplo o primeiro *slice*, serão exportados os dados no ponto $y=-9.875$, o mesmo sucede para todas as restantes células.

Tabela 4.8: Configuração no plano Y para exportação dos parâmetros ficheiros .sf

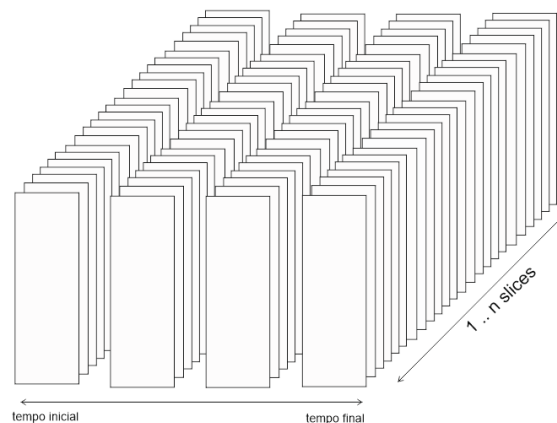
```

&SLCF PBY=-9.875000, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&SLCF PBY=-9.875000, QUANTITY='DENSITY' SPEC_ID='OXYGEN'/
&SLCF PBY=-9.875000, QUANTITY='DENSITY' SPEC_ID='WATER VAPOR'/
&SLCF PBY=-9.875000, QUANTITY='DENSITY' SPEC_ID='NITROGEN'/
&SLCF PBY=-9.875000, QUANTITY='DENSITY' SPEC_ID='CARBON DIOXIDE'/
&SLCF PBY=-9.875000, QUANTITY='DENSITY' SPEC_ID='CELLULOSE'/

```

4.6.1 Cálculo da atenuação

Após o processamento dos ficheiros são calculados, para cada *slice*, os valores da densidade de eletrões e velocidade de colisão em cada instante de tempo. Esses dados são gravados posteriormente num ficheiro do tipo .mat (do tipo estrutura) que armazena a densidade de eletrões, e a frequência de colisão e a temperatura em cada instante de tempo da simulação, num determinado plano (*slice*). Para cada ponto no plano XZ, é calculada e apresentada a atenuação em dB/m. A Figura 4.26 exemplifica os vários *slices* ao longo tempo, sendo que a primeira linha corresponde à atenuação calculada para o primeiro instante de tempo, a segunda linha corresponde ao segundo instante de tempo e assim sucessivamente. Após ter sido calculada a atenuação de cada *slice* em dB/m, ao longo dos vários instantes de tempo, calcula-se o valor total da atenuação ao longo do cenário, multiplicando-se o valor da atenuação obtida em cada *slice* pelo tamanho da célula. A atenuação total num dado instante de tempo, corresponde à soma da atenuação de todos os *slices* ao longo desse tempo. Assim, através da soma da atenuação na primeira linha resulta na atenuação total no primeiro instante de tempo, e assim sucessivamente. A atenuação total de uma célula corresponde à soma dessa célula ao longo dos 80 *slices* considerados.

Figura 4.26: Número de *slices* com a atenuação ao longo do tempo.

O valor total da atenuação pode ser calculado usando apenas, um número de *slices* mais reduzido, ou seja, inclui-se apenas os *slices* onde ocorre o fogo, uma vez que a atenuação é praticamente nula para os *slices* fora da zona de combustão (Figura 4.27).

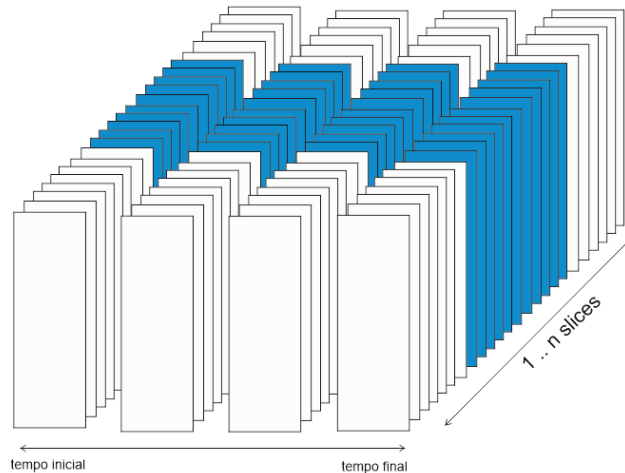


Figura 4.27: *Slices* na zona de combustão ao longo do tempo de simulação.

4.6.2 Cálculo do desvio de fase

O cálculo do desvio de fase resulta da aplicação da expressão (2.12) sendo necessário a densidade de elétrons e a frequência de colisão, os quais são determinados com base na temperatura e densidades obtidas a partir do FDS, além disso é necessário definir a frequência de propagação. O resultado da expressão (2.12) é apresentado em rad/m. Para calcular o desvio de fase final, é necessário fazer a integração ao longo do cenário, considerando que cada célula tem uma dimensão de 25 cm.

4.7 Conclusões interinas

Neste capítulo foi apresentada a metodologia utilizada na aplicação do modelo numérico. Com recurso ao FDS foi definido o cenário, os parâmetros de entrada e de saída necessários para o modelo em estudo.

A definição do tamanho das células do cenário permite obter uma maior resolução e convergência nos valores da temperatura obtidos, no entanto células mais reduzidas têm como desvantagem aumentar significativamente o tempo de simulação.

Foram descritos os procedimentos para obtenção da densidade de elétrons, da frequência de colisão a partir das concentrações dos gases e da celulose disponibilizados pelo FDS.

Foi também apresentada e validada a expressão que permite o cálculo da atenuação em dB/m e o desvio de fase (graus/m). Por último foram apresentadas as considerações necessárias para cálculo da atenuação total e do desvio de fase ao longo do tempo e espaço de simulação do cenário.

5. Apresentação e Análise de Resultados

5.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados do modelo aplicado. Esta análise é feita em função dos objetivos definidos inicialmente. Para esse efeito, no subcapítulo 5.2, começa por analisar-se a influência que a temperatura tem na atenuação obtida. Em 5.3 demonstra-se como a densidade de eletrões contribui para a atenuação. No 5.4 mostra-se a variação da frequência de colisão em função da temperatura. No subcapítulo 5.5. verifica-se o impacto que o calor de combustão tem nos valores da atenuação e no desvio de fase. No subcapítulo 5.6 são apresentadas as repercussões que a variação da quantidade dos metais alcalinos tem no cálculo do valor da atenuação. Em 5.7 apresenta-se os resultados da atenuação em função de uma pirolise lenta e rápida. Em 5.8 varia-se a frequência e apresentam-se os resultados da atenuação. No subcapítulo 5.9 é calculada a atenuação em função da variação da taxa de libertação de calor. No 5.10 é avaliado o impacto que a variação da densidade da vegetação tem na atenuação. Em 5.11 é calculada a atenuação total em função da temperatura. O subcapítulo 5.12 apresenta uma análise estatística através da função cumulativa de distribuição relativamente à atenuação total obtida. Por fim, são apresentadas as conclusões interinas do capítulo.

5.2 Influência da temperatura na atenuação

A Figura 5.1 mostra a variação da temperatura máxima ao longo do tempo da simulação para o cenário formado por um tronco de madeira. A chama é ativada no instante 1 s e é desativada aos 30 s. Pode-se observar que a temperatura facilmente atinge um valor superior a 1000 K, e no fim da simulação, após o bloco acabar de ser queimado, a temperatura volta a baixar para os valores de início de simulação.

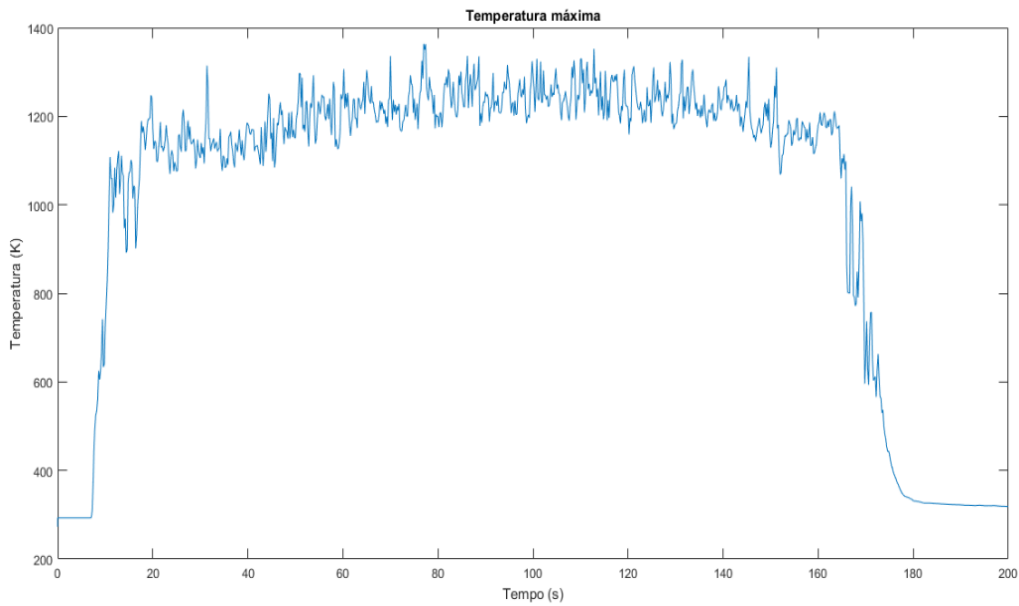


Figura 5.1: Temperatura máxima obtida a partir do *slice* número 40.

Modificaram-se os parâmetros de entrada da simulação, nomeadamente o calor de combustão e a taxa de libertação de calor por unidade de área. Esses parâmetros têm impacto direto nos valores da temperatura. Os resultados apresentados na Figura 5.2 mostram que o aumento da temperatura reflete-se no aumento da atenuação.

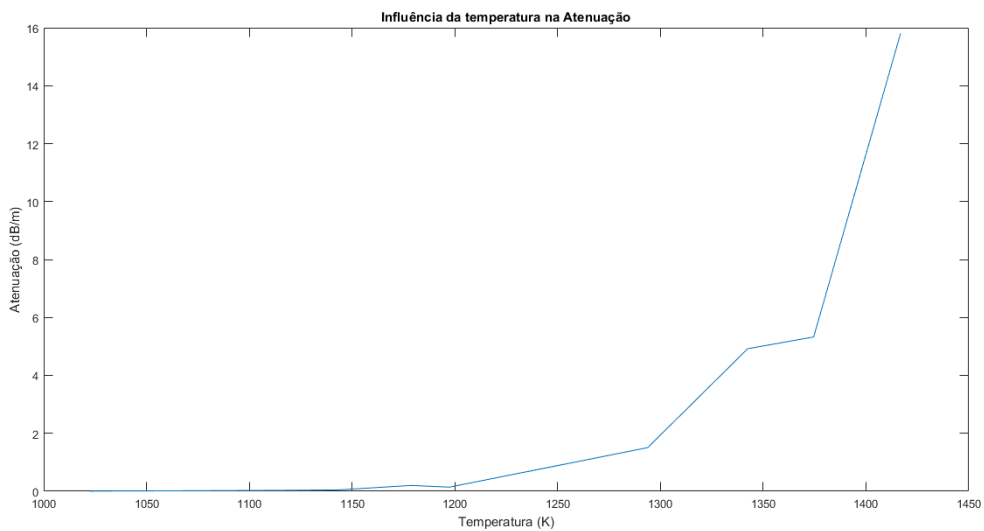


Figura 5.2: Influência da temperatura na atenuação.

5.3 Variação da densidade de elétrons

A Figura 5.3, apresenta a densidade de elétrons máxima ao longo do tempo de simulação. O valor máximo da atenuação está intrinsecamente ligado com o valor máximo da temperatura.

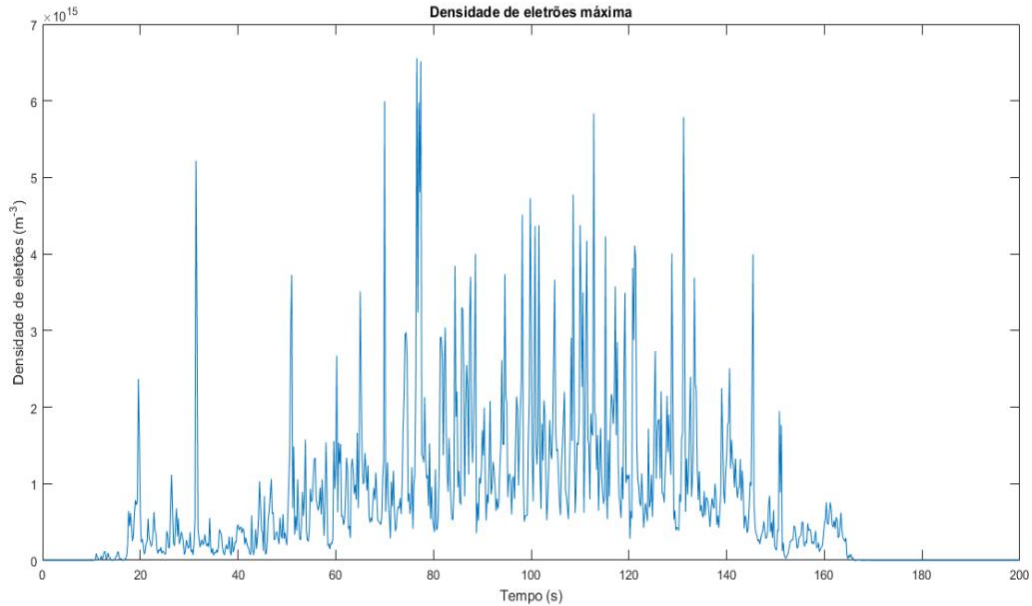


Figura 5.3: Densidade de elétrons obtida a partir do *slice* número 40.

A densidade de elétrons aumenta consideravelmente quando a temperatura atinge valores superiores a 1100 K.

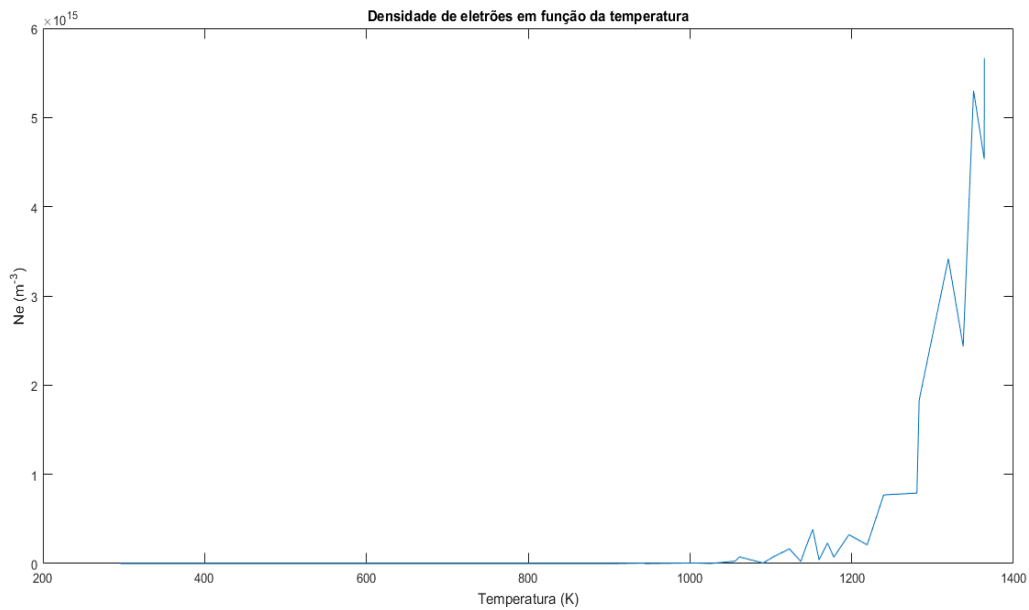


Figura 5.4: Densidade de elétrons em função da temperatura.

5.4 Variação da frequência de colisão

A frequência de colisão máxima obtida foi de $1.2667 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$. Quando a temperatura atinge o valor máximo, constata-se que, ao longo da simulação, a frequência de colisão tende para um valor entre $6 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ e $8 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$. Na Figura 5.5 está representada com a cor rosa a frequência de colisão máxima obtida ao longo do tempo e a cor azul representa o valor da frequência de colisão quando a temperatura atinge o valor máximo no *slice* número 40. O aumento da temperatura provoca uma diminuição da frequência de colisão.

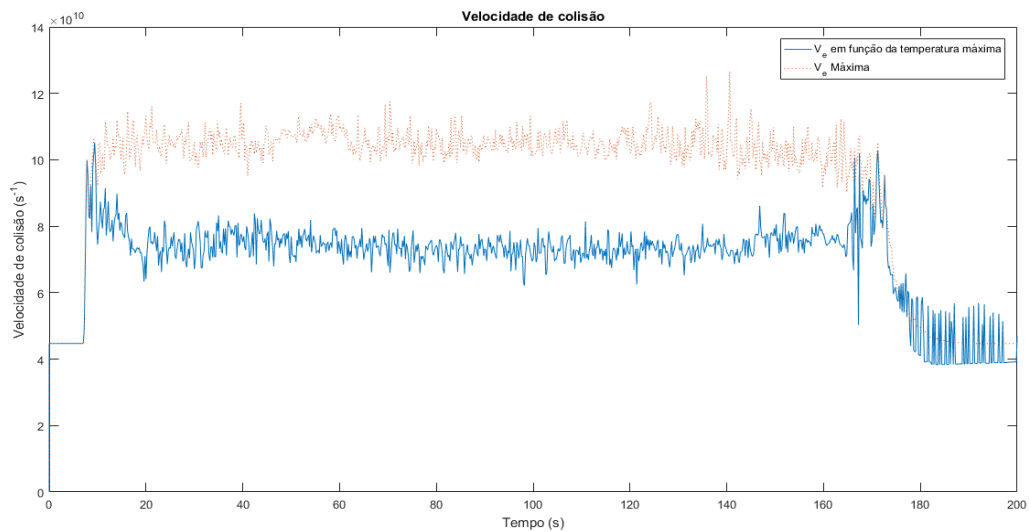


Figura 5.5: φ_{eff} máxima e φ_{eff} em função da temperatura máxima do *slice* número 40.

A Figura 5.6 mostra que a frequência de colisão varia com a temperatura, contudo a ordem de grandeza mantém-se na ordem dos 10^{10} s^{-1} .

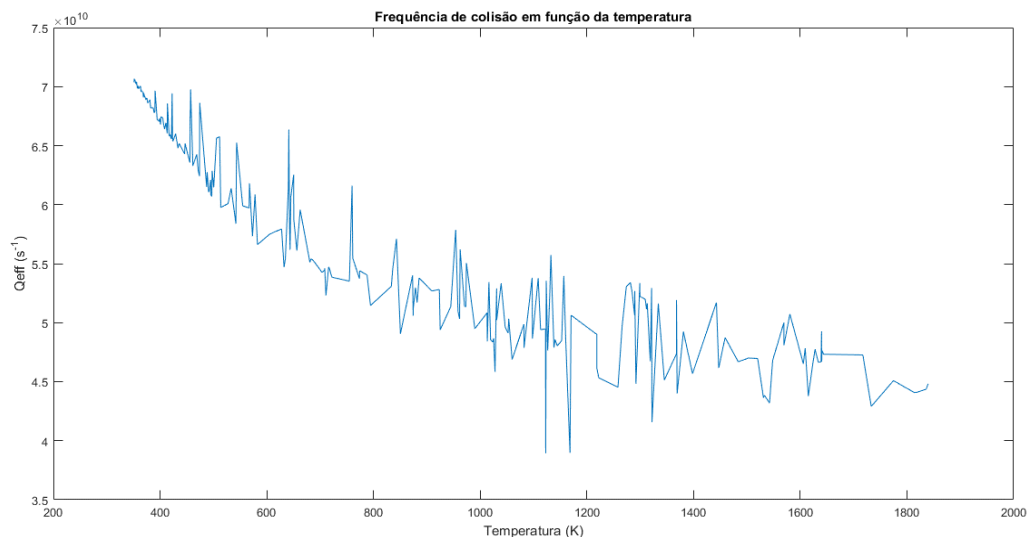


Figura 5.6: Frequência de colisão em função do valor da temperatura.

5.5 Variação do calor de combustão

O calor de combustão é um parâmetro utilizado para definir o tipo de combustível utilizado, sendo no cenário em causa constituído por celulose. Foram efetuadas diversas simulações variando-se diferentes valores para o calor de combustão. Os valores presentes na Tabela 5.1 indicam os valores simulados. A taxa de calor libertada por unidade de área (HRRPUA) considerada na modelação do fogo foi de 20100 kW/m^2 para uma área do incêndio de 20 m^2 .

Tabela 5.1: Diferentes valores para o calor de combustão.

Calor de combustão (kJ/kg)	Taxa de calor libertado	
11020	HRRPUA = 2500 kW/m ² , 15000 kW/m ²	[5]
12600	HRR (máximo) = 330 kW/m ²	[32]
15000		
17700	HRRPUA = 260 kW/m ² e HRR = 26 ± 2.6 MW	[33]

Com base na Figura 5.7, verifica-se que dos 80 *slices* considerados no eixo dos *yy* para extrair os valores de interesse, aquele onde a atenuação por metro é mais elevada corresponde ao *slice* número 49. Essa atenuação é atingida a uma distância de 2.125 m do centro do cenário Figura 5.8.

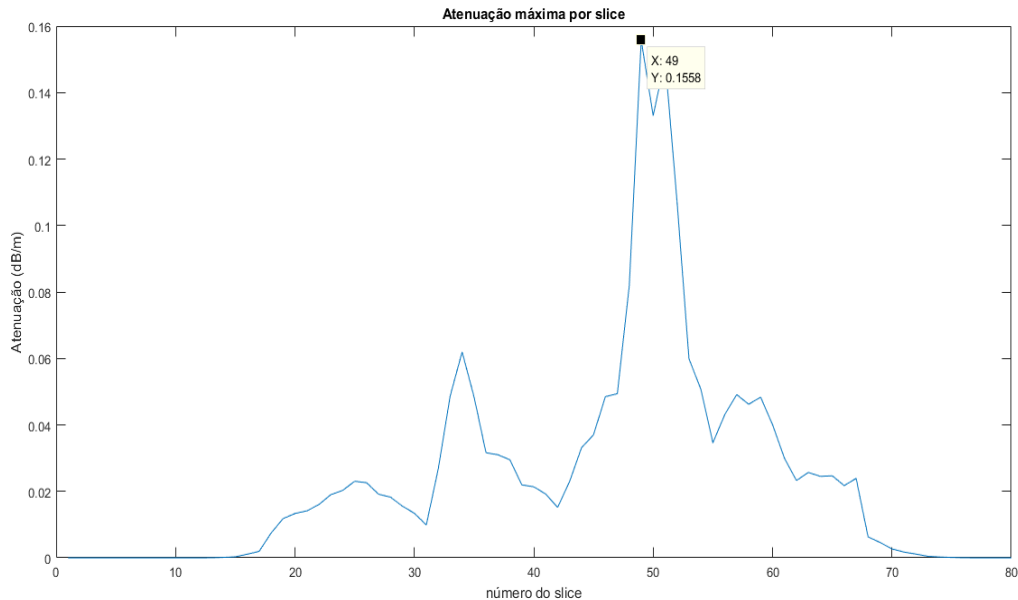


Figura 5.7: Atenuação máxima por *slice* com um Calor de Combustão: 11020 kJ/kg.

Os resultados foram obtidos para um valor de calor de combustão igual a 11020 kJ/kg. Este valor corresponde ao utilizado pelo exemplo utilizado em [5] para um cenário de pequena dimensão implementado.

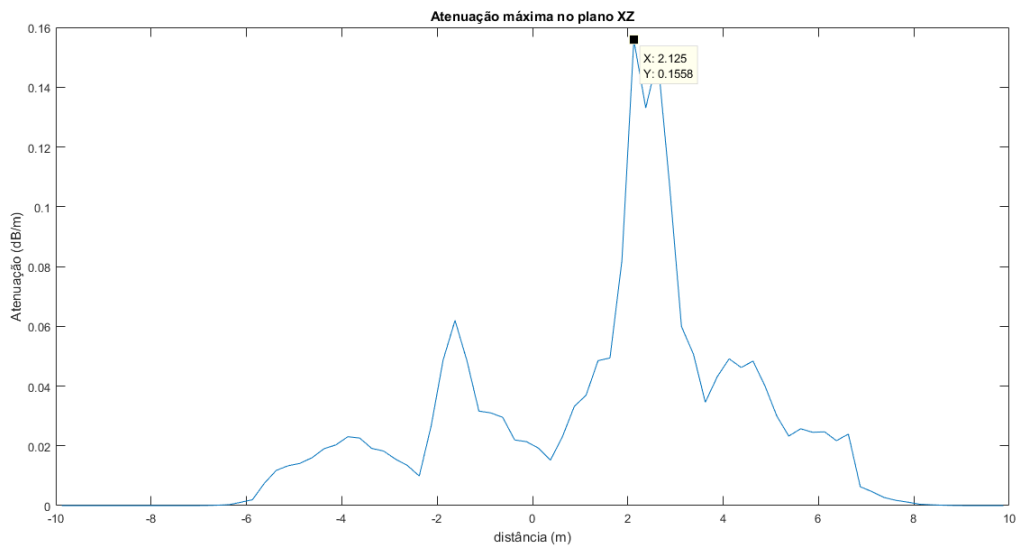


Figura 5.8: Atenuação máxima no plano XZ com um Calor de Combustão: 11020 kJ/kg.

Na Figura 5.9, representam-se os valores da temperatura, densidade de eletrões, frequência de colisão, atenuação e o desvio de fase, no plano XZ. Considerou-se o *slice* número 40, o que corresponde ao ponto central do cenário, ou seja 0 m. O tempo de amostragem foi aos 97 s.

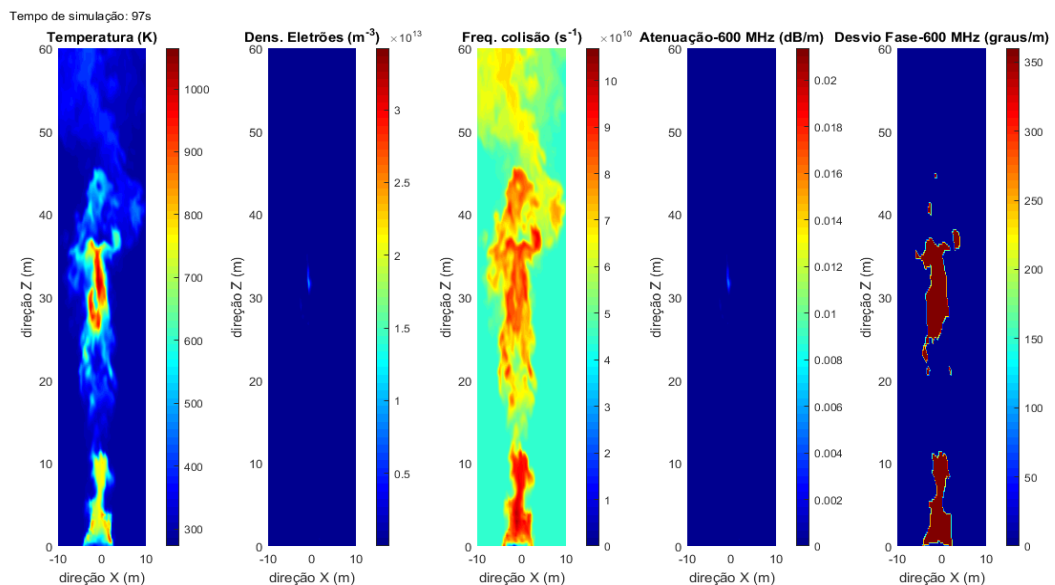


Figura 5.9: Calor de Combustão de 11020 kJ/kg no *slice* número 40.

Observa-se que a densidade de eletrões está fortemente dependente da temperatura. O mesmo se nota com a atenuação, que depende da densidade de eletrões presente. Com um calor de combustão de 11.02×10^3 kJ/kg, a atenuação apresenta um valor reduzido, pois os

valores de temperatura máximos obtidos são também eles reduzidos. No caso do desvio de fase, este é influenciado pela velocidade da frequência de colisão.

Considerando um cenário em que o calor de combustão é de 12.6×10^3 kJ/kg, o valor da atenuação máxima obtida foi de 4.9 dB/m, para o *slice* número 40. À medida que o calor de combustão aumenta, também a temperatura máxima aumenta, repercutindo-se essa situação na subida da atenuação obtida. O *slice* que registou uma maior atenuação corresponde ao número 43, com 11.66 dB/m.

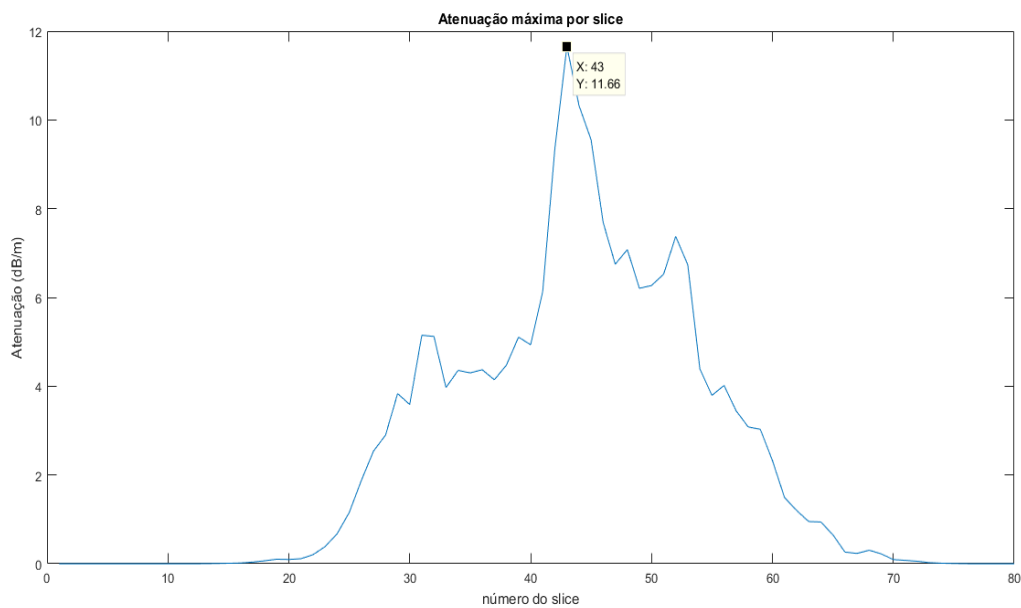


Figura 5.10: Atenuação máxima por *slice* com um Calor de Combustão de 12600 kJ/kg.

A Figura 5.11 mostra os resultados obtidos para um calor de combustão de 12.6 kJ/kg, e permite concluir que o valor da temperatura máxima aumentou face aquela onde foi utilizado um valor de 11.02 kJ/kg, levando a que quer a densidade de eletrões, quer a atenuação também tenham sofrido aumentos. Também se regista um aumento na velocidade de colisão.

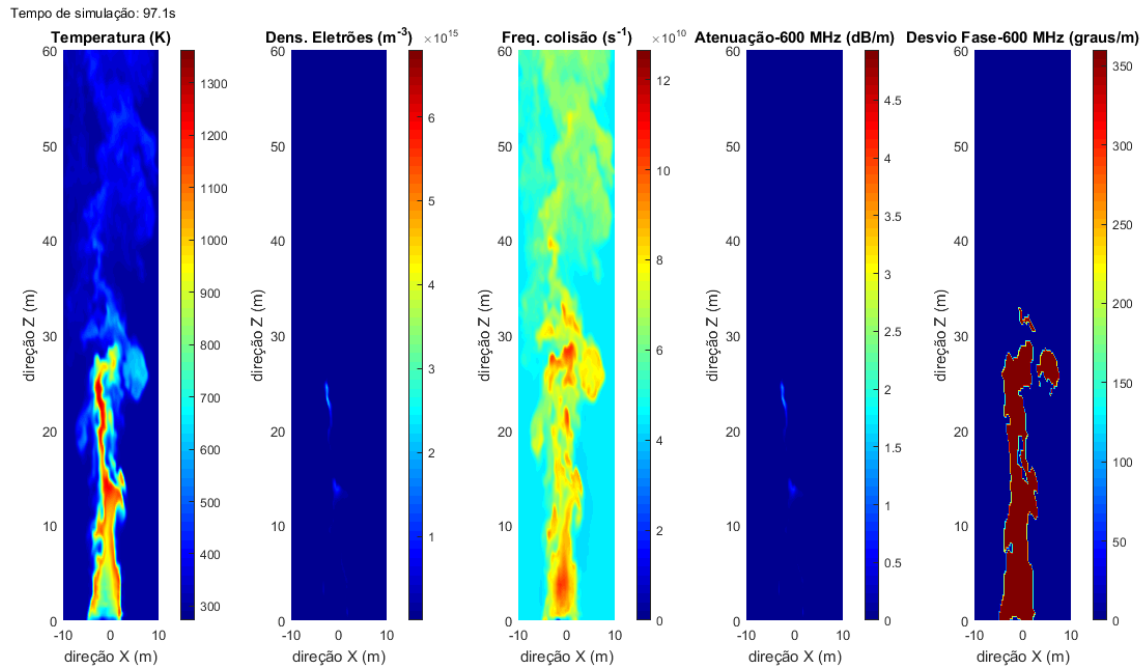


Figura 5.11: Calor de Combustão de 12600 kJ/kg.

Para um calor de combustão de 15000 kJ/kg, o valor da atenuação máxima foi de 111.6 dB/m, e esse valor foi obtido para o *slice* número 39, como se observa na Figura 5.12.

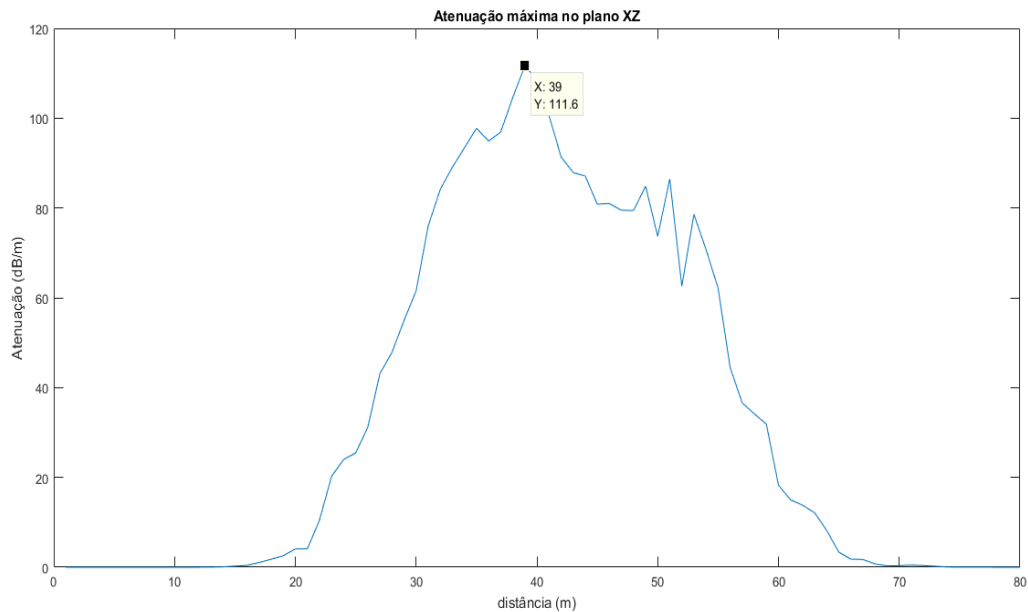


Figura 5.12: Atenuação máxima por *slice* com um Calor de Combustão: 15000 kJ/kg.

Na Figura 5.13, verifica-se que a atenuação está dependente do valor da densidade de eletrões, sendo que esta é maior na zona de combustão onde a temperatura é maior. A temperatura neste *slice* atinge o valor de 1600 K.

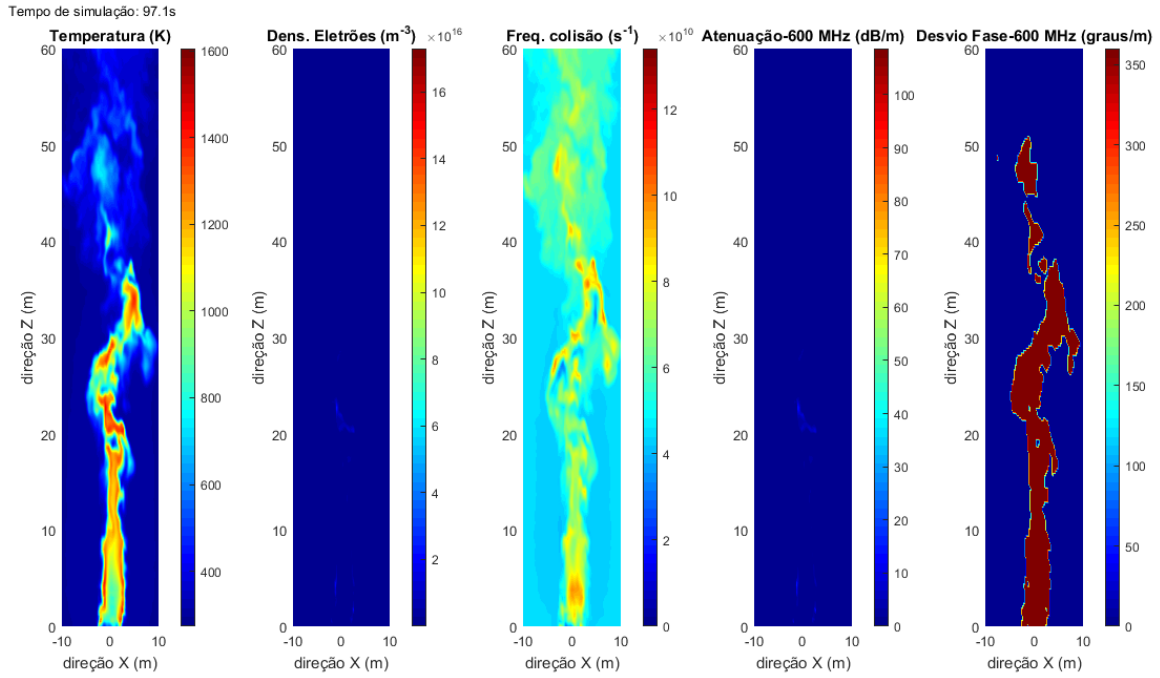


Figura 5.13: Calor de Combustão de 15000 kJ/kg.

A Figura 5.14 mostra que para um calor de combustão de 17700 kJ/kg, a temperatura pode atingir valores de 1800 K, levando a que a densidade de eletrões seja bastante elevada, e o seu valor pode atingir máximos na ordem de $10^{18} m^{-3}$. O desvio de fase é também mais elevado na zona em que a densidade de eletrões é mais elevada.

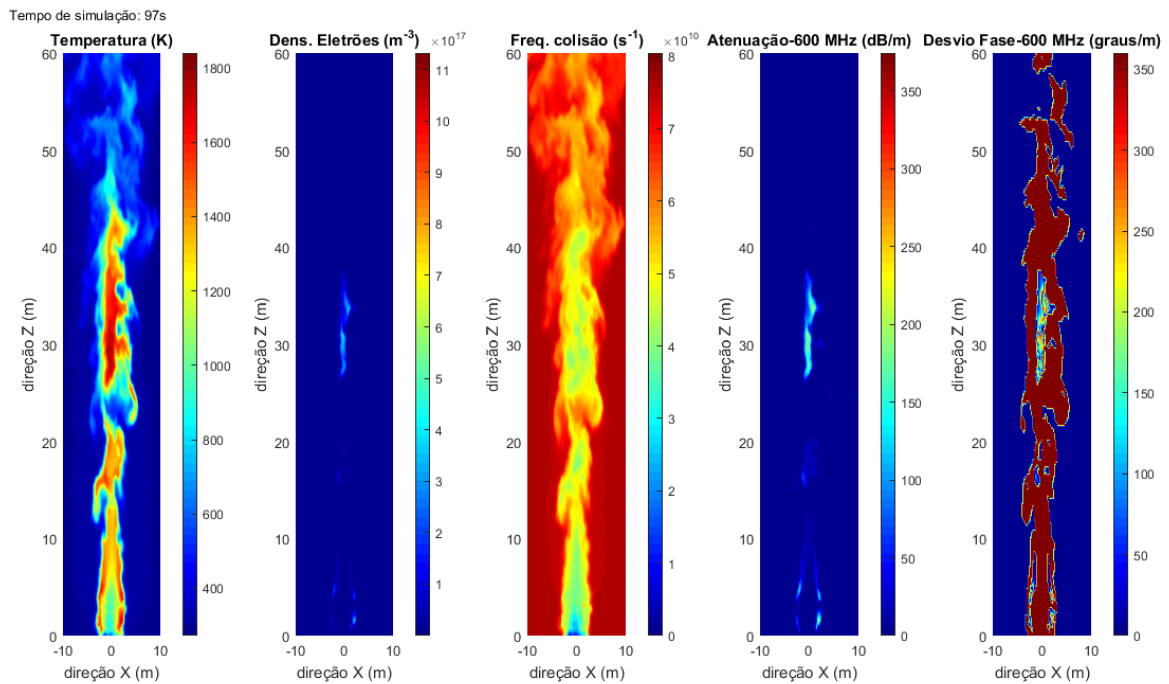


Figura 5.14: Calor de Combustão de 17700 kJ/kg.

A Figura 5.15 ilustra que a atenuação aumenta em função do calor de combustão. A atenuação máxima foi calculada no *slice* número 40 para as 4 simulações.

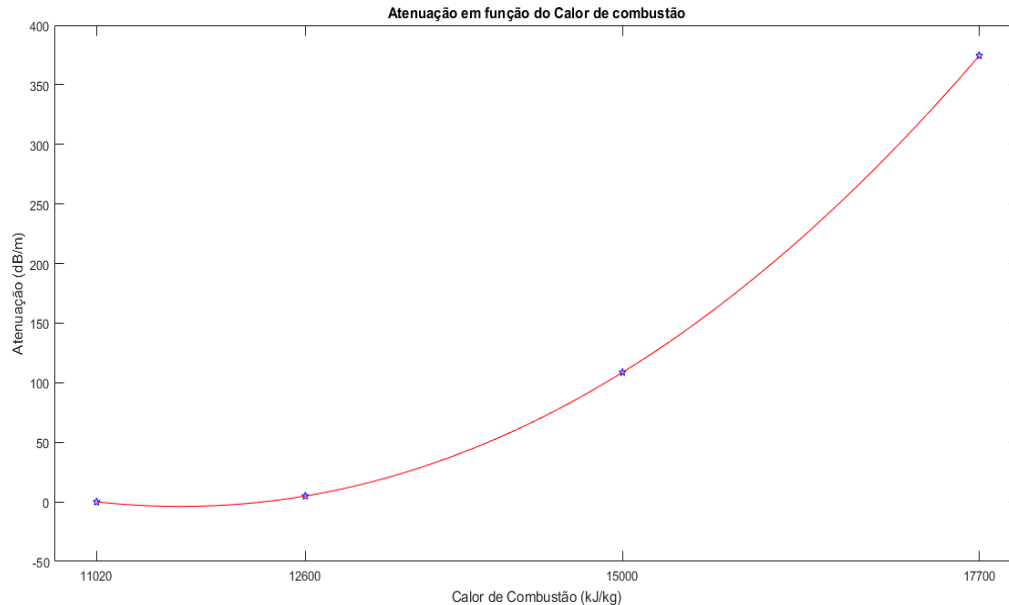


Figura 5.15: Variação da atenuação em função do calor de combustão – *slice* 40.

Na Tabela 5.2, é possível verificar como o calor de combustão influencia a temperatura, a densidade de elétrons e a velocidade de colisão, e, conseqüentemente, o impacto que esses valores têm na atenuação das ondas rádio. Os valores apresentados consistem nos valores máximos obtidos para o *slice* número 40, ou seja, o ponto médio do cenário. Pode-se confirmar que o aumento da temperatura provoca um aumento na densidade de elétrons, ao mesmo tempo diminui a velocidade de colisão, o que contribui para o aumento da atenuação.

Tabela 5.2: Valores máximos obtidos para o *slice* n°40

Calor de Combustão (kJ/kg)	Temperatura (K)	Densidade de elétrons (m^{-3})	Velocidade de colisão (s^{-1})	Atenuação (dB/m)
11020	1065	3.4×10^{13}	1.07×10^{11}	0.02
12600	1363	6.8×10^{15}	1.26×10^{11}	4.93
15000	1605	1.7×10^{17}	1.34×10^{11}	108.6
17700	1840	1.13×10^{18}	8.05×10^{10}	374.5

Na Tabela 5.4 são apresentados os valores obtidos por Boan para o modelo de simulação de um incêndio a escala pequena que implementou. Em ambos os modelos, a percentagem dos valores dos metais alcalinos (K, Ca, Mg) utilizados foram iguais, assim como o tipo de pirólise rápida. Se comparamos os valores obtidos do modelo apresentado neste estudo,

como o modelo de Boan, verificamos que para uma temperatura de 1064 K, a atenuação registada foi de 0.02 dB/m, tendo sido calculada uma densidade de eletrões de $3.42 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ e a frequência de colisão de $7.3 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$. Boan, fixou a velocidade de colisão em $1 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$, e para uma temperatura de 1100 K, registou uma densidade de eletrões de $1.3 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ e a atenuação foi de 0.06 dB/m.

Tabela 5.3: Valores obtidos Atenuação da Temperatura, Ne, φ_{eff} , desvio de fase

Calor de Combustão (kJ/kg)	Atenuação (dB/m)	Temp. (K)	Densidade de eletrões (m^{-3})	Velocidade de colisão (s^{-1})	Desvio fase (graus/m)	Tempo (s)	Slice
11020	0.02	1061	3.42×10^{13}	7.3×10^{10}	360	112	40
11020	0.16	1161	2.43×10^{14}	7.15×10^{10}	360	94	49
12600	4.93	1322	6.8×10^{15}	6.3×10^{10}	358.8	131	40
12600	11.6	1381	1.56×10^{16}	6.1×10^{10}	359.3	73	43
15000	108.6	1575	1.7×10^{17}	5.4×10^{10}	247	76	40
17700	374.5	1810	1.13×10^{18}	4.2×10^{10}	201.1	122	40

Comparando os dados da Tabela 5.3 com os da Tabela 5.4 (modelo de Boan), pode-se concluir que a ordem de grandeza da densidade de eletrões é idêntica para valores idênticos da temperatura. No entanto a atenuação é ligeiramente maior no modelo concebido, uma vez que considera que a velocidade de colisão não é constante, mas que varia com a temperatura, e diminui com o aumento da temperatura. Deste modo, consegue-se uma aproximação convergente entre ambos os modelos.

Tabela 5.4: Resultados Boan [5] para uma φ_{eff} de 1×10^{11} – Planta Eucalipto (0.9% K, 0.82% Ca, 0.28% Mg) – Pirólise rápida (II K = 100% II Ca = 20% II Mg = 40%)

Temperatura	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700
Ne $\times 10^{15} \text{ m}^{-3}$	0.13	0.95	5.0	21.5	75.1	225	595
Atenuação (dB m^{-1})	0.06	0.4	2.3	9.8	33.4	84	159

5.6 Variação da quantidade de metais alcalinos

A variação da quantidade dos metais alcalinos, e a sua repercussão no valor da atenuação está representada nas Figuras 5.16, 5.17 e 5.18. Podemos visualizar na Figura 5.16, que o potássio é o metal alcalino que mais influencia a atenuação. Isto justifica-se pelo facto de ter um potencial de ionização inferior aos outros metais.

A variação na percentagem do cálcio e magnésio não apresenta impacto na atenuação.

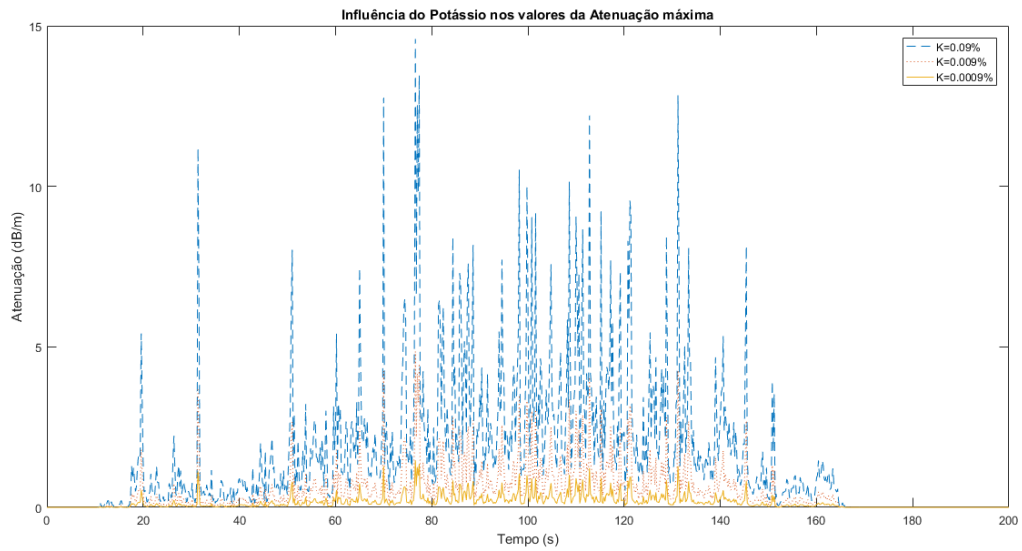


Figura 5.16: Atenuação em função da variação do potássio (K).

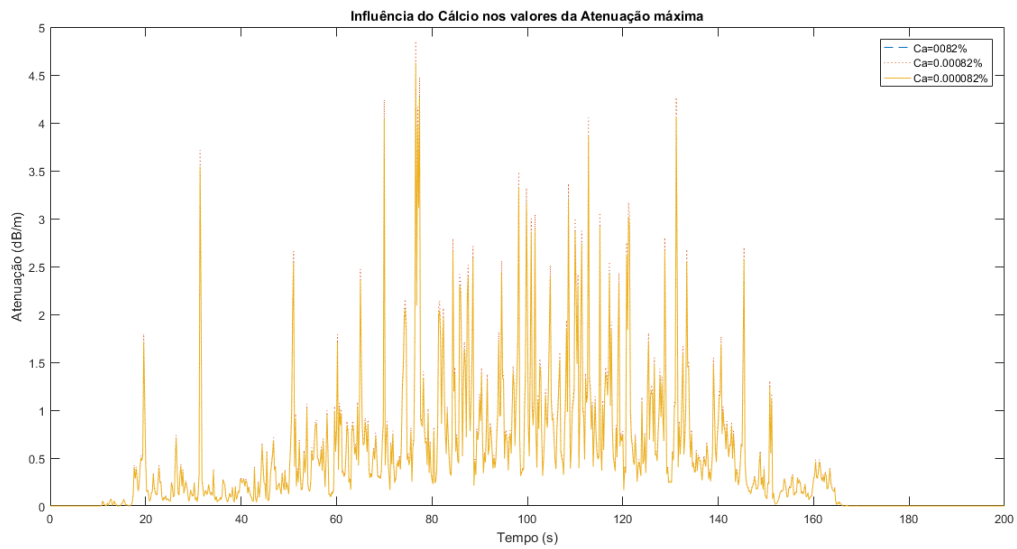


Figura 5.17: Atenuação em função da variação do Cálcio (Ca).

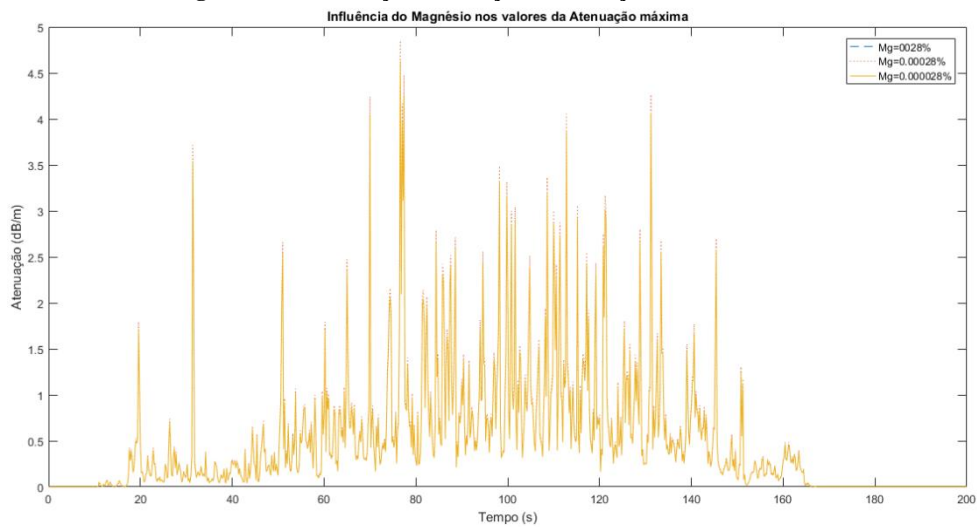


Figura 5.18: Atenuação em função da variação do Magnésio.

5.7 Modificação do tipo de pirólise

O tipo de pirólise influencia a atenuação. Para uma pirólise lenta, menor será a quantidade de materiais alcalinos que são colocados na zona de ionização, logo a densidade de elétrons será menor, assim como a atenuação. Na Figura 5.19 observa-se que para uma pírolise rápida a atenuação é maior quando comparada com a pirólise do tipo lenta.

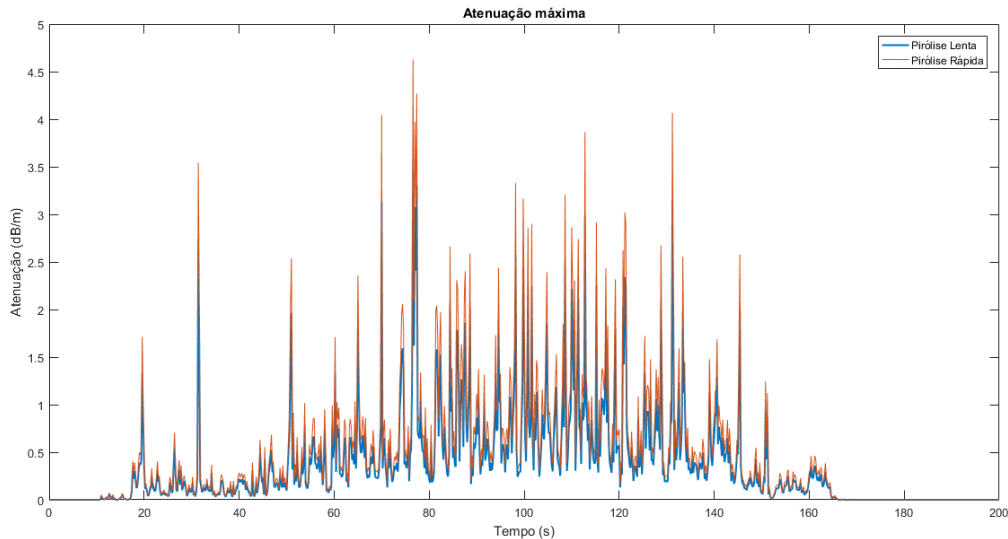


Figura 5.19: Atenuação e tipo de pirólise.

5.8 Variação da frequência

Para a simulação que utiliza o valor de combustão igual a 12.6 kJ/kg, foi calculada a atenuação máxima no *slice* número 40. As frequências escolhidas foram as seguintes: 380 MHz a utilizada pelos serviços de emergência; 600 MHz, utilizada por Boan; 900 MHz utilizada pelos serviços GSM. Os resultados mostram que a atenuação não varia para as frequências de 380 MHz, 600 MHz e 900 MHz, no entanto para a frequência de 5 GHz a atenuação apresenta uma redução.

Tabela 5.5: Atenuação em função da frequência

Frequência (MHz)	Atenuação (dB/m)
380	4.6303
600	4.6273
900	4.6102
5000	3.7650

5.9 Variação da taxa de libertação de calor

A Figura 5.21 mostra os resultados obtidos para uma simulação configurada com um calor de combustão de 17700 kJ/kg, e com uma taxa de libertação de calor por unidade de área de 2500 kW/m². Comparando estes resultados com os da Figura 5.14, cujo valor da taxa de libertação de calor usada foi de 20100 kW/m², verifica-se que não existe uma alteração significativa no valor da atenuação obtida. No entanto, estes resultados mostram que a densidade de eletrões é ligeiramente menor e a frequência de colisão dos eletrões é maior. Comparando ambas as figuras, verifica-se a influência que o aumento da temperatura se traduz no aumento do desvio de fase. Variando a taxa de libertação de calor de 260 kW/m² para 350 kW/m² provoca um aumento considerável na atenuação máxima tal como ilustrado na Figura 5.20.

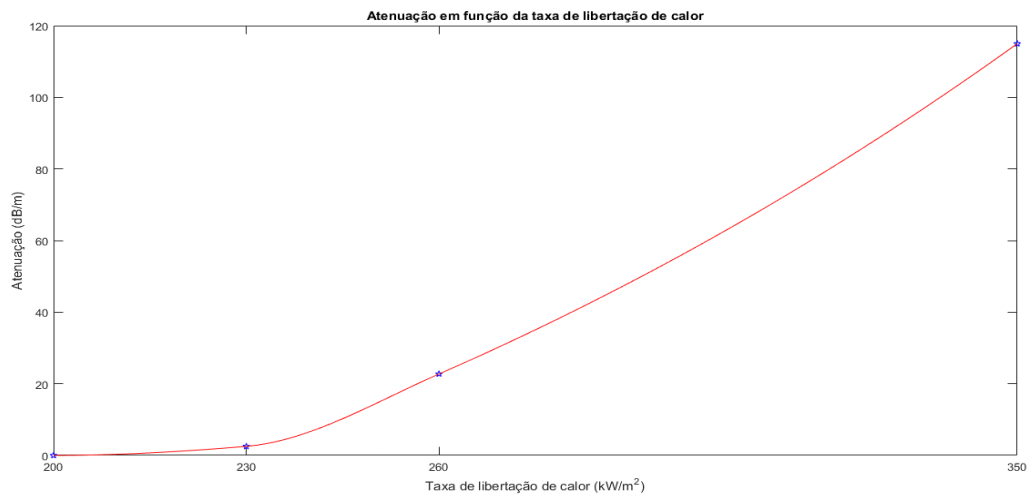


Figura 5.20: Variação da taxa de libertação de calor (taxa máxima de 350 kW/m²) - slice 40.

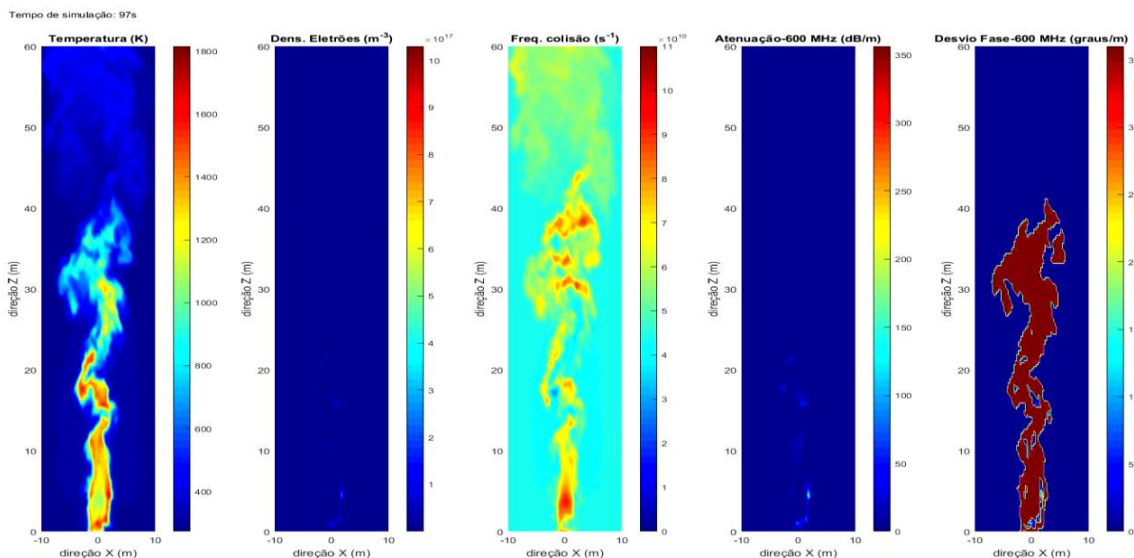


Figura 5.21: Calor de Combustão 17700 kJ/kg e taxa de libertação de calor por unidade de área de 2500 kW/m².

Para uma taxa de libertação de calor superior a 350 kW/m^2 a temperatura é superior a 1600K . A Figura 5.22 mostra que uma alteração significativa na taxa de 2500 kW/m^2 para 20100 kW/m^2 tem implicações reduzidas no valor da temperatura máxima obtida.

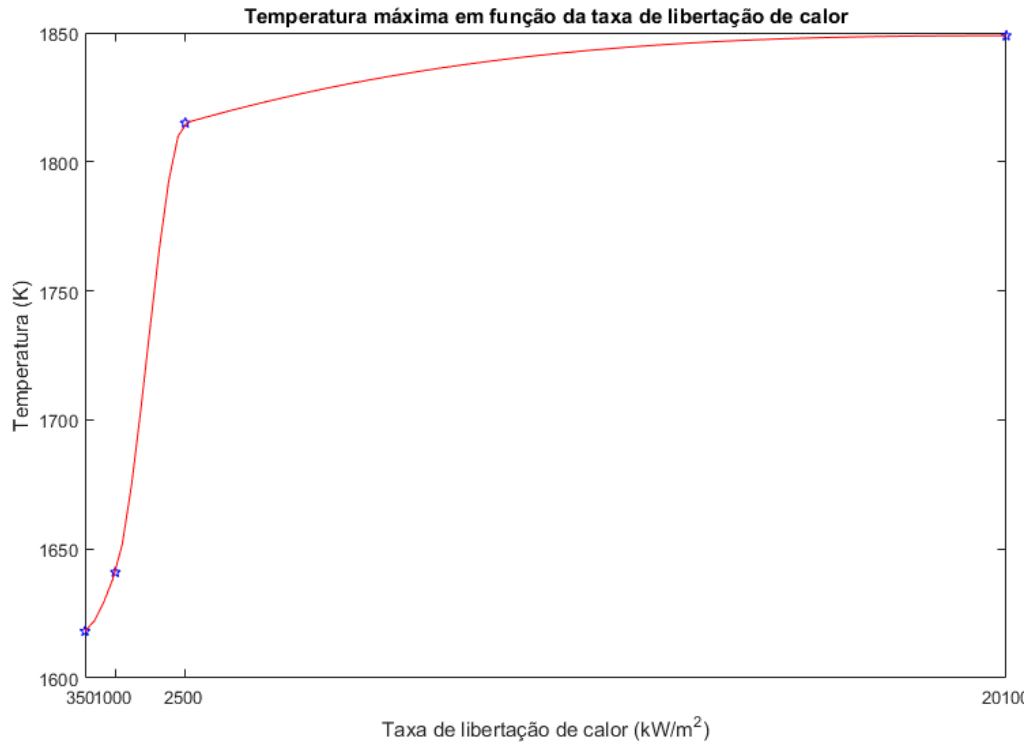


Figura 5.22: Temperatura máxima em função da taxa de libertação de calor (taxa máxima de 2500 kW/m^2).

Na Figura 5.23 visualiza-se que uma ligeira variação na taxa de libertação de calor tem implicações diretas no valor máximo da temperatura obtida.

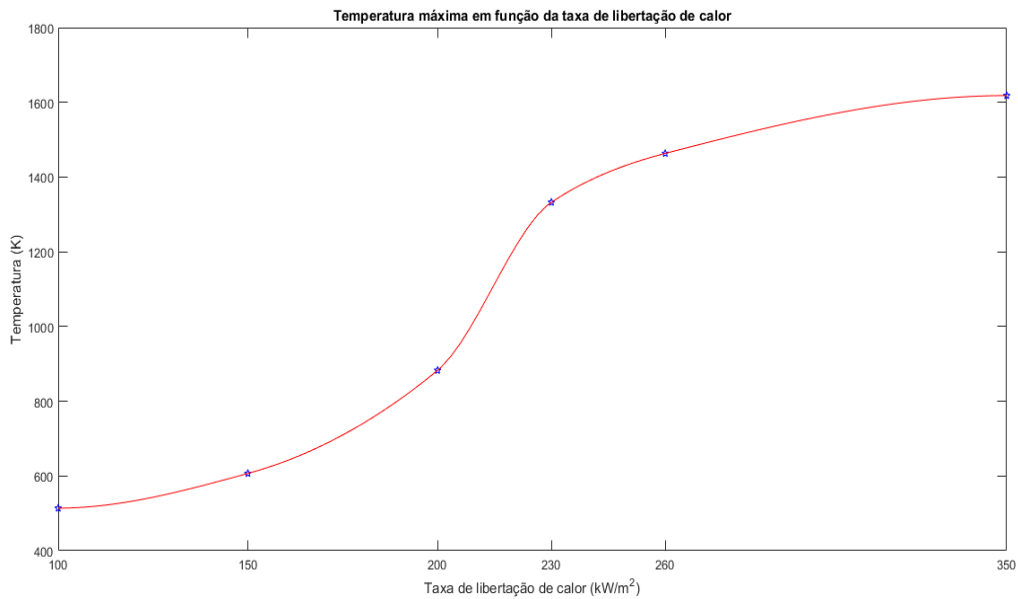


Figura 5.23: Temperatura máxima em função da taxa de liberação de calor (taxa máxima de 350 kW/m²).

A taxa de liberação de calor tem, no entanto, um impacto significativo no tempo de duração da simulação no FDS.

5.10 Variação da densidade da vegetação

Na Tabela 5.6, são apresentados valores calculados para a atenuação, tendo sido alterada a densidade, a percentagem de celulose e de água do material combustível. Nas simulações apresentadas anteriormente foi utilizada uma vegetação com densidade de 600 kg/m³, formada por 97% de celulose e 0.01% de vapor de água (H₂O). O tipo de planta é eucalipto formado por K 0.9%, Ca 0.82% e Mg 0.28% [5]. Alterando esses valores para uma densidade de 514 kg/m³, com 84% de celulose e 0.16 de água [33] verifica-se que o valor de atenuação aumenta. Quando existe um aumento da densidade da vegetação, a temperatura, densidade de elétrons e atenuação diminuem. A velocidade de colisão permanece praticamente inalterada. Um aumento da quantidade de celulose implica um aumento da concentração de metais alcalinos e conseqüente aumento da atenuação. A redução da percentagem de água na vegetação provoca um aumento na temperatura obtida e densidade de elétrons. Além disso, essa redução, provoca ainda que ligeira uma diminuição na frequência de colisão.

Tabela 5.6: Atenuação em função da densidade e composição química da vegetação.

Taxa de libertação de calor (kW/m ²)	ρ (kg/m ³)	Celulose (%)	H ₂ O (%)	Temperatura Máxima (K)	Ne (m ⁻³)	φ_{eff} (s ⁻¹)	Atenuação dB/m
230	600	86	14	1212	8.15×10^{14}	6.73×10^{10}	0.6
230	514	86	14	1332	3.18×10^{15}	5.78×10^{10}	2.5
260	514	86	14	1463	2.59×10^{16}	5.18×10^{10}	22.7
230	514	86	1	1464	3.29×10^{16}	5.46×10^{10}	27.2
260	514	97	1	1669	2.28×10^{17}	5.21×10^{10}	134
260	600	97	1	1640	2.07×10^{17}	5.04×10^{10}	128.6

5.11 Cálculo da atenuação total

Na Figura 5.24, visualiza-se a atenuação total obtida para a simulação realizada com um calor de combustão de 11020 kJ/kg. Nos pontos onde a temperatura é mais elevada é onde se regista um maior valor de atenuação total. A Figura 5.25 mostra a atenuação total obtida para a simulação que utilizou um calor de combustão de 12600 kJ/kg. O calor de combustão é um parâmetro que aumenta a temperatura e conseqüentemente a atenuação total será maior.

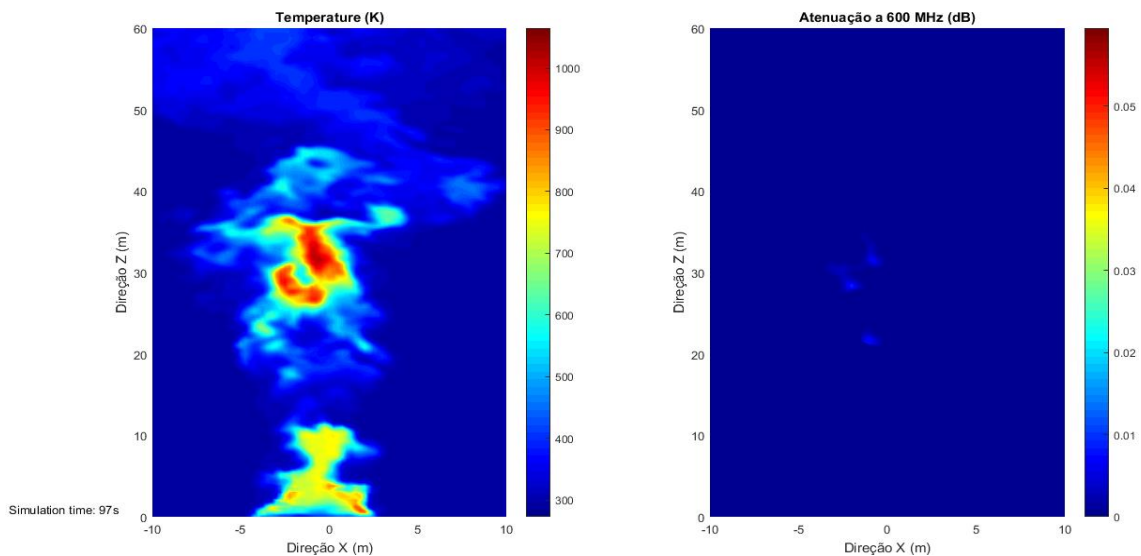


Figura 5.24: Atenuação total para um calor de combustão de 11020 kJ/kg.

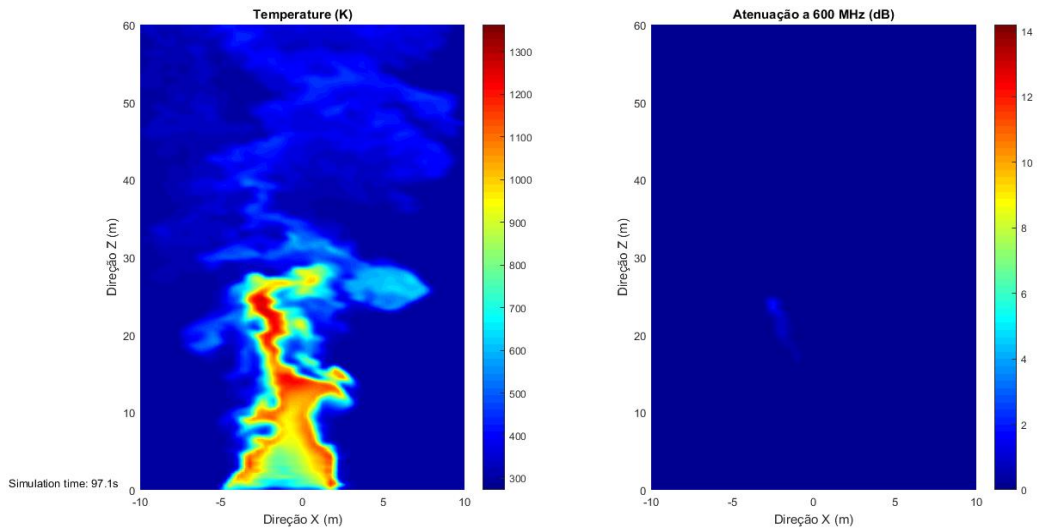


Figura 5.25: Atenuação total para um calor de combustão de 12600 kJ/kg.

A atenuação máxima total é atingida no tempo em que a densidade de elétrons e temperatura é máxima e a velocidade de colisão atinge o seu valor mínimo. O seu valor varia ao longo da simulação como pode ser observado na Figura 5.26.

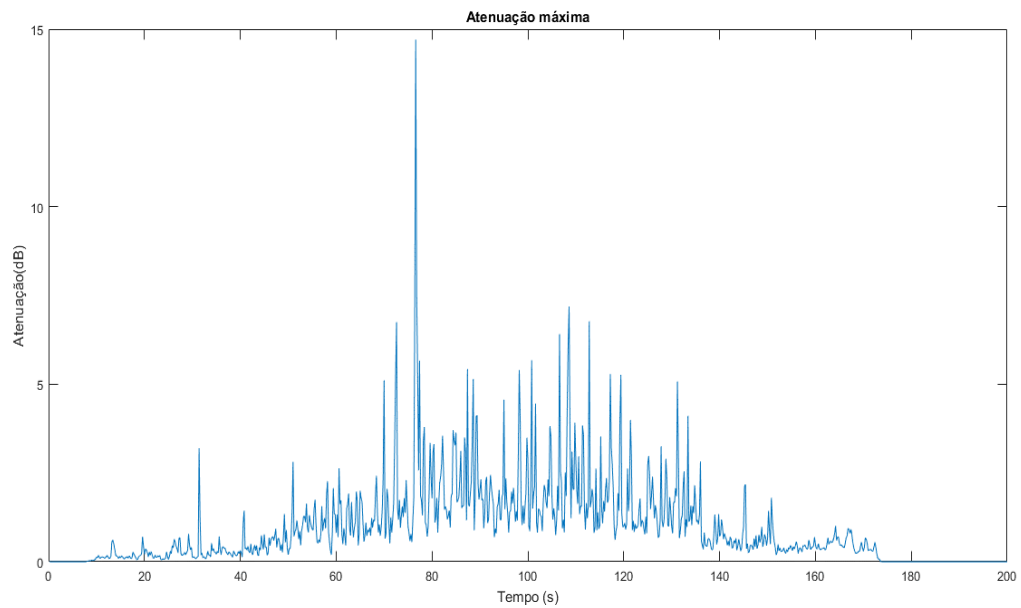


Figura 5.26: Atenuação total máxima ao longo do tempo – slice número 40.

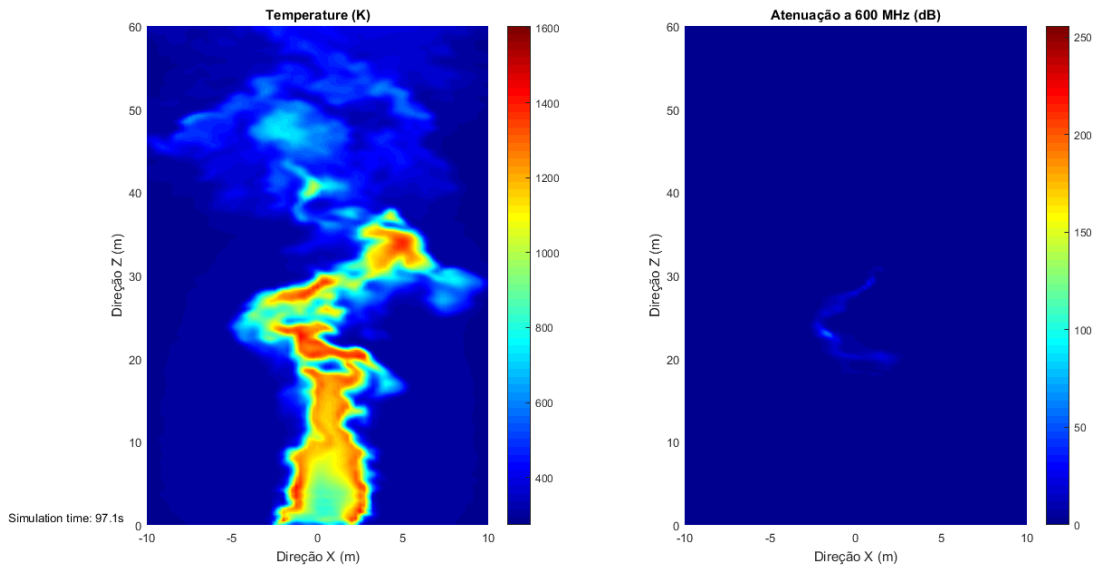


Figura 5.27: Atenuação total para um calor de combustão de 15000 kJ/kg.

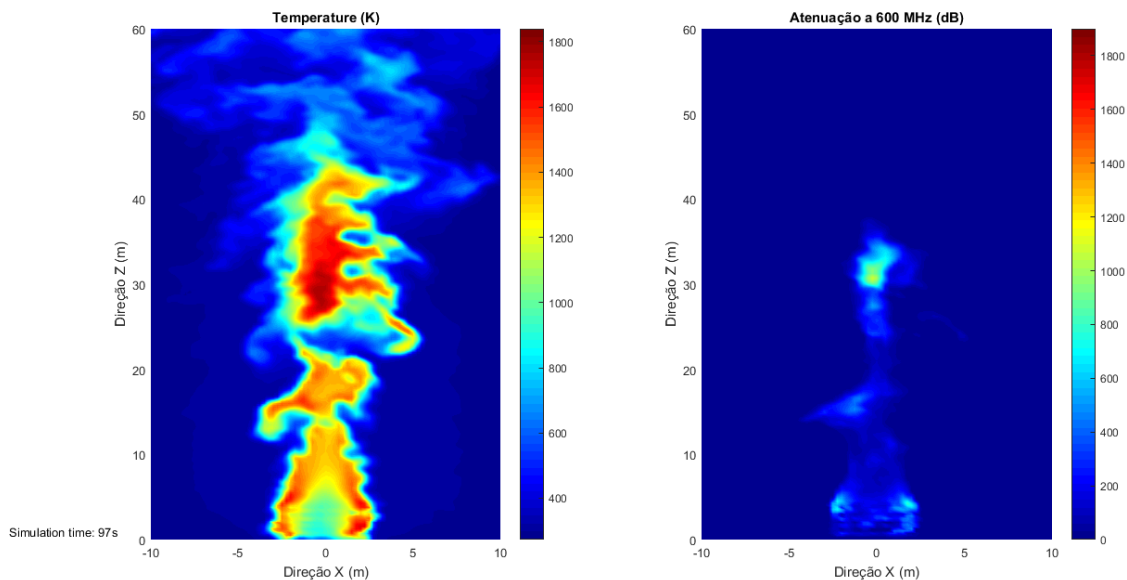


Figura 5.28: Atenuação total para um calor de combustão de 17700 kJ/kg.

A rede SIRESP estipula um nível de sinal mínimo, em condições ideais, nas vias de comunicação de -103 dBm. Em condições não ideais há que considerar atenuações adicionais de 10-20 dB. No incêndio de Pedrogão Grande, é referido que em 20% dos locais é elevada a probabilidade de o nível de sinal recebido no terminal móvel ser inferior a -93 dBm [9]. Adicionando ainda as perdas adicionais de 14 dB provocadas pelo incêndio implicará uma redução de probabilidade de cobertura significativa da rede SIRESP no teatro de operações.

5.12 Análise Estatística através da Função Distribuição Acumulada

Para o cenário de 12.6 kJ/kg de calor de combustão, verifica-se que o valor da mediana é igual a 0.57 dB, ou seja a probabilidade da atenuação ser inferior ou superior a 0.57 dB é a mesma, ou seja de 50%, tal como está patente na Figura 5.29.

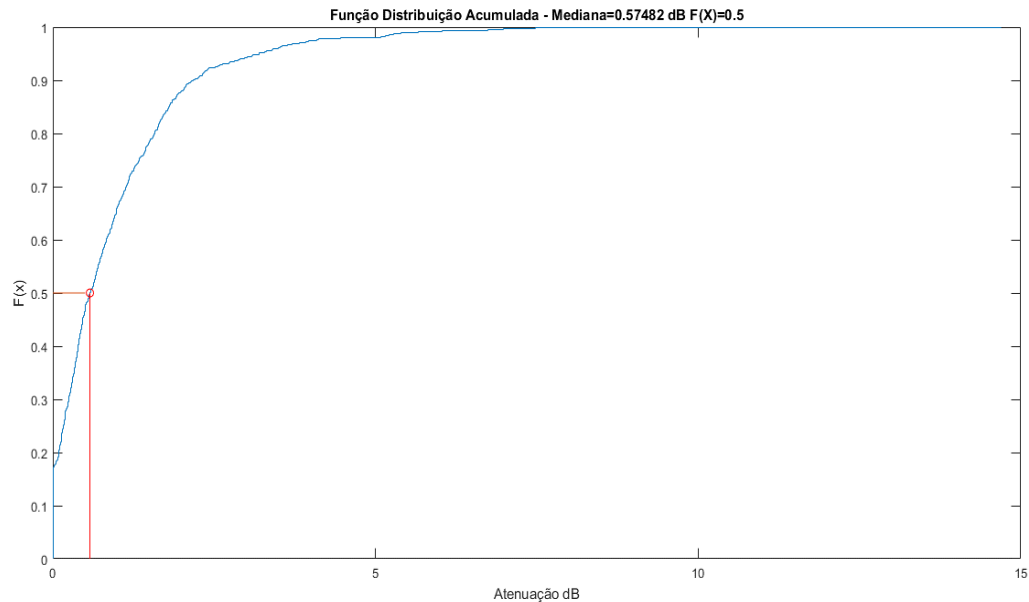


Figura 5.29: Função distribuição acumulada – mediana.

A média da atenuação é de 0.95 dB, e a probabilidade de uma amostra inferior à média é de 64%, sendo de 36% a probabilidade de uma amostra ser superior à média, como se indica na Figura 5.30.

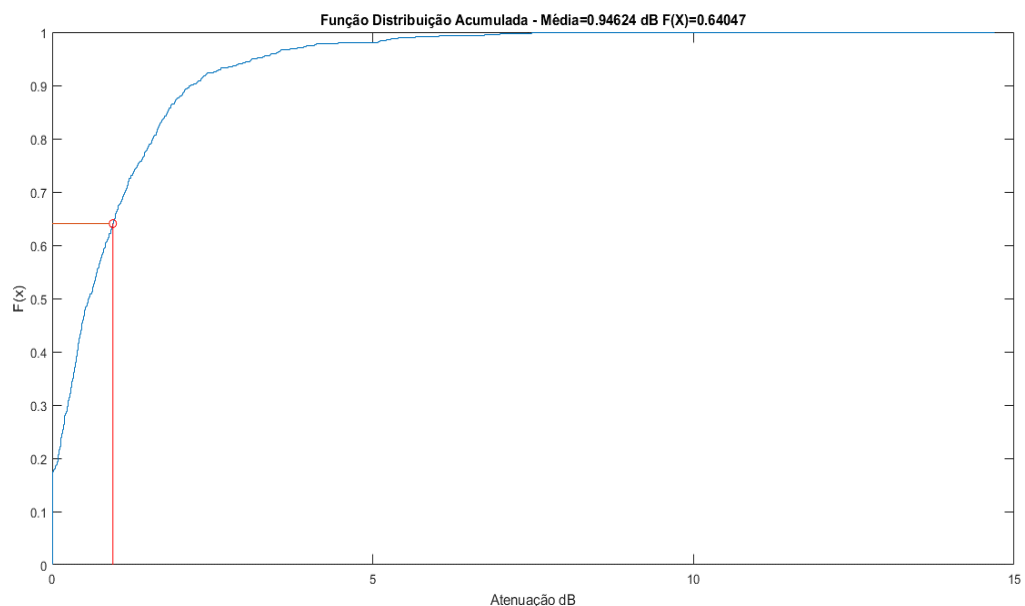


Figura 5.30: Função distribuição acumulada – média.

A probabilidade da atenuação estar abaixo de 3 dB é de 94%, tal como está patente no gráfico da Figura 5.31.

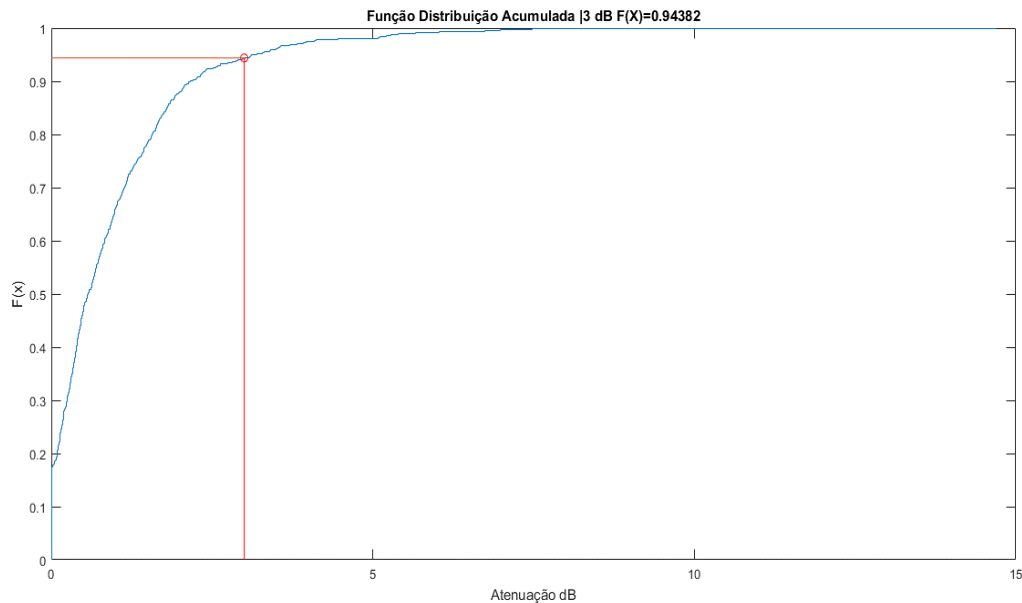


Figura 5.31: Função distribuição acumulada – 3dB.

5.13 Conclusões interinas

A temperatura é um fator determinante no valor da atenuação das ondas eletromagnéticas obtida. Para temperaturas acima de 1000 K, já se começa a verificar atenuação, embora que ainda ligeira. A partir de 1300 K a atenuação aumenta significativamente, devido ao facto de aumentar a concentração de eletrões na zona de combustão. A frequência de colisão desce ligeiramente com o aumento da temperatura, sendo que os valores obtidos variam entre $4 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ e $7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$. Os parâmetros de entrada que afetam a temperatura são o calor de combustão e a taxa de libertação de calor.

A percentagem de metais alcalinos na vegetação tem influência direta na população de eletrões, sendo o potássio o elemento crucial para a formação da densidade de eletrões. Também a densidade da planta tem influência no aumento da atenuação, sendo que o aumento da atenuação está relacionado com a diminuição da densidade da planta. A percentagem do combustível, ou seja, o aumento da celulose no combustível também tem implicações no aumento da atenuação.

Nas frequências de 380 MHz, 600 MHz, 900 MHz, os resultados mostram que a atenuação praticamente não sofre alterações. Para a frequência de 5 GHz, os resultados mostram uma diminuição no valor da atenuação.

Para uma temperatura de 1322 K, obtêm-se uma densidade de elétrons de $6.8 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ e frequência de colisão de $6.3 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$, a atenuação obtida foi de 4.93 dB/m. Considerando-se que o sinal atravessa um tronco de madeira em chamas com 7 m de comprimento, e atingindo um valor máximo de temperatura de 1322 K, a atenuação total obtida é de aproximadamente 14 dB.

O desvio de fase também aumenta com a temperatura, sendo os resultados mais notórios a partir de temperaturas acima de 1300 K.

6. Conclusões

6.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido. Este capítulo está dividido em dois subcapítulos: revisão de dissertação e limitações do estudo e propostas para um trabalho futuro.

6.2 Resumo dos resultados

Neste trabalho foi apresentado um modelo numérico para a caracterização de ondas eletromagnéticas na presença de fogo.

No Capítulo 1 foram apresentados os objetivos e motivações que levaram à elaboração deste trabalho de investigação. Também é apresentada o modo como está estruturada esta dissertação.

De modo a serem alcançados os objetivos propostos, no Capítulo 2, iniciou-se com o estudo dos fenómenos que caracterizam a propagação de ondas eletromagnéticas em cenários de incêndio. A atenuação está diretamente relacionada com a densidade de eletrões e a frequência de colisão entre os eletrões livres e as partículas do plasma, sendo proporcional e inversamente proporcional à N_e e φ_{eff} respetivamente.

No Capítulo 3 foi apresentada a revisão da literatura, tendo sido apresentados os modelos numéricos e experimentais utilizados por Boan e Mphale para o cálculo da atenuação.

No Capítulo 4 foi descrita a metodologia utilizada na aplicação do modelo numérico que caracteriza a propagação em cortinas de fogo e com recurso a uma *framework* são apresentados os valores para a temperatura, densidade de eletrões, frequência de colisão, os resultados da atenuação e o desvio de fase para uma dada frequência utilizando um cenário de pequena escala. Com recurso ao FDS foi definido o cenário, os parâmetros de entrada e de saída necessários para o modelo em estudo, visando o cálculo da atenuação e o desvio de fase. Neste capítulo foi realizada a descrição dos procedimentos para obtenção da densidade de eletrões, da frequência de colisão, atenuação e desvio de fase.

No Capítulo 5 foram mostrados e analisados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas no FDS. Foi possível constatar que a temperatura, assim como a quantidade de

material alcalino presente na vegetação influenciam consideravelmente a densidade de elétrons. A atenuação está fortemente dependente da densidade de elétrons. Os incêndios cuja temperatura atinja valores muito elevados irão criar uma densidade de elétrons extremamente alta, o que conseqüentemente representa um aumento significativo da atenuação das ondas eletromagnéticas. O conteúdo das plantas, no que se refere à quantidade dos metais alcalinos, também tem uma influência na densidade de elétrons produzida. O potássio apresenta um potencial de ionização muito baixo, levando que os elétrons entrem facilmente na zona de combustão, contribuindo também para o aumento da atenuação.

A frequência de colisão está diretamente relacionada com as densidades dos gases das espécies do coberto vegetal e diminui com o aumento da temperatura.

O desvio de fase está também fortemente dependente da temperatura, sendo notório para temperaturas superiores a 1300 K.

Utilizando-se um modelo de um incêndio a uma pequena escala, verificou-se que para uma temperatura de 1322 K, foi atingida uma atenuação de 4.93 dB/m. Para temperaturas entre os 1061 K e 1810 K, obteve-se uma densidade de elétrons entre $3.42 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ e $1.13 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ respectivamente e uma frequência de colisão que varia entre $4.2 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ e $7.3 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$. O desvio de fase varia entre os 358.8 e 201.1 graus/m. Constata-se que para o cenário em estudo, um incêndio cuja temperatura atinja 1300 K, a atenuação total ao longo do percurso pode atingir os 14 dB.

6.3 Limitações do estudo e trabalho futuro

As limitações deste trabalho, decorrem do facto de serem utilizadas células de tamanho reduzido nas simulações, sendo que o tempo de duração das simulações é elevado. Além disso, o processamento dos dados retirados a partir do FDS é um processo que exige grande capacidade de memória. Esse processamento teve de ser efetuado de forma gradual, não sendo possível processar os *slices* todos em simultâneo.

O cálculo da atenuação baseou-se no teorema de sobreposição, sendo que será necessária uma análise de onda completa (*e.g.* FDTD) ou uma análise numérica baseada em linhas de transmissão.

Como investigação futura, sugere-se um aprofundamento ao nível da modelação química do tipo de vegetação e a realização de simulações em função dessa caracterização. Seria também necessário desenvolver um modelo estatístico que represente o efeito da dinâmica

do fogo que se propaga em meios turbulentos. Posteriormente seria interessante a aplicação do modelo em cenários que possam representar um incêndio real, por exemplo numa floresta. Paralelamente, sugere-se a realização experimental dos cenários, através de ensaios reais com a realização progressiva de pequenos fogos, até uma simulação real de incêndio e a comparação dos resultados com o modelo estudado.

Bibliografia

- [1] P. Fernandes, “Congresso Nacional sobre Alterações Climáticas,” Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro , Vila Real, 2018.
- [2] Com Lusa, “<https://sicnoticias.pt/especiais/tragedia-em-pedrogao-grande/2019-06-17-2-anos-de-Pedrogao-Grande-66-mortos-e-500-casas-afetadas-pelo-fogo>,” [Online].
- [3] Expresso, “<https://expresso.pt/sociedade/2017-11-13-Incendios-45-mortes-800-casas-e-500-empresas-atingidas-na-regiao-Centro>,” [Online].
- [4] Ben Griffiths e Doug Booth, “The effects of Fire and Smoke on VHF Radio Communications.,” Technical Report COMM-REP-038-1, Country Fire Association, 2001.
- [5] J. A. Boan, “Radio Propagation in Fire Environments,” *Thesis, Department of Electrical and Electronic Engineering, School of Engineering, Computer and Mathematical Sciences, University of Australia*, 2009.
- [6] Ben Griffiths and Doug Booth, The Effects of Fire and Smoke on VHF Radio Communications, Technical Report COMM-REP-038-1: Country Fire Association, 2001.
- [7] “<https://pages.nist.gov/fds-smv/>,” [Online].
- [8] J. Boan, “Radio Experiments With Fire,” *IEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2007.
- [9] Ana Aguiar, António Navarro, António Rodrigues, Carlos Fernandes, Carlos Salema, José Sanguino, Nuno Borges Carvalho, Rafael Caldeirinha, Estudo do funcionamento do SIRESP - Parte I, Instituto de Telecomunicações, 2017.
- [10] Kgakgamatso Mphale e Mal Heron, “Microwave measurement of electron density and collision frequency of a pine fire,” *Physics Department, University of Botswana*, 2007.
- [11] M. Levey, “Parabolic equation methods for electromagnetic wave propagation,” *The Institution of Electrical Engineers*, 2000.
- [12] J. M. Rueger, “International association of geodesy, report of the ad-hoc working party on refractive indices of light, infrared and radio waves in the atmosphere of the IAG special commission SC3 - fundamental constants (SCFC),” 1999.

- [13] J. M. Reuguer, “Refractive index formulas for radio waves,” *Technical report, International Congress*, 2002.
- [14] H. F. Calcote, Mechanisms for the formation of ions in flames, *Combust. Flame*, vol. 1, p. 385, 1957.
- [15] Heron, M.L e Mphale, K., “Radio wave attenuation in bushfires, tropical cyclones and other severe atmospheric conditions.,” *Final Report on EMA Project 60/2001*, pp. 5-7, 2004.
- [16] K. Mphale, “Radiowave Propagation Measurements and Prediction in Bushfires,” p. 123, 2008.
- [17] Y. Itikawa, “Effective collision frequency of electrons in gases,” *The Physics of Fluids*, 16(6):831, 1973.
- [18] Kamran Akhtar, John E. Scharer, Shane M. Tysk, e Enny Kho, “Plasma interferometry at high pressures,” *Review of Scientific Instruments* 74, p. 996, 2003.
- [19] P. M. Attiwill and M. A. Adams,, “Nutrition of Eucalypts,” *CSIRO*, 1996.
- [20] P. E. Ciddor, “Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared.,” *Applied Optics*, 35(9):1566, 1996.
- [21] Heron M., Mphale K. e Verma T., Effect of wildfire-induced thermal bubble on radio communication., *Progress In Electromagnetic Research*, PIER 68:197-228., 2007.
- [22] L. Frost, Conductivity of seeded atmospheric pressure plasmas., *Journal of Applied Physics*, 32(10):2029., 1961.
- [23] M. W. Chase, NIST-JANAF thermochemical tables, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Monograph 9, 1998.
- [24] R. J. Vidmar, “On the use of atmospheric pressure plasmas as electromagnetic reflectors and absorbers.,” *IEEE Transaction on Plasma Science*, 18(4):733, 1990.
- [25] H. Belcher e T. M. Sudden, “Studies on ionisation produced by metallic salts in flames I. Determination of collision frequency of electrons in coal gas-air flame,” *Proc. R. Soc. A* 201(1067), 480–488 (1950).
- [26] P. Molmud, “Langevin Equation and the ac Conductivity of Non Maxwellian Plasmas,” *Phys. Rev*, vol. N1, p. 114, 1959.
- [27] R. Whitmer, “Phys. Rev. 104 (1956) 572–575.,” 1956.
- [28] <https://www.nist.gov/services-resources/software/fds-and-smokeview>. [Online].

- [29] “<https://www.fs.usda.gov/pnw/projects/wildland-urban-interface-fire-dynamics-simulator-wfds>,” [Online].
- [30] Kamran Alhtar, John E. Scharer, Shane M. Tysk, e Enny Kho, “Plasma interferometry at high pressures,” *Department of Electrical and Computer Engineering, University of Wisconsin, Madison*, 2003.
- [31] K. G. Budden, “The propagation of radio waves,” *Cambridge University Press*, 1985.
- [32] Steven J. Ritchie, Kenneth D. Steckler, Anthony Hamins, Thomas G. Cleary, Jiann C. Yang e Takashi Kashiwagi, The effect os Sample Size on the Heat Release Rate of Charring Material, Gaithersburg, MD 20899 USA: Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Tecnology.
- [33] William Mell, Alexander Maranghides, Randall McDermott, Samuel L. Manzello, Numerical simulation and experiments of burning douglas fir trees, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA, 2009.
- [34] “<https://alunosonline.uol.com.br/fisica/leis-refracao.html>,” [Online].
- [35] Kagakgamatso Mphale, Mohan Jacob, Mal Heron, “Prediction and Measurement of Eletron Density and Collision Frequency in a Weakly Ionised Pine Fire,” *Int J Infrared Milli Waves*, 2007.

Anexo A

Ficheiros de modelação

A1. WFDS - Modelação de uma pequena árvore

&HEAD CHID='onetree_surf_1mesh', TITLE='Single processor One tree over surface fuel, uses fuel element model' /

- Specify number of grid cells (IJK) and domain size (XB, meters) in x,y,z directions
&MESH IJK=45,45,90, XB=-2,2,-2,2,0,8 /

- Stretch computation grid in the z direction
TRNZ IDERIV=1,CC=0,PC=0.5 /
TRNZ IDERIV=2,CC=0,PC=0.0 /

- Duration of simulation in seconds
&TIME T_END=25 /

- Miscellaneous parameters
&MISC BAROCLINIC=.TRUE. /

- Gaseous combustion parameters
&REAC ID='WOOD'
FYI='Ritchie, et al., 5th IAFSS, C_3.4 H_6.2 O_2.5, dHc = 15MW/kg'
SOOT_YIELD = 0.02
O = 2.5
C = 3.4
H = 6.2
HEAT_OF_COMBUSTION = 17700. /

REAC ID='WOOD'
FYI='Ritchie, et al., 5th IAFSS, C_3.4 H_6.2 O_2.5, dHc = 15MW/kg'
SOOT_YIELD = 0.02
O = 2.5
C = 3.4
H = 6.2
HEAT_OF_COMBUSTION = 17700. /

- Account for water vapor released during drying
&SPEC ID='WATER VAPOR' /
&SPEC ID='WOOD' /
SPEC ID='OXYGEN' /

! VEGETATION PARAMETERS

- Pine tree (cone shaped)

-- needles

```
&PART ID='needles',
      TREE=.TRUE.,
      QUANTITIES='VEG_TEMPERATURE',
      VEG_INITIAL_TEMPERATURE=28.,
      VEG_SV=3940.,
      VEG_MOISTURE=0.26,
      VEG_CHAR_FRACTION=0.25,
      VEG_DENSITY=514.,
      VEG_BULK_DENSITY=1.28,
      VEG_BURNING_RATE_MAX=0.4,
      VEG_DEHYDRATION_RATE_MAX=0.4,
      VEG_REMOVE_CHARRED=.TRUE. /
&TREE XYZ=0,0,0,
      PART_ID="needles",
      FUEL_GEOM="CONE",
      CROWN_WIDTH=1.5,
      CROWN_BASE_HEIGHT=0.30,
      TREE_HEIGHT=4.5,
      OUTPUT_TREE=.TRUE.,
      LABEL='needles' /
```

- Ignitor fire location and heat release rate magnitude and history

260 kW/m² fire on bottom of domain and at

0 ≤ x ≤ 0.2 meters; -2 ≤ y ≤ 0 meters

```
&SURF ID='IGN FIRE',HRRPUA=260,RAMP_Q='RAMPFIRE' /
&RAMP ID='RAMPFIRE',T= 0.0,F=0.0 /
&RAMP ID='RAMPFIRE',T= 1,F=1.0 /
&RAMP ID='RAMPFIRE',T= 20,F=1.0 /
&RAMP ID='RAMPFIRE',T=21,F=0.0 /
```

```
RAMP ID='RAMPFIRE',T= 0.0,F=0.0 /
RAMP ID='RAMPFIRE',T= 1.5,F=1 /
RAMP ID='RAMPFIRE',T= 90,F=1 /
RAMP ID='RAMPFIRE',T= 91,F=0 /
```

```
&VENT XB=-2,2,-2,2,0,0,SURF_ID='IGN FIRE' /
```

- Set inflow velocity characteristics, 2 m/s wind into domain

```
SURF ID='INFLOW',VEL=-2,RAMP_V='RAMPVEL' /
RAMP ID='RAMPVEL',T=0.0,F=0.0 /
RAMP ID='RAMPVEL',T=0.5,F=1.0 /
```

- Boundary conditions on computational domain

- Domain-Boundary conditions

```
VENT XB=-2,-2,-2, 2,0,8,SURF_ID='OPEN' / inflow through x=-4 (left side)
VENT XB=2,2,-2, 2,0,8,SURF_ID='OPEN' /
VENT XB=-2,2,-2,-2,0,8,SURF_ID='OPEN' /
```

```
VENT XB=-2,2, 2, 2,0,8,SURF_ID='OPEN' / symmetry along y=0 plane  
VENT XB=-2,2,-2, 2,8,8,SURF_ID='OPEN' /
```

```
!Boundary condtions
```

```
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /  
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /  
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /  
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /  
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /
```

```
- Output data to be viewed using Smokeview
```

```
-- two-dimensional slice files
```

```
&SLCF PBX= 0, QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
```

```
-- termopares
```

```
&DEVC XYZ=0,0,0, QUANTITY='THERMOCOUPLE', ID='T_0m' /  
&DEVC XYZ=0,0,1, QUANTITY='THERMOCOUPLE', ID='T_1m' /  
&DEVC XYZ=0,0,2, QUANTITY='THERMOCOUPLE', ID='T_2m' /  
&DEVC XYZ=0,0,3, QUANTITY='THERMOCOUPLE', ID='T_3m' /
```

```
DEVC XYZ=0,0,0, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='CARBON DIOXIDE',  
ID='MF_CO2_0m' /
```

```
DEVC XYZ=0,0,1, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='CARBON DIOXIDE',  
ID='MF_CO2_1m' /
```

```
DEVC XYZ=0,0,2, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='CARBON DIOXIDE',  
ID='MF_CO2_2m' /
```

```
DEVC XYZ=0,0,3, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='CARBON DIOXIDE',  
ID='MF_CO2_3m' /
```

```
- Declare end of input file
```

```
&TAIL /
```

A2. FDS - Modelação de um tronco de madeira

```
HEAD CHID='tronco', TITLE='Pipers Creek Cube Fire Model for FDS vers. 6' /
&MESH IJK=80,80,240, XB=-10.0,10.0,-10.0,10.0,0.0,60.0 / Mesh was changed
&TIME TWFIN=150.0 / Run simulation a long time to see long term effects and average ...
DUMP NFRAMES=600 /
```

---Define the reaction types---

Wood composition was obtained from Ritchie et al., 5th IAFSS, C3.4 H6.2 O2.5

```
&REAC ID='WOOD'
  FUEL='CELLULOSE'
  SOOT_YIELD=0.1
  O=2.5
  C=3.4
  H=6.2
  HEAT_OF_COMBUSTION=17700.0 /
```

Previously, there wasn't the line FUEL and ID = 'WOOD'

```
&SPEC ID='OXYGEN' /
&SPEC ID='NITROGEN' /
&SPEC ID='CARBON DIOXIDE' /
&SPEC ID='WATER VAPOR' /
SPEC ID='FUEL' /
&SPEC ID='WATER' /
```

```
&MATL ID='TREE'
  N_REACTIONS=1
  SPEC_ID(1:2,1)='CELLULOSE', 'WATER'
  NU_SPEC(1:2,1)=0.86, 0.14
  CONDUCTIVITY=0.17
  SPECIFIC_HEAT=2.45
  DENSITY=514.0
  REFERENCE_TEMPERATURE(1)=300.0
  HEAT_OF_REACTION(1)=300.0 /
```

---For the leave surface model we may need to create another matl model for the moisture---

-

```
&MATL ID='WET_TREE'
  N_REACTIONS=1
  SPEC_ID(1:2,1)='CELLULOSE', 'WATER'
  NU_SPEC(1:2,1)=0.87, 0.1
  CONDUCTIVITY=0.17
  SPECIFIC_HEAT=2.45
  DENSITY=200.0
  REFERENCE_TEMPERATURE(1)=200.0
  HEAT_OF_REACTION(1)=200.0 /
```

```
&SURF ID='TRUNK'
  COLOR='BROWN'
  MATL_ID='TREE'
  BURN_AWAY=.TRUE.
  THICKNESS=0.028
  BACKING='EXPOSED' /
```

```
&SURF ID='LEAVE'
  COLOR='GREEN'
  MATL_ID='WET_TREE'
  BURN_AWAY=.TRUE.
  THICKNESS=0.028
  BACKING='EXPOSED' /
```

```
&SURF ID='GRASS'
  RGB=0,128,0
  MATL_ID='WET_TREE'
  BURN_AWAY=.FALSE.
  THICKNESS=0.028
  BACKING='INSULATED' /
```

---All open boundaries---

```
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
```

---The following part was not used but included to simulate a wind in the atmosphere---

```
SURF ID='WIND', VEL=0.0, PROFILE='ATMOSPHERIC', Z0=27.0, PLE=0.15 /
SURF ID='WIND', VEL=-1.0, PROFILE='ATMOSPHERIC', Z0=27.0, PLE=0.15 /
SURF ID='WIND', VEL=-3.0, PROFILE='ATMOSPHERIC', Z0=27.0, PLE=0.15 /
SURF ID='WIND', VEL=-5.0, PROFILE='ATMOSPHERIC', Z0=27.0, PLE=0.15 /
```

---Fire source---

```
SURF ID='FIRE', HRRPUA=15000.0, COLOR='RED' /
OBST XB=-1.5,1.5,-1.2,1.2,2.51,3.7, SURF_ID='FIRE', DEVC_ID='time_fire' /
VENT XB=-2.5,-1.5,-1.5,1.5,0.0,0.0, SURF_ID='FIRE', DEVC_ID='time_fire' /
DEVC XYZ=0.1,0.1,0.1, ID='time_fire', SETPOINT=35.0, QUANTITY='TIME',
INITIAL_STATE=.TRUE. /
```

---Fire souce of a model for rapidly spreading fire over a rectangular area---

```
&SURF ID='bushfire', HRRPUA=20100.0, RAMP_Q='fireramp', COLOR='RED' /
&RAMP ID='fireramp', T=0.0, F=0.0 /
&RAMP ID='fireramp', T=1.0, F=1.0 /
&RAMP ID='fireramp', T=30.0, F=1.0 /
&RAMP ID='fireramp', T=31.0, F=0.0 /
&VENT XB=-2.0,2.0,-2.5,2.5,0.0,0.0, SURF_ID='bushfire', XYZ=0.5,1.0,0.0,
SPREAD_RATE=0.03 /
```

---Main Fuel Block---

OBST XB=-3.5,3.5,-3.5,3.5,0.2,0.5, SURF_ID='GRASS' /
 &OBST XB=-3.5,3.5,-3.5,3.5,0.5,4.0, SURF_ID='TRUNK' /
 OBST XB=-1.75,1.75,-3.5,3.5,0.5,7.5, SURF_ID='TRUNK' /
 OBST XB=-3.5,3.5,-3.5,3.5,4.5,7.5, SURF_ID='LEAVE' /

---Hole generation---

Thickness: 0.1

 Step equal to 0.35 and X(-3.5,3.5) - Y(-3.5,3.5) - Z(0.5,4.0)

X variation

&HOLE XB=-3.45,-3.35,-3.5,3.5,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=-3.10,-3.00,-3.5,3.5,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=-2.75,-2.65,-3.5,3.5,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=-2.40,-2.30,-3.5,3.5,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=-2.05,-1.95,-3.5,3.5,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=-1.70,-1.60,-3.5,3.5,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=-1.35,-1.25,-3.5,3.5,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=-1.00,-0.90,-3.5,3.5,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=-0.65,-0.55,-3.5,3.5,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=-0.30,-0.20,-3.5,3.5,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=0.05,0.15,-3.5,3.5,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=0.40,0.50,-3.5,3.5,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=0.75,0.85,-3.5,3.5,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=1.10,1.20,-3.5,3.5,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=1.45,1.55,-3.5,3.5,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=1.80,1.90,-3.5,3.5,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=2.15,2.25,-3.5,3.5,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=2.50,2.60,-3.5,3.5,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=2.85,2.95,-3.5,3.5,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=3.20,3.30,-3.5,3.5,0.5,4.0 /

Z variation

&HOLE XB=-3.5,3.5,-3.5,3.5,0.55,0.65 /
 &HOLE XB=-3.5,3.5,-3.5,3.5,0.90,1.00 /
 &HOLE XB=-3.5,3.5,-3.5,3.5,1.25,1.35 /
 &HOLE XB=-3.5,3.5,-3.5,3.5,1.60,1.70 /
 &HOLE XB=-3.5,3.5,-3.5,3.5,1.95,2.05 /
 &HOLE XB=-3.5,3.5,-3.5,3.5,2.30,2.40 /
 &HOLE XB=-3.5,3.5,-3.5,3.5,2.65,2.75 /
 &HOLE XB=-3.5,3.5,-3.5,3.5,3.00,3.10 /
 &HOLE XB=-3.5,3.5,-3.5,3.5,3.35,3.45 /

Y variation

&HOLE XB=-3.5,3.5,-3.45,-3.35,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=-3.5,3.5,-3.10,-3.00,0.5,4.0 /
 &HOLE XB=-3.5,3.5,-2.75,-2.65,0.5,4.0 /

```
&HOLE XB=-3.5,3.5,-2.40,-2.30,0.5,4.0 /
&HOLE XB=-3.5,3.5,-2.05,-1.95,0.5,4.0 /
&HOLE XB=-3.5,3.5,-1.70,-1.60,0.5,4.0 /
&HOLE XB=-3.5,3.5,-1.35,-1.25,0.5,4.0 /
&HOLE XB=-3.5,3.5,-1.00,-0.90,0.5,4.0 /
&HOLE XB=-3.5,3.5,-0.65,-0.55,0.5,4.0 /
&HOLE XB=-3.5,3.5,-0.30,-0.20,0.5,4.0 /
&HOLE XB=-3.5,3.5,0.05,0.15,0.5,4.0 /
&HOLE XB=-3.5,3.5,0.40,0.50,0.5,4.0 /
&HOLE XB=-3.5,3.5,0.75,0.85,0.5,4.0 /
&HOLE XB=-3.5,3.5,1.10,1.20,0.5,4.0 /
&HOLE XB=-3.5,3.5,1.45,1.55,0.5,4.0 /
&HOLE XB=-3.5,3.5,1.80,1.90,0.5,4.0 /
&HOLE XB=-3.5,3.5,2.15,2.25,0.5,4.0 /
&HOLE XB=-3.5,3.5,2.50,2.60,0.5,4.0 /
&HOLE XB=-3.5,3.5,2.85,2.95,0.5,4.0 /
&HOLE XB=-3.5,3.5,3.20,3.30,0.5,4.0 /
```

---Data to save---

```
&SLCF PBY=-9.875000, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&SLCF PBY=-9.875000, QUANTITY='DENSITY' SPEC_ID='OXYGEN'/
&SLCF PBY=-9.875000, QUANTITY='DENSITY' SPEC_ID='WATER VAPOR'/
&SLCF PBY=-9.875000, QUANTITY='DENSITY' SPEC_ID='NITROGEN'/
&SLCF PBY=-9.875000, QUANTITY='DENSITY' SPEC_ID='CARBON DIOXIDE'/
&SLCF PBY=-9.875000, QUANTITY='DENSITY' SPEC_ID='CELLULOSE'/
- Declare end of input file
&TAIL /
```