

Modelação Numérica de uma Caldeira Doméstica a
Pellets

Ricardo Couto Barbosa

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica – Ramo de Energia

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



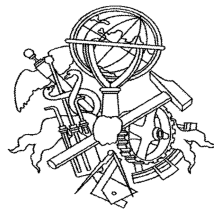
31 de outubro de 2014

Relatório da Unidade Curricular de Dissertação/Projecto/Estágio do 2º ano do Mestrado
em Engenharia Mecânica – Ramo de Energia

Candidato: Ricardo Couto Barbosa, Nº 1070607, 1070607@isep.ipp.pt
Orientação Científica: Professor Doutor Rui de Araújo Rego, rfr@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo de Energia
Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



31 de outubro de 2014

Agradecimentos

Ao Professor Rui de Araújo Rego, agradeço toda a disponibilidade demonstrada para me ajudar a ultrapassar as dificuldades que foram surgindo ao longo deste trabalho, o encorajamento nos momentos mais difíceis, e as discussões que tivemos, que foram uma fonte da aprendizagem.

Ao Professor Fernando Aristίδes agradeço a ajuda com a utilização do *OpenFOAM*, sem a qual este trabalho não teria sido possível.

Resumo

A biomassa é uma das fontes de energia renovável com maior potencial em Portugal, sendo a capacidade de produção de *pellets* de biomassa atualmente instalada superior a 1 milhão de toneladas/ano. Contudo, a maioria desta produção destina-se à exportação ou à utilização em centrais térmicas a biomassa, cujo crescimento tem sido significativo nos últimos anos, prevendo-se que a capacidade instalada em 2020 seja de aproximadamente 250 MW.

O mercado português de caldeiras a *pellets* é bastante diversificado. O estudo que realizamos permitiu concluir que cerca de 90% das caldeiras existentes no mercado português têm potências inferiores a 60 kW, possuindo na sua maioria grelha fixa (81%), com sistema de ignição eléctrica (92%) e alimentação superior do biocombustível sólido (94%).

O objetivo do presente trabalho foi o desenvolvimento de um modelo para simulação de uma caldeira a *pellets* de biomassa, que para além de permitir otimizar o projeto e operação deste tipo de equipamento, permitisse avaliar as inovações tecnológicas nesta área.

Para tal recorreu-se o *BiomassGasificationFoam*, um código recentemente publicado, e escrito para utilização com o *OpenFOAM*, uma ferramenta computacional de acesso livre, que permite a simulação dos processos de pirólise, gasificação e combustão de biomassa. Este código, que foi inicialmente desenvolvido para descrever o processo de gasificação na análise termogravimétrica de biomassa, foi por nós adaptado para considerar as reações de combustão em fase gasosa dos gases libertados durante a pirólise da biomassa (recorrendo para tal ao *solver reactingFoam*), e ter a possibilidade de realizar a ignição da biomassa, o que foi conseguido através de uma adaptação do código de ignição do *XiFoam*.

O esquema de ignição da biomassa não se revelou adequado, pois verificou-se que a combustão parava sempre que a ignição era inativada, independentemente do tempo que ela estivesse ativa. Como alternativa, usaram-se outros dois esquemas para a combustão da biomassa: uma corrente de ar quente, e uma resistência de aquecimento. Ambos os

esquemas funcionaram, mas nunca foi possível fazer com que a combustão fosse autossustentável.

A análise dos resultados obtidos permitiu concluir que a extensão das reações de pirólise e de gasificação, que são ambas endotérmicas, é muito pequena, pelo que a quantidade de gases libertados é igualmente muito pequena, não sendo suficiente para libertar a energia necessária à combustão completa da biomassa de uma maneira sustentável.

Para tentar ultrapassar esta dificuldade foram testadas várias alternativas, , que incluíram o uso de diferentes composições de biomassa, diferentes cinéticas, calores de reação, parâmetros de transferência de calor, velocidades do ar de alimentação, esquemas de resolução numérica do sistema de equações diferenciais, e diferentes parâmetros dos esquemas de resolução utilizados. Todas estas tentativas se revelaram infrutíferas.

Este estudo permitiu concluir que o *solver BiomassGasificationFoam*, que foi desenvolvido para descrever o processo de gasificação de biomassa em meio inerte, e em que a biomassa é aquecida através de calor fornecido pelas paredes do reator, aparentemente não é adequado à descrição do processo de combustão da biomassa, em que a combustão deve ser autossustentável, e em que as reações de combustão em fase gasosa são importantes. Assim, é necessário um estudo mais aprofundado que permita adaptar este código à simulação do processo de combustão de sólidos porosos em leito fixo.

Palavras-Chave

Biomassa, Caldeira, Pellets, OpenFOAM, BiomassGasificationFoam, Simulação

Abstract

The currently installed production of biomass pellets in Portugal is over 1 million tons/year, which makes biomass one of our most important renewable energy sources. However, most of this production is for exportation or to be used in biomass power plants, whose growth has been significant in recent years, with an expected installed capacity of 250 MW in 2020.

The Portuguese market for pellet boilers is quite diversified. The study that we carried out led to the conclusion that 90% of the existing boilers in the Portuguese market have powers below 60 kW, most of which have fixed grate (81%), with electric ignition systems (92%) and top feeding of the solid biofuel (94%).

The aim of this work was to develop a numerical simulation model of a biomass pellets boiler, which, besides allowing the optimization of the design and operation of this type of equipment, would also allow the evaluation of technological innovations in this area.

To reach this goal we made the option to use the *BiomassGasificationFoam*, a recently published solver, written for use with *OpenFOAM*, an open source tool that would allow the simulation of processes such as the pyrolysis, gasification and combustion of biomass. This code, which was originally developed to describe the process of biomass gasification in thermogravimetric analysis, was adapted, by us, to take into consideration the gas phase combustion reactions of the gases resulting from the biomass pyrolysis (using the solver *reactingFoam*), and to be also able to perform the ignition of the biomass, which has been achieved by adapting the ignition code of *XiFoam*.

The scheme of ignition of the biomass did not prove to be suitable for our purposes, because the combustion stopped when the ignition was inactivated, irrespective of the time during which it was active. Alternatively, two other schemes for the combustion of the biomass were used, the feed of a hot air stream, and the use of a heating resistance at the air inlet. Both schemes worked, but it was never possible to reach a self-sustaining combustion.

The results obtained showed that the extent of the pyrolysis and gasification reactions, which are both endothermic, was very small, so that the corresponding amount of gases released was also very small, not being sufficient to release the energy required for the complete combustion of the biomass in a self-sustaining mode.

To try to overcome this difficulty various alternatives were tested, some more realistic than others, which involved the use of biomass of different compositions, different kinetics, heats of reaction, heat transfer parameters, air velocities, numerical schemes for solving the system of differential equations and different parameters for the numerical schemes used. All these attempts were unsuccessful.

This work led to the conclusion that the solver *BiomassGasificationFoam*, which was developed to describe the biomass gasification process in an inert atmosphere, wherein the biomass is heated by energy supplied by the reactor walls, is not suitable for the description of the process of combustion of biomass, which must be self-sustaining, and where the combustion reaction in the gas phase are important. Therefore, further work is necessary to adapt this solver to the description of the combustion of a fixed bed of a porous solid.

Keywords

Biomass, Boiler, Pellets, OpenFOAM, BiomassGasificationFoam, Simulation.

Résumé

La biomasse est une des sources d'énergie renouvelables avec le plus grand potentiel au Portugal, avec une capacité de production de biomasse actuellement installée supérieure à 1 million tonnes / an. Cependant, la plupart de cette production est destinée à l'exportation ou pour une utilisation dans les centrales de biomasse, dont la croissance a été significative au cours des dernières années, il est prévu que la capacité installée en 2020 sera d'environ 250 MW.

Le marché portugais pour les chaudières à pellets est assez diversifié. L'étude que nous avons menée a conduit à la conclusion que 90% des chaudières existantes sur le marché portugais de puissances de moins de 60 kW, grille dont la plupart ont fixe (81%), avec des systèmes électriques d'allumage (92%) et en haut l'alimentation de le biocombustible solide (94%).

Dans ce contexte, le présent travail a été développé, dont l'objectif était de développer un modèle de simulation d'une chaudière à pellets de biomasse, qui en plus de permettre d'optimiser la conception et le fonctionnement d'un tel équipement, a permis d'évaluer les innovations technologiques dans ce domaine.

À cette fin, nous avons eu recours à la *BiomassGasificationFoam* un code récemment publié, écrit pour une utilisation avec un outil de *OpenFOAM*, d'accès libre, qui permet de simuler des processus de pyrolyse, la gazéification et la combustion de la biomasse. Ce code, qui a été initialement développé pour décrire le processus de gazéification de la biomasse pendant l'analyse thermogravimétrique, a été adapté par nous de prendre en considération les réactions de combustion en phase gazeuse ont évolué pendant des gaz de pyrolyse de la biomasse (en utilisant le *reactingFoam* solveur), et être capable d'effectuer l'allumage de la biomasse, qui a été réalisé par l'adaptation du code de allumage du *XiFoam*.

L'allumage du système de la biomasse n'a pas prouvé approprié car il a été trouvé que la combustion est arrêté lorsque le contact a été inactivé, indépendamment du moment où elle a été active. En variante, sont utilisés deux autres régimes d'initier la combustion,

l'utilisation d'un courant d'air chaud et utilisant une résistance. Les deux régimes ont travaillé, mais ne purent jamais faire la combustion était autonome.

Les résultats obtenus ont montré que la mesure des réactions de pyrolyse et de gazéification, qui sont endothermiques, est très faible, de sorte que la quantité de gaz dégagé est également très faible, ne pas être suffisante pour libérer de l'énergie nécessaire à la combustion complète de la biomasse.

Pour tenter de surmonter cette difficulté différentes alternatives ont été testées, certains plus réalistes que d'autres, impliquant l'utilisation de la biomasse de différentes compositions, des cinétiques différentes, des chaleurs de réaction, les paramètres de transfert de chaleur, les vitesses d'air d'alimentation, résolution système de schémas numériques équations différentielles et les différents paramètres des régimes de résolution utilisés. Toutes ces tentatives se sont révélées infructueuses.

Cette étude a conclu que le programme de calcul qui a été développé pour décrire le processus de gazéification de biomasse dans un milieu inerte, dans lequel la biomasse est chauffée par la chaleur fournie à travers les parois du réacteur, ne convient pas à la description du processus de combustion de biomasse, dans lequel doit être combustion auto-entretenu, et la réaction de combustion en phase gazeuse sont importants. Par conséquent, d'autres travaux sont nécessaires pour adapter ce solveur à la description de la combustion d'un lit fixe d'un solide poreux.

Mots-clés

Biomasse, Chaudières, Pellets, OpenFOAM, BiomassGasificationFoam, Simulation.

Índice

ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XV
NOMENCLATURA	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. PREÂMBULO	1
1.2. A BIOMASSA.....	2
1.2.1. ASPETOS GERAIS	2
1.2.2. O MERCADO EUROPEU DE <i>PELLETS</i>	5
1.2.3. O MERCADO PORTUGUÊS DE <i>PELLETS</i>	9
2. CALDEIRAS DOMÉSTICAS A BIOMASSA	19
2.1. GENERALIDADES	19
2.1.1. TIPO DE PERMUTADOR DE CALOR	22
2.1.2. TIPO DE QUEIMADOR	24
2.1.3. TIPO DE SISTEMA DE IGNIÇÃO	29
2.1.4. TIPO DE SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO	30
2.1.5. TIPO DE SISTEMA DE CONTROLO	33
2.1.6. NOVAS TECNOLOGIAS	39
2.1.7. RESERVATÓRIOS DE <i>PELLETS</i>	40
2.2. A COMBUSTÃO DA BIOMASSA	43
3. MODELAÇÃO NUMÉRICA DA COMBUSTÃO DE BIOMASSA	47
3.1. INTRODUÇÃO	47
3.2. MODELO MATEMÁTICO.....	50
3.2.1. CAMPO DE POROSIDADE DINÂMICO	50
3.2.2. EQUAÇÕES DO MODELO.....	53
3.2.3 <i>Conversão térmica da biomassa</i>	55
3.2.4 <i>Transferência de calor</i>	60
3.2.5 <i>Propriedades físicas</i>	63
4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA COMBUSTÃO DE BIOMASSA	65
4.1 IMPLEMENTAÇÃO DO <i>BIOMASSGASIFICATIONFOAM</i>	65
4.2 GERAÇÃO DA GEOMETRIA E DA MALHA	66
4.3 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS.....	69
4.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	72
4.4.1 <i>Resistência de aquecimento</i>	74
4.4.2 <i>Alimentação de ar quente</i>	88
4.3.3 <i>Sistema de ignição</i>	93
4.3.4 <i>Efeito da porosidade</i>	99
5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	107
REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS	111
ANEXO A. FICHEIROS DE DADOS	117

Índice de Figuras

Figura 1 - <i>Pellets</i> de biomassa [26]	3
Figura 2 - Consumo mundial de <i>pellets</i> de madeira [33]	6
Figura 3 - Produção mundial de <i>pellets</i> de madeira [33]	7
Figura 4 - Salamandra a biomassa [39]	21
Figura 5 - Esquema de uma caldeira a biomassa [73]	21
Figura 6 - Tipos de permutadores usados no mercado português	23
Figura 7 - Queimadores em anel com injetores de ar [48]	25
Figura 8 - Grelha em funil [48]	25
Figura 9 - Grelha basculante [48]	26
Figura 10 - Grelha de passo [48]	27
Figura 11 - Grelha cilíndrica rotativa [48]	28
Figura 12 - Tipos de grelhas usadas no mercado português	28
Figura 13 - Geometria das câmaras de combustão usadas no mercado português	29
Figura 14 - Sistemas de ignição nas caldeiras comercializadas em Portugal	30
Figura 15 - Queimador de alimentação inferior [48]	31
Figura 16 - Esquema de um leito fixo com alimentação horizontal [48]	32
Figura 17 - Esquema de um leito fixo com alimentação superior [48]	32
Figura 18 - Sistemas de alimentação nas caldeiras comercializadas em Portugal	33
Figura 19 - Sonda lambda [48]	34
Figura 20 - Geradores de turbulência [48]	36
Figura 21 - Sistemas de limpeza dos permutadores das caldeiras comercializadas em Portugal	37
Figura 22 - Sistemas de limpeza de cinza das caldeiras comercializadas em Portugal	37
Figura 23 - Sistemas de alimentação de ar das caldeiras comercializadas em Portugal	38
Figura 24 - Potências das caldeiras comercializadas em Portugal	39
Figura 25 - Representação esquemática de uma caldeira de condensação [10]	40
Figura 26 - Sistema de alimentação por parafuso flexível [77]	41
Figura 27 - Sistema de alimentação pneumático [77]	42
Figura 28 - Representação esquemática do processo de combustão da biomassa	45
Figura 29 - Estrutura do <i>BiomassGasificationFoam</i> [43]	50
Figura 30 – Corpo de malha paralelepípedica	67
Figura 31 – Corpo de malha paralelepípedica com entrada de ar lateral	67
Figura 32 - Malha correspondente à câmara de combustão estudada, com a biomassa representada a azul	68
Figura 33 – Representação de uma célula de biomassa	69
Figura 34 – Variação da temperatura do sólido numa simulação em que a ignição é desativada aos 800 s.	73

Figura 35 – Variação da temperatura na biomassa com o uso de resistência (<i>Crank-Nicholson</i>)....	75
Figura 36 - Variação da temperatura do gás com o uso de resistência (<i>Crank-Nicholson</i>).....	75
Figura 37 – Variação da porosidade da biomassa com o uso de resistência (<i>Crank-Nicholson</i>).	76
Figura 38 – Variação da quantidade de celulose com o uso de resistência (<i>Crank-Nicholson</i>).	77
Figura 39 – Variação da quantidade de hemicelulose com o uso de resistência (<i>Crank-Nicholson</i>).	78
Figura 40 – Variação da quantidade de lenhina com o uso de resistência (<i>Crank-Nicholson</i>).	78
Figura 41 – Variação do teor de humidade da biomassa com o uso de resistência (<i>Crank-Nicholson</i>).	79
Figura 42 – Variação da fração mássica de azoto com o uso de resistência (<i>Crank-Nicholson</i>).	80
Figura 43 – Variação da fração mássica de oxigénio com o uso de resistência (<i>Crank-Nicholson</i>).80	
Figura 44 – Variação da fração mássica de metano com o uso de resistência (<i>Crank-Nicholson</i>). .	81
Figura 45 – Variação da fração mássica de hidrogénio com o uso de resistência (<i>Crank-Nicholson</i>).	81
Figura 46 – Variação da fração mássica de dióxido de carbono com o uso de resistência (<i>Crank-Nicholson</i>).	82
Figura 47 – Variação da fração mássica de monóxido de carbono com o uso de resistência (<i>Crank-Nicholson</i>).	82
Figura 48 – Variação da massa de carvão com o uso de resistência (<i>Crank-Nicholson</i>).	83
Figura 49 – Variação da massa de cinzas com o uso de resistência (<i>Crank-Nicholson</i>).	83
Figura 50 – Velocidade e temperatura do gás para $t = 8000$ s.	84
Figura 51 – Velocidade e temperatura do gás para $t = 25000$ s.	85
Figura 52 – Velocidade e temperatura do gás para $t = 120000$ s.	86
Figura 53 – Variação da temperatura na biomassa com o uso de resistência (<i>Euler</i>).	87
Figura 54 – Variação da temperatura na biomassa com o uso de resistência (<i>Backward</i>).	87
Figura 55 – Variação da temperatura na biomassa com o uso de ar quente (<i>Crank-Nicholson</i>).	89
Figura 56 – Variação da temperatura do gás com o uso de ar quente (<i>Crank-Nicholson</i>).	89
Figura 57 – Variação da porosidade da biomassa com o uso de ar quente (<i>Crank-Nicholson</i>).	90
Figura 58 – Variação do teor de humidade da biomassa com o uso de ar quente (<i>Crank-Nicholson</i>).	90
Figura 59 – Velocidade e temperatura do gás para $t = 9000$ s.	91
Figura 60 – Velocidade e temperatura do gás para $t = 15000$ s.	92
Figura 61 – Velocidade e temperatura do gás para $t = 65000$ s.	93
Figura 62 – Variação da temperatura da biomassa com o uso de ignição (<i>Backward</i>).	94
Figura 63 – Variação da temperatura da biomassa com o uso de ignição (<i>Euler</i>).	95
Figura 64 – Variação da temperatura do gás com o uso de ignição (<i>Euler</i>).	95
Figura 65 – Variação da porosidade da biomassa com o uso de ignição (<i>Euler</i>).	96
Figura 66 – Variação da quantidade de humidade na biomassa com o uso de ignição (<i>Euler</i>).	96
Figura 67 – Variação da quantidade de lenhina com o uso de ignição (<i>Euler</i>).	97

Figura 68 – Velocidade e temperatura do gás para $t = 8000$ s.	98
Figura 69 – Velocidade e temperatura do gás para $t = 25000$ s.	98
Figura 70 – Velocidade e temperatura do gás para $t = 120000$ s.	99
Figura 71 – Velocidade do gás para uma porosidade da biomassa de (0.9) para 200s.	100
Figura 72 – Velocidade do gás para uma porosidade da biomassa de (0.9) para 1060s.	101
Figura 73 – Velocidade do gás para uma porosidade da biomassa de (0.75) para 200s.	102
Figura 74 – Velocidade do gás para uma porosidade da biomassa de (0.75) para 1060s.	103
Figura 75 – Velocidade do gás para uma porosidade da biomassa de (0.54) para 200s.	104
Figura 76 – Velocidade do gás para uma porosidade da biomassa de (0.54) para 1060s.	105

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Composição e PCI de alguns tipos de <i>pellets</i> [60].....	4
Tabela 2 - Propriedades normativas para <i>pellets</i> (EN 14961-1).....	9
Tabela 3 - Comparação de caldeiras a <i>pellets</i> e gás natural [51,72].....	9
Tabela 4 - Unidades de Produção de <i>pellets</i> [46].....	10
Tabela 5 - Quantificação do potencial da floresta em Portugal continental [51]	11
Tabela 6 - Centrais dedicadas, cogeração e <i>pellets</i> [46].....	13
Tabela 7 - Resíduos da indústria da madeira em Portugal [51].....	14
Tabela 8 - Potencial de resíduos agrícolas em Portugal [51]	15
Tabela 9 - Contribuições para o custo da produção de <i>pellets</i> em Portugal [51]	17
Tabela 10 - Resumo das propriedades termoquímicas usadas e do seu valor médio [43]	64
Tabela 11 - Composição da biomassa em frações mássicas [43].....	70
Tabela 12 - Quantidade de gases produzidos durante a pirólise dos componentes da biomassa [em mili mole/(g de biomassa)] [84].	71
Tabela 13 - Parâmetros cinéticos para as reações em fase sólida e gasosa.	71
Tabela 14 - Propriedades físicas dos componentes sólidos [43].	72

Nomenclatura

Caracteres Romanos

- a – Raio do poro (considerado cilíndrico)
- A – Fator pré-exponencial da modelo de Arrhenius
- c – Capacidade calorífica específica
- d – Diâmetro do poro
- D – Difusividade efetiva da mistura gasosa
- \mathcal{G} – Fluxo de energia radiante
- h_s – Entalpia sensível
- h_f – Entalpia de formação
- h_r – Entalpia de reação para a reação r
- H_r – Energia gerada pela conversão térmica do sólido
- k – Condutividade térmica
- K – Tensor da resistência viscosa do meio poroso
- R – Termo de geração de massa devido à reação em fase sólida
- T – Temperatura
- Y – Fração mássica
- V – Volume da célula computacional
- W – Massa molar

Caracteres Gregos

- α – Coeficiente de transferência de calor por unidade de área
- ρ – Densidade global

- γ – Porosidade
- Γ – Coeficiente de aquecimento do gás
- μ – Viscosidade dinâmica da mistura gasosa
- ν – Coeficiente estequiométrico para as espécies gasosas
- Σ – Área superficial dos poros por unidade de volume de biomassa
- ξ – Coeficiente estequiométrico para as espécies sólidas
- ω – Velocidade de reação para a combustão em fase gasosa
- Ω – Velocidade de reação
- δ – Coeficiente de absorção ótica da superfície sólida
- ϵ – Razão dos coeficientes de absorção e emissão da superfície sólida
- σ – Constante de Boltzmann

Subscritos

- a* – Agente de gasificação (O₂, CO₂, vapor de água)
- c* – Valor crítico (limite de temperatura a partir do qual a reação ocorre)
- i* – Índice relativo a espécies gasosas
- k* – Índice relativo a componentes da biomassa
- s* – Índice relativo ao substrato sólido da reação
- p* – Índice relativo a produto gasoso da reação
- par* – Parede
- sup* – Superfície

Sobescritos

- comb* – Combustão
- evap* – Evaporação

- G* – Gás
- gasif* – Gasificação
- pir* – Pirólise
- rad* – Radiação
- S* – Sólido

Abreviaturas

- CFD – Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics*)
- FER – Fontes de Energia Renovável
- max – Máximo
- OpenFOAM – *Open Field Operation and Manipulation*
- PCI – Poder Calorífico Inferior
- PCS – Poder Calorífico Superior
- PIMPLE – Combinação dos algoritmos PISO e SIMPLE
- PISO – *Pressure Implicit with Splitting of Operators*
- SIMPLE – *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*

1. Introdução

1.1. Preâmbulo

Portugal não possui recursos energéticos de origem fóssil, o que faz com que atualmente mais de 80% da energia consumida seja importada [36]. No entanto, e no que respeita às fontes de energia renovável (FER), o país tem um enorme potencial que pode e deve ser explorado, não só para reduzir a dependência energética externa, mas também para contribuir para o combate às alterações climáticas, pois o uso de energias renováveis para além de contribuir para a sustentabilidade energética, contribui igualmente para a redução das emissões de gases com efeito de estufa. Na realidade, Portugal possui uma rede hidrográfica relativamente densa, uma elevada exposição solar média anual, uma área florestal e agrícola significativa, e uma vasta frente marítima que beneficia dos ventos atlânticos, o que lhe confere a possibilidade de aproveitar o potencial energético da água dos rios, da radiação solar, da biomassa florestal e agrícola, das ondas e do vento.

Recentemente, os governos, movidos principalmente por questões ligadas a aspetos ambientais, como o aquecimento global, têm tentado criar acordos e legislação que promova o crescente uso de fontes de energia renovável. Nesse sentido, surge a Diretiva 2009/28/EC da União Europeia (UE) que estabelece como meta para 2020, que 20% da energia total consumida seja originária de fontes renováveis, percentagem esta que atualmente se encontra nos 8,4% [51]. Para atingir este objetivo a Diretiva define três vias: uso de eletricidade obtida a partir de fontes renováveis, utilização de energia renovável para aquecimento e refrigeração, e recurso a combustíveis renováveis para uso em meios de transportes. O uso de biomassa, que Portugal atualmente exporta para vários países devido ao baixo consumo interno, pode contribuir para os dois primeiros objetivos. O recurso à biomassa é acompanhado por uma redução da emissão de gases com efeito de estufa, contribuindo assim para outro dos objetivos da referida Diretiva, que é a redução em 20% da emissão de gases de efeito de estufa.

Neste contexto surgiu o tema desta dissertação, em que se pretende estudar a utilização de biomassa, em particular na forma de *pellets*, como combustível para caldeiras domésticas. Para tal, na secção seguinte começamos por definir o que se entende por biomassa e por caracterizar o mercado europeu e português da biomassa. No Capítulo 2 caracterizamos o mercado europeu e português de caldeiras domésticas a *pellets* identificando, e quantificando, os vários tipos de tecnologias, nomeadamente no que se refere a tipos de queimadores, sistemas de ignição, sistemas de alimentação e sistemas de controlo, entre outros aspetos. Com o objetivo de estudar e otimizar a operação deste tipo de caldeiras, e avaliar tecnologias emergentes, recorreu-se à utilização de um programa de dinâmica de fluidos computacional (CFD) de acesso livre, o *OpenFOAM*. O *OpenFOAM* não dispõe atualmente de nenhum programa (*solver*) adequado à simulação do processo de combustão da biomassa em leito fixo, como ocorre numa caldeira a *pellets*, pelo que se estudou a adaptação de um *solver* recentemente publicado, o *BiomassGasificationFoam* [43], publicado em novembro de 2013, e que foi principalmente desenvolvido para o estudo da pirólise e da gasificação da biomassa em leito fixo. As características deste *solver* são discutidas no Capítulo 3. No Capítulo 4 apresentam-se os vários aspetos relacionados com a implementação do *BiomassGasificationFoam* e com a simulação de uma caldeira de biomassa, apresentando os resultados obtidos. As conclusões deste trabalho e as propostas de trabalho futuro são apresentadas no Capítulo 5.

1.2. A Biomassa

1.2.1. Aspetos gerais

A biomassa pode ser definida como a matéria orgânica não fossilizada e biodegradável proveniente de plantas, animais e microrganismos [21], incluindo assim os produtos, subprodutos e resíduos da agricultura, silvicultura, floresta e indústrias conexas, bem como as frações não fossilizadas e biodegradáveis dos resíduos industriais e municipais. A biomassa inclui ainda os gases e os líquidos recuperados a partir da decomposição da matéria orgânica não fossilizada e biodegradável. Em termos da obtenção de combustível sólido para caldeiras, as principais fontes de biomassa são os resíduos florestais, os resíduos agrícolas e os resíduos da indústria de processamento de madeira.

A biomassa é um produto natural cuja utilização é “amiga” do ambiente, podendo ser considerada um combustível neutro em carbono, pois o dióxido de carbono (CO₂) libertado durante a combustão é reutilizado no processo de fotossíntese dos diferentes tipos de plantas de onde é originária, não contribuindo assim para o aumento da emissão de gases com efeito de estufa.

A biomassa é caracterizada por uma baixa densidade energética e baixa produção por unidade de área [40], dois fatores que contribuem para elevar o seu custo, tornando, numa primeira análise, menos atrativa a sua utilização como substituto de combustíveis fósseis. Na realidade, a densidade energética da biomassa situa-se entre os 13 e os 18 MJ/kg, ou seja, menos de metade da densidade energética do gás natural e do petróleo, que é de 55,2 e 43,2 MJ/kg, respetivamente [49,59]. A produção de biomassa densa, em particular na forma de *pellets* (granulado) (Figura 1), tem merecido particular atenção devido às suas características superiores, quando comparada com a biomassa no seu estado natural, em termos de características físicas e de combustão, pois o processo de produção de *pellets* reduz o teor de humidade da biomassa, o que aumenta o seu teor energético e eficiência da combustão, para além de permitir uma composição mais uniforme do que a da biomassa no seu estado natural [70]. A densidade da biomassa na forma de *pellets* é 4 a 10 vezes superior à da biomassa de onde é obtida [37], o que, entre outros fatores, facilita o seu manuseamento e transporte.



Figura 1 - *Pellets* de biomassa [26]

Os *pellets* de biomassa, incluindo os *pellets* de madeira, são produzidos normalmente de forma cilíndrica (com diâmetro entre 6 e 10 mm) a partir de pequenas partículas de madeira e outras fontes de biomassa, sendo bastante densas e com um aspeto uniforme, e

devendo ter um baixo teor de humidade (< 10%) para a sua combustão ser mais eficiente e facilitar a sua conservação, embora os *pellets* devam ser armazenados em lugares secos para aumentar a sua durabilidade. A sua geometria regular, para além de facilitar a sua armazenagem, permite igualmente uma alimentação das caldeiras quase sem problemas, tanto em sistemas de alimentação manual como de alimentação automática. A biomassa é assim uma forma sustentável de energia que pode ser utilizada para várias finalidades, que incluem as centrais térmicas a biomassa, o fornecimento de energia a várias indústrias e o aquecimento de habitações.

As características dos *pellets* dependem do tipo de biomassa usado para as produzir, variando, em particular, a sua composição química, que é das propriedades que afeta mais diretamente a potência calorífica do combustível, propriedade fundamental na avaliação da sua utilização como fonte de aquecimento. A Tabela 1 apresenta a composição típica de alguns tipos de *pellets*, em termos da sua composição em humidade, voláteis, carbono fixo (também designado por carvão ou material carbonado) e cinzas, e o correspondente poder calorífico. O teor em voláteis da biomassa refere-se à quantidade de gases libertados durante a decomposição térmica da biomassa, que são, essencialmente, metano (CH₄), hidrogénio (H₂), dióxido de carbono (CO₂) e monóxido de carbono (CO), o carbono fixo está relacionado com o resíduo combustível que se obtém após a libertação dos voláteis quando a biomassa é sujeita a um processo de aquecimento, e que consiste essencialmente de carbono, as cinzas correspondem à matéria sólida que resulta da combustão completa da biomassa, e que é constituída essencialmente por minerais.

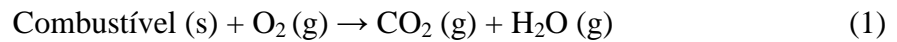
Tabela 1 - Composição e PCI de alguns tipos de *pellets* [60]

Matéria-Prima	Humidade*	Voláteis*	Carbono fixo*	Cinzas*	PCI (MJ/kg)
Aparas de pinheiro	8,5	67,0	24,3	0,2	17,5
Caroço de azeitona	13,0	61,3	25,1	0,6	15,3
Casca de amêndoa	11,9	64,1	23,4	0,6	15,6
Choupo	9,8	68,0	18,9	3,3	14,9
Matéria vegetal	9,0	66,0	17,9	7,1	13,1
RSM**	17,9	61,8	6,9	13,4	14,6

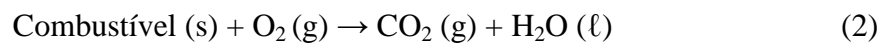
* % ponderal em base húmida

** Resíduos Sólidos Municipais

Na Tabela 1 apresenta-se o valor de PCI, isto é, do poder calorífico inferior do combustível. Este valor refere-se à energia libertada durante a combustão da biomassa quando todos os produtos resultantes da combustão se encontram no estado gasoso. Por exemplo, considerando a combustão completa de um combustível formado apenas por átomos de carbono, hidrogénio e oxigénio, a reação de combustão pode ser representada pela equação (1)



em que o combustível sólido reage com o oxigénio gasoso para dar dióxido de carbono e água no estado gasoso. Alternativamente, e dependendo das condições em que ocorre a reação, da combustão pode resultar água do estado líquido (eq. (2)).



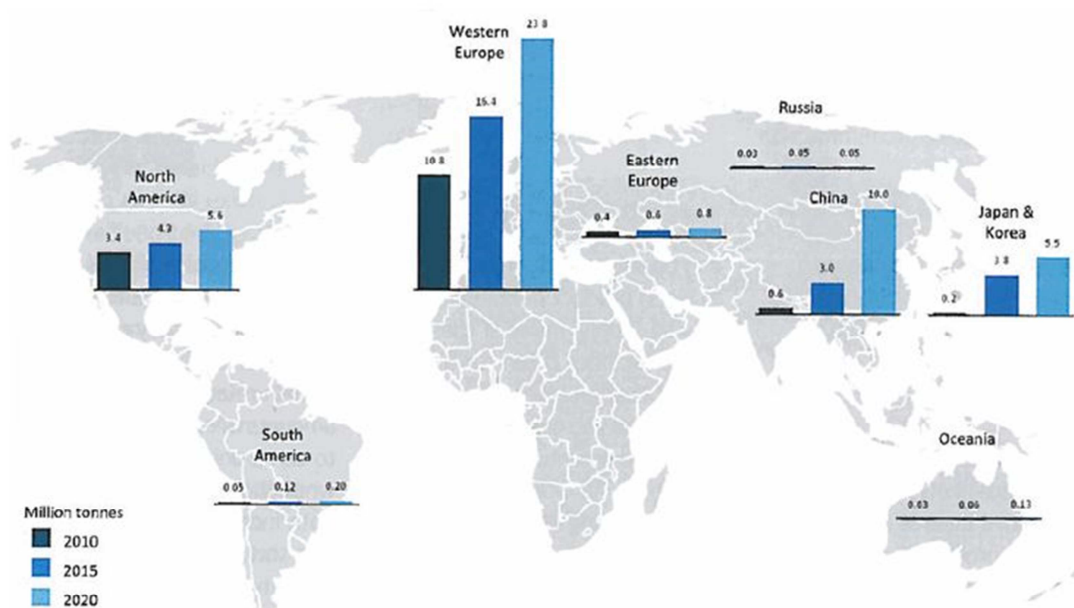
Ambas as reações libertam energia, mas o calor libertado pela reação (1) é menor que o libertado pela reação (2), pois na reação (1) parte da energia libertada é usada para vaporizar a água. Assim, o calor libertado pela reação (1) é inferior ao calor libertado pela reação (2), correspondendo o primeiro ao poder calorífico inferior (PCI) e o segundo ao poder calorífico superior (PCS) do combustível. No processo de combustão da biomassa em caldeiras a água produzida pela reação de combustão encontra-se tipicamente no estado gasoso, pelo que no projeto deste equipamento é o PCI que deve ser tomado em consideração. Uma discussão mais detalhada sobre a combustão da biomassa será realizada mais adiante, quando for discutido o mecanismo de combustão deste material.

1.2.2. O mercado europeu de *pellets*

O mercado de biomassa, como de qualquer outro bem de consumo, depende da oferta e da procura. As fontes de matéria-prima diferem de país para país. Estas podem ser resíduos florestais, resíduos agrícolas ou restos de madeira que tenha sido utilizada para outros fins, podendo igualmente serem de material virgem, como cereais ou outras plantas. A sua procura é influenciada pelo custo associado à sua utilização, o qual depende de vários fatores, incluindo decisões de ordem política, como sejam taxas ambientais, comércio de cotas de emissão gasosas, incentivos fiscais, e outros, que variam de país para país. A

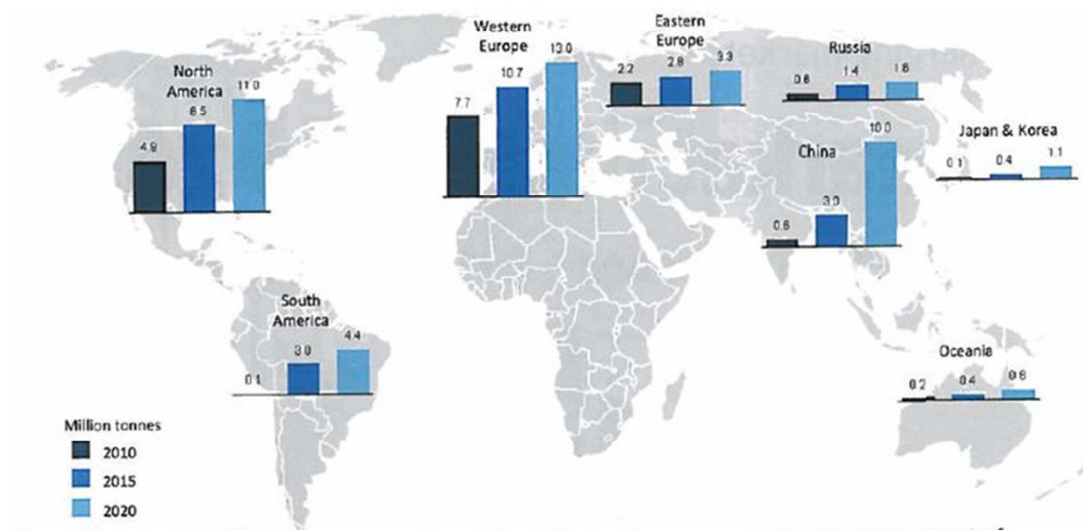
produção de *pellets* representa a possibilidade de usar estes diferentes resíduos como um combustível uniforme. Caldeiras que usam *pellets* como combustível permitem a sua operação automática, o que é particularmente vantajoso para os consumidores domésticos, quando comparada com o uso de lenha, mantendo as emissões gasosas dentro de limites aceitáveis [41]. Um dos incentivos à utilização de biomassa como combustível são as metas para 2020 da União Europeia (UE) relativas ao incremento das fontes renováveis de energia e à redução de emissão de gases com efeito de estufa [31].

Atualmente os *pellets* de madeira são uma das comodidades sólidas de biomassa mais comercializadas, na Europa Ocidental o consumo em 2010 era de 10,8 milhões de toneladas (Figura 2), contudo, o mercado de *pellets* de biomassa está em franco crescimento na Europa [63], onde se espera que o consumo em 2020 seja superior a 23 milhões de toneladas [33,57]. A Figura 3 mostra que a produção de *pellets* na Europa Ocidental é inferior à procura, pelo que a Europa é uma potência importadora desta comodidade, fazendo, por isso, todo o sentido que países como Portugal, com uma área florestal e agrícola significativa, invistam na produção de *pellets* de biomassa.



The Global consumption of wood pellets BioenergyInsight, July 2011

Figura 2 - Consumo mundial de *pellets* de madeira [33]



The Global production of wood pellets BioenergyInsight, July 2011 –

Figura 3 - Produção mundial de *pellets* de madeira [33]

A Diretiva 2009/28/EC para fontes de energia renovável tem como um dos objetivos que em 2020 a energia produzida por fontes renováveis seja 20% de energia total consumida; em 2008 a fração de energia de fontes renováveis era apenas de 8,4%, dos quais 3,9% correspondiam ao uso de madeira e seus resíduos, incluindo *pellets* de madeira (0,2%). Para atingir esta meta a Diretiva da UE define três vias: uso de eletricidade renovável, energia renovável para aquecimento e refrigeração, e combustíveis renováveis para utilização em meios de transportes. O recurso a *pellets* de biomassa pode contribuir, assim, para se atingir os dois primeiros objetivos, levando igualmente a uma redução da emissão de gases com efeito de estufa, o que vai de encontro a uma outra meta da referida Diretiva da UE, que é a redução em 20% da emissão de gases de efeito de estufa.

Em janeiro de 2010 foram publicadas as primeiras normas da União Europeia relativas às especificações e qualidade dos biocombustíveis sólidos, nomeadamente as normas EN 14961 e EN 15234, que foram publicadas em várias subdivisões [1]. A EN 14961-1 é de uso geral e incide sobre os requisitos gerais referentes aos diferentes tipos de biomassa e às propriedades que devem ser especificadas, a EN 14961-2 especifica as normas para os *pellets* de madeira para uso não industrial, a EN 14961-3 refere-se a briquetes de madeira, a EN 14961-4 a estilha de madeira para uso não industrial, a EN 14961-5 aplica-se a lenha, e a EN 14961-6 aborda os outros tipos de *pellets* (que não *pellets* de madeira). A Tabela 2

resume as principais características técnicas dos *pellets*, de acordo com a norma europeia EN 14961.

As várias subdivisões da norma EN 15234 (EN 15234-1 a EN 15234-6) têm por objetivo assegurar a qualidade do biocombustível sólido, nas suas várias formas (previstas na norma EN 14961). Estas normas visam assegurar a qualidade dos biocombustíveis ao longo de toda a cadeia de produção, desde do fornecimento da matéria-prima até à utilização pelo consumidor final [23].

Um dos principais entraves a um maior crescimento do mercado de *pellets* para consumo doméstico tem sido o desconhecimento do pequeno consumidor (menos de 100 kW) de que os *pellets* são uma boa alternativa aos combustíveis convencionais [25]. Contudo, existem igualmente vários problemas técnicos, e não só, ligados ao uso de *pellets* em sistemas de aquecimento de pequena escala, como sejam o armazenamento, transporte e disponibilidade. Os *pellets* de madeira são mais caros do que os resíduos de madeira devido às necessidades de processamento e transporte inerentes à sua produção, pelo que um aumento significativo do custo dos *pellets* pode afetar a viabilidade económica do seu uso em caldeiras a biomassa, quando comparado com a utilização alternativa de resíduos de madeira. Para os consumidores de pequena dimensão, incluindo o consumidor doméstico, o gás natural é um forte concorrente dos *pellets* de biomassa, não só em termos de preço, mas também em termos da automatização do sistema. A Tabela 3 mostra uma comparação entre o uso de caldeiras a *pellets* e a gás natural, onde se verifica que, embora o custo das caldeiras a *pellets* seja bastante superior às de gás natural, o menor custo do combustível pode compensar o uso deste tipo de caldeiras [80], em particular, se tivermos em consideração que a rede de gás natural está particularmente concentrada no litoral e nas grandes cidades, o que faz com que esta opção de combustível não seja uma alternativa viável em muitas regiões de Portugal, particularmente no interior, tornando, assim, as caldeiras a biomassa como a melhor opção. Nesta comparação deve-se ter igualmente em consideração que o gás natural é um combustível fóssil, por isso, com reservas limitadas, sendo previsível que o seu preço vá aumentando no futuro, e que a biomassa é uma opção energética mais sustentável e com menores problemas ambientais.

Tabela 2 - Propriedades normativas para *pellets* (EN 14961-1)

Diâmetro (mm)	6 ± 1
Comprimento (mm)	3,15 – 40
Humidade (%)*	< 10
Cinzas (%)**	≤ 1,0
Durabilidade mecânica (%)*	≥ 96,5
Finos (%)*	≤ 1,0
Aditivos (%)*	1 (amido)
Densidade global (kg/m ³)	≥ 600
Poder calorífico líquido (MJ/kg)	≥ 16,5
Teor de nitrogénio (%)**	≤ 0,5
Teor de enxofre (%)**	≤ 0,05
Teor de cloro (%)**	≤ 0,03
Temperatura de fusão das cinzas (°C)	≥ 1200

* % ponderal em base húmida

** % ponderal em base seca

Tabela 3 - Comparação de caldeiras a *pellets* e gás natural [51,72]

	<i>Pellets</i>	Gás Natural
Preço médio da caldeira	4 000 €	1 000 €
Eficiência da caldeira	88 %	92 %
Potência calorífica inferior	17 MJ/kg	55 MJ/kg
Preço do combustível	0,04 €/kWh	0,07 €/kWh

1.2.3. O mercado português de *pellets*

Durante o ano de 2012 foram produzidos em Portugal perto de 690 mil toneladas de *pellets*, o que representa um aumento de 8% comparativamente a 2011, tendo-se neste mesmo período verificado um aumento de 41% relativamente ao consumo interno desta comodidade [3]. Em 2013 a capacidade instalada em Portugal para produção de *pellets* era superior a 1 milhão de toneladas (Tabela 4), contudo, a maioria desta produção destina-se à exportação ou utilização por centrais termoelétricas a biomassa, não sendo este aumento de produção acompanhado por um aumento equivalente do consumo por parte do utilizador doméstico [51].

Tabela 4 - Unidades de produção de *pellets* [46]

Entidade	Concelho	Consumo de Biomassa (t/ano)	Estado
Gesfinu Lousada	Lousada	161 000	Em funcionamento
Gesfinu Mortágua	Mortágua	161 000	Em funcionamento
Gesfinu Alcacer	Álcacer do Sal	161 000	Em funcionamento
Enerpellets	Perdrógão Grande	161 000	Em funcionamento
Visabeira	Alcobaça	161 000	Em funcionamento
EnerMontijo	Montijo	161 000	Em funcionamento
Oleiros	Oleiros	150 000	Em construção
Stellept Vidago	Vidago	103 500	Em construção
Sertã e outros	Sertã	150 000	Em construção
Visabeira	Arganil	-----	Em funcionamento

Portugal continental é rico em matérias-primas que podem ser usadas como biocombustíveis sólidos. Quase um terço do território nacional é constituído por florestas [46,51], isto é, aproximadamente 2,05 Mha (31,3% do solo português). Resíduos resultantes do corte de árvores e limpeza de arbustos e mato podem servir como fonte de biomassa para a produção de *pellets*. A madeira pode ser usada diretamente como combustível ou de uma forma processada, na forma de briquetes, *pellets* ou estilha. A análise da evolução da floresta nos últimos 30 anos permite verificar que a área total da floresta não tem variado significativamente, verificando-se, contudo, uma redução apreciável da área de pinheiro bravo (de 1,3 para 0,9 Mha), que é uma das principais matérias-primas para a produção de *pellets* de madeira, e um aumento significativo da área plantada de eucaliptos (de 0,2 para 0,75 Mha), o que se pode justificar pelo maior interesse económico na plantação do eucalipto devido ao seu crescimento ser mais rápido, e por isso economicamente mais atrativo.

Uma avaliação do potencial técnico dos resíduos florestais em Portugal é apresentada na Tabela 5, onde se verifica a existência de um potencial técnico considerável, principalmente para o pinheiro-bravo, eucalipto e sobreiro.

Contudo, há vários fatores que podem reduzir o potencial técnico dos resíduos florestais existentes em Portugal, um desses fatores está relacionado com o facto da extração dos resíduos florestais remover nutrientes essenciais ao equilíbrio do ecossistema local, podendo levar à redução da produtividade da floresta a longo prazo. Como cerca de metade dos nutrientes dos resíduos florestais estão concentrados nas agulhas/folhas, este problema

pode ser minimizado se não se recolher esta parte dos resíduos, ou se esta recolha for feita mais tarde.

Tabela 5 - Quantificação do potencial da floresta em Portugal continental [51]

Espécie	Biomassa (10⁶ kg)
Pinheiro-Bravo	49,69
Eucalipto	36,25
Sobreiro	34,93
Azinhaira	10,67
Carvalho	6,53
Pinheiro-Manso	5,32
Castanheiro	2,41
Acácia	0,72
Outras espécies folhosas	4,99
Outras coníferas	0,96
Total	152,47

Outro fator está relacionado com as características do terreno onde a biomassa está localizada, pois terrenos muito inclinados ou com poucas acessibilidades tornam economicamente inviável a recolha de biomassa. Ainda no que se refere à dificuldade de recolha da biomassa é de referir a falta de cadastro dos terrenos rústicos, que dificulta o conhecimento dos limites e dos proprietários destas propriedades. A importância deste problema fica bem patente se tivermos em consideração que cerca de 93% da floresta pertence a mais de 400 mil proprietários, sendo o restante distribuído entre o Estado e baldios [46]. A dimensão média da propriedade florestal em Portugal assume um valor baixo, que varia entre 2 e 4 hectares, existindo, contudo, diferenças assinaláveis entre as diferentes regiões do país.

A biomassa em Portugal tem origem, essencialmente, em três fontes: resíduos florestais, resíduos da indústria da madeira e resíduos agrícolas. Analisemos com mais algum detalhe estas fontes de biomassa.

A limpeza das florestas é um fator que contribui para a prevenção dos fogos florestais e os produtos obtidos nesta atividade são valiosas fontes de energia. Neste contexto, a Resolução do Conselho de Ministros nº 63/2003, de 28 de abril, definia como meta para 2010 a instalação em Portugal de 150 MW de potência com origem em biomassa florestal.

Para atingir este objetivo o governo lançou em 2006 um concurso para injeção de potência produzida por centrais térmicas a biomassa (100 MW) na rede nacional de eletricidade. A Tabela 6 apresenta as centrais térmicas a biomassa que foram lançadas através deste concurso, referindo-se igualmente outras licenciadas fora deste programa, indicando para cada uma a sua potência, consumo de biomassa e o estado da sua situação atual.

A Resolução do Conselho de Ministros n° 169/2005, de 24 de outubro, pormenoriza as metas para o setor energético. Assim, a produção de eletricidade baseada em energia renovável deveria crescer até finais de 2010 de 39 para 45% do consumo total, sendo o objetivo para a potência instalada obtida a partir da biomassa florestal de 250 MW em 2010, distribuída pelas novas centrais térmicas a biomassa. Esta meta não foi atingida, visto que no final de 2010 a potência instalada era apenas de 106 MW, pelo que a estratégia nacional para a energia mantém a mesma meta, mas agora para o ano de 2020 (Resolução do Conselho de Ministros n° 29/2010, de 15 de abril).

Estas centrais térmicas a biomassa competem pela biomassa existente, o que faz com que haja menor disponibilidade de matéria-prima para a produção de *pellets*. Esta escassez de matéria-prima poderá encarecer o seu preço, o que se repercutirá no preço final dos *pellets*, podendo fazer com que estes se tornem uma alternativa menos atrativa do ponto de vista económico.

Tendo em consideração o potencial de Portugal em biomassa florestal, e considerando um poder calorífico inferior médio (PCI) de 15 MJ/kg, uma eficiência elétrica de 25%, típica em centrais térmicas de combustão, a potência máxima que poderá ser instalada é de 264 MW [26], pelo que a meta portuguesa está muito próxima do valor máximo possível para os resíduos florestais atualmente existentes em Portugal.

Tabela 6 - Centrais dedicadas, cogeração e *pellets* [46]

Entidade	Concelho	Potência (kW)	Consumo de Biomassa (t/ano)	Estado
Projetos implementados antes do concurso de 2006				
EDP Produção Bioelétrica	Mortágua	7 400	115 000	Em funcionamento
Centroliva	V.V. Rodão	6 000	60 748	Em funcionamento
Central Biomassa TS Maria	Oliveira de Azeméis	10 044	121 500	Em funcionamento
Rodão Power	V.V. Rodão	13 232	140 000	Em funcionamento
EDP Produção Bioelétrica	Contância	13 020	140 000	Em funcionamento
S.P.C.G.	Setúbal	12 090	146 000	Em funcionamento
Enerplus	Aveiro	12 500	146 000	Em funcionamento
EDP Produção Bioelétrica	Figueira da Foz	27 900	400 000	Em funcionamento
Projetos do concurso de 2006				
Probiomass (lote 1)	Valpaços	11 000	133 645	Adjudicada em 2008
MIESE (lote 3)	Braga	10 000	121 500	Adjudicada em 2010
PA Termoflorestal (lote 4)	Monção	4 650	61 000	Licença de estabelecimento
Ecotator (lote 6)	Belmonte	1 920	24 300	Em funcionamento
MIESE (lote 5)	Alijó	11 000	133 645	Adjudicada em 2009
SIAF (lote 8)	Mangualde	10 000	121 500	Não adjudicada
Biobeiraner (lote 9)	Viseu	5 000	61 000	Em projeto
Palser (lote 10)	Sertã	4 000	36 500	Em funcionamento
Enerwood Covilhã (lote 11)	Fundão	10 000	121 500	Adjudicada em 2009
Centro + Bioenergia (lote 12)	Sertã	10 000	121 500	Adjudicada 2010
Enerwood	Portalegre	10 000	121 500	Adjudicada em 2009
Tecneira+Forestech	Rio Maior	6 000	73 000	Adjudicada em 2009
Tecneira+Forestech	Odemira	3 000	36 500	Adjudicada em 2009
Projetos em licenciamento (extra concurso de 2006)				
EDP Produção Bioelétrica	Gondomar	13 050	175 500	Licenciada
EDP Produção Bioelétrica	Mortágua	10 000	243 000	Licenciada
EDP Produção Bioelétrica	Cabeceiras de Basto	10 120	133 645	Licenciada
EDP Produção Bioelétrica	Oleiros	9 300	121 000	Licenciada
EDP Produção Bioelétrica	Monchique	14 650	189 800	Licenciada
Forestech	Alcácer do Sal	1 200	12 150	Licenciada

Isohidra	Anadia	5 000	121 500	Licenciada
Triquimica	Sintra	960	12 150	Licenciada
Projetos de Cogeração				
Portucel	Viana	8 000	97 500	Em funcionamento
Enerpulp	Cacia	6 000	110 370	Em funcionamento
Enerpulp	Figueira da Foz	15 000	219 960	Em funcionamento
Enerpulp	Setúbal	12 000	168 480	Em funcionamento
Caima	Constância	4 000	54 600	Em funcionamento
Celtejo	Rodão	n.d.	n.d.	Em funcionamento
Sonae	----	5 000	65 000	Em funcionamento
Projetos de Cimenteiras				
Sécil	Setúbal	----	30 000	Em funcionamento
Cimpor	diversos	----	5 000	Em funcionamento

A indústria da madeira inclui uma série de atividades como sejam: produção de mobiliário, carpintaria, contraplacados, tacos, serrações e impregnação de madeira, sendo estas empresas essencialmente de pequena e média dimensão. Os resíduos destas indústrias são essencialmente serradura e aparas de madeira. A Tabela 7 mostra a quantidade de resíduos de madeira produzidos por cada um destes subsectores em Portugal. Com o recente aumento de exportações de mobiliário e aglomerados de madeira, esta quantidade tenderá a aumentar.

Tabela 7 - Resíduos da indústria da madeira em Portugal [51]

Subsector	10⁶ kg/ano (base seca)
Serrações	178,0
Impregnados de madeira	0,84
Tacos de madeira (<i>parquet</i>)	70,7
Carpintaria	144,4
Mobiliário	93,4
Contraplacados de madeira	112,9
Total	600,2

O principal fator limitante ao uso dos resíduos de serrações para produção de energia é o facto destes resíduos serem usados para outros fins, como sejam, leitões para animais, trilhos pedestres e fertilizante, entre outros [2,68].

Embora Portugal seja o maior produtor mundial de cortiça, os resíduos desta indústria não são uma fonte de matéria-prima viável porque já são utilizados pela própria indústria corticeira para a produção de energia nas suas instalações.

Na agricultura há igualmente resíduos que podem ser utilizados para a produção de energia, em particular para a produção de *pellets*. A Tabela 8 mostra o potencial energético de vários resíduos agrícolas em Portugal.

Tabela 8 - Potencial de resíduos agrícolas em Portugal [51]

Espécie	10⁶ kg/ano
Palha de cereais	284
Resíduos de azeitona	31
Resíduos de poda	447
Resíduos de amêndoas	93
Total	855

Embora o maior potencial de matéria-prima de origem agrícola em Portugal seja oferecido pela produção de milho, a produção de resíduos de plantações de trigo é de cerca de 300 a 350 mil toneladas, ou seja, claramente suficiente para a criação de um mercado de *pellets* de origem agrícola [51].

Apesar dos resíduos agrícolas terem um elevado potencial para a produção de *pellets*, a sua baixa densidade, dificuldade de recolha, e a incerteza associada à quantidade disponível desta matéria-prima em cada ano, para além dos problemas de transporte, e a necessidade de pré-processamento deste tipo de biomassa para remoção de resíduos agrícolas sem interesse energético (pedras, solo, etc) reduz o interesse neste tipo de resíduos para a produção de *pellets*. De igual modo, *pellets* resultantes de resíduos agrícolas têm maiores emissões gasosas e produzem mais cinzas que os *pellets* oriundos de resíduos florestais e industriais [52].

A produção de *pellets* é um processo com várias etapas sequenciais que incluem: pré-processamento, secagem, moagem, compactação, arrefecimento, separação por tamanhos e embalamento. Detalhes sobre este processo, que ultrapassa o âmbito desta tese, podem ser encontrados em várias referências [29,53].

Para o preço final dos *pellets* contribuem vários custos, nomeadamente, custo a matéria-prima, custo de produção e custo de distribuição. Monteiro et al. [51] fizeram uma análise da contribuição destes vários custos para o preço final dos *pellets* em Portugal, que se resume a seguir.

O preço da matéria-prima inclui o custo da recolha, transporte, processamento e distribuição. O custo da recolha, que pode variar significativamente dependendo do tipo de resíduo e da sua localização, pode ser estimado para resíduos florestais como tendo um valor médio de 14,50 €/t. O custo de transporte depende do preço do combustível (tipicamente gasóleo) e da densidade do material transportado, podendo, a preços de 2013, ser estimado em 0,61 €/(t.km) para o transporte de madeira e 0,24 €/(t.km) para o transporte de estilha de madeira. Em algumas situações é necessário a produção de aparas a partir dos resíduos florestais, cujo custo médio é estimado em 5,05 €/t.

O custo da produção dos *pellets*, que é o que mais contribui para o custo final desta comodidade, depende de vários fatores, nomeadamente, custo de mão-de-obra, custo de energia e custo de manutenção. O custo da energia, um dos mais importantes, depende do tipo de unidade industrial, e varia entre 30 e 70 €/(t.h). O custo de manutenção pode ser estimado como sendo de 4 €/t [4]. O custo de mão-de-obra dependerá do tipo de instalação, podendo-se considerar que tipicamente uma unidade de produção de *pellets* possui, no mínimo, 5 funcionários por turno.

Os custos de distribuição estão associados ao custo de transporte e embalagem. O estudo de Monteiro et al. [51] conclui que o custo mínimo de produção de *pellets* em Portugal é de 87 €/t e aumenta linearmente com a distância entre o local de recolha da matéria-prima e a unidade de processamento. A Tabela 9 resume os vários custos que contribuem para o preço final dos *pellets* em Portugal.

Como já foi referido, para o crescimento do mercado de *pellets* em Portugal há dois obstáculos que têm de ser transpostos. Primeiro, ao nível da produção, são as limitações de recursos de biomassa para produção de *pellets*, que já foram discutidas e que podem ser um obstáculo à criação de novas unidades de produção de *pellets*. O segundo, ao nível de penetração de mercado, é conseguir convencer o pequeno consumidor que os *pellets* de biomassa podem ser uma boa alternativa aos combustíveis tradicionais. Em Portugal 85%

das habitações usam sistemas de aquecimento, incluindo lareiras, embora apenas 3% das habitações tenham aquecimento central [12].

Um outro fator que se opõe à expansão do uso de caldeiras a *pellets* relaciona-se com o seu preço e com o facto deste tipo de caldeira necessitar de mais espaço que as caldeiras a gás natural, nomeadamente para o armazenamento do combustível sólido. Contudo, o uso de *pellets* torna-se mais económico para grandes utilizações (mais de 1000 horas/ano), sendo o investimento neste equipamento amortizado em menos de 5 anos [51].

Tabela 9 - Contribuições para o custo da produção de *pellets* em Portugal [51]

Etapa	Operação	Custo
Matéria-Prima	Moagem	5,05 €/t
	Recolha	14,50 €/t
	Transporte	0,24-0,61 €/(t.km)
Produção	Mão-de-obra	2-4 €/t
	Energia	80-130 kWh/t
	Manutenção	4 €/t
Distribuição	Embalamento	12 €/t
	Transporte	0,06-0,09 €/(t.km)

Devido à falta de procura por parte do consumidor doméstico, o preço atual dos *pellets* no mercado nacional é relativamente baixo, entre 120 a 190 euros/tonelada [81], enquanto noutros mercados europeus os valores chegam aos 140 euros/tonelada para o consumidor industrial e 220 euros/tonelada para os consumidores domésticos [63].

2. Caldeiras Domésticas a Biomassa

2.1. Generalidades

A elevada qualidade e uniformidade de tamanho e geometria dos *pellets* faz com que este combustível sólido seja particularmente atrativo, quando comparado com outras formas de biomassa, para utilização em caldeiras. O desenvolvimento de caldeiras automáticas para biomassa com um conforto operacional semelhante ao do aquecimento com combustíveis líquidos e gasosos só é possível usando *pellets* como combustível.

A operação automática da caldeira é mais fácil de ajustar para os *pellets* do que para o restante tipo de biomassa, pois os *pellets*, para além de possuírem um teor de humidade praticamente constante, têm uma dimensão uniforme, sendo por isso mais fáceis de armazenar e transportar. Os sistemas a *pellets* são igualmente menos propensos a avarias e mais práticos do que os sistemas a lenha, podendo-se usar sistemas automáticos de alimentação e espaços de armazenamento mais compactos.

Os *pellets* podem ser usados como combustível numa gama alargada de caldeiras, desde das de pequena dimensão, até 100 kW, às de dimensão média, 100 a 1000 kW, e de grande dimensão, mais de 1000 kW. Os sistemas de pequena dimensão são usados não só para aquecimento de residências, mas também por pequenos utilizadores industriais [53].

Quando nos focamos na indústria europeia de biomassa para aquecimento verificamos que esta é muito diversificada abrangendo os mercados residencial e industrial, e incluindo as unidades de produção de energia a partir da queima de combustíveis (i.e., as centrais a biomassa). Os produtores de caldeiras oferecem, por isso, caldeiras com uma vasta gama de potências, que vão desde alguns kilowatts até aos megawatts. Nesta secção vai-se analisar o mercado europeu de caldeiras de pequena e média potência, incluindo potências

até aos 200 kW, fazendo-se igualmente referência ao mercado português de caldeiras a biomassa para uso doméstico.

Como já foi referido, a importância dos *pellets* de biomassa para aquecimento com equipamentos de pequena e média escala tem vindo a crescer em toda a Europa, para o que tem contribuído algumas políticas governamentais de incentivo à sua utilização, em particular na Europa do Norte e Europa Central. Estes incentivos, e o correspondente crescimento do mercado de *pellets* de biomassa, tem levado ao aumento da eficiência e fiabilidade destes equipamentos, com a correspondente diminuição de emissões poluentes.

As tecnologias existentes para a combustão de biomassa são várias, incluindo a combustão em leito fixo, combustão em leito fluidizado e combustão em leito pulverizado [76].

Míguez et al. [48] apresentaram um estudo de caldeiras de biomassa de baixa potência, que inclui a análise de informação muito diversificada relativa aos 27 países da UE e incluindo igualmente a Noruega e a Suíça. Este estudo tenta associar os equipamentos com os combustíveis para que são apropriados, pois devido à diversidade da biomassa as caldeiras devem ser projetadas tendo em consideração o combustível que irão utilizar. Para analisar até que ponto as conclusões deste estudo são aplicáveis a Portugal, fizemos uma pesquisa para tentar caracterizar as caldeiras a biomassa comercializadas em Portugal, estudo este que incluiu a análise de 89 modelos diferentes de caldeiras domésticas de biomassa comercializados por 18 empresas.

Segundo aqueles autores existe no mercado dois tipos principais de equipamentos, salamandras (Figura 4) e caldeiras (Figura 5). As salamandras são sistemas de aquecimento que são colocados na divisão que se quer aquecer, possuindo um sistema de armazenamento de *pellets* que, dependendo da sua constituição, pode ser suficiente para algumas horas ou até mesmo alguns dias de operação. O recurso a um sistema de camisa de água permite distribuir o calor gerado na câmara de combustão pelas várias superfícies que se pretende aquecer, funcionando assim a salamandra como um sistema de aquecimento central.

As caldeiras são sistemas de aquecimento central e/ou produção de água quente sanitária (AQS). As caldeiras podem possuir um queimador externo, em que a combustão dos *pellets* ocorre no exterior da caldeira e só os gases resultantes da combustão (i.e., os fumos) entram na caldeira, o que permite que a otimização da operação do queimador e da caldeira

sejam feitas em separado. Este tipo de sistemas tem igualmente a vantagem de permitir a fácil conversão de caldeiras já existentes, a gás ou outros tipos de combustíveis, em sistemas a *pellets*, mudando simplesmente o queimador e mantendo a caldeira já existente.



Figura 4 - Salamandra a biomassa [39]

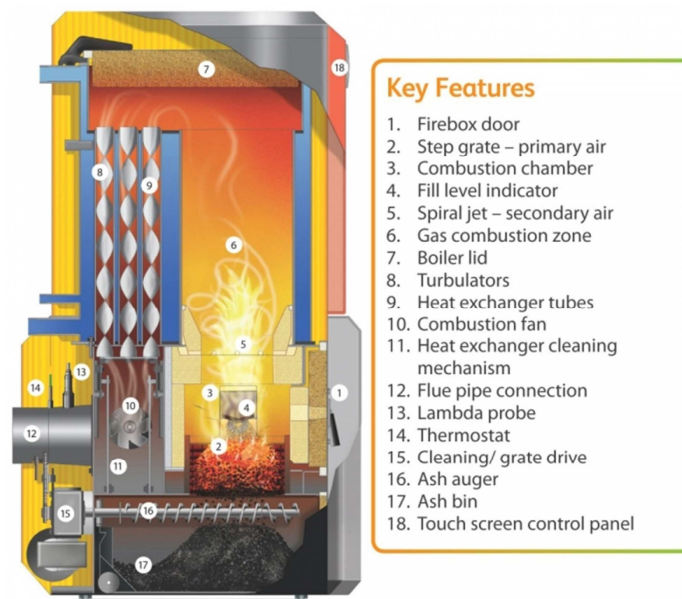


Figura 5 - Esquema de uma caldeira a biomassa [73]

Relativamente ao tipo de biocombustível, existem cinco tipos principais de combustíveis: *pellets* (granulado), lenha (toros de madeira), estilha de madeira (*wood chips*), estilha misturada com *pellets*, e poliocombustíveis (p.ex., *pellets*, estilha e cascas de amêndoas). Assim, existem várias combinações possíveis de equipamentos com biocombustíveis, contudo, Miguez et al. [48] identificaram seis destas combinações como sendo as mais comuns no mercado europeu, nomeadamente: caldeiras para *pellets*, caldeiras para estilha de madeira, caldeiras para lenha, caldeiras para estilha de madeira e *pellets*, caldeiras para poliocombustíveis e salamandras para *pellets*.

Os fabricantes de caldeiras oferecem uma gama alargada de tipos de caldeiras e potências, sendo a maioria destas empresas localizada na Alemanha e na Áustria (correspondendo a aproximadamente 80% da produção total na Europa), logo seguidas pela Itália, Dinamarca e Suécia. Considerando o tipo de combustível, 31% do mercado europeu corresponde a caldeiras a *pellets*, 22% a caldeiras a lenha e 17% a caldeiras para estilha de madeira [48]. O restante do mercado é composto por caldeiras a *pellets* usadas em combinação com outros combustíveis, principalmente estilha de madeira. A produção de caldeiras a biomassa é regida por normas internacionais que estabelecem as especificações relativamente ao projeto, fabrico, construção, segurança, eficiência e emissões gasosas, assim como os testes que devem ser realizados para a sua certificação. As normas mais usadas são a EN-14785:2003, para potências nominais até 50 kW, e a EN-303-5:1999, para potências até 300 kW [55,61].

Os principais componentes e opções tecnológicas das caldeiras, independentemente do tipo de combustível usado, são:

- Câmara de combustão / queimador / sistemas de ignição;
- Sistema de alimentação;
- Permutador de calor.

2.1.1. Tipo de permutador de calor

O estudo de Miguez et al. [48] permitiu concluir que no mercado europeu se encontram principalmente permutadores de calor do tipo pirotubulares, isto é, em que os gases

quentes (fumos) circulam dentro dos tubos do permutador. Nas caldeiras a *pellets* este tipo de permutadores chega a corresponder a mais de 90% do mercado. Os permutadores aquatubulares, em que é a água que circula dentro dos tubos, podem ser encontrados nas caldeiras a estilha de madeira (36%), caldeiras a lenha (26%) e caldeiras a *pellets* e estilha de madeira (27%). Em 80% dos casos os permutadores são colocados na posição vertical, apenas em caldeiras a policom bustível e salamandras a *pellets* se verifica a opção por outro tipo de arranjo do permutador. A principal vantagem dos permutadores pirotubulares, relativamente aos aquatubulares, é contribuir para uma maior durabilidade da caldeira, pois, como os fumos são arrefecidos por contacto com o fluido circulante que os envolve, os vários componentes da caldeira ficam assim protegidos das elevadas temperaturas dos fumos [66].

No nosso estudo do mercado português verificamos que cerca de 68% das caldeiras a *pellets* usa permutadores de tubos verticais, 23% permutadores de tubos horizontais, e 9% permutadores com tubos alhetados. Nesta pesquisa não foi possível obter informação consistente sobre se esses permutadores eram do tipo pirotubulares ou aquatubulares.

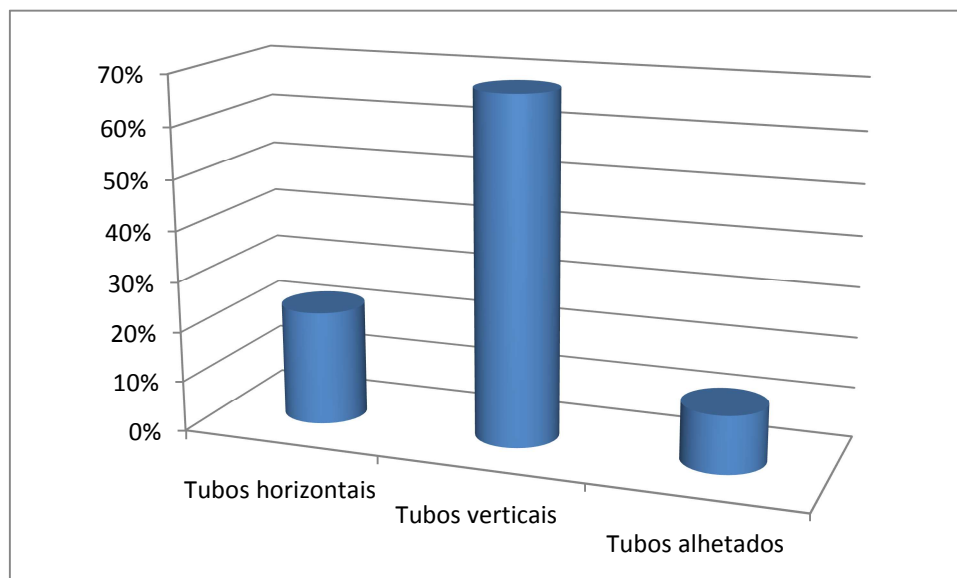


Figura 6 - Tipos de permutadores usados no mercado português

2.1.2. Tipo de queimador

O queimador é um componente que deve ser convenientemente projetado para queimar continuamente, e eficientemente, um determinado tipo de combustível. Alguns queimadores estão equipados com um reservatório ou silo de alimentação de pequena dimensão, que pode operar manual ou automaticamente, e que é usado como ponto intermédio de armazenagem da biomassa guardada em silos maiores.

Os três principais tipos de queimador são os de leito fixo (grelha fixa), grelha móvel e prato de queima (tipo vulcão). Quase todas as caldeiras de *pellets* (99,3%) e a lenha utilizam queimadores do tipo leito fixo.

A análise realizada por Miguez et al. [48] permitiu concluir que os queimadores do tipo grelha móvel são os preferidos nas caldeiras de estilha de madeira (41,3%), sendo igualmente usados nas caldeiras a *pellets* e estilha (22,9%).

Os queimadores do tipo prato de queima, que correspondem a 5% do total, requerem a adição contínua de combustível. Para este tipo de queimadores o combustível é alimentado através de tubagem adequada à parte inferior do leito de combustão. O combustível novo, ao ser alimentado, empurra as partículas parcialmente queimadas para fora até que as partículas completamente queimadas caem da retorta.

Com o aumento da potência das caldeiras, o queimador do tipo grelha móvel torna-se preferível, principalmente para caldeiras com potência superior a 40 kW. Em contraponto, o queimador do tipo prato de queima vai sendo cada vez menos usado com o aumento da potência da caldeira, não sendo o seu uso recomendado para potências superiores a 100 kW.

Uma análise dos queimadores do tipo grelha fixa mostra que existem vários arranjos possíveis: grelha fixa com alimentação horizontal, que é a mais comum, queimadores em anel com injetores de ar (Figura 7), queimadores cilíndricos em aço ou aço inox, e queimadores com grelhas em funil (Figura 8). O material mais usado no fabrico de grelhas fixas é o aço inox devido ao seu baixo custo. Contudo, este material demora a aquecer (tem uma capacidade calorífica significativa), pelo que alguns fabricantes usam aço refratário, que melhora a fase inicial da combustão ficando rapidamente incandescente, promovendo

assim uma combustão mais completa dos gases. Uma outra opção é a utilização de tijolos refratários, que são mais resistentes ao armazenamento do calor.

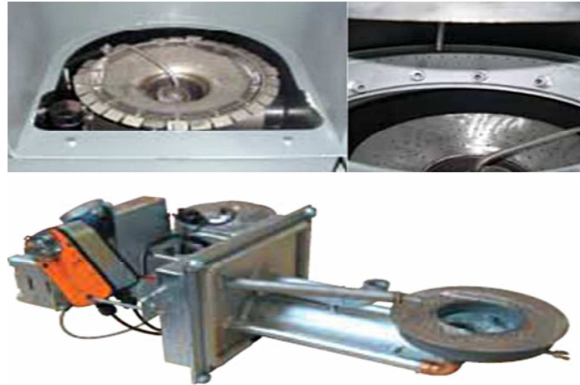


Figura 7 - Queimadores em anel com injetores de ar [48]

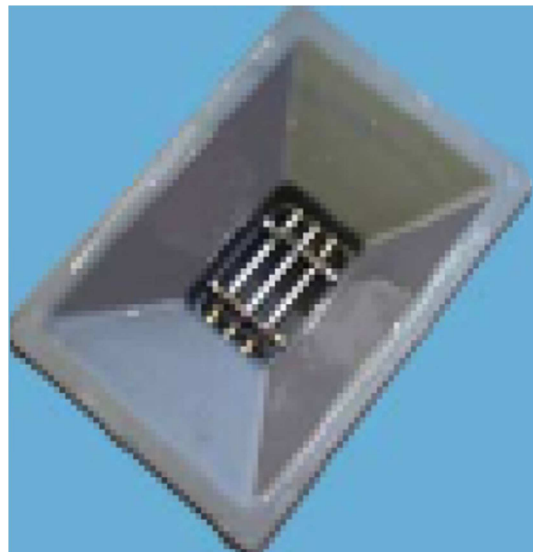


Figura 8 - Grelha em funil [48]

Os queimadores usados nas caldeiras de estilha de madeira são principalmente do tipo anel (21%), enquanto os das caldeiras a *pellets* são essencialmente do tipo cilíndrico, em aço ou

em cerâmica (35%). Em caldeiras a lenha, policombustível, e salamandras a *pellets*, a grelha fixa com alimentação horizontal é o tipo de queimador mais usado (80%).

O queimador de grelha fixa do tipo funil é o que permite conter uma maior quantidade de cinza por unidade de área, o que promove uma combustão mais completa da biomassa, reduzindo assim as perdas de energia.

As grelhas móveis são raramente usadas em caldeiras a lenha e em salamandras e pequenas caldeiras a *pellets*, sendo igualmente pouco utilizadas noutros tipos de tecnologias de queima, representando apenas 14% do mercado. Contudo, existe um tipo muito interessante deste tipo de grelhas, que é a grelha basculante, que promove a remoção da cinza para um cinzeiro existente por baixo da grelha, prevenindo assim a acumulação de cinza na superfície da grelha, o que permite manter praticamente constante o rendimento da caldeira. Este tipo de queimador é usado em 33% das caldeiras para estilha de madeira ou estilha e *pellets*. Neste queimador a grelha pode virar mais de 90 graus em intervalos regulares (Figura 9). Um outro tipo de grelha móvel é a grelha articulada, que é um tipo de grelha vibratória que é usada com combustíveis que sejam propensos a aglomerar. Com a grelha articulada o processo de alimentação é constante e regular, com uma distribuição praticamente constante do combustível devido ao movimento da grelha. Este sistema é usado predominantemente em caldeiras a estilha de madeira e *pellets*.

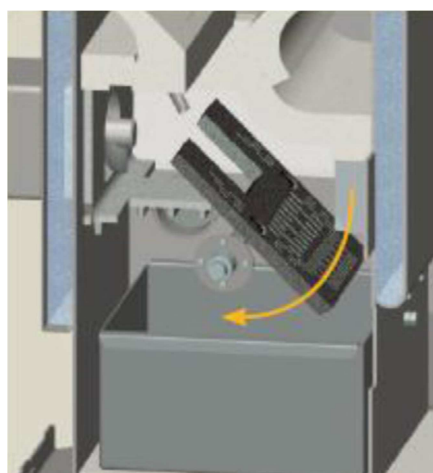


Figura 9 - Grelha basculante [48]

Nas caldeiras a *pellets* e a policombustível as grelhas de passo são muito comuns. O combustível recebe o ar primário por debaixo da grelha, o que permite uma boa refrigeração da grelha e um pré-aquecimento do ar de combustão (Figura 10). Este esquema assegura um rendimento praticamente constante.

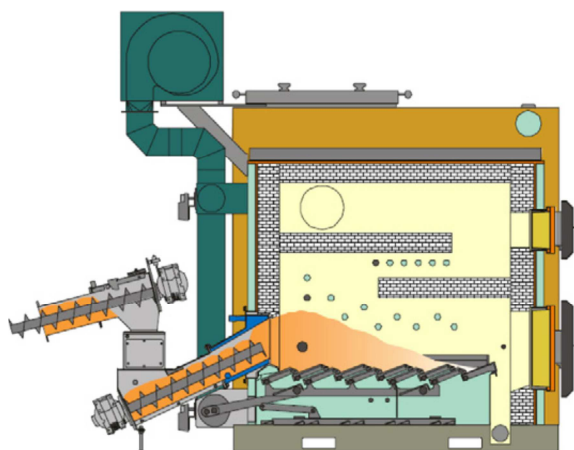


Figura 10 - Grelha de passo [48]

Dois tipos de grelhas, que podem ser consideradas subtipos de grelhas móveis, são a grelha de rotor, que permite uma descarga automática e intermitente da cinza e é muito comum nos queimadores de policombustíveis, mas é raramente usada em caldeiras a *pellets*; e a grelha cilíndrica rotativa, que permite uma combustão completa com menor produção de cinza pois, devido ao movimento da grelha, a área onde está a ocorrer a combustão está continuamente a ser agitada (Figura 11).

A nossa pesquisa do mercado português de caldeiras a *pellets* confirmou o estudo de Miguez et al. [48], em que a maioria dos queimadores usam grelha fixa (81%), como mostra a Figura 12, e apenas 11% usam grelha rotativa. Relativamente à geometria da câmara de combustão, que não foi analisada no estudo de Miguez et al. [48], verificamos que são igualmente usadas caldeiras com câmaras cilíndricas e paralelepípedicas (Figura 13).

O nosso estudo permitiu identificar alguns tipos de queimadores que não são referidos no trabalho de Miguez et al. [48], nomeadamente, queimadores com grelha oca [75], que permite a circulação interior de água, assegurando assim um melhor aproveitamento do

calor e evitando a formação de escória, queimadores de várias etapas (duas ou quatro) [74], em que a queima pode ser feita em vários estágios, e queimadores com tecnologia 3C (Combustor Cerâmico Catalítico), em que o queimador possui um catalisador que aumenta a temperatura de combustão assegurando altos desempenhos e diminuindo de forma considerável as emissões para a atmosfera [18].

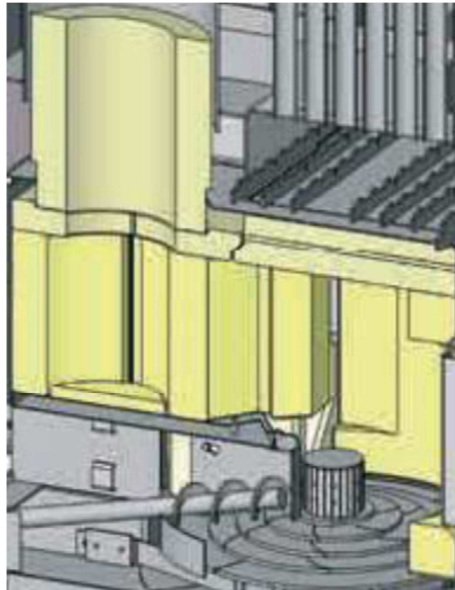


Figura 11 - Grelha cilíndrica rotativa [48]

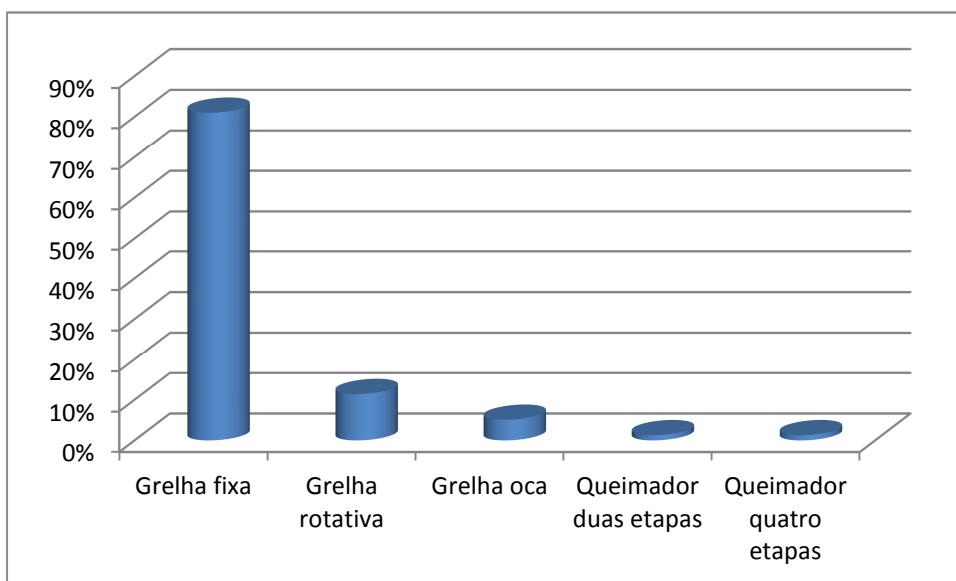


Figura 12 - Tipos de grelhas usadas no mercado português

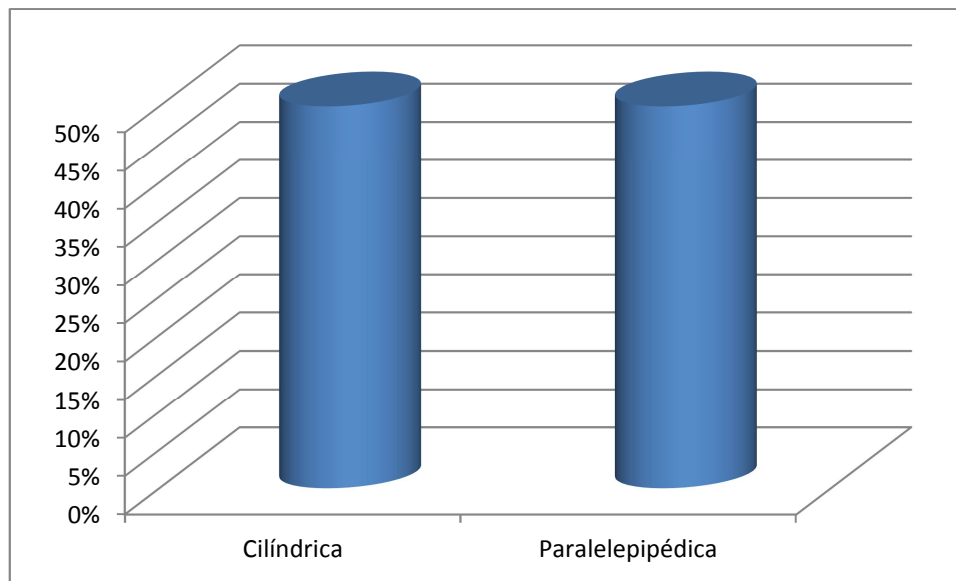


Figura 13 - Geometria das câmaras de combustão usadas no mercado português

2.1.3. Tipo de sistema de ignição

Na maioria das caldeiras domésticas a ignição do combustível é feita automaticamente usando uma das seguintes técnicas:

- **Ar quente:** Um gerador de ar quente produz a chama de ignição, a qual é controlada por um microprocessador localizado no painel de comando eletrónico;
- **Eletricidade:** A ignição elétrica é o sistema de ignição usado em mais de 53% das caldeiras, sendo a ignição produzida por recurso a uma resistência elétrica;
- **Elemento cerâmico:** A ignição é provocada por um elemento cerâmico incandescente. Esta fonte de ignição consome apenas 250 W de eletricidade, sendo por isso vantajosa quando comparada com a ignição por ar quente, que consome entre 1500-1800 W [48], e é mais resistente, e por isso tem um maior tempo de vida, que as resistências elétricas.

Segundo o estudo de Míguez et al. [48], a ignição por elemento cerâmico é a usada em 56% das caldeiras a *pellets* e 67% das salamandras a *pellets*, enquanto o sistema de ignição por fornecimento automático de ar quente é o preferido em 66% das caldeiras que usam estilha de madeira e 84% das caldeiras a *pellets* e estilha de madeira. As caldeiras a lenha continuam, tipicamente, a recorrer à ignição manual.

Na nossa pesquisa verificamos que das caldeiras comercializadas em Portugal, a grande maioria, 92%, usam sistema de ignição elétrica, e 8% sistema de ignição por elemento cerâmico (Figura 14).

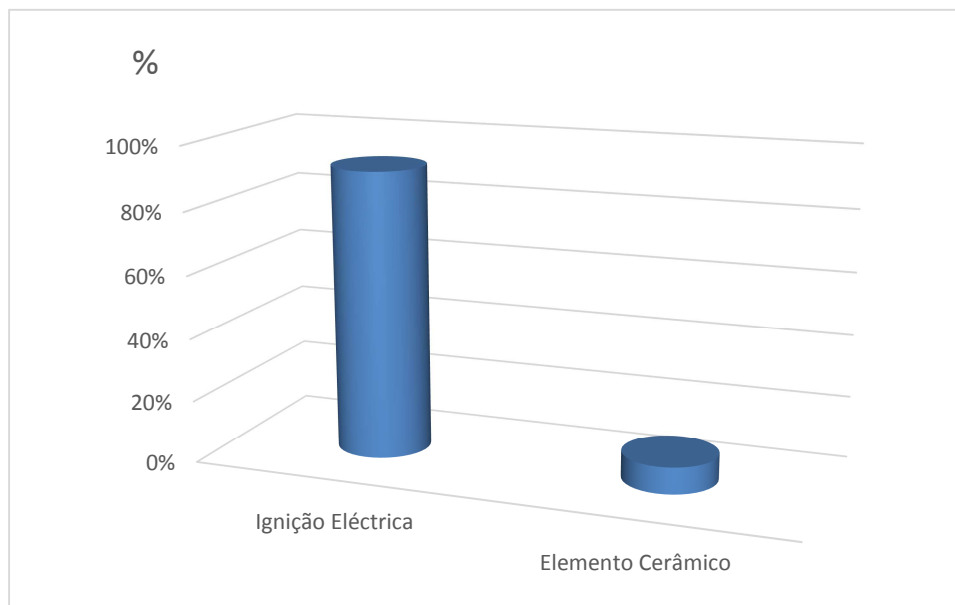


Figura 14 - Sistemas de ignição nas caldeiras comercializadas em Portugal

2.1.4. Tipo de sistema de alimentação

A maioria dos queimadores de lenha (toros de madeira) são alimentados de forma manual e horizontalmente. Os restantes tipos de queimadores podem ser classificados, de acordo com o sistema de alimentação, em: queimadores de alimentação inferior, queimadores de alimentação horizontal e queimadores de alimentação superior.

Queimadores de alimentação inferior: Neste tipo de queimadores o combustível é alimentado à parte inferior da câmara de combustão ou da grelha da retorta, onde é depois puxado para cima. Este tipo de queimadores são usados principalmente para estilha de madeira e *pellets*, ou para misturas destes dois tipos de biomassa. Normalmente a alimentação é feita por um parafuso sem-fim que transporta o biocombustível até à zona de combustão (Figura 15). O ar primário é alimentado pelos lados da retorta e flui para cima, sendo a direção da chama também ascendente. À medida que o parafuso vai avançando os *pellets* vão sendo queimados caindo a cinza para um cinzeiro colocado na parte inferior.

Como não há excesso de combustível, o arrastamento de cinzas é pequeno, mas como os *pellets* entram em contacto direto com a chama pode acontecer que eles voltem acesos para a tremonha, propagando a combustão até ao local de armazenamento. Na alimentação inferior a camada de cinzas que se encontra na zona de combustão não pode ser espessa, o que poderia provocar uma combustão deficiente e a formação de escórias no leito. Uma outra desvantagem deste tipo de alimentação está relacionada com o movimento contínuo ou intermitente do parafuso que pode danificar os *pellets*, ou compactá-los.

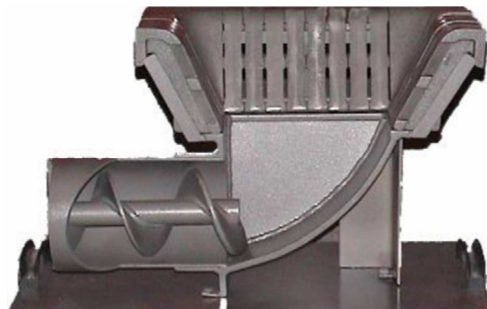


Figura 15 - Queimador de alimentação inferior [48]

Queimadores de alimentação horizontal: Este sistema de alimentação é o mais usado para estilha de madeira e policombustíveis, sendo por vezes também usado em queimadores de *pellets* de madeira (Figura 16). A ideia do sistema de alimentação horizontal é conseguir que o combustível seja fornecido de acordo com as necessidades de aquecimento, reduzindo assim o consumo de combustível. Neste tipo de queimadores o ar primário entra por cima e por baixo do combustível em brasa, sendo a chama horizontal. Nestes sistemas é possível a propagação da combustão ao sistema de armazenagem, o que requer um projeto cuidadoso destes equipamentos. Uma das desvantagens deste sistema é a possibilidade do transportador da biomassa (p.ex., parafuso sem-fim) poder compactar o combustível, o que pode criar uma base de combustão pouco homogénea a que corresponderá uma combustão mais pobre.

Queimadores de alimentação superior: Este tipo de sistema de alimentação foi desenvolvido para a combustão de *pellets* e é o mais usado em caldeiras e salamandras a *pellets*. Os *pellets* são alimentados por cima e caem para ao leito de combustão. A principal vantagem deste sistema é a divisão entre o sistema de alimentação e a chama, o que

permite um melhor controlo da quantidade do combustível alimentado. A desvantagem é que devido à queda dos *pellets* a combustão é mais pobre, aumentando a quantidade de produtos não queimados e poeira (Figura 17).

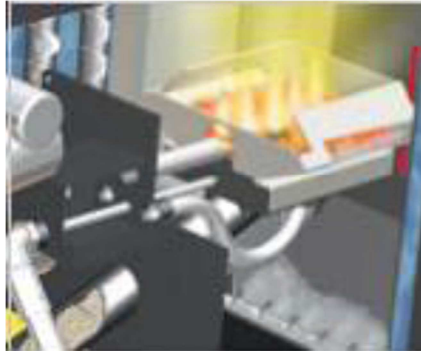


Figura 16 - Esquema de um leito fixo com alimentação horizontal [48]

Neste tipo de sistemas o ar primário e secundário são inseridos diretamente na zona da queima, havendo uma combustão completa dos resíduos dos *pellets* e dos gases por eles libertados. No sistema de alimentação superior não existe o perigo da criação de escórias, uma vez que o ar primário está a ser inserido na zona das cinzas, arrefecendo, por isso, essa zona. De igual modo, o mecanismo de transporte não está diretamente ligado com a zona de combustão, e por isso não há o perigo de os *pellets* voltarem acesos pela tremonha para a zona de armazenamento.



Figura 17 - Esquema de um leito fixo com alimentação superior [48]

A alimentação por cima é o sistema mais usado em caldeiras de baixa potência (< 15 kW), para potências superiores a 40 kW o sistema preferido é o de alimentação horizontal. A alimentação inferior encontra-se em todas as gamas de potências, numa proporção praticamente constante, entre os 20 e 30% [48].

Os resultados da nossa pesquisa (Figura 18) são consistentes com o do estudo de Míguez et al. [48], tendo-se verificado que nas caldeiras a *pellets* comercializadas em Portugal a grande maioria, 94%, usam sistemas de alimentação superior por parafuso sem-fim, e 5% usam sistemas de alimentação híbridos (superior e inferior).

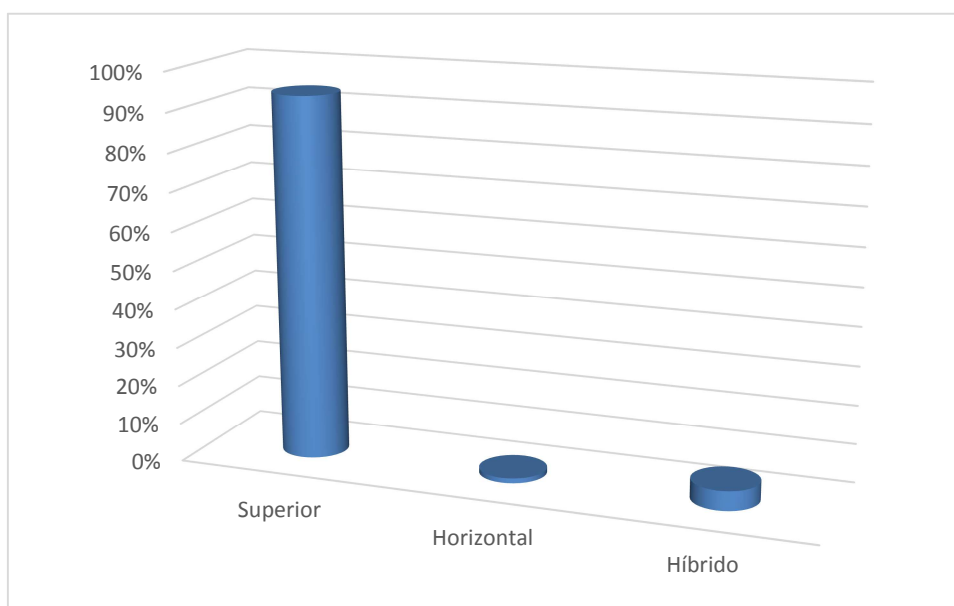


Figura 18 - Sistemas de alimentação nas caldeiras comercializadas em Portugal

2.1.5. Tipo de sistema de controlo

As caldeiras mais desenvolvidas tecnologicamente possuem sistemas automáticos de controlo, que diferem de fabricante para fabricante, e que permitem o controlo de vários parâmetros de operação. Este controlo é importante para garantir o melhor desempenho possível da caldeira e a menor emissão de gases em toda a sua gama de operação. O desempenho da caldeira deve ser o melhor possível tanto à potência nominal (total) como a potências inferiores, seja no começo ou no fim da combustão, qualquer que seja a carga de combustível. O equipamento mais usado para controlo da combustão é a sonda lambda

(Figura 19). Esta sonda está normalmente localizada na chaminé, detetando e controlando a concentração de oxigénio. O objetivo é ajustar os níveis de oxigénio para assegurar uma combustão completa. O ar secundário é aumentado ou diminuído de modo a garantir o nível mínimo de oxigénio. A sonda lambda é usada na grande maioria das caldeiras de estilha de madeira e *pellets*, contudo, apenas 40% das caldeiras a lenha usam este tipo de sonda, enquanto as restantes 60% não possuem qualquer tipo de sistema de controlo [48]. Em mais de 40% das caldeiras e salamandras a *pellets* podem-se encontrar técnicas modulares de controlo. O uso da sonda lambda torna-se mais comum com o aumento da potência da caldeira, sendo ligeiramente menos comum em outros sistemas modulares. Enquanto na Alemanha e na Áustria o uso de sondas lambda em caldeiras é o estado de arte, em países como a Suécia os sistemas de aquecimento a *pellets* recorrem com frequência ao controlo manual.



Figura 19 - Sonda lambda [48]

A maioria dos fabricantes oferecem a opção de um painel de controlo que permite ao consumidor regular vários parâmetros, tais como: caudal de ar, velocidade dos ventiladores de ar, carga de combustível, gestão do reservatório de armazenamento de combustível, regulação do reservatório de água e controlo da temperatura da água.

As caldeiras a biomassa mais recentes produzem uma quantidade muito pequena de cinzas devido a uma combustão mais limpa e eficiente. Estas cinzas são recolhidas em recipientes específicos, designados por cinzeiros, que são instalados nas caldeiras para este fim. As cinzas que caem no queimador são eliminadas automaticamente. Estes queimadores são

construídos com mecanismos específicos para eliminar as cinzas que se vão formando, como sejam: grelhas vibratórias, agitadores, sistemas de vibração, sistemas articulados e parafusos sem-fim, entre outros. Nas caldeiras que não dispõem deste tipo de sistemas, a cinza deve ser removida todas as semanas ou de duas em duas semanas, embora a indicação dos fabricantes seja que a remoção de cinzas deve ser feita apenas uma a três vezes por ano. A maioria das caldeiras possui sistemas automáticos de remoção de cinza, dos quais o mais comum é o parafuso sem-fim helicoidal. Contudo, verifica-se que normalmente as salamandras a *pellets* e as caldeiras a lenha não possuem sistemas automáticos de remoção de cinzas.

Em mais de 75% das caldeiras os tubos do permutador de calor são limpos automaticamente recorrendo a dois tipos de tecnologias completamente diferentes:

Sistema Mecânico: O permutador possui equipamentos localizados na passagem dos gases de combustão para remoção de cinza e escória. Exemplos deste tipo de sistema inclui a limpeza por molas, lâminas para promover a turbulência dos gases de combustão, e que também melhoram a transferência de calor; alavancas, sistemas vibratórios e parafusos sem-fim helicoidais.

Sistemas de recirculação: Estes são sistemas com recirculação de ar a velocidades elevadas. Uma fração dos gases de combustão é forçada através do permutador de calor a grande velocidade, arrastando assim as partículas depositadas, que são posteriormente eliminadas num ciclone

Contudo, em algumas caldeiras a limpeza dos tubos do permutador de calor é realizada de um modo semi-automático, usando, por exemplo, geradores de turbulência (Figura 20) que são ativados manualmente por uma alavanca localizada na parte de fora da caldeira. O recurso a geradores de turbulência é o sistema de limpeza mais usado.

Caldeiras com passagens horizontais, normalmente usadas em caldeiras a gasóleo, não são apropriadas para conversão em caldeiras a *pellets*, porque a formação de cinza e escória é maior, o que requer intervalos menores de manutenção.

No circuito das caldeiras a *pellets* para aquecimento central existem alguns sistemas de segurança, como:

- Válvula de segurança térmica de descarga, que abre ao atingir a temperatura de descarga, e é dotada de ação positiva. Esta válvula é utilizável em caldeiras de combustível sólido, não pulverizado, com vaso aberto e fechado;
- Regulador de tiragem que é instalado na caldeira com o elemento termostático imerso no fluido, e regula automaticamente o caudal do ar comburente e a exaustão dos fumos permitindo uma combustão mais regular e completa;
- Válvulas anti-condensação que regulam automaticamente a temperatura da água de retorno à caldeira. A manutenção da caldeira a uma temperatura elevada previne formação de condensação do vapor de água contido nos gases. A condensação gera incrustações que, agarrando-se às superfícies metálicas do permutador, provocam corrosão, reduzem a sua eficiência térmica e constituem uma fonte de perigo para as condutas de exaustão de gases de combustão, devido a serem inflamáveis. A válvula anti-condensação permite prolongar a vida da caldeira e assegura uma maior eficiência;
- Purgador automático de ar que permite controlar o ar que se liberta da água na fase de aquecimento, e que pode ter efeitos negativos na fiabilidade e no rendimento da caldeira, para além de prevenir a formação de bolsas de ar nos aquecedores e fenómenos de cavitação.

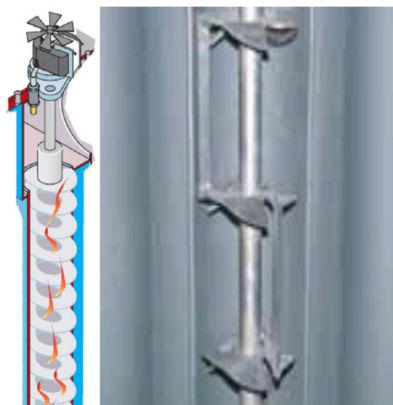


Figura 20 - Geradores de turbulência [48]

A pesquisa realizada ao mercado português de caldeiras de biomassa permitiu concluir que quase todas dispõem de controlo automático por painel eletrónico (podendo dispor de mostrador LCD), incluindo cronotermóstatos que permitem a programação diária, semanal

ou de fim-de-semana, sistemas estes que podem ser comandados por controlo remoto. No que se refere aos sistemas de limpeza dos permutadores, 68% usam sistemas automáticos, e 32% sistemas manuais (mecânicos) (Figura 21). De igual modo, 57% dos sistemas usados para limpeza de cinzas são manuais, e 31% automáticos (Figura 22), sendo de referir a existência de um sistema de prato rotativo associado a um cinzeiro com compressão, que reduz a frequência com que é necessário esvaziar o cinzeiro.

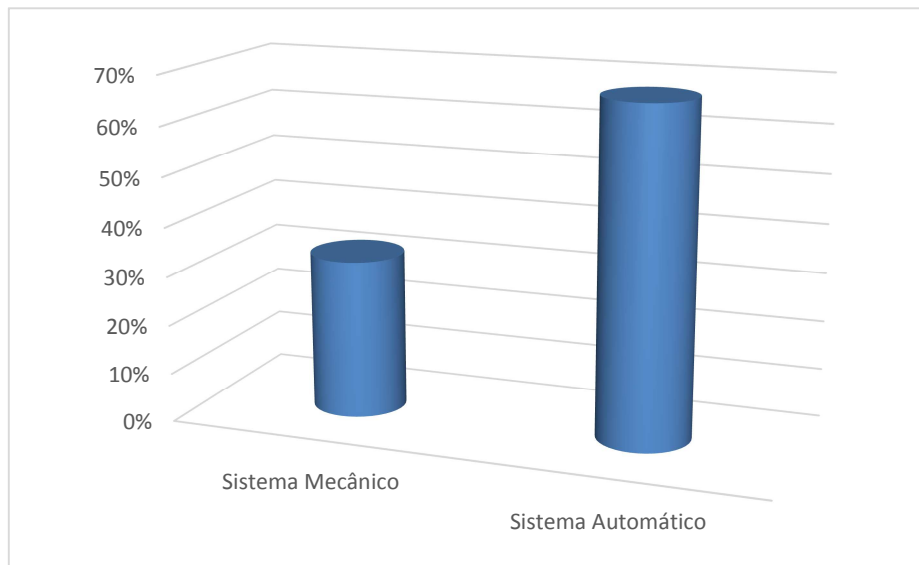


Figura 21 - Sistemas de limpeza dos permutadores das caldeiras comercializadas em Portugal

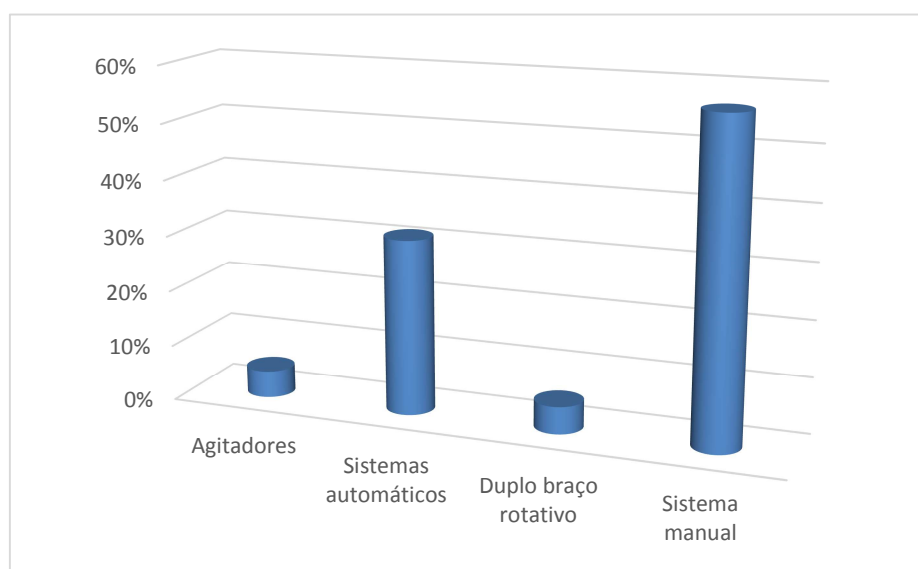


Figura 22 - Sistemas de limpeza de cinza das caldeiras comercializadas em Portugal

No que se refere aos sistemas de controlo, encontramos no mercado português caldeiras com sensores de nível de *pellets* no silo, sensores de temperatura, reguladores de saída de fumos por sistema de borboleta, reguladores automáticos da razão ar/combustível, botões de corte de emergência e sistemas de segurança anti-retorno de chama.

Em Portugal são igualmente comercializados vários modelos de caldeiras que usam o sistema Leonardo para gerir de forma automática a combustão dos *pellets*. Este sistema deteta em contínuo os principais parâmetros da combustão para assegurar um funcionamento otimizado e a economia de combustível. Os parâmetros analisados pelo sistema Leonardo incluem:

- Características da conduta para a coleta e evacuação de fumos (curvas, comprimento, forma, diâmetro, etc);
- Condições ambientais (vento, humidade, pressão atmosférica, altitude da instalação, etc);
- Características dos *pellets* (essência da madeira, compacidade, teor de humidade, etc).

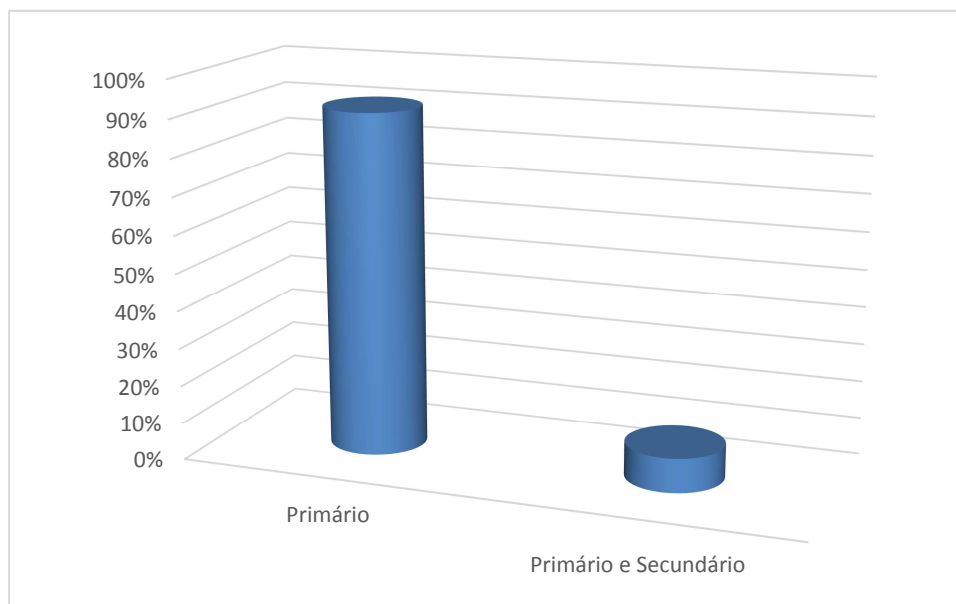


Figura 23 - Sistemas de alimentação de ar das caldeiras comercializadas em Portugal

Antes de avançar na nossa discussão sobre caldeiras a *pellets*, convém referir duas outras conclusões que resultaram da análise ao mercado português deste tipo de sistemas de aquecimento, nomeadamente, quanto ao tipo de admissão de ar, tendo-se verificado que

apenas 9% das caldeiras dispõem de sistema de ar secundário (Figura 23), e relativamente às potências comercializadas, podendo-se verificar que 31% têm potências entre os 20 e 30 kW, e 90 % do total têm potências inferiores a 60 kW (Figura 24).

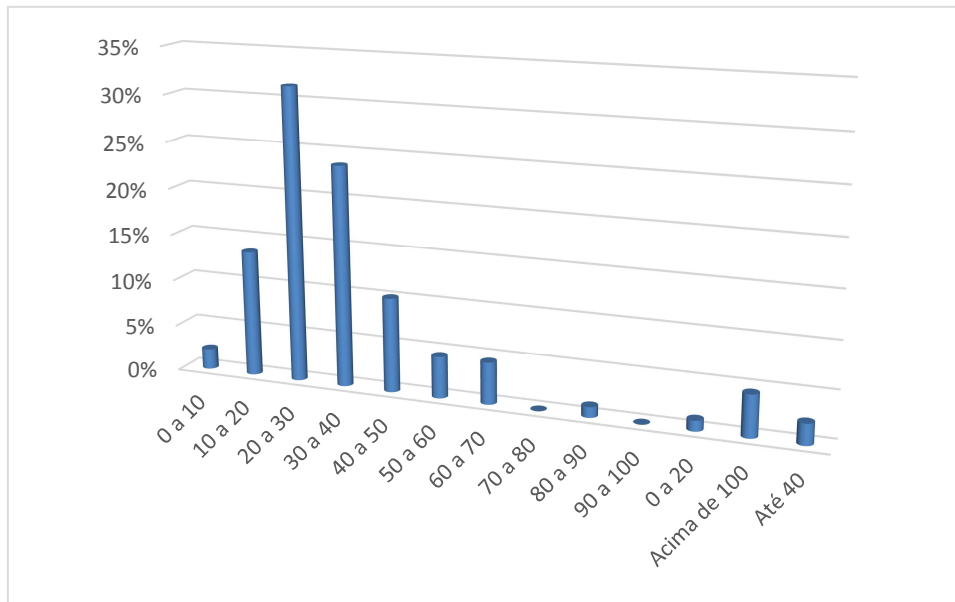


Figura 24 - Potências das caldeiras comercializadas em Portugal

2.1.6. Novas tecnologias

Nesta secção faz-se uma breve referência ao uso de caldeiras de condensação para a queima de biomassa. As caldeiras de condensação, que têm sido usadas principalmente para combustíveis gasosos e líquidos [10,11,47], diferem das caldeiras convencionais pela existência de um segundo permutador de calor que condensa o vapor de água existente nos fumos, aproveitando assim o calor latente libertado durante a condensação do vapor de água como um calor adicional para aquecimento, o que aumenta o rendimento térmico destas caldeiras (Figura 25). Existe, contudo, caldeiras de condensação com um único permutador [10].

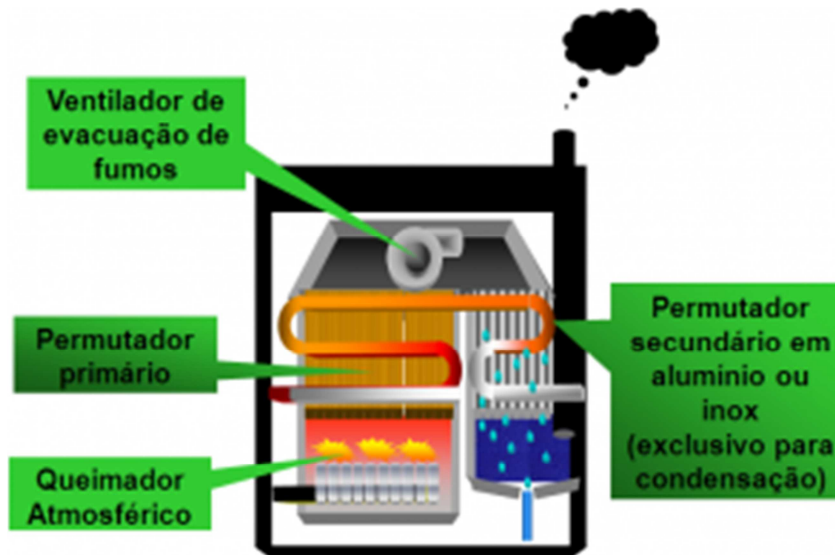


Figura 25 - Representação esquemática de uma caldeira de condensação [10]

Tipicamente, os fumos resultantes da combustão em caldeiras tradicionais estão a 130 °C, enquanto nas caldeiras de condensação estão a cerca de 50 °C, pelo que, para além do aproveitamento do calor latente de condensação da água que se encontra nos fumos, há também o aproveitamento do calor sensível referente a este arrefecimento dos fumos.

Para as caldeiras de condensação são indicados, por vezes, rendimentos térmicos superiores a 100% (da ordem dos 110%), isto deve-se ao facto do rendimento ser calculado com base no PCI do combustível, e o calor libertado pela condensação do vapor de água e pelo arrefecimento dos fumos ser, normalmente, superior ao calor perdido pela caldeira [10]. As principais desvantagens deste tipo de caldeiras são o seu custo elevado e possíveis problemas de corrosão devido à condensação.

A utilização de caldeiras de condensação para a queima de biomassa é muito recente, existindo ainda pouca informação disponível [19,27,28,30,34,56], não tendo sido possível encontrar nenhuma marca que comercializasse em Portugal este tipo de equipamento.

2.1.7. Reservatórios de pellets

Antes de o combustível sólido entrar na caldeira e ser alimentado por um parafuso sem-fim para se realizar a combustão, a biomassa é guardada em depósitos de armazenamento e

depois transportada para reservatórios mais pequenos, com capacidades variáveis, localizados no lado exterior da caldeira. Os *pellets* armazenados nestes reservatórios são depois alimentados à caldeira através de um parafuso flexível ou por um sistema pneumático (aspiração por vácuo).

O depósito de armazenamento com alimentação da caldeira a *pellets* por um parafuso flexível é a solução clássica para o armazenamento de *pellets* [53] (Figura 26), podendo-se optar por construir tetos falsos a baixo custo, por onde se conduzem os *pellets* até ao parafuso de extração, que pode estar associado a um sistema rotativo que permite um fornecimento mais uniforme à caldeira. Se o armazenamento dos *pellets* estiver junto à sala da caldeira, os *pellets* serão diretamente alimentados desde o depósito de armazenamento até a caldeira, não sendo necessário um reservatório junto à caldeira.

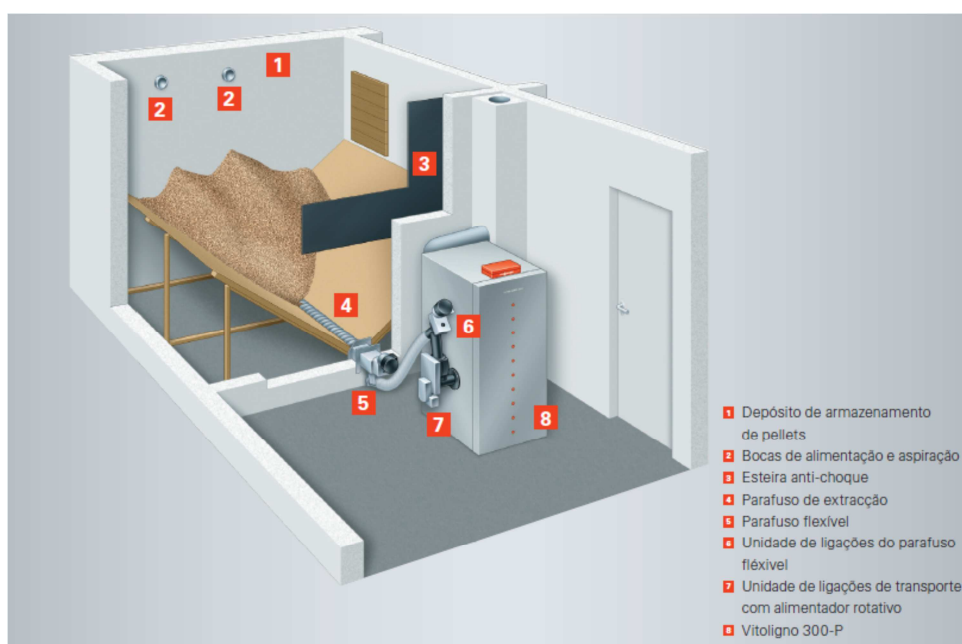


Figura 26 - Sistema de alimentação por parafuso flexível [77]

O sistema pneumático de alimentação é útil quando o armazenamento não está junto à sala onde se situa a caldeira (Figura 27). Com o sistema de aspiração por vácuo os *pellets* podem ser transportados até ao depósito de *pellets* junto à caldeira. Este sistema permite a deslocação dos *pellets* até distâncias máximas de 15 metros.



Figura 27 - Sistema de alimentação pneumático [77]

Para o armazenamento dos *pellets* pode-se optar por silos interiores, que são estanques ao pó, e que são uma solução de baixo custo e caracterizam-se pela sua instalação rápida e simples [77]. Este sistema de distribuição tem igualmente a vantagem de ser facilmente acessível para os trabalhos de manutenção. Se o silo dos *pellets* estiver junto à sala da caldeira, os *pellets* serão diretamente alimentados desde o depósito de armazenamento até a caldeira, não sendo necessário um reservatório junto a caldeira.

Para uma boa qualidade dos *pellets* e uma boa conservação do depósito de armazenamento é preciso ter em atenção certos cuidados, como por exemplo [53]:

- O perigo que representa a existência de quantidades significativas de poeira no armazenamento dos *pellets*;
- O abrasão e o impacto durante a entrega dos *pellets* que irá criar uma poeira fina, que pode ser prevenido usando tubos lisos de descarga com curvas de raio elevado;
- O perigo potencial que representa o uso de aparelhos elétricos dentro do espaço de armazenagem da biomassa;
- Os tubos devem ter ligação à terra para evitar acumulação de carga estática;
- A quantidade de CO no armazenamento, sendo necessária uma boa ventilação;

- Manter a poeira dentro do local de armazenamento dos *pellets* não a deixando entrar na zona da caldeira, colocando, se necessário, um aparelho anti-fogo e em casos extremos um painel de descarga de explosão.

2.2. A combustão da biomassa

Nas caldeiras a *pellets* o calor resulta do processo de combustão da biomassa, processo este que envolve várias etapas, algumas endotérmicas e outras exotérmicas, algumas requerendo a presença de oxigénio, e outras que ocorrem sem intervenção deste comburente, o que torna o processo de combustão da biomassa muito mais complexo de descrever que os processos de combustão dos combustíveis líquidos e gasosos.

Os principais processos que ocorrem durante a combustão da biomassa são (Figura 28):

- 1. Secagem** – Processo inicial em que a biomassa é seca por evaporação da humidade nela contida. Esta é a primeira etapa do processo de combustão da biomassa, verificando-se que quando se atinge na caldeira temperaturas ligeiramente superiores a 100 °C (se a caldeira funcionar à pressão atmosférica) a biomassa se encontra praticamente seca, começando então a sua degradação térmica. Este é um processo endotérmico que, por isso, consome energia.
- 2. Pirólise** – A pirólise, também designada por volatilização, corresponde ao processo de degradação térmica da biomassa na ausência de agentes oxidativos (p.ex., oxigénio). A pirólise é uma degradação térmica da biomassa em produtos gasosos, líquidos e sólidos, em que as moléculas dos hidrocarbonetos que constituem a biomassa se decompõem em moléculas mais pequenas. Deste processo resulta a produção de substâncias gasosas, nomeadamente: hidrogénio (H₂), metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e monóxido de carbono (CO), substâncias líquidas (alcatrão), e substâncias sólidas, que são substâncias ricas em carbono, e que se designam genericamente por carvão. Na modelização deste processo assume-se normalmente que o alcatrão é igualmente gasificado dando origem a gases idênticos aos obtidos na pirólise. Este processo é endotérmico, requerendo o fornecimento de energia para se realizar.

3. Gasificação – O processo de gasificação corresponde à degradação térmica da biomassa na presença de um agente oxidativo, que não o oxigénio, em que o carvão (material carbonado) resultante da pirólise reage com o dióxido de carbono (CO_2) e/ou vapor de água (H_2O), para dar origem a substâncias gasosas de baixo peso molecular (p.ex., CO e H_2). Mais uma vez, este é um processo endotérmico.

4. Combustão – Este processo corresponde à oxidação completa do combustível, que envolve a reação heterogénea do carvão resultante da pirólise e da gasificação com o oxigénio (O_2) existente no ar, e às reações homogéneas que ocorrem na fase gasosa entre o O_2 e os gases formados durante os processos de degradação térmica da biomassa. Estas reações são exotérmicas, libertando quantidades significativas de energia. O calor libertado na etapa da combustão vai ser consumido nas etapas iniciais da degradação da biomassa (secagem, pirólise e gasificação) e no aquecimento produzido pela caldeira. Se a reação de combustão for completa, para além do CO_2 e H_2O existente nos fumos, resultará a formação de cinza, que corresponde à matéria inorgânica que não é combustível.

Embora no uso de caldeiras para aquecimento o processo desejado seja a combustão completa da biomassa, a produção de combustíveis líquidos e gasosos a partir da pirólise e gasificação da biomassa tem merecido um interesse crescente recentemente, visto estes biocombustíveis poderem ser posteriormente usado em máquinas de combustão interna, principalmente turbinas a gás, para produção de energia por processos com elevado rendimento.

O processo de pirólise, gasificação e combustão da biomassa pode ser descrito recorrendo a vários modelos [14], um dos quais assume que a biomassa seca é formada por celulose, hemicelulose e lenhina, em proporções diferentes, que dependem da origem da biomassa, e em que as reações de decomposição térmica destes componentes são independentes, dando todas elas origem a carvão (material carbonado) e gases leves. Assim, conhecida a velocidade de decomposição de cada um dos constituintes da biomassa (i.e., celulose, hemicelulose e lenhina), a velocidade de pirólise de diferentes tipos de biomassa pode ser determinada conhecendo as frações mássicas de cada um destes constituintes para a biomassa a ser considerada. Com base neste modelo de biomassa, o processo de pirólise poderá ser descrito pelas equações (3) a (5),

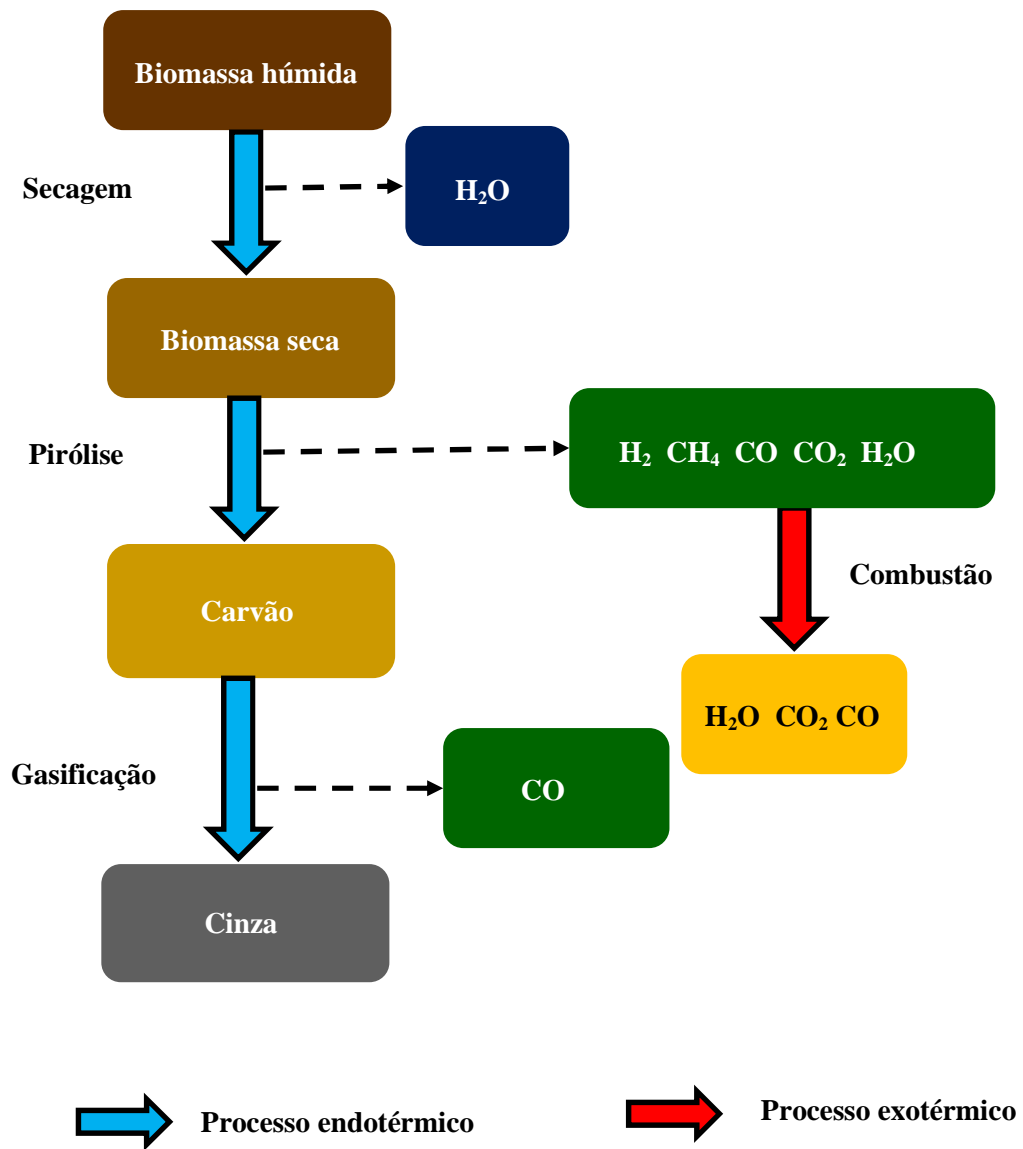
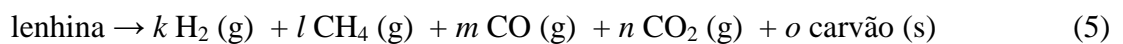
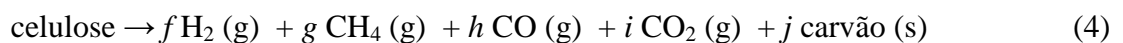


Figura 28 - Representação esquemática do processo de combustão da biomassa



em que os coeficientes estequiométricos, $a-o$, são obtidos experimentalmente [43]. A velocidade da pirólise do combustível seco será a soma das velocidades de decomposição de cada um destes constituintes. Para além da velocidade destas reações de pirólise do combustível seco é necessário tomar em consideração a velocidade de secagem da biomassa (equação (6)), que é o primeiro processo que ocorre. Igualmente, tem que se considerara velocidade das reações da gasificação do carvão (equação (7)), e a velocidade das reações de combustão dos gases libertados durante a pirólise e gasificação. A combustão é um processo que ocorre em simultâneo com o processo de degradação da biomassa (pirólise e gasificação). As equações (8) a (12) representam as reações homogéneas em fase gasosa que se considera que ocorrem durante o processo de combustão da biomassa [14, 43].

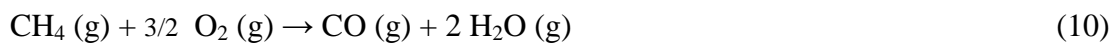
Secagem



Gasificação



Combustão



3. Modelação Numérica da Combustão de Biomassa

O objetivo deste trabalho foi iniciar o estudo do comportamento de caldeiras domésticas a *pellets* para otimização do seu projeto e condições de operação, bem como criar uma base para avaliar a validade de tecnologias emergentes no mercado. Para atingir este objetivo optou-se pela utilização do programa (*solver*) *BiomassGasificationFoam*, desenvolvido para *OpenFOAM*, que permite simular o processo de pirólise, gasificação e combustão de biomassa, e que, segundo os seus autores [43], pode ser facilmente implementado para a descrição do fenómeno de combustão de biomassa, como se pretende neste trabalho.

Neste capítulo faz-se uma breve referência ao *OpenFOAM* e às bibliotecas disponíveis que permitem usar esta ferramenta na simulação de processos em que ocorrem reações químicas, assim como uma descrição mais detalhada do *BiomassGasificationFoam*, suas características e modelos em que se baseia.

3.1. Introdução

Para a simulação da caldeira de biomassa pretendeu-se utilizar um programa de acesso livre e generalizado, tendo-se optado por usar o *OpenFOAM* (*Open Field Operation and Manipulation*), um programa de dinâmica de fluidos computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) de acesso livre, em linguagem C++, que permite a resolução de equações diferenciais às derivadas parciais através do método dos volumes finitos. Esta ferramenta apresenta como uma das suas grandes vantagens a possibilidade de facilmente substituir as bibliotecas existentes por novas implementações, mais adequadas ao problema em análise [69,83].

O *OpenFOAM* é amplamente usado em várias áreas da mecânica dos fluidos e disponibiliza bibliotecas de uso geral e ferramentas eficazes para resolver equações às derivadas parciais. Devido à sua flexibilidade e versatilidade, o *OpenFOAM* tem sido usado para modelar e simular uma gama diversificada de problemas, que incluem: escoamento e mistura, difusão, escoamentos com reação, meios porosos, combustão, transferência de calor, fluidos viscoelásticos, escoamento multifásico e escoamentos biológicos, entre muitos outros [43]. Uma característica desta ferramenta, inerente à utilização da linguagem C++, é a possibilidade de substituir e escrever por cima de bibliotecas existentes. A utilização desta ferramenta recorre a códigos específicos para determinadas classes de problemas (i.e., *solvers*), como seja, por exemplo, o *reactingFoam* que permite a resolução de problemas de escoamento de fluidos em que ocorre reação química.

O processo de combustão de biomassa em caldeiras domésticas, em que a combustão ocorre em leito fixo, é um processo complexo em que para além da dinâmica de fluidos, já em si complexa devido ao leito ser poroso, envolve também simultaneamente processos complexos de transferência de massa e calor em meio heterogéneo (sólido/gás). Para vencer este desafio é importante criar um ambiente computacional que permita incorporar os últimos desenvolvimentos nesta área e que permita a partilha com outros programas que estejam a ser desenvolvidos, em paralelo, para este mesmo fim.

Os programas para simulação de processos reativos atualmente distribuídos com o *OpenFOAM*, e que permitem a modelação dos processos de pirólise (*fireFoam*), reação química (*reactingFoam*) e gasificação em leito fluidizado (*coalChemistryFoam*), não são adequados para a simulação da combustão de biomassa em leito fixo, como ocorre nas caldeiras domésticas a *pellets*. Estes programas não consideram a influência mútua do fluxo reacional com o sólido e as reações que ocorrem no volume do sólido poroso.

O *fireFoam* [22], que é um dos *solvers* mais avançados que inclui os processos térmicos que ocorrem no sólido, foi desenvolvido essencialmente para a modelação de incêndios/fogos. Neste *solver* o meio em que ocorre a pirólise está ligado ao domínio computacional principal, em que o fluxo gasoso é calculado, e interage com a fase gasosa apenas através das condições fronteira do domínio. Através deste modelo não existe uma representação natural do material poroso com a corrente gasosa que o atravessa. No *fireFoam* a pirólise é implementada como um fenómeno superficial, e não volumétrico, o

que limita a sua aplicabilidade. Assim, este *solver*, pelas razões expostas, não é o mais adequado à descrição do processo de combustão de biomassa, processo este que ocorre num leito fixo poroso.

O *coalChemistryFoam*, [24] foi desenvolvido para simular o processo de gasificação e combustão de carvão em leito fluidizado, não estando por isso adaptado a problemas de leito fixo. O *reactingFoam* [45], de uso generalizado, considera reações volumétricas (i.e., que ocorrem no volume e não apenas na superfície) mas apenas na fase gasosa, pelo que não é adequado para descrever a decomposição térmica da biomassa, em que as principais reações ocorrem na fase sólida.

Mais recentemente, em finais de 2013, surgiu um novo programa (*solver*) para descrever o processo de pirólise/gasificação da biomassa, o *BiomassGasificationFoam* [43], que tem associada a biblioteca *BiomassGasificationMedia*, e que foi desenvolvido para simular uma gama alargada de processos associados à gasificação de biomassa em leito fixo, incluindo os processos de secagem da biomassa, as reações de pirólise e gasificação, e a combustão de biomassa. Este programa é baseado no algoritmo usado no *solver reactingFoam* para problemas em estado transiente de escoamento turbulento e laminar de misturas reativas, com modelos de turbulência disponíveis na versão padrão do *OpenFOAM*. Contudo, o modelo desenvolvido por Kwiatkowski et al. [43] foi testado por este investigadores para a descrição do processo de Análise Termogravimétrica (TGA) de biomassa, tendo os autores obtido resultados muito promissores. Convém referir que na análise termogravimétrica a decomposição da biomassa é obtida com o fornecimento de energia através das paredes do reator, em meio inerte (i.e., sem oxigénio), pelo que as condições em que este *solver* foi testado diferem significativamente das condições encontradas na combustão da biomassa em caldeiras.

Nas secções seguintes vamos descrever em mais pormenor o *solver* usado neste estudo, o *BiomassGasificationFoam*, nomeadamente o modelo matemático em que se baseia, as suas características e a sua implementação.

A estrutura do *BiomassGasificationFoam* está representada esquematicamente na Figura 29, sendo os principais aspetos inovadores implementados neste *solver* os seguintes:

- Introdução de um meio poroso reativo;

- Introdução das equações para a fase sólida (conservação de energia e conservação dos componentes da fase sólida);
- A equação da continuidade para a fase gasosa e para o transporte de espécies contêm termos geradores devido ao gás libertado durante a gasificação da biomassa;
- A equação de conservação de energia para o gás tem termos adicionais devidos às trocas de calor entre a fase gasosa e a fase sólida;
- A absorção pela biomassa do calor de radiação pode ser tomada em consideração.

Este *solver* recorre ao algoritmo *PIMPLE (PISO-SIMPLE)* para a resolução numérica das equações diferenciais que descrevem processo. Mais detalhes sobre o *BiomassGasificationFoam* podem ser encontrados em Kwiatkowski et al. [43].

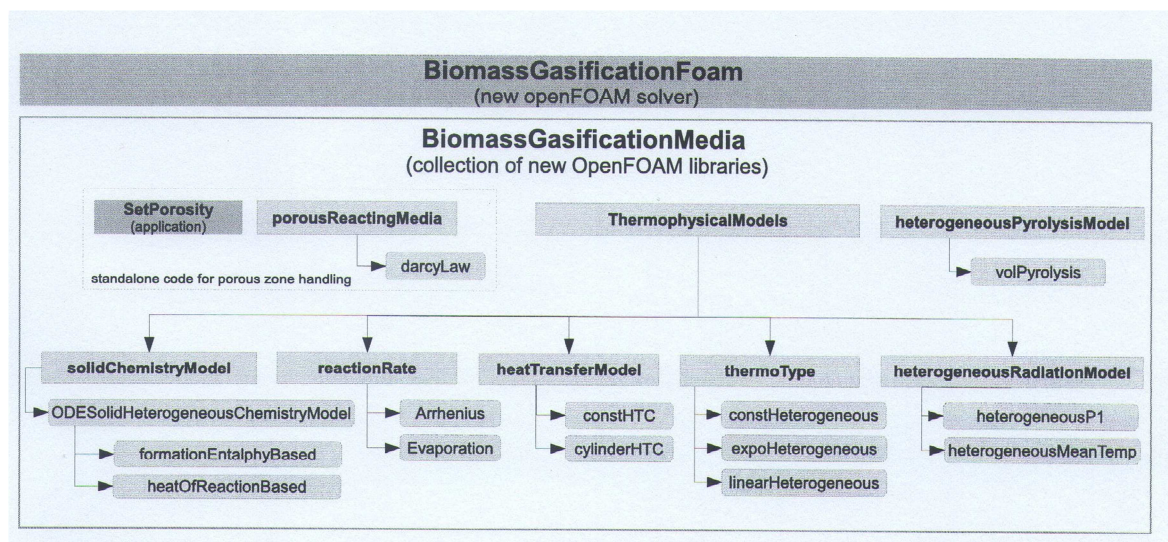


Figura 29 - Estrutura do *BiomassGasificationFoam* [43]

3.2. Modelo matemático

3.2.1. Campo de porosidade dinâmico

Como já foi referido, os programas atualmente disponíveis com o *OpenFOAM* para simulação de escoamentos reativos, nomeadamente: *fireFoam*, *reactingFoam*, e *coalChemistryFoam*, não são adequados para a simulação da decomposição térmica da

biomassa em leito fixo. Estes programas não tomam em consideração a interação entre o fluxo gasoso reacional e as reações que ocorrem na fase sólida porosa.

Para permitir a implementação volumétrica dos processos térmicos, Kwiatkowski et al. [43] propuseram a introdução de um meio poroso dentro do domínio computacional principal criando, para tal, um campo volumétrico de porosidades. Nesta aproximação o modelo de fluxo segue o designado método do Domínio Fictício [38], que é um caso particular do método da Fronteira Imersa [50]. No *BiomassGasificationFoam* as equações dentro e fora do meio poroso são as mesmas, não tendo a fronteira nenhuma dinâmica extra associada a si. Neste modelo a fronteira do material poroso corresponde à superfície onde os parâmetros físicos presentes nessas equações são descontínuos. Por exemplo, na equação do momento o termo correspondente à lei de Darcy e o termo viscoso do fluido Newtoniano na equação de Navier-Stokes são apresentados formalmente da mesma maneira, mas os coeficientes associados apresentam uma descontinuidade no seu valor através da fronteira.

O meio poroso que representa a biomassa é definido por dois campos: um escalar (porosidade) e um tensorial (resistência viscosa). Como a fronteira do material poroso não tem uma dinâmica intrínseca, não há necessidade de detetar a sua configuração, como acontece, por exemplo, com fronteiras elásticas ou com a tensão superficial onde a curvatura local é de importância crítica. Assim, a implementação numérica deste método fica muito simplificada, pois pode-se assumir que cada célula da malha está localizada completamente dentro ou completamente fora do domínio poroso. Os campos que definem o meio poroso (campo volumétrico de porosidade diferente de um e resistência viscosa) são acessíveis e facilmente modificáveis, se necessário, durante os cálculos.

No *solver* desenvolvido por Kwiatkowski et al. [43] foi implementado um novo conjunto de bibliotecas para introdução das propriedades térmicas, químicas e de radiação relativas ao campo poroso, e que determinam as interações com a fase gasosa que flui através ou em torno deste campo. No essencial, estas bibliotecas tratam a biomassa como uma coleção adicional de campos escalares e tensoriais no domínio computacional (p.ex., fração mássica de celulose, condutividade térmica do meio poroso, e densidade).

A simulação da decomposição térmica da biomassa como um processo volumétrico torna possível estudar efeitos como o avanço da frente de reação na biomassa e a simulação de

processos químicos e térmicos no meio poroso, envolvendo interações mútuas do gás com o sólido (e *vice-versa*). Os autores apenas testaram a validade deste programa aplicando-o à modelação do processo de gasificação durante a análise termogravimétrica de biomassa, processo este que ocorre num recipiente com atmosfera inerte de azoto e em que o aquecimento é através das paredes. Contudo, os autores indicam que este programa poderá ser utilizado, tal como está, para descrever a combustão da biomassa, e outros processos que envolvam reação em meios porosos, como catálise ou mesmo filtração.

O modelo de porosidade é implementado através do *porousReactingMedia* da biblioteca *BiomassGasificationMedia* (Figura 29). O meio poroso é introduzido por dois campos volumétricos no domínio computacional principal: *volScalarField porosityF*, que representa os valores de $(1 - \gamma)$, isto é, da fração não porosa, e o *volTensorField Df* que representa o tensor de resistência viscosa \mathbf{K} (ver eq. (14)).

Os valores iniciais das propriedades mecânicas do meio poroso são estabelecidos através da aplicação *SetPorosity*, que cria um campo de porosidade (*porosityF*) e um campo tensorial de resistência porosa (*Df*). Estes campos são criados usando restrições de coordenadas dos centros de cada uma das células computacionais do domínio (malha) previamente criado. O valor da porosidade (γ) permite reconhecer se as células da malha correspondem a sólido ou a gás, em que a célula está localizada na fase gasosa se $\gamma = 1$, e na fase sólida se $\gamma \neq 1$.

O *solver* recorre ao *heterogeneousPyrolysisModel* para criar os campos necessários para as propriedades do sólido (p.ex., campo de massa dos componentes sólidos) e integra os submodelos físicos para o estado sólido (p.ex., radiação, cinética, condução). A biblioteca resolve as equações para os componentes sólidos (eq. (17)), conservação de energia (eq. (19)) e variação de porosidade, equação (13),

$$\frac{d\gamma}{dt} = \sum_k \rho_k \sum_r \Omega_{k,r} \quad (13)$$

em que ρ_k é a densidade do componente sólido k , e $\Omega_{k,r}$ é a velocidade da reação r do componente sólido k .

O modelo pretendido pode ser escolhido através do dicionário *pyrolysisProperties*, onde pode ser colocado como ativo ou inativo. Atualmente, só o modelo *volPyrolysis* se

encontra implementado para processos volumétricos. Quando este modelo se encontra inativo, não se realizam cálculos para o campo formado pelas células de sólido.

3.2.2. Equações do modelo

O *BiomassGasificationFoam* usa um modelo matemático transiente, a três dimensões, para descrever a conversão térmica da biomassa, o qual é baseado na aplicação à fase gasosa e à fase sólida das leis de conservação de massa, energia e momento, e em que o sólido pode ser considerado um meio poroso isotrópico ou anisotrópico.

No desenvolvimento deste modelo Kwiatkowski et al. [43] fizeram as seguintes hipóteses:

- O leito poroso é fixo,
- A humidade está contida na estrutura porosa, sendo eliminada através da sua evaporação,
- Existe a possibilidade de transferência de calor por radiação das paredes do domínio para a superfície do sólido,
- Os processos de reação e transferência de calor podem ocasionar situações de não-equilíbrio térmico,
- A fração porosa (de vazio) é determinada para todo o domínio pela expressão $\gamma = \frac{v-v^s}{v}$, em que v é o volume da célula e v^s o volume de sólido na célula; assim, $\gamma = 0$ nas células em que só existe sólido e $\gamma = 1$ nas células em que não existe sólido,
- O meio poroso perde massa através de processos homogêneos e heterogêneos.

Assim, as equações que descrevem o comportamento da fase gasosa são as de conservação de momento, eq. (14), continuidade, eq. (15), conservação de espécies, eq. (16), e conservação de energia, eq. (18). Como a fase sólida é considerada estática, a descrição do seu comportamento é feita recorrendo apenas às equações de conservação dos componentes sólidos, eq. (17), e de conservação de energia, eq. (19). Nestas equações Y_1^G representa a fração mássica das espécies presentes na fase gasosa (p.ex., vapor de água, H_2 , CH_4 , CO , CO_2 , N_2), Y_k^S representa a fração mássica dos componentes da fase sólida (p.ex., celulose, hemicelulose, leninha, carvão e cinza), e ρ_k^S refere-se à densidade destes constituintes da fase sólida. Todas estas equações são resolvidas em todo o domínio computacional, contudo, onde o campo de porosidades é igual a um, os parâmetros da fase

sólida, como a densidade, capacidade calorífica e condutividade térmica, são nulos. Este procedimento é idêntico ao do Domínio Fictício [38].

$$\frac{\partial \gamma \rho^G \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho^G \mathbf{u} \mathbf{u}) + \nabla p - \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) = (1 - \gamma) K \mu \mathbf{u} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \gamma \rho^G}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho^G \mathbf{u}) = \sum_i (R_i^{G^{evap}} + R_i^{G^{pir}} + R_i^{G^{gasif}}) \quad (15)$$

$$\frac{\partial \gamma \rho^G Y_i^G}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho^G \mathbf{u} Y_i^G) - \nabla \cdot (\rho^G D \nabla Y_i^G) = \omega_i^G + R_i^{G^{evap}} + R_i^{G^{pir}} + R_i^{G^{gasif}} \quad (16)$$

$$\frac{\partial Y_k^S \rho^S}{\partial t} = R_k^{S^{pir}} + R_k^{S^{gasif}} + R_k^{S^{comb}} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \gamma \rho^G C_i^G T^G}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot (\nabla \rho^G C_i^G T^G) - \nabla \cdot ((1 - \gamma) k^G \nabla T^G) \\ = \sum_i \omega_i^G h_{fi}^G - \alpha \Sigma (T^G - T^S) - \Gamma + S^{G^{rad}} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\frac{\partial \rho^S C_k^S T^S}{\partial t} - \nabla \cdot (\gamma k^S \nabla T^S) = \alpha \Sigma (T^G - T^S) + H_r + S^{S^{rad}} \quad (19)$$

Nas equações acima os termos dos membros da esquerda correspondem à descrição do fluxo da fase gasosa ou transferência de calor no sólido, enquanto os membros da direita correspondem a termos geradores relativos à estrutura porosa da biomassa, isto é, relativos a reações químicas e conversões térmicas. Os processos térmicos são incorporados através dos termos geradores representados pelas velocidades de reação, R , com os correspondentes sobrescritos (G – gás, S – sólido, *evap* – evaporação, *pir* – pirólise, *gasif* – gasificação, *comb* – combustão) e subscritos (*i* – espécie gasosa, *k* – componente sólido), H_r é o calor total correspondente às reações que ocorrem na fase sólida.

3.2.3 Conversão térmica da biomassa

A sequência de processos que ocorrem durante a conversão térmica da biomassa encontra-se representada, esquematicamente, na Figura 28. Este processo começa com a secagem da biomassa, em que a humidade contida na biomassa é removida por evaporação, seguidamente compostos voláteis são libertados durante a pirólise da fase sólida, em que as moléculas de elevado peso molecular que constituem a biomassa são quebradas dando origem a moléculas menores (i.e., os gases voláteis). Em ambos os processos é preciso fornecer energia à biomassa e os produtos formam-se sem a intervenção de outros reagentes. O produto carbonado (também designado por carvão - *char*) resultante da pirólise tem uma porosidade maior que a biomassa original. O carvão é então gasificado na presença de agentes de gasificação, dióxido de carbono ou vapor de água, ou sofre combustão na presença de um oxidante. Deste processo resulta, para além dos gases libertados, uma pequena quantidade de cinza, que corresponde à parte mineral (inorgânica) que constitui a biomassa.

No *BiomassGasificationFoam* os termos correspondentes à geração de massa por unidade de volume para os diferentes processos térmicos são expressos pelas correspondentes velocidades de reação, que podem ser calculadas através das equações (20) a (23),

$$R_{\text{vapor de água}}^{G^{evap}} = \rho^S Y_{\text{humidade}}^S k^{evap} \quad (20)$$

$$R_{\text{gás}}^{G^{pir}} = \rho^S Y_{\text{biomassa seca}}^S k^{pir} \quad (21)$$

$$R_{\text{carvão}}^{S^{gasif}} = -\rho^S Y_{\text{carvão}}^S Y_{\text{CO}_2}^G k^{gasif} \quad (22)$$

$$R_{\text{carvão}}^{S^{comb}} = -\rho^S Y_{\text{carvão}}^S Y_{\text{O}_2}^G k^{comb} \quad (23)$$

onde a constante cinética de reação, k , é calculada pelo modelo de Arrhenius [7,8], isto é,

$$k = \begin{cases} A \exp\left(-\frac{T_a}{T}\right), & T > T_c \\ 0, & T \leq T_c \end{cases} \quad (24)$$

em que A é o fator pré-exponencial da equação de Arrhenius, T_a a temperatura de ativação, que pode ser obtida através da relação $T_a = E_a/R$, em que E_a é a energia de ativação da reação, R a constante dos gases ideais, e T_c é a temperatura a baixo da qual não há reação (i.e., abaixo de T_c , designada por temperatura crítica, a velocidade de reação é tão pequena que se pode considerar que a reação não ocorre a essa temperatura).

Uma das vantagens do *BiomassGasificationFoam* é a possibilidade de incorporar outros esquemas para a descrição da combustão da biomassa [43], como, por exemplo, os descritos em [5,6,58].

A cinética das reações está implementada no *ODEHeterogeneousSolidChemistryModel* que é uma adaptação da biblioteca *ODESolidChemistryModel* que permite a implementação da cinética das reações da fase sólida. A cinética implementada é adequada tanto para reações homogêneas (que ocorrem apenas na fase gasosa ou na fase sólida) como para reações heterogêneas (em que participam a fase gasosa e a fase sólida em simultâneo). As reações que ocorrem apenas na fase gasosa, como sejam as reações de combustão dos gases libertados durante a pirólise e gasificação da biomassa, são incorporadas de um modo análogo ao usado no *reactingFoam*. Para introduzir as reações que ocorrem na fase sólida deve ser declarada uma nova entrada no subdicionário *reaction* do dicionário *chemistryProperties*. Assim, por exemplo, a reação homogênea, em fase sólida, da pirólise da hemicelulose deve ser introduzida da seguinte forma:

```
irreversibleSolidArrheniusHeterogeneousReaction  
hem = 1.57 CH4 + 8.75 H2 + 5.73 CO + 9.72 CO2 + 0.4 char  
(1.5e9 1.9e4 400 1 1)
```

A primeira linha identifica o modelo escolhido para a velocidade de reação. A segunda linha descreve a reação de pirólise da hemicelulose, em que 1 kg de hemicelulose é convertida em 0,4 kg de carvão (*char*) libertando vários gases (CH_4 , H_2 , CO e CO_2) de acordo com a estequiometria determinada experimentalmente. Como nesta reação só existe um substrato (reagente), ela é imediatamente reconhecida como sendo uma reação homogênea. A terceira linha contém os parâmetros da reação pela seguinte ordem: fator pré-exponencial (A), temperatura de ativação ($T_a = E_a/R$), temperatura crítica (T_c), abaixo da qual não ocorre reação, ordem da reação (n_r), e calor de reação (h_r); se em vez de pôr o

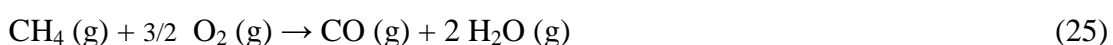
calor de reação se puser “1” o programa calcula o calor de reação através dos calores de formação. O calor de reação é definido por unidade de massa de voláteis (i.e., por unidade de massa da fase sólida que desaparece devido à sua conversão térmica). Os valores numéricos apresentados neste exemplo, assim como os que se seguem, são meramente exemplificativos, os valores usados neste trabalho serão apresentados no próximo capítulo.

Como exemplo de uma reação heterogénea podemos considerar a gasificação do carvão usando CO₂ como agente gasificante, que deve ser introduzida no dicionário *chemistryProperties* da seguinte forma:

```
irreversibleSolidArrheniusHeterogeneousReaction
char + CO2 = 2 CO + 0.1 ash
(1.7e7 324 800 2 1)
```

Esta reação é imediatamente interpretada como sendo heterogénea, e em que 1 kg de carvão (*char*) reage com dióxido de carbono no estado gasoso produzindo 0,1 kg de cinzas (*ash*) e duas moles de CO por cada mole de CO₂ que reage. Embora o número de moles total possa não se manter constante em sistemas reativos, a massa mantém-se constante, pelo que é possível aplicar as equações de conservação de massa às espécies gasosas envolvidas na reação.

As reações de combustão dos gases em fase gasosa são implementadas recorrendo ao *solver reactingFoam*, seguindo uma estrutura ligeiramente diferente da que acabamos de expor. Assim, se considerarmos, por exemplo, a reação de combustão do metano,



Esta informação é introduzida como,

```
REACTIONS JOULES/MOLE
CH4 + 1,5O2 = CO + 2H2O 6.6e+06 0.0 3.3e+05!
```

em que a primeira linha indica que as constantes vão ser introduzidas em unidades SI (Sistema Internacional de unidades). A segunda linha apresenta a equação e os respetivos parâmetros cinéticos para uma constante cinética cuja fórmula geral é a apresentada pela

equação (26), que difere da equação (24) usada para as reações em fase sólida, e em que os parâmetros cinéticos são escritos pela seguinte ordem: fator pré-exponencial (A), expoente da temperatura (β), que consideramos sempre igual a zero no nosso estudo, e energia de ativação (E_a). O calor de reação é calculado a partir das entalpias de formação das espécies envolvidas na reação. É de salientar que enquanto para as reações em fase gasosa se introduz a energia de ativação (E_a), para as reações em fase sólida introduz-se a temperatura de ativação, T_a (em que, $T_a = E_a/R$).

$$k = A T^\beta \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (26)$$

A evaporação da humidade contida na biomassa é calculada de um modo idêntico às velocidades das reações em fase sólida, em que o modelo da reação é o *irreversibleSolidEvaporationHeterogeneousReaction*, e em que a constante cinética segue um modelo idêntico ao da equação (27), embora seja possível usar um modelo cinético idêntico ao descrito pela equação (24).

$$k = A |T - T_c|^{2/3} \exp\left(-\frac{T_a}{T}\right) \quad T > T_c \quad (27)$$

Como exemplo, a evaporação da humidade pode ser implementada do seguinte modo:

irreversibleSolidEvaporationHeterogeneousReaction

hum = H2O

(9.7e8 8.4e3 300 1 1)

A velocidade da reação r , Ω_r , que envolva um substrato sólido, s , pode ser calculada pela seguinte expressão,

$$\Omega_r = \begin{cases} k_r \rho^s (Y_s^s)^{n_r} (Y^G)^{\delta^G} & T > T_c \\ 0 & T \leq T_c \end{cases} \quad (28)$$

onde δ^G é igual a um se o substrato for gasoso, e nulo nos outros casos.

O calor de reação para os processos envolvendo a fase sólida pode ser obtido de duas maneiras alternativas:

- *formationEnthalpy* – em que o calor de reação é determinado a partir do conhecimento das entalpias de formação dos reagentes e dos produtos de reação;
- *heatOfReaction* – em que o utilizador fornece o valor do calor de reação para a reação em causa.

sendo o efeito energético calculado de modo diferente para estas duas situações.

O cálculo do efeito energético através do recurso às entalpias de formação é um processo que já está implementado no *reactingFoam*, e é usado tipicamente para as reações em fase gasosa, sendo o calor de reação obtido através da equação,

$$H_r = \sum_s \Delta m_s h_{f,s} + \sum_p \Delta m_p h_{f,p} \quad (29)$$

em que $h_{f,i}$ é a entalpia de formação do componente i , o índice s refere-se ao substrato (reagente) e o índice p aos produtos de reação. O Δm_i refere-se à variação de massa do componente i , e pode ser calculado através da equação:

$$\Delta m_k = \frac{dm_k}{dt} = \sum_r \Omega_{k,r} \quad (30)$$

Infelizmente, as entalpias de formação dos componentes sólidos, como a lenhina, são difíceis de determinar. Nestas situações os calores de reação podem ser introduzidos com base na informação experimental existente, sendo agora o efeito energético para o incremento de tempo Δt dado por,

$$H_r = \Delta t \sum_r h_r \Omega_r \quad (31)$$

em que h_r é a entalpia da reação r .

3.2.4 Transferência de calor

Durante a conversão térmica de partículas de biomassa com espessura significativa, os gases, tanto dentro como fora das partículas, não estão em equilíbrio térmico com o sólido [42], pelo que se torna necessário inserir no modelo matemático equações distintas para a conservação de energia na fase gasosa (equação (18)) e na fase sólida (equação (19)). A hipótese de equilíbrio térmico entre o gás e o sólido só parece ser válida para partículas com poros muito pequenos, da ordem dos micrómetros [8,15].

A hipótese de que não há equilíbrio térmico nas partículas de biomassa requer que se considere a transferência de calor que ocorre entre o sólido e o gás em todo o domínio poroso, o que pode ser feito através do seguinte termo gerador,

$$\alpha \Sigma (T^G - T^S) \quad (32)$$

onde α é o coeficiente de transferência de calor por unidade de área e Σ é a área superficial total dos poros por unidade de volume do sólido, T^G é a temperatura do gás e T^S a temperatura do sólido, sendo a transferência de calor entre as duas fases proporcional a esta diferença de temperaturas.

Contudo, a transferência de calor no seio da fase sólida é diferente da transferência de calor que ocorre através da fronteira sólido-gás. Para diferenciar estas duas situações o *solver BiomassGasificationFoam* introduz, para além do parâmetro *HTC* (Heat Transfer Coefficient), um novo parâmetro, o *borderHTC*. O *HTC* corresponde ao valor de α para as células no seio da fase sólida (partículas de biomassa), e o *borderHTC* usa um valor de α diferente para a superfície das partículas de biomassa.

Para determinar a área superficial dos poros, Σ , Kwiatkowski et al. [43] assumiram que os poros são cilíndricos e que a área superficial dos poros por unidade de volume do sólido é constante, obtendo a seguinte relação:

$$\Sigma = \frac{2}{a_0} \left(\frac{\gamma_0}{\gamma} \right)^{1/2} \quad (33)$$

em que a_0 é o raio inicial dos poros, assumindo que são cilíndricos, γ_0 é a porosidade inicial e γ é a porosidade no instante considerado.

O *BiomassGasificationFoam* assume que durante a conversão térmica da biomassa a temperatura do substrato sólido é igual à temperatura do meio poroso, enquanto a temperatura dos produtos gasosos é igual à temperatura dos gases dentro do material poroso. Assim, para as reações que ocorrem na fase sólida, é necessária uma quantidade de energia Γ para aquecer (ou arrefecer) os produtos até à temperatura do gás. Este termo de geração de energia pode ser calculado através da equação,

$$\Gamma = (T^G C_p^G(T^G) - T^S C_p^S(T^S)) \sum_i R_i^G \quad (34)$$

Este processo de transferência de calor é independente do processo já referido de transferência de calor entre as fases sólida e gasosa.

Os autores do *solver* em análise afirmam no seu artigo original que existe uma diferença significativa entre as capacidades caloríficas das fases sólida e gasosa, que pode ocasionar instabilidade numérica na resolução deste problema devido à transferência de calor entre as duas fases. Para tentar ultrapassar este problema os autores introduziram um parâmetro de controlo que limita o incremento do tempo ($maxdT$) no dicionário *controlDict*. Este parâmetro controla a razão máxima de variação das temperaturas do gás e do sólido em todas as células.

Na versão atual do *solver* a influência no sólido do calor transferido por radiação é descrita por um modelo simplificado, em que se assume que a superfície da biomassa só absorve

radiação, não emitindo energia por radiação. Atualmente o dicionário *radiationProperties* dispõe de três modelos, *heterogeneousRaditionModels*, implementados, nomeadamente:

- Nenhum;
- *heterogeneousMeanTemp*;
- *heterogeneousPI*.

Na primeira situação não se considera a existência de transferência de calor por radiação. No modelo *heterogeneousMeanTemp* assume-se que a espessura ótica dos gases na caldeira é pequena, e que por isso os gases não interferem com a transferência de calor por radiação. Nesta situação, o valor líquido da energia absorvida por unidade de volume da biomassa, S_{rad} , é dado por [43],

$$S_{rad} = \max\left(0, \frac{1}{6} \frac{V^{\frac{2}{3}}}{V} \delta \sigma (T_{par}^4 - \epsilon (T_{sup}^S)^4)\right) \quad (35)$$

em que V é o volume da célula, T_{par} é a temperatura média das paredes, T_{sup} é a temperatura da superfície da partícula de biomassa, σ é a constante de Boltzmann, δ é o coeficiente de absorção ótica da superfície do sólido, e ϵ é a razão da absorção relativamente à emissão. Estes dois últimos parâmetros, que descrevem as propriedades óticas da superfície da biomassa, são considerados constantes.

No modelo *heterogeneousPI* a radiação no domínio computacional é calculada através do modelo de radiação *PI* disponível no *OpenFOAM*, em que se considera que todas as superfícies são difusas, sendo adequado para situações em que a espessura ótica é significativa (superior a 3) [49]. A atual implementação do *solver BiomassGasificationFoam* não inclui a emissão de radiação a partir da biomassa, o que significa que a massa de sólido não influencia a densidade de radiação, assim a densidade de radiação calculada para a fase gasosa é absorvida na superfície da fase sólida, sendo o valor líquido do fluxo energético por unidade de volume dado por [43],

$$S_{rad} = \max\left(0, \frac{1}{6} \frac{V^{\frac{2}{3}}}{V} \delta(G - \epsilon\sigma(T^S)^4)\right) \quad (36)$$

onde G é o fluxo de energia radiante.

3.2.5 Propriedades físicas

A aplicação do modelo matemático propostos (equações (14) a (19)) requer o conhecimento das propriedades físico-químicas dos gases e da biomassa. Embora existam valores e modelos relativamente precisos para a determinação das propriedades dos gases que constituem a fase gasosa, o mesmo não se pode dizer para as propriedades da biomassa, o que é fácil de compreender se lembrarmos da variabilidade da composição deste tipo de matéria-prima, que não depende apenas da sua origem, mas também da época do ano em que é colhida, e das condições climáticas vigentes.

Primeiro é necessário começar por definir a porosidade da biomassa. Para tomar em consideração a heterogeneidade da biomassa, o *BiomassGasificationFoam* permite definir uma distribuição não-uniforme da porosidade, o que pode ser conseguido através do *setPorosity*. Em simultâneo com a porosidade é necessário definir o tensor da resistência viscosa.

Uma outra propriedade que precisa de ser definida é a densidade absoluta, $\tilde{\rho}^S$, que é a densidade que o material teria se não existissem vazios (i.e., se a porosidade fosse nula). A densidade absoluta da biomassa é calculada como sendo a média das densidades dos componentes que a constituem, nomeadamente, humidade, lenhina, celulose, hemicelulose, carvão e cinza:

$$\tilde{\rho}^S = \left(\sum_k \frac{Y_k^S}{\tilde{\rho}_k^S}\right)^{-1} \quad (37)$$

Com base na densidade absoluta, $\tilde{\rho}^S$, e na porosidade, γ , a densidade do meio poroso, ρ^S , que é o valor usado na simulação, é determinada através da seguinte expressão,

$$\rho_k^S = \gamma \tilde{\rho}_k^S \quad (38)$$

As propriedades térmicas do material são a condutividade térmica, k^S , e as capacidades caloríficas, C^S . Estes parâmetros intrínsecos são igualmente definidos para os componentes sólidos individuais. Durante a conversão térmica da biomassa a fração mássica do material lignocelulósico diminui, enquanto a fração mássica do material carbonado (carvão) aumenta. Como resultado, variações das propriedades do material que acompanham a sua conversão térmica devem ser incorporadas no *solver*. A Tabela 10 resume as propriedades usadas para o gás e para o sólido, assim como o cálculo do seu valor médio.

Tabela 10 - Resumo das propriedades termoquímicas usadas e do seu valor médio [43]

Propriedade	Valor médio
Fase gasosa	
Densidade	$\rho^G = \sum \rho_i^G$
Capacidade calorífica	$c^G = \sum Y_i^G c_i^G$
Condutividade térmica	$k^G = \sum Y_i^G k_i^G$
Viscosidade	$\mu^G = \sum \mu_i^G$
Coefficiente de difusão	$D^G = \sum \mu_i^D$
Fase sólida	
Capacidade calorífica	$c^S = \sum Y_k^S c_k^S$
Condutividade térmica	$k^S = (\sum (Y_k^S k_k^S) / \rho_k^S) / (\sum Y_k^S / \rho_k^S)$

A biblioteca *thermoType* determina o cálculo de três das principais propriedades dos componentes sólidos: densidade, capacidade calorífica e condutividade térmica. Atualmente existem três modelos no dicionário *solidThermophysicalProperties* que podem ser usados para o cálculo destas propriedades, nomeadamente:

- *solidMixtureThermo<constHeterogeneous>* - que assume que a densidade, capacidade calorífica e condutividade térmica são constantes;
- *solidMixtureThermo<expoHeterogeneous>* - que considera a densidade constante e a capacidade calorífica e condutividade térmica com variação em forma de potência;
- *solidMixtureThermo<linearHetrogenic>* - a densidade e a capacidade calorífica são consideradas constantes e a condutividade térmica varia linearmente

4. Simulação numérica da combustão de biomassa

Neste capítulo vamos discutir a implementação e consequente adaptação do *solver BiomassGasificationFoam* à simulação do processo de combustão de biomassa numa caldeira doméstica a *pellets*, definindo o problema estudado, os casos analisados e os resultados obtidos.

4.1 Implementação do *BiomassGasificationFoam*

A implementação do *solver BiomassGasificationFoam*, que deve ser usado com a versão 2.1.1 do *OpenFOAM*, é discutida no artigo de Kwiatkowski et al. [43], estando a sua estrutura esquematizada na Figura 29. Como já foi referido, este *solver* é baseado no *solver reactingFoam*, que é distribuído com o *OpenFOAM*, e que permite a simulação de escoamentos turbulentos e laminares em que ocorrem reações em fase gasosa. A vantagem do *BiomassGasificationFoam* é permitir simular casos em que ocorram simultaneamente reações em fase gasosa e em fase sólida, e em que o sólido é um meio poroso e estático (i.e., para leito fixo).

Com o objetivo de tornar a simulação mais realista implementamos no *solver* um código que permite simular o processo de ignição da biomassa. Este método de ignição foi baseado no *XiFoam* [85] e adaptado ao *reactingFoam* de modo a ser utilizado pelo *BiomassGasificationFoam*. O código da ignição baseia-se no aumento de entalpia num conjunto de células especificadas, durante um período de tempo igualmente especificado. Este aumento de entalpia, em que a entalpia das células escolhidas é multiplicada por um fator pré-determinado, designado por *strength*, que no nosso estudo foi igual a 1,5, permite

libertar uma quantidade de calor suficiente para iniciar o processo de combustão. O código implementado foi inicialmente testado fazendo a ignição de uma mistura de gases combustíveis, com metano e hidrogénio, tendo-se confirmado a sua adequabilidade.

A utilização do *OpenFOAM* envolve três fases: pré-processamento, resolução, e pós-processamento. Na fase de pré-processamento é necessário introduzir toda a informação que diz respeito às propriedades físico-químicas do sistema a estudar, aos modelos que vão ser usados para calcular as propriedades físico-químicas e os métodos escolhidos para a resolução das equações diferenciais que descrevem o problema, incluindo os parâmetros inerentes a esses métodos, cujo valor tem uma influência crucial na convergência da simulação.

Os ficheiros correspondentes ao pré-processamento encontram-se em quatro pastas principais, nomeadamente, as pastas: “*O*”, “*chemkin*”, “*constante*” e “*system*”, enquanto os resultados, isto é, o pós-processamento, se encontra na pasta “*probes*”. Uma descrição mais detalhada destas pastas e da informação e ficheiros que elas contêm é apresentada no Anexo A.

4.2 Geração da Geometria e da Malha

A informação relativa à malha, e correspondente geometria do corpo estudado, encontra-se no ficheiro *blockMeshDict* da pasta *polyMesh*, localizado na pasta *constant*, que faz parte do conjunto de pastas da fase de pré-processamento do *OpenFOAM*, e que contém a informação relativa à criação da malha definindo os vértices, condições fronteira, número de células e número de blocos que constituem o corpo em estudo. Esta pasta contém igualmente outros ficheiros relacionados com a malha que foi definida, nomeadamente, os ficheiros: *boundary*, *faces*, *points*, *owner* e *neighbour*.

Para a simulação do comportamento da caldeira, ou mais especificamente, da câmara de combustão da caldeira, testaram-se várias geometria e malhas, algumas das quais estão representadas nas Figuras 30 a 32. A Figura 30 corresponde a um corpo de forma paralelepédica com entrada de ar pela face inferior e saída pela face superior, a Figura 31 corresponde a um corpo em “L” com entrada de ar lateral e saída pela face superior, e a

Figura 32 corresponde a um corpo cilíndrico com admissão de ar pela face inferior e saída pela face superior.

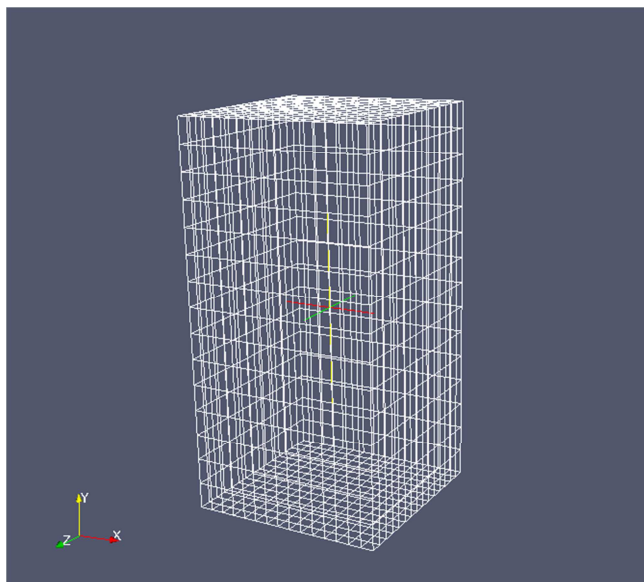


Figura 30 – Corpo de malha paralelepédica

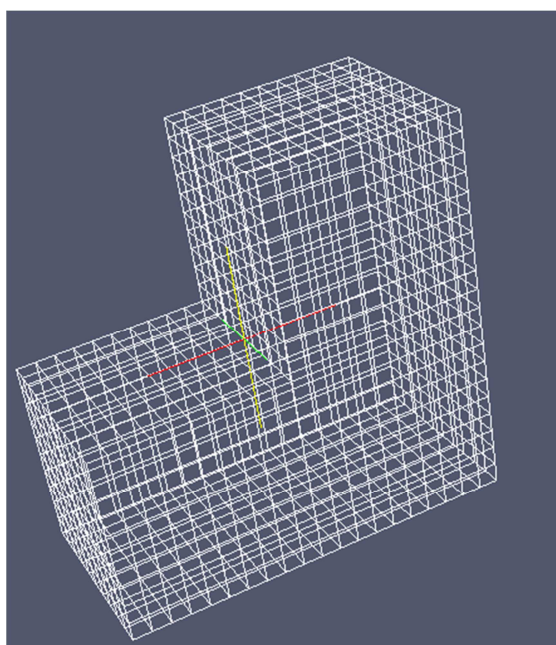


Figura 31 – Corpo de malha paralelepédica com entrada de ar lateral

A nossa opção final recaiu sobre o corpo de malha cilíndrica, não só pela sua simplicidade, mas também por esta geometria permitir simular o processo de combustão em reatores tubulares de leito fixo, para os quais existem vários estudos na literatura, com os quais poderiam ser comparados os nossos resultados.

Como já foi referido, neste estudo a câmara de combustão da caldeira foi considerada cilíndrica com a entrada (*inlet*) pela base e a saída (*outlet*) pelo topo, sendo o restante paredes (*walls*). A malha é constituída por um bloco de 640 células. As suas dimensões são de 130 mm em x e z (diâmetro) e 1300 mm em y (altura). As dimensões estão em mm devido ao *convertToMeters* usado ser igual a 0,001. A malha resultante para a câmara de combustão está representada na Figura 32, onde as células de biomassa, isto é, as células com porosidade diferente de um, estão representadas a azul. A Figura 33 mostra a representação de uma célula de biomassa, cujas dimensões são de 32,5 mm em todas as direções (i.e., x, y e z); a sua forma cúbica permite reduzir os problemas numéricos inerentes à simulação. O número de células do bloco usado para representar a câmara de combustão teve em consideração que o uso de um número maior de células levantava problemas de convergência, principalmente quando era usado o esquema com ignição..

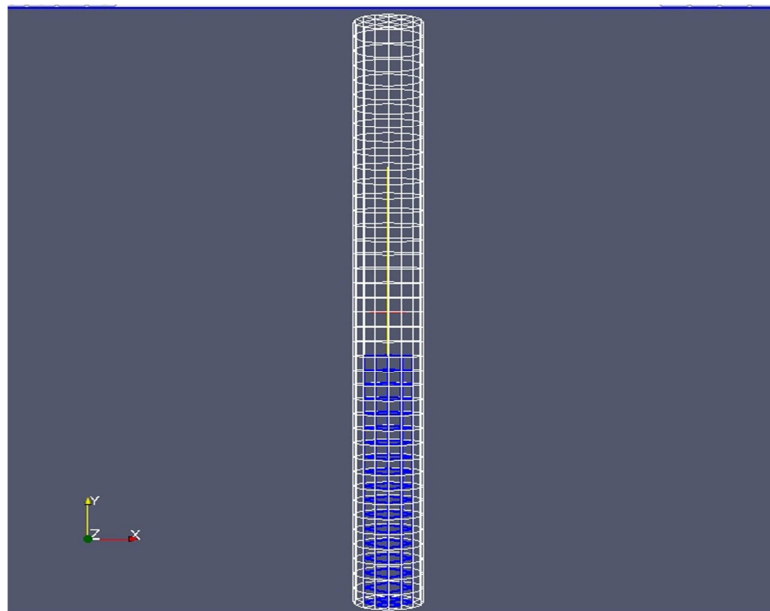


Figura 32 - Malha correspondente à câmara de combustão estudada, com a biomassa representada a azul.

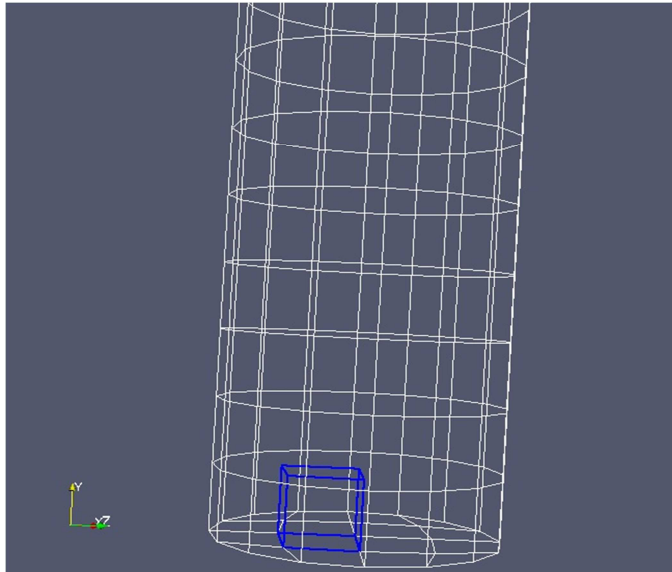


Figura 33 – Representação de uma célula de biomassa

4.3 Propriedades físico-químicas

Para realizar a simulação numérica da combustão da biomassa com o *solver BiomassGasificationFoam* é necessário fornecer um conjunto de informação, nomeadamente: a composição da biomassa, as reações que ocorrem na fase sólida e na fase gasosa, e correspondentes parâmetros cinéticos, as propriedades físicas das diferentes espécies sólidas e gasosas que participam neste processo, para além de outros parâmetros mais específicos, como condição de ignição da biomassa, parâmetros dos métodos usados na resolução das equações que descrevem este processo, entre outros.

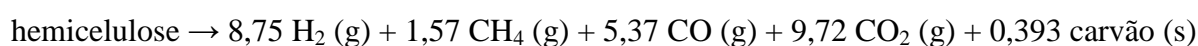
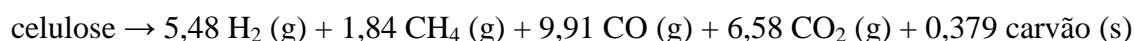
A composição da biomassa é muito diversificada, dependendo, entre outros fatores, do tipo de biomassa, da região de onde ela é originária, e da época do ano em que foi recolhida. Para a descrição da composição da biomassa vamos seguir o procedimento adotado por Kwiatkowski et al. [43], em que se assume que é constituída por celulose, hemicelulose e lenhina em diferentes percentagens, contendo igualmente humidade e cinzas (i.e., matéria inorgânica). Os valores adotados neste estudo para a composição da biomassa foram os do

trabalho de Kwiatkowski et al. [43], que estão resumidos na Tabela 11, onde se apresentam os valores da fração mássica dos vários componentes da biomassa.

Tabela 11 - Composição da biomassa em frações mássicas [43]

	Celulose	Hemicelulose	Lenhina	Cinzas	Humidade
Frações mássicas	0,3588	0,2760	0,2852	0,0100	0,0700

Seguidamente apresentam-se os parâmetros cinéticos para a descrição do processo de combustão que compreende as reações em fase sólida e em fase gasosa. Relativamente às reações em fase sólida (equações (3) a (5)), é necessário especificar a quantidade de voláteis libertada e a quantidade de carvão (i.e., carbono fixo / material carbonado) que resulta do processo de pirólise da celulose, hemicelulose e lenhina. A quantidade libertada de voláteis na reação de pirólise é obtida experimentalmente [84], ver Tabela 12, o que dá origem às seguintes reações:



O significado das reações acima é o seguinte, considerando, por exemplo, a reação de pirólise da celulose, a reação indica que 1 kg de celulose é convertida em 0,379 kg de carvão (*char*) libertando 5,48 moles de hidrogénio, 1,84 moles de metano, 9,91 moles de monóxido de carbono e 6,58 moles de dióxido de carbono.

Para além da pirólise, ocorre igualmente a reação de secagem da biomassa (equação (6)), da gasificação da matéria carbonada resultante da pirólise da biomassa (equação (7)) e das reações de combustão em fase gasosa dos gases libertados durante o processo anterior (equações (8) a (12)). A Tabela 13 resume os parâmetros cinéticos para estas reações.

Tabela 12 - Quantidade de gases produzidos durante a pirólise dos componentes da biomassa [em mili mole/(g de biomassa)] [84].

	H₂	CH₄	CO	CO₂
Celulose	5,48	1,84	9,91	6,58
Hemicelulose	8,75	1,57	5,37	9,72
Lenhina	20,84	3,98	8,46	7,81

Tabela 13 - Parâmetros cinéticos para as reações em fase sólida e gasosa.

Reação*	A (s⁻¹)	Ea (J/mol)	Ta (K)	Tc (K)	β	Ref.
3	2,6x10 ¹¹	1,457x10 ⁵	1,753x10 ⁴	300	----	[82]
4	1,3x10 ¹⁰	1,505x10 ⁵	1,810x10 ⁴	300	----	[82]
5	7,7x10 ⁶	1,114x10 ⁵	1,340x10 ⁴	300	----	[82]
6	1,4x10 ¹⁴	1,350x10 ⁴	1,624x10 ³	300	----	[43]
7	1,7x10 ⁷	2,694x10 ³	3,240x10 ²	300	----	[43]
8	1,3x10 ¹⁴	1,255x10 ⁸	-----	----	0	[14]
9	1,0x10 ¹⁴	8,315x10 ⁷	-----	----	0	[14]
10	5,0x10 ¹⁴	2,000x10 ⁸	-----	----	0	[14]
11	2,8x10 ³	1,255x10 ⁷	-----	----	0	[14]
12	9,4x10 ⁴	4,659x10 ⁷	-----	----	0	[14]

* Número da equação que representa a reação química (ver secção 2.2)

As principais propriedades físicas da biomassa necessárias à realização da simulação encontram-se resumidas na Tabela 14, nomeadamente, as entalpias de formação, Δh_f^0 , densidade, ρ , porosidade inicial, γ_0 , raio inicial dos poros, a_0 , permeabilidade, condutividade térmica, k , e capacidade calorífica, C^s . Para os gases as propriedades são calculadas através

da informação contida nos ficheiros associados ao *reactingFoam*, em particular, o ficheiro *therm.dat*.

As simulações foram efetuadas assumindo que a caldeira opera à pressão atmosférica e que a velocidade do ar à entrada é de 0,5 m/s.

Tabela 14 - Propriedades físicas dos componentes sólidos [43].

	Cel	Hem	Len	Carvão	Cinzas	Hum
Δh_f^0 (J/kg)	$-1,0 \times 10^6$	$-8,5 \times 10^5$	$-9,2 \times 10^5$	$-4,1 \times 10^4$	$-1,24 \times 10^7$	$-1,59 \times 10^7$
ρ (kg/m ³)	1480	1480	1480	1957	2500	1000
γ_0	0,55	0,55	0,55	0,91	-----	-----
a_0 (m)	$1,0 \times 10^6$	$1,0 \times 10^6$	$1,0 \times 10^6$	$1,0 \times 10^4$	-----	-----
Permeabilidade (m ²)	$1,0 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-11}$	-----	-----
k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,2	0,2	0,2	0,1	0,17	0,58
C^s (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1380	1380	1380	1100	840	4200

4.4 Resultados das simulações numéricas

Nesta secção apresentam-se os resultados da aplicação do *solver BiomassGasificationFoam* à simulação da combustão da biomassa numa câmara de combustão com a malha representada na Figura 32. Para uma aplicação mais realista adaptou-se o código de ignição usado pelo *XiFoam* à ignição da biomassa, o qual permite ativar a ignição durante um período de tempo pré-estabelecido, e com uma força pré-estabelecida, de tal modo que quando a ignição é desativada a combustão da biomassa deveria continuar, isto é, a combustão deveria ser autossustentável. Contudo, verificou-se que para as várias condições testadas a combustão parava sempre que a ignição era desativada. A Figura 34, que mostra a variação da temperatura do sólido ao longo do tempo, exemplifica este comportamento, em que se verifica que ao fim de 800 s, quando a ignição é desativada, a temperatura do sólido desce rapidamente dos cerca de 460 K até perto dos 300 K, que é a temperatura de admissão do ar.

Para além disso, surgiram vários problemas de convergência, que Kwiatkowski et al. [43] tinham já referido como expectáveis na aplicação deste *solver*, e que são essencialmente devidos a problemas numéricos que ocorrem na resolução das equações de conservação de energia, em particular, devido às diferenças das propriedades térmicas do sólido e do gás. Com o objetivo de ultrapassar os problemas de convergência e de autossustentação da combustão, foram testadas várias hipóteses, umas mais realistas que outras, tentativas estas que incluíram diferentes composições de biomassa, diferentes cinéticas, diferentes configurações da câmara de combustão, diferentes refinamentos da malha e tipos de malha, e valores dos parâmetros dos métodos usados pelo simulador, tendo-se todas elas revelado infrutíferas. Nesta secção optamos por apresentar os resultados baseados nos modelos cinéticos mais realistas, analisando a aplicação de vários esquemas de resolução das equações diferenciais, nomeadamente o método de *Euler*, o método de *Crank-Nicholson* (CN), com $\psi = 0,5$, que seria o mais adequado a este tipo de problemas (problema *stiff*), e o método *backward* [54]. Na aplicação destes métodos foi sempre tido em consideração que o valor do número de *Courant* deve ser inferior à unidade.

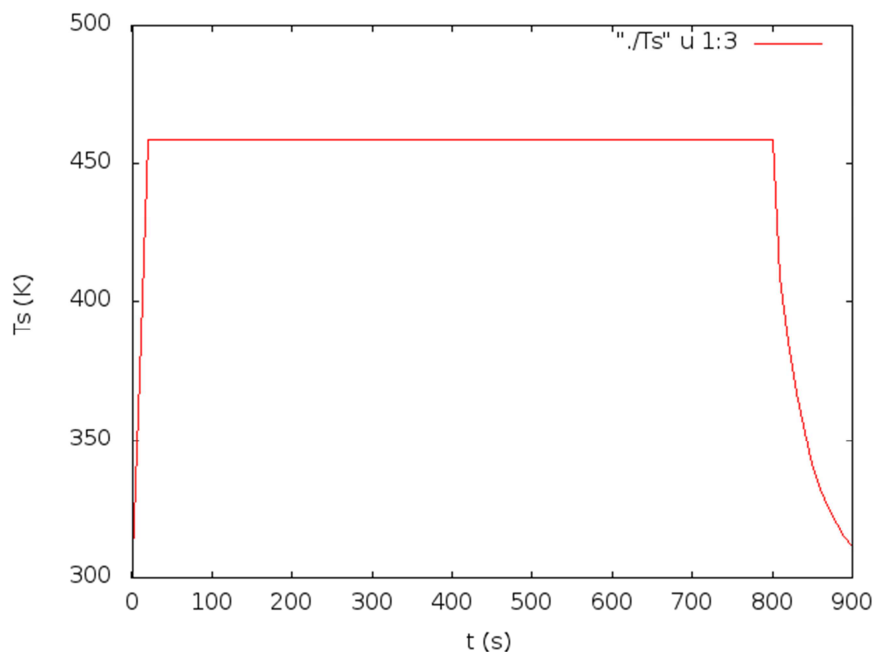


Figura 34 – Variação da temperatura do sólido numa simulação em que a ignição é desativada aos 800 s.

Como o esquema da ignição da biomassa não funcionou com este *solver*, pois a decomposição da biomassa parava assim que a ignição era desligada, estudou-se dois outros esquemas para promover a combustão, nomeadamente, a alimentação de uma corrente de ar quente e o uso de uma resistência para aquecer a biomassa. No estudo dos esquemas com ignição e alimentação de ar quente a biomassa é colocada apenas a partir da segunda camada de células, e deixando uma camada de células livre em seu redor, para permitir a circulação do ar. Para o esquema com a resistência, a biomassa é colocada em cima dessa resistência, isto é, na superfície inferior (Figuras 32 e 33).

4.4.1 Resistência de aquecimento

No nosso estudo, o esquema que deu melhores resultados foi o uso de uma resistência colocada na superfície de *inlet* do corpo (isto é, da câmara de combustão). Para simular esta situação as células correspondentes ao *inlet* foram colocadas à temperatura de 1000 K durante toda a simulação. Os resultados mais significativos que se obtiveram são resumidos nos gráficos das Figuras 35 a 41, em que se usou o esquema de *Crank-Nicholson* para a integração numérica do sistema de equações diferenciais.

A Figura 35 mostra a variação da temperatura do sólido (T_s) na parte inferior, intermédia e superior da biomassa. Na célula inferior, que está em contacto com a resistência (curva 1:2), a temperatura aumenta muito rapidamente, estabilizando nos 650 K ao fim de 20 000 s. Nas outras células a temperatura sobe mais lentamente, verificando-se, como seria de esperar, que quanto mais longe da resistência se encontra a célula mais tempo demora para a sua temperatura subir, começando a subir perto dos 10 000 s para a célula intermédia (curva 1:4) e só depois dos 20 000 s para a célula superior (curva 1:6), estabilizando estas temperaturas a partir dos 40 000 s.

A Figura 36 mostra a temperatura do gás (T) na parte inferior, intermédia e superior da biomassa, à saída da caldeira (curva 1:10) e num ponto intermédio (1:8), entre a célula superior de biomassa e a saída da caldeira. Como se verifica pela análise desta figura, a evolução da temperatura do gás em contacto com a biomassa é idêntica à da Figura 35, enquanto para a temperatura à saída da caldeira se verifica uma subida rápida no início, seguida de uma subida mais lenta, e estabilizando esta temperatura nos 380 K ao fim de 40

000 s. A variação da temperatura do gás no ponto intermédio, entre a biomassa e a saída da caldeira, é idêntica à variação de temperatura à saída da caldeira

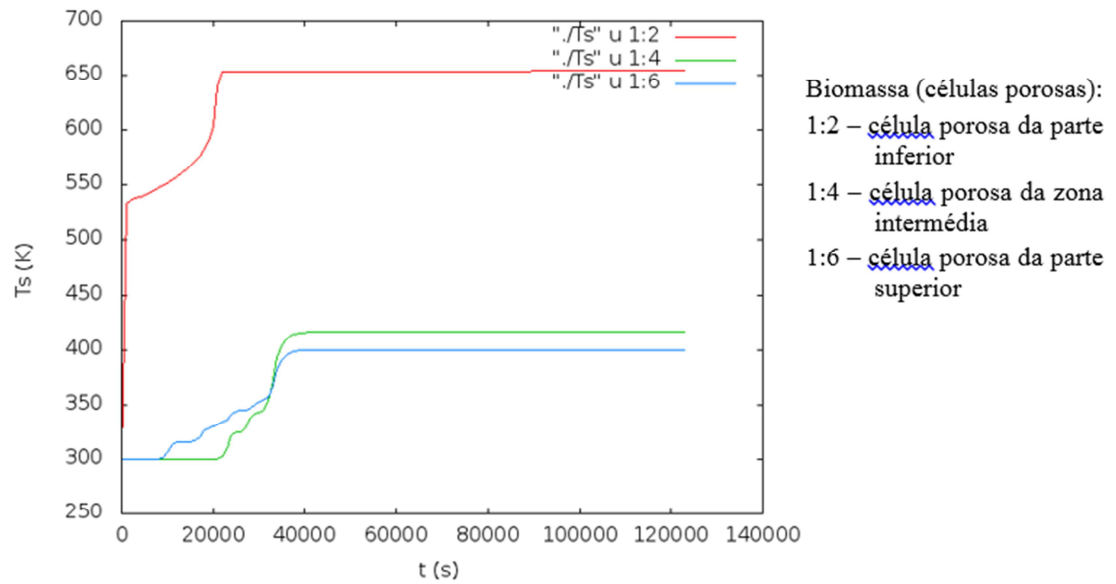


Figura 35 – Variação da temperatura na biomassa com o uso de resistência (Crank-Nicholson).

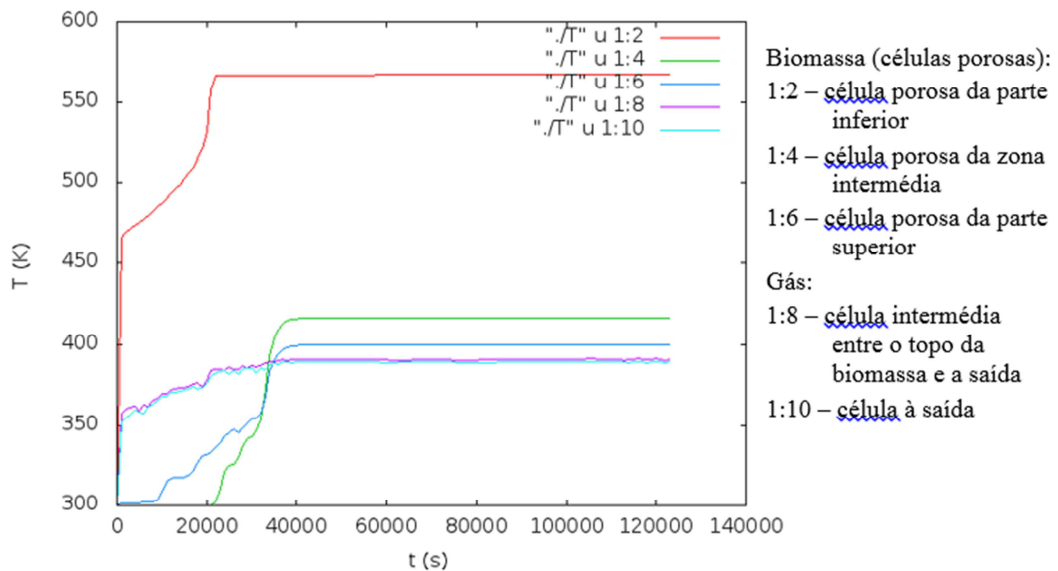


Figura 36 - Variação da temperatura do gás com o uso de resistência (Crank-Nicholson).

A Figura 37 mostra a evolução da porosidade da biomassa nas três localizações referidas anteriormente. Antes de mais, convém referir que o valor tabelado não é a porosidade (γ), mas sim $(1 - \gamma)$, pelo que a diminuição deste valor indica que o material está a ficar mais poroso (o valor de zero corresponde a uma célula totalmente porosa, isto é, de gás). Esta figura mostra que na célula em contacto com a resistência a porosidade baixa rapidamente, o que indica que está a ocorrer a degradação da biomassa, enquanto nas outras células verifica-se igualmente uma diminuição, mas muito menos acentuada, até perto do 0,4, estabilizando neste valor a partir dos 20 000 s, o que indica que a combustão deixou de ocorrer, ou, pelo menos, será muito lenta.

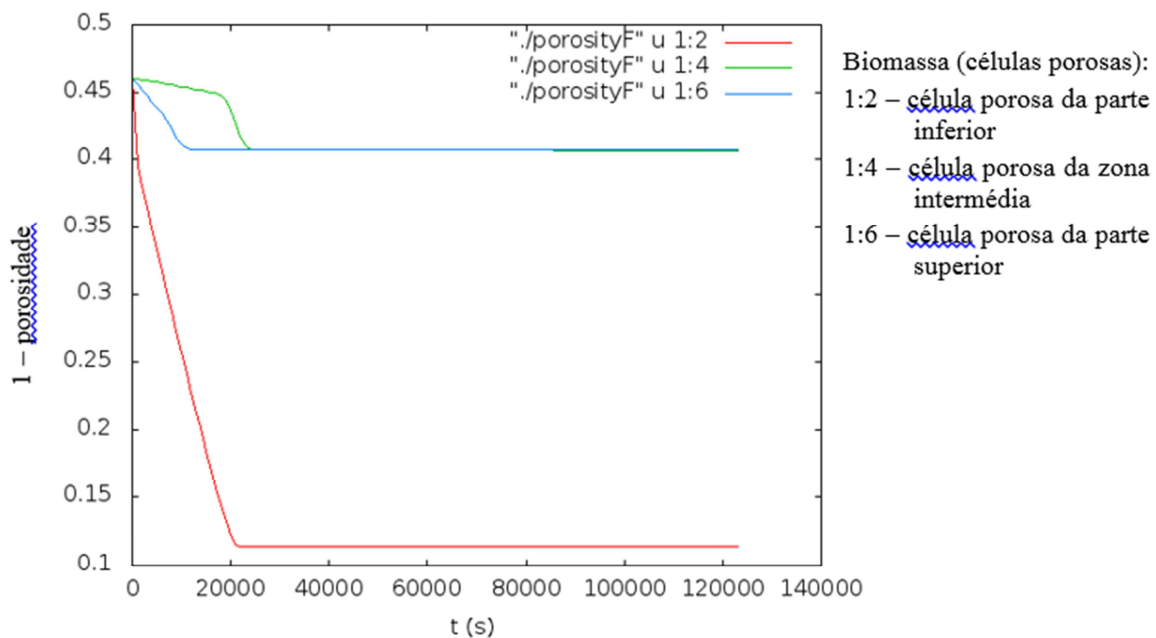


Figura 37 – Variação da porosidade da biomassa com o uso de resistência (*Crank-Nicholson*).

As Figuras 38 a 41 representam a variação de quantidade de celulose, hemicelulose, lenhina e humidade na biomassa, nas localizações anteriormente referidas. Como se pode verificar, nas células mais afastadas da resistência a massa de celulose, hemicelulose e lenhina mantêm-se praticamente constante, enquanto na célula em contacto com a resistência, devido à temperatura mais elevada, a quantidade destes componentes diminui mais rapidamente, sendo a sua degradação térmica praticamente completa nesta célula a

partir dos 20 000 s, o que está consistente com o valor da variação da porosidade (Figura 37).

No que diz respeito à humidade, os valores para a célula de biomassa em contacto com a resistência não são perceptíveis no gráfico, pois a evaporação da humidade é muito rápida devido à elevada temperatura nessa célula, enquanto nas outras células a humidade é totalmente evaporada perto dos 18 000 s e 22 000 s (curvas 1:4 e 1:6, respetivamente). Se compararmos estes valores com os gráficos das temperaturas (Figuras 35 e 36), concluímos que a primeira etapa do processo da combustão da biomassa é a evaporação da humidade (que é um processo endotérmico), e só depois o calor libertado é usado no aquecimento das células, verificando-se que as temperaturas do sólido e do gás começam a elevar-se quando a água foi totalmente evaporada.

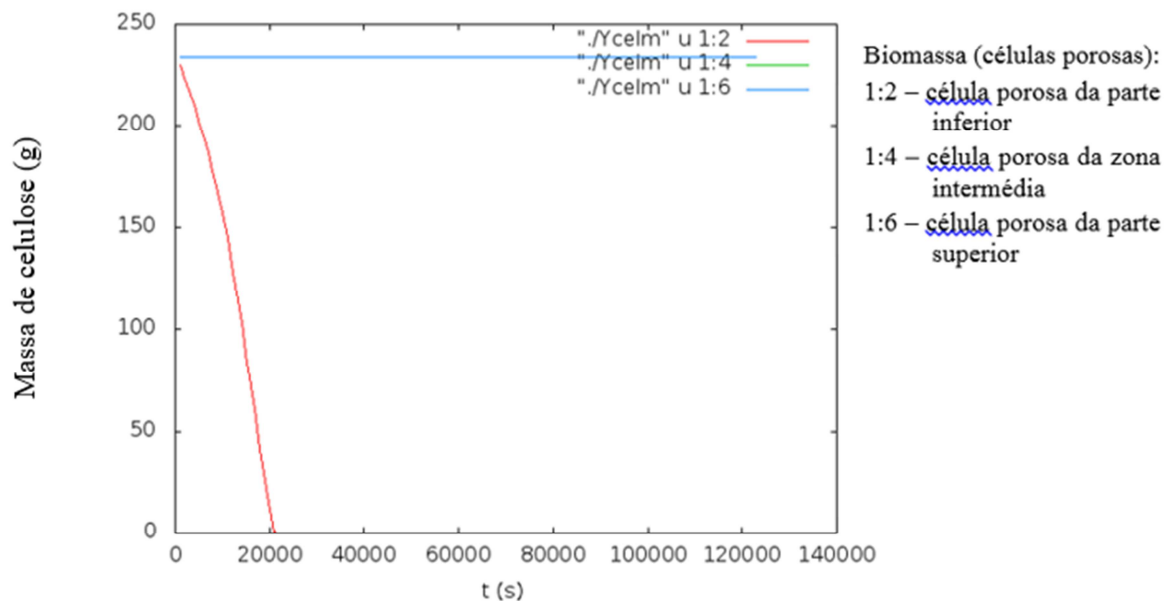


Figura 38 – Variação da quantidade de celulose com o uso de resistência (*Crank-Nicholson*).

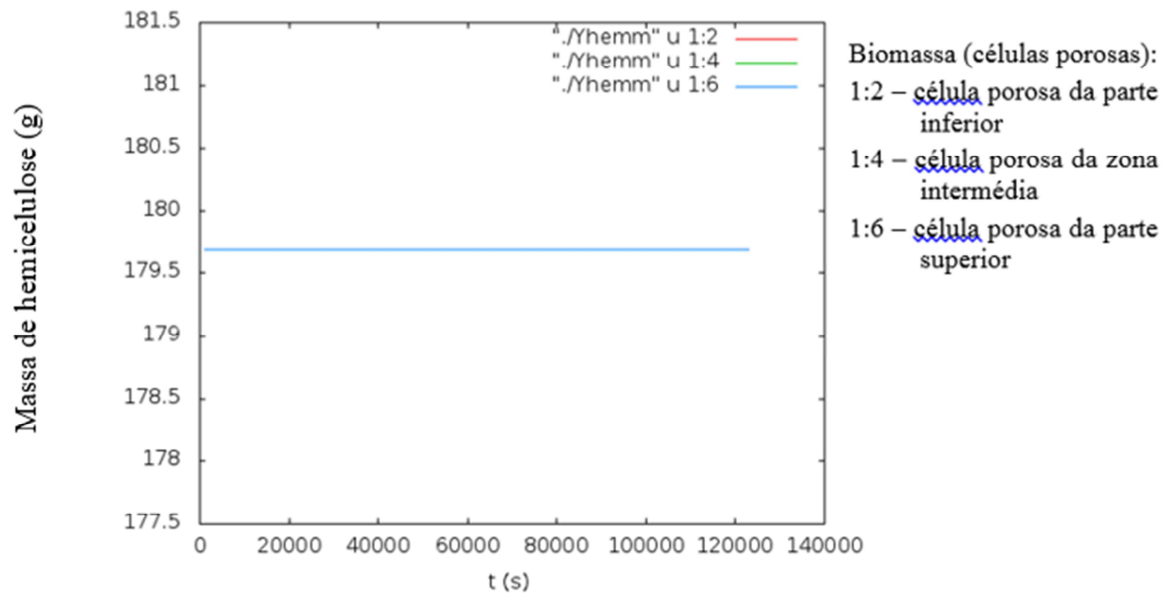


Figura 39 – Variação da quantidade de hemicelulose com o uso de resistência (Crank-Nicholson).

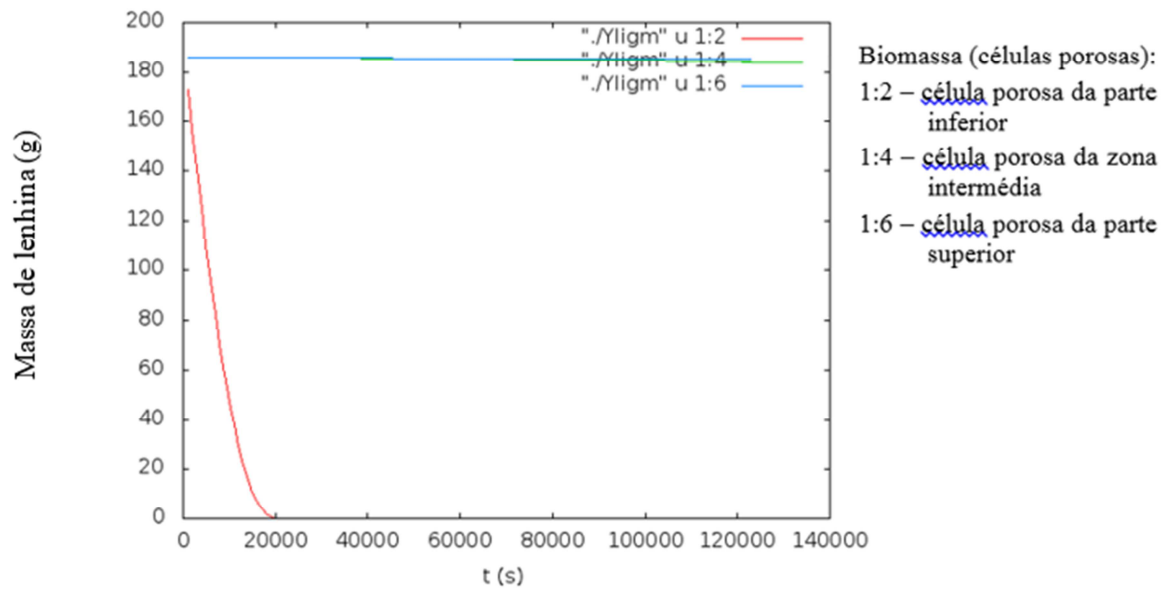


Figura 40 – Variação da quantidade de lenhina com o uso de resistência (Crank-Nicholson).

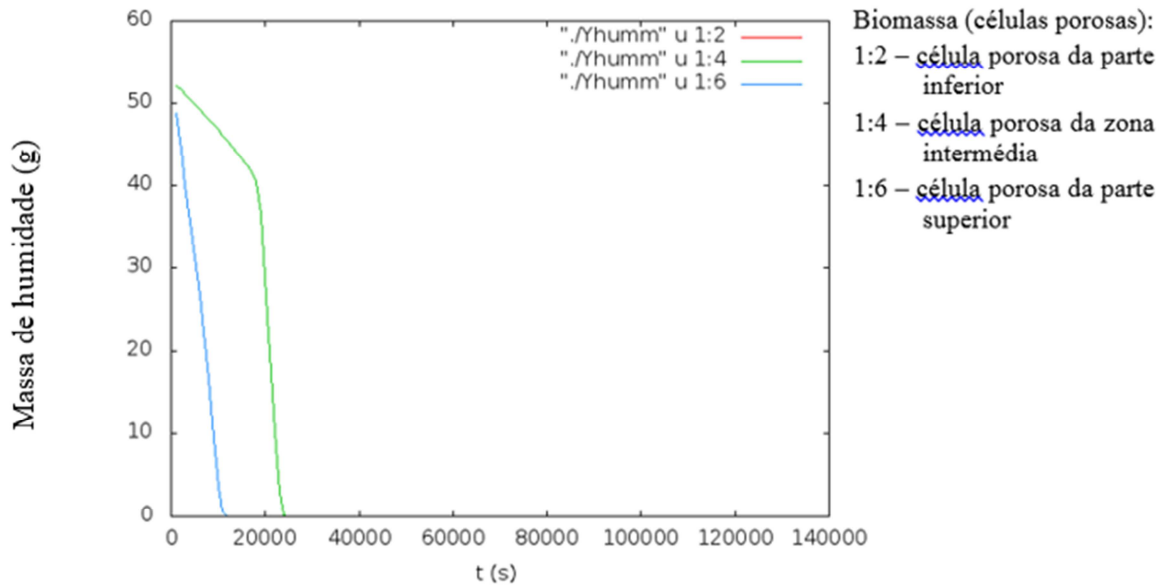


Figura 41 – Variação do teor de humidade da biomassa com o uso de resistência (*Crank-Nicholson*).

Relativamente à composição dos gases, verifica-se que a composição do azoto e oxigénio se mantêm praticamente constantes, após uma pequena oscilação inicial (Figuras 42 e 43), sendo os seus valores ligeiramente inferior na zona intermédia da biomassa. As frações de metano, hidrogénio e dióxido de carbono são praticamente nulas, inferiores a 5×10^{-4} , (Figuras 44, 45 e 46), e a de monóxido de carbono, embora pequena, é superior às dos outros voláteis (Figura 47), chegando a atingir o valor de 0,065 na célula de biomassa da zona intermédia. A análise destas figuras mostra que a concentração dos gases da pirólise é maior na zona intermédia da biomassa, o que justifica a diminuição dos valores das frações de azoto e oxigénio nesta zona. Estas pequenas frações mássicas dos gases que resultam da reação de pirólise da biomassa indicam que as reações de combustão em fase gasosa não ocorrem, ou ocorrem em pequena extensão. Este resultado é consistente com os valores da massa de carvão (matéria carbonada) e cinzas (Figuras 48 e 49), que dão uma indicação das extensão das reações na fase sólida, e em que se verifica que a massa de cinza se mantêm constante e igual ao valor inicial, o que mostra que não ocorre gasificação, e que a massa de carvão é praticamente nula, verificando-se apenas uma pequena produção deste material na zona intermédia da biomassa, o que é consistente com o aparecimento, que já foi referido, de maiores concentrações dos gases de pirólise nesta zona. Assim, como não há reação significativa na fase sólida, não há produção de gases combustíveis cuja

combustão libertaria o calor necessário à elevação de temperatura na câmara de combustão e à autossustentação do processo de combustão dos gases combustíveis e à degradação térmica da biomassa.

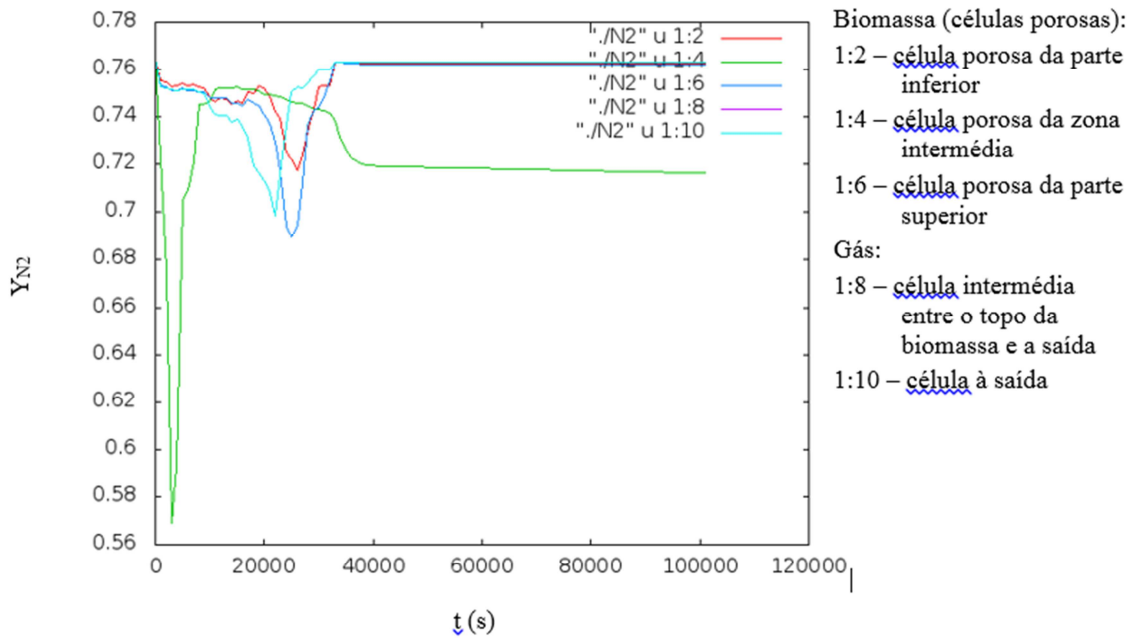


Figura 42 – Variação da fração mássica de azoto com o uso de resistência (*Crank-Nicholson*).

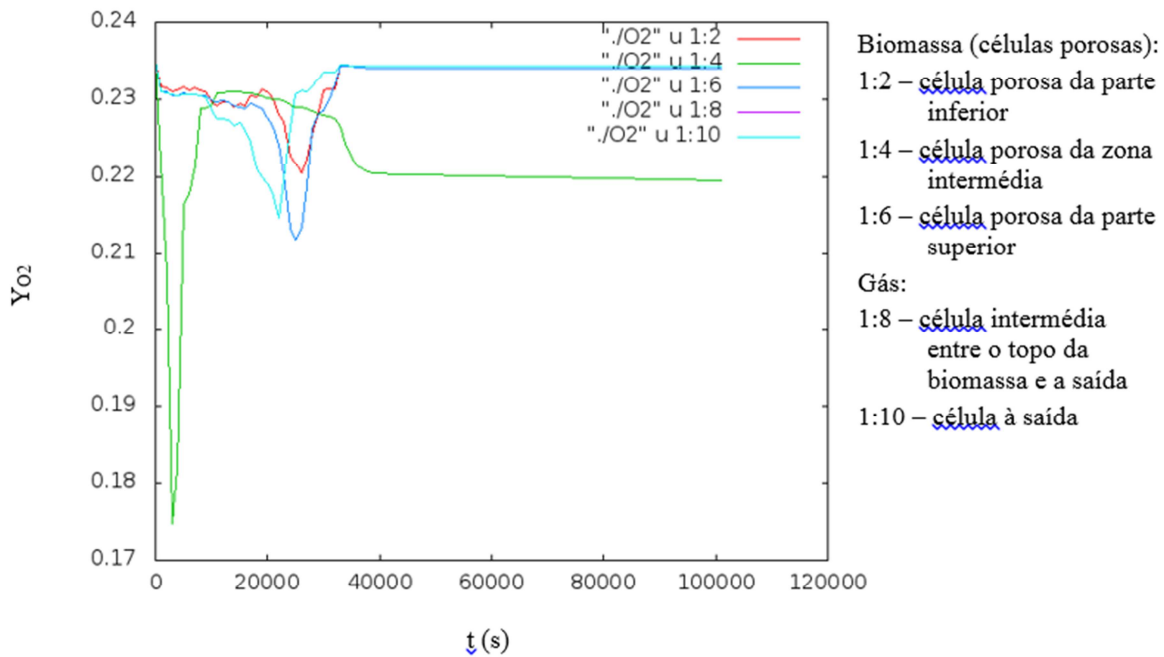


Figura 43 – Variação da fração mássica de oxigénio com o uso de resistência (*Crank-Nicholson*).

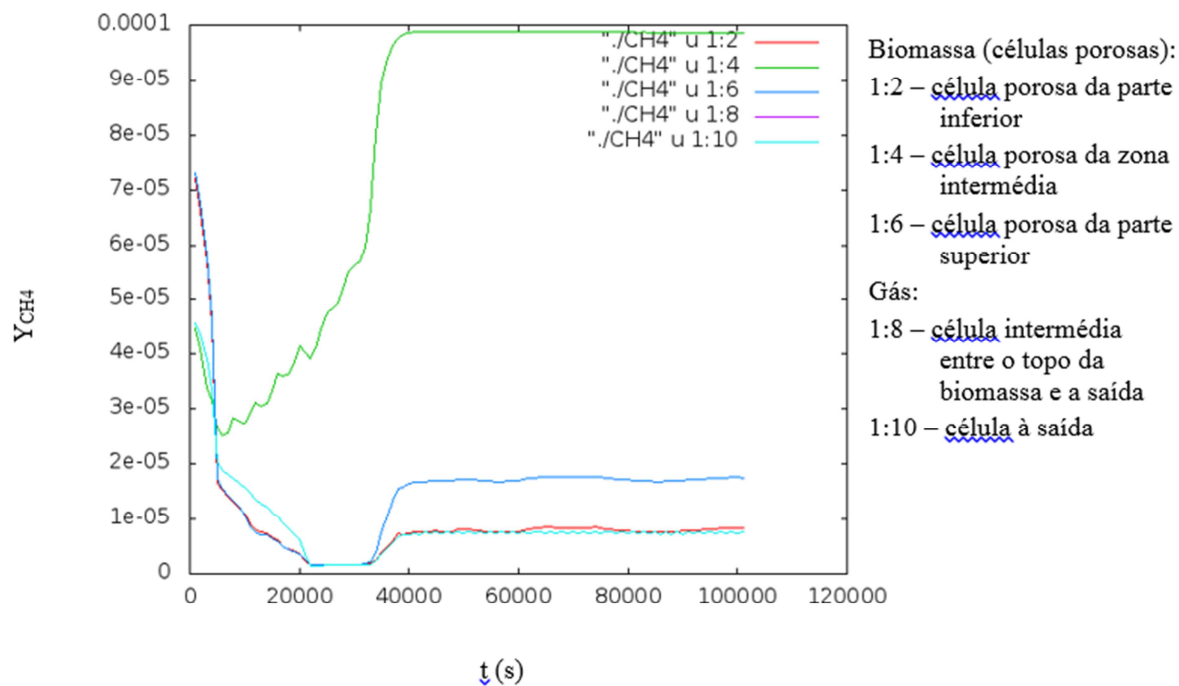


Figura 44 – Variação da fração mássica de metano com o uso de resistência (*Crank-Nicholson*).

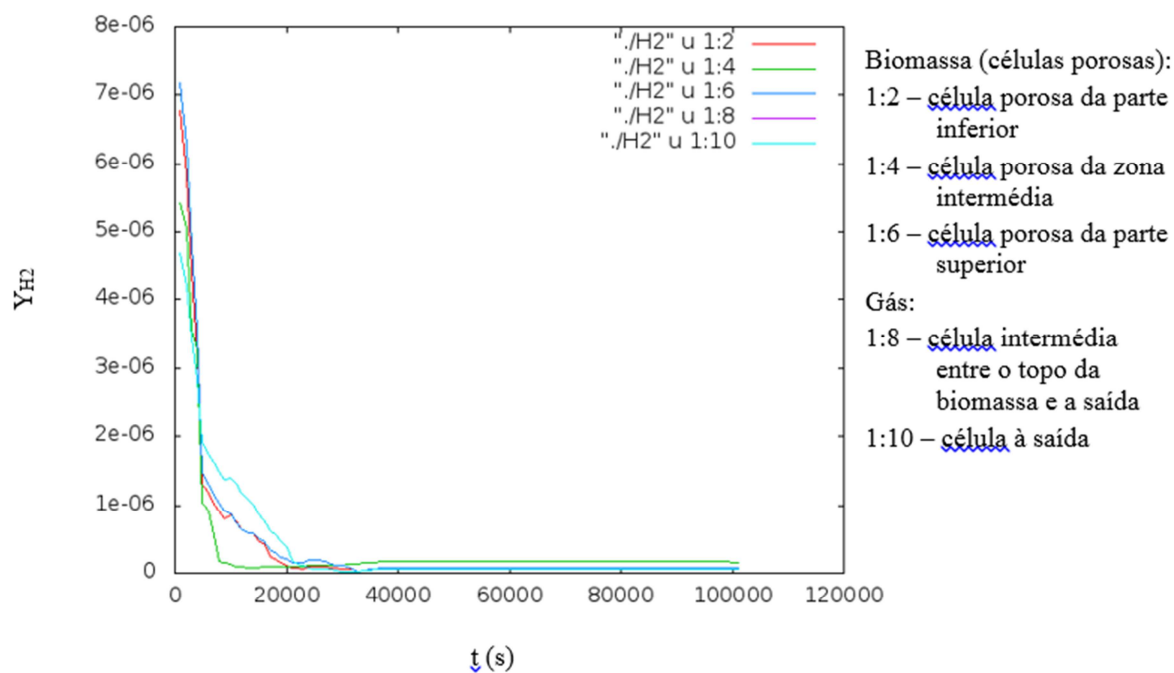


Figura 45 – Variação da fração mássica de hidrogénio com o uso de resistência (*Crank-Nicholson*).

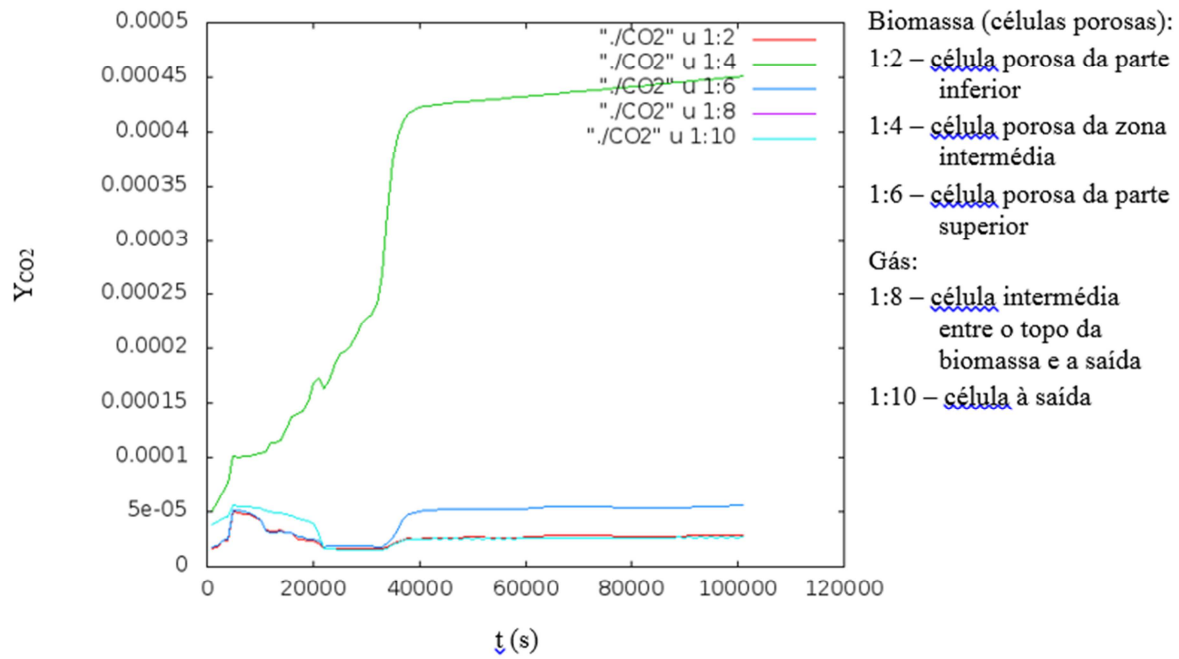


Figura 46 – Variação da fração mássica de dióxido de carbono com o uso de resistência (Crank-Nicholson).

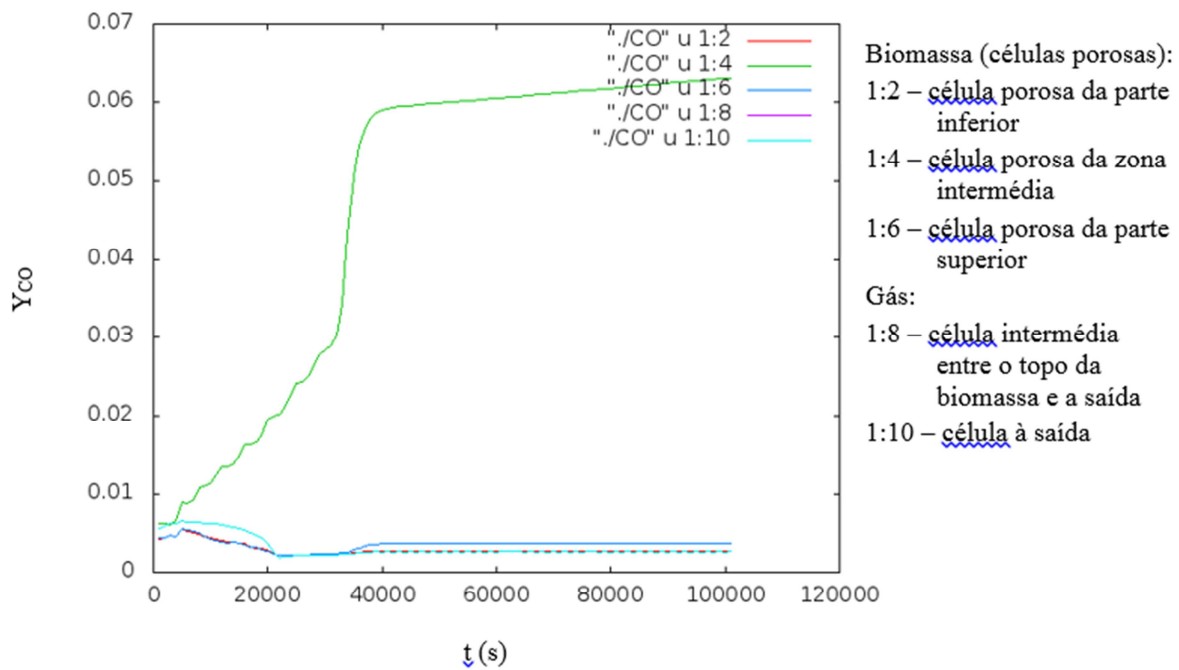


Figura 47 – Variação da fração mássica de monóxido de carbono com o uso de resistência (Crank-Nicholson).

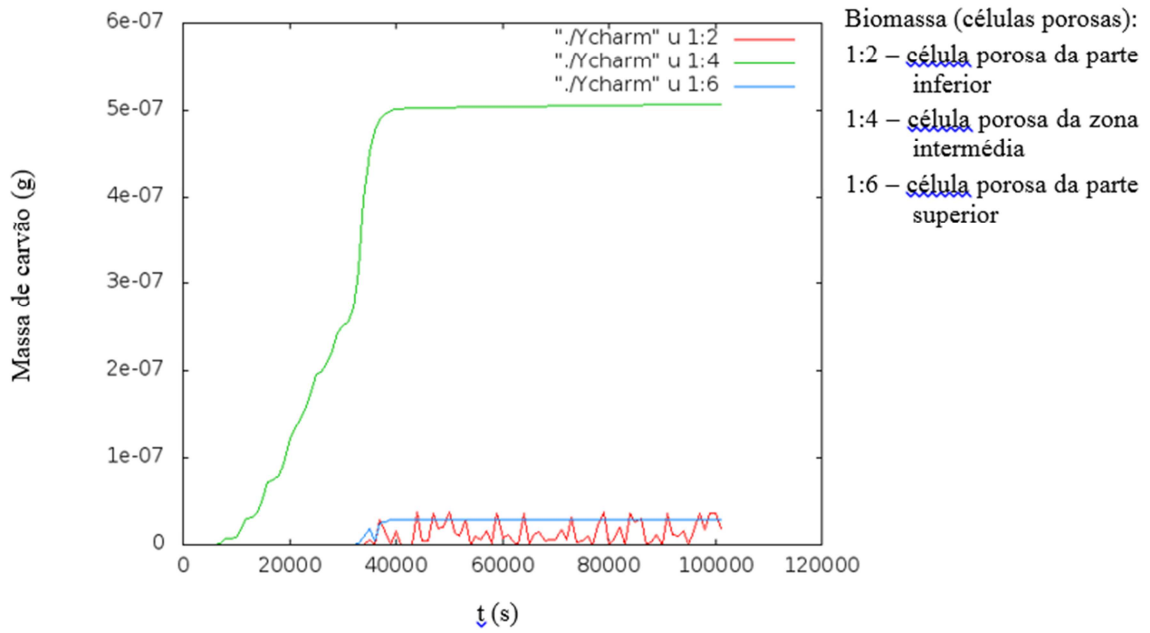


Figura 48 – Variação da massa de carvão com o uso de resistência (*Crank-Nicholson*).

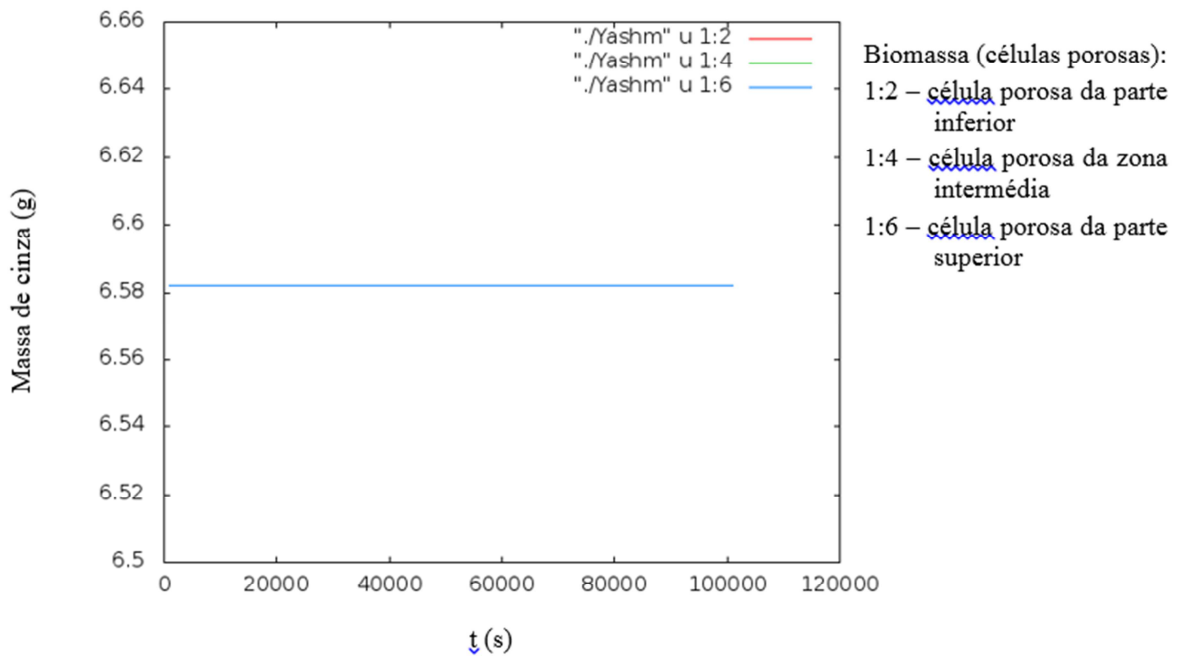


Figura 49 – Variação da massa de cinzas com o uso de resistência (*Crank-Nicholson*).

Para concluir esta análise mostramos o resultado da simulação para três tempos diferentes (8000 s, 25000 s e 120000 s) no que se refere à variação da temperatura e velocidade do

gás (Figuras 50 a 52), em que as linhas de corrente (*stream lines*) se referem à velocidade do gás. Estas figuras mostram as zonas da câmara de combustão onde a temperatura e velocidade do gás são maiores e menores, e como elas evoluem com o tempo.

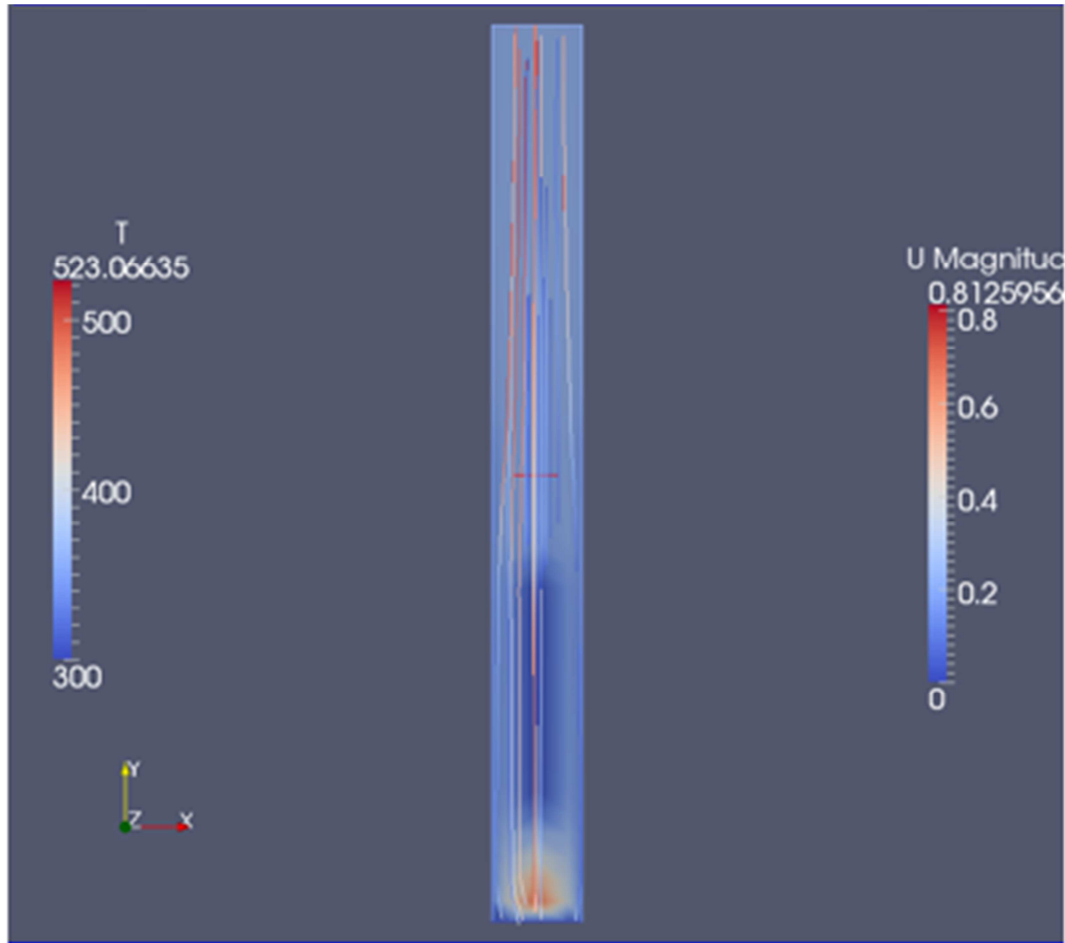


Figura 50 – Velocidade e temperatura do gás para $t = 8000$ s.

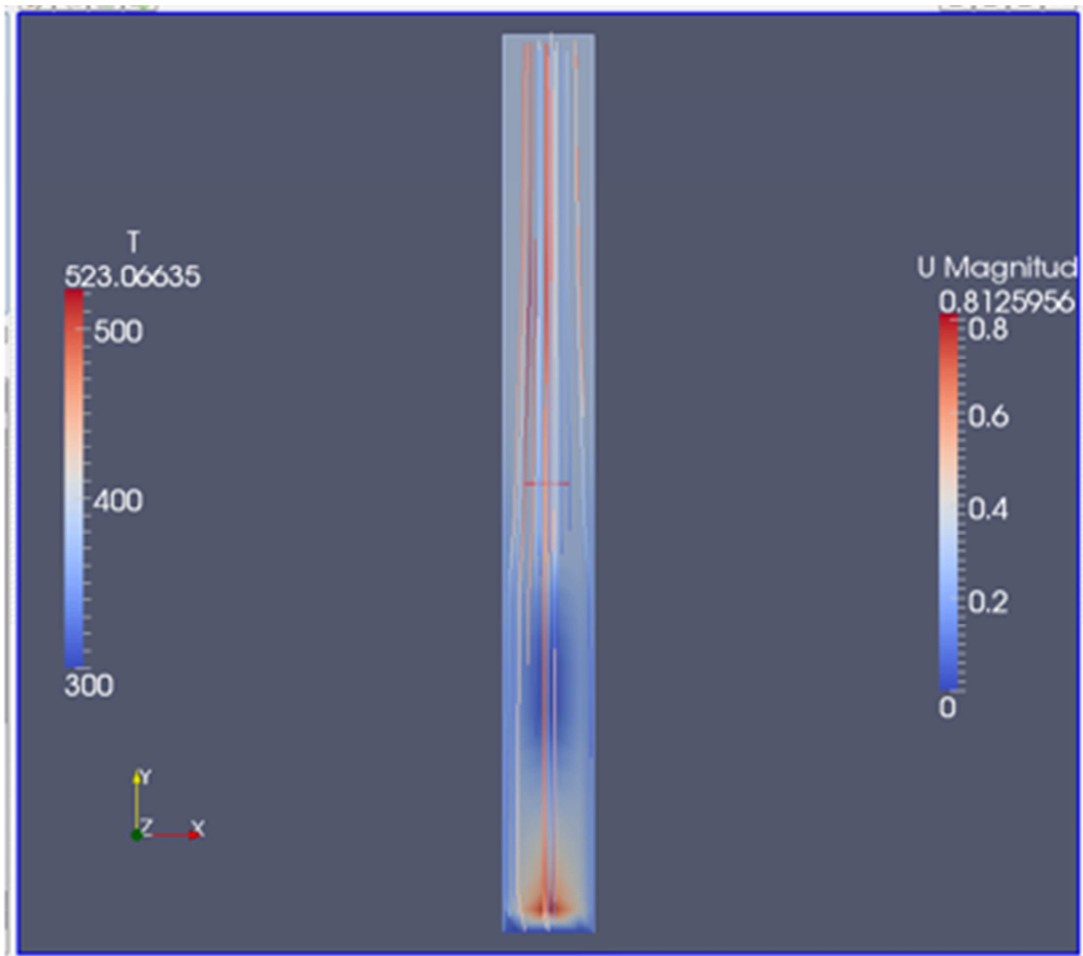


Figura 51 – Velocidade e temperatura do gás para $t = 25000$ s.

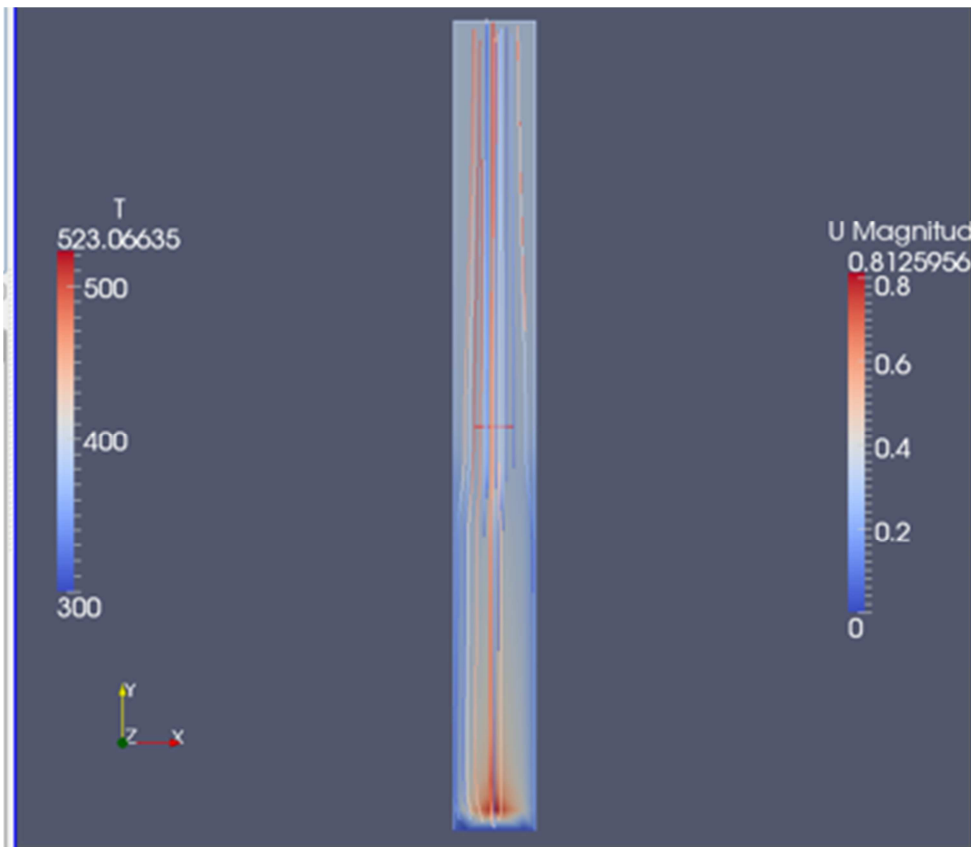


Figura 52 – Velocidade e temperatura do gás para $t = 120000$ s.

Para analisar a influência do esquema de integração numérica nos resultados e na sua estabilidade (isto é, convergência) repetiu-se a simulação anterior usando os métodos de Euler e o *Backward* [54]. Verificamos que os resultados obtidos pelos métodos de Euler e *Backward* são idênticos aos obtidos com o método de *Crank-Nicholson*, como mostram as Figura 53 e 54, que representam os perfis obtidos por estes dois métodos para a temperatura do sólido (comparar com a Figura 35).

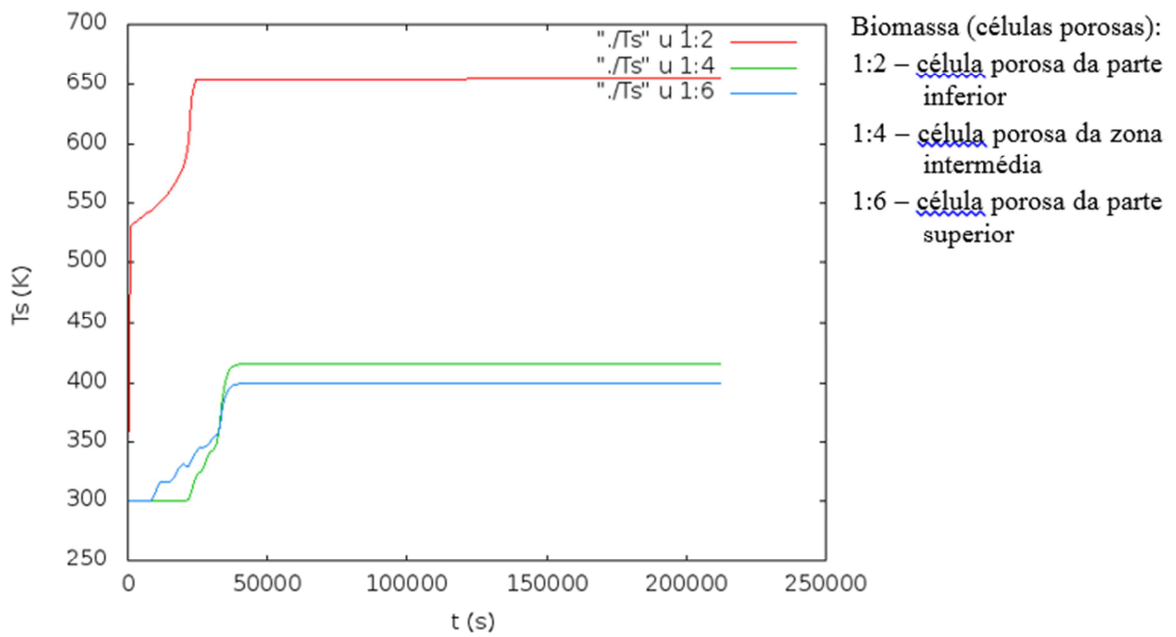


Figura 53 – Variação da temperatura na biomassa com o uso de resistência (Euler).

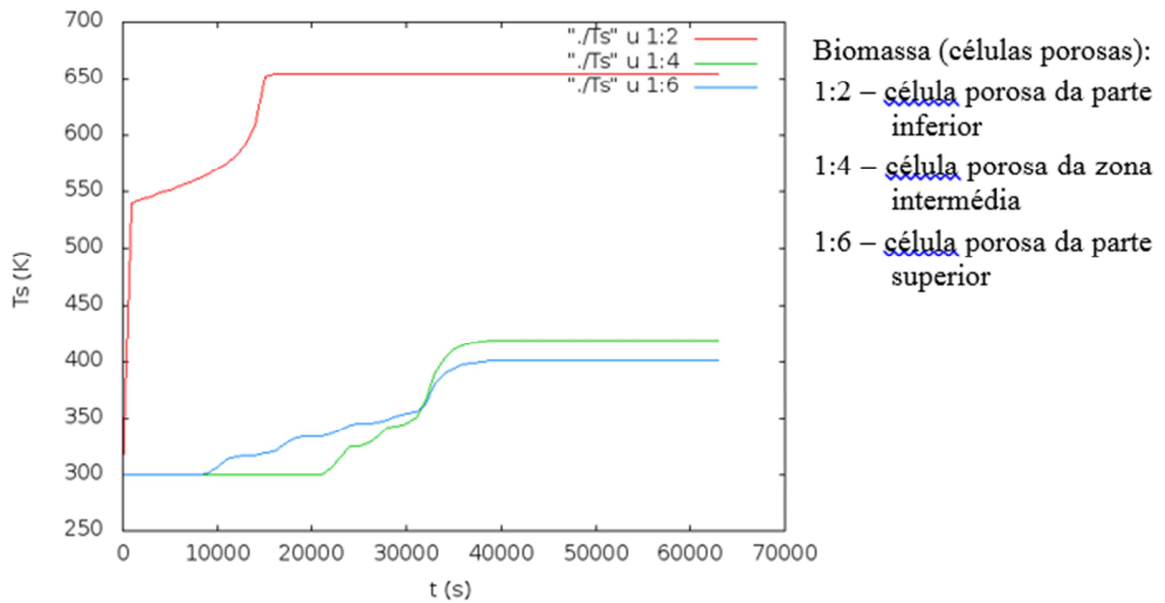


Figura 54 – Variação da temperatura na biomassa com o uso de resistência (Backward).

4.4.2 Alimentação de ar quente

Como alternativa ao uso de uma resistência para a combustão da biomassa estudou-se a hipótese de recorrer à utilização de uma corrente de ar quente. Inicialmente analisou-se a simulação com recurso a uma corrente de ar quente a 800 K usando os três métodos alternativos de integração numérica, já referidos anteriormente. Para todos eles verificou-se que a simulação não convergiu, dando a indicação que o número de iterações era muito elevado. Optou-se então por reduzir a temperatura da corrente de ar para os 500 K, e fazer a simulação usando o esquema de *Crank-Nicholson*, já que é o mais adequado para este tipo de problemas, e como verificamos com o uso da resistência, os valores obtidos não diferem significativamente.

A Figura 55 representa a variação da temperatura do sólido em três localizações diferentes, verificando-se que na célula mais perto da admissão do ar quente é onde a temperatura começa a aumentar primeiro, curva 1:3. Relativamente às outras duas localizações da biomassa, a variação da temperatura é idêntica, embora se verifique que o aumento se verifica primeiro para a célula do topo, curva 1:7, que está em contacto com o ar quente, e só depois na célula intermédia, curva 1:5. Para a temperatura do gás (Figura 56), a variação é idêntica para as células da biomassa, verificando-se que nas células sem biomassa colocadas próximo da admissão de ar quente a temperatura sobe muito rapidamente até atingir os 500 K (que é a temperatura do ar quente à entrada da câmara de combustão), curva 1:2, enquanto à saída da caldeira e acima da biomassa, como seria expectável, a temperatura também aumenta rapidamente, estabilizando nos 430 K (curvas 1:10 e 1:9).

A Figura 57 mostra a variação da porosidade, ou melhor, de $1 - \gamma$. Como se pode ver, a porosidade diminui em todas as células, cuja localização é igual à anteriormente referida, verificando-se que a diminuição é mais acentuada na célula mais perto do *inlet*, contudo a variação é muito pequena, de 0,46 para 0,405, indicando que nestes 40 000 s foi muito pouca a quantidade de biomassa que sofreu degradação térmica (pirólise). Esta conclusão está consistente com a análise da variação de massa de celulose, hemicelulose e lenhina, que foi inferior a 1%. Na realidade, nestes primeiros 40 000 s, o que se verifica é a evaporação da humidade contida na biomassa (Figura 58), que ocorre ao fim de 2 500 s para a células inferiores, e 12 500 e 15 000 s para as restantes células, pelo que só após esta etapa de secagem se verificará a combustão (neste caso pirólise) da biomassa.

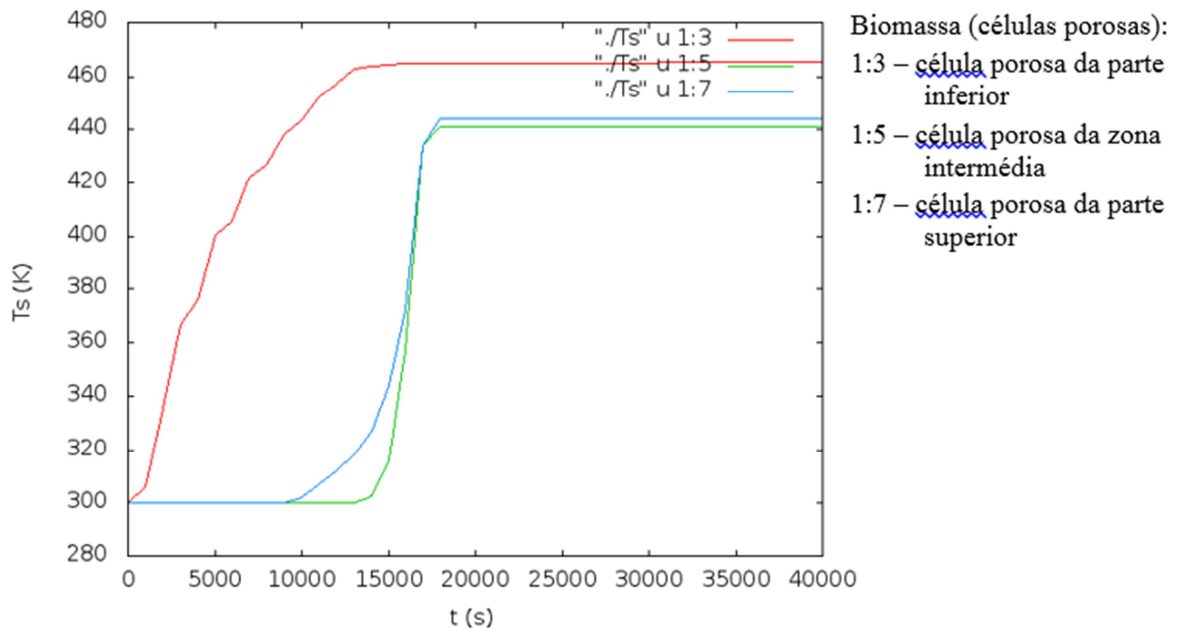


Figura 55 – Variação da temperatura na biomassa com o uso de ar quente (*Crank-Nicholson*).

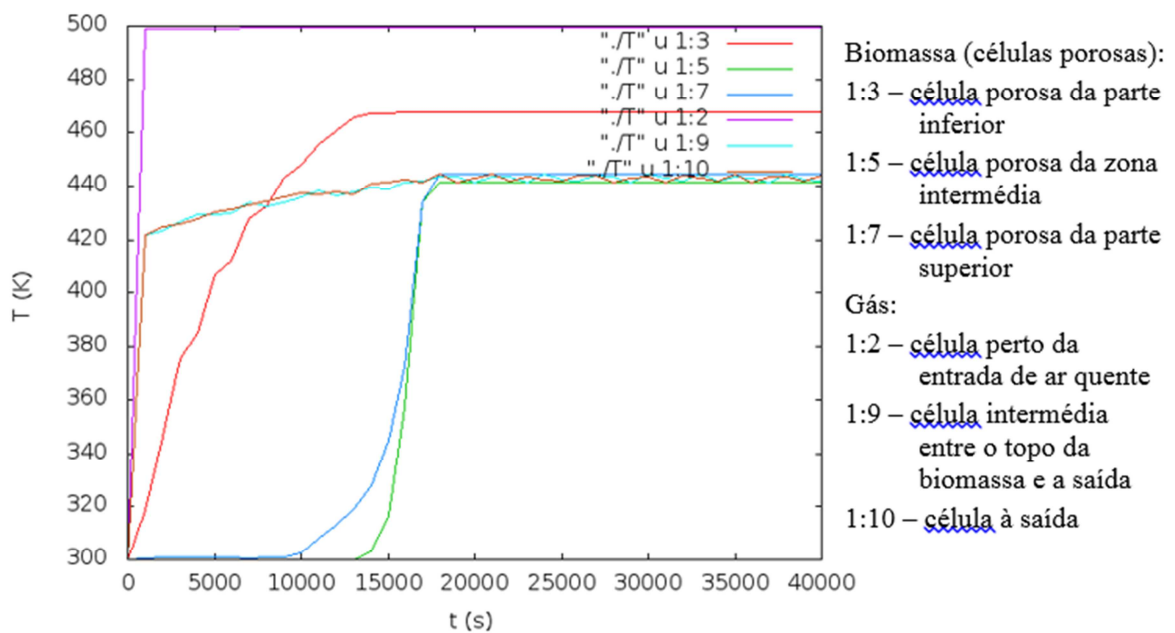


Figura 56 – Variação da temperatura do gás com o uso de ar quente (*Crank-Nicholson*).

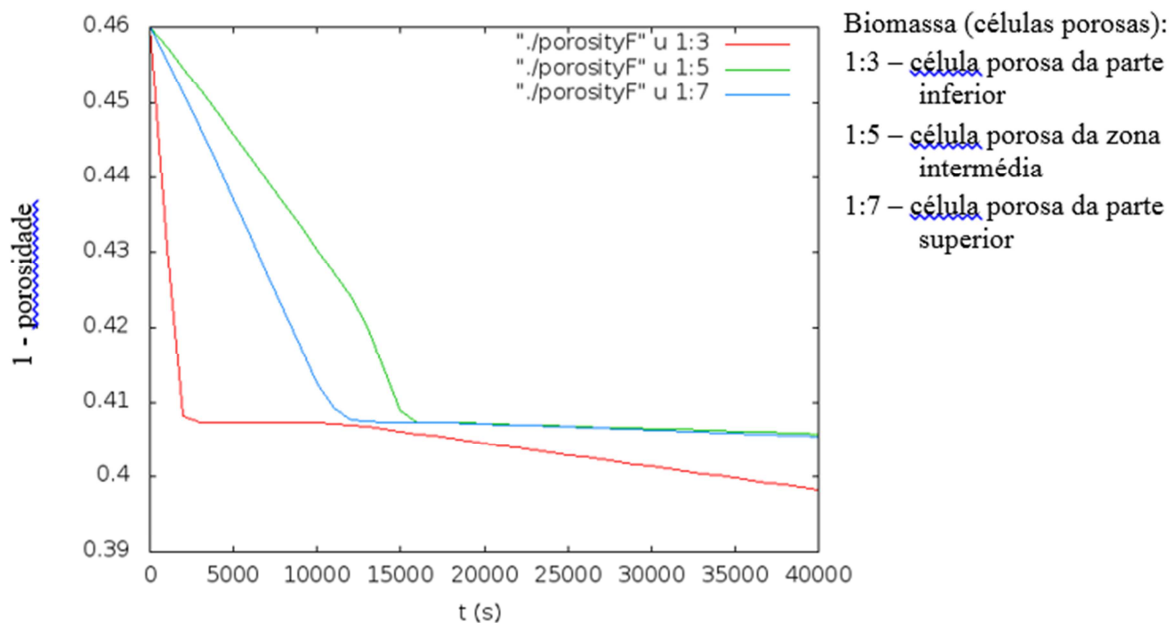


Figura 57 – Variação da porosidade da biomassa com o uso de ar quente (Crank-Nicholson).

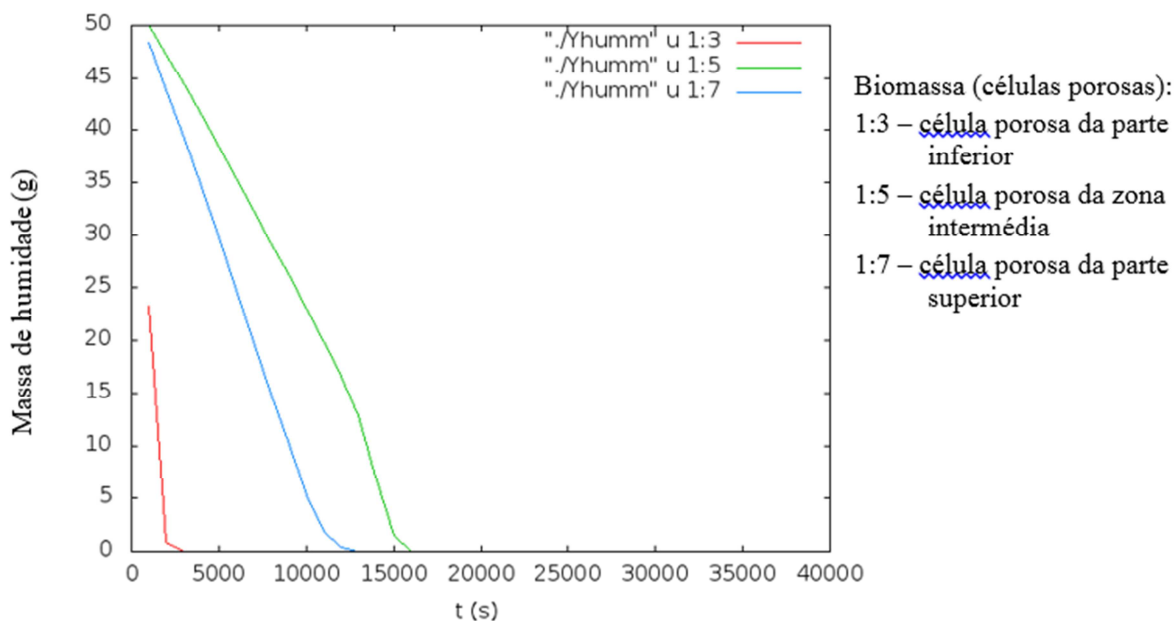


Figura 58 – Variação do teor de humidade da biomassa com o uso de ar quente (Crank-Nicholson).

Tal como se verificou para as simulações com a resistência de aquecimento, a composição do azoto e do oxigénio mantêm-se praticamente constantes à saída da caldeira, com pequenas variações no seu interior, e a concentração dos outros gases, CH₄, CO, CO₂, H₂O

são praticamente nulas, ou muito pequenas, o que indica que as reações em fase gasosa não ocorrem, ou ocorrem em pequena extensão. Este resultado está de acordo com os valores da massa de carvão (matéria carbonada) e cinzas, que dão uma indicação das extensão das reações na fase sólida, e em que se verifica que a massa de cinza se mantém constante e igual ao valor inicial, e que a massa de carvão é praticamente nula, o que indica que não há reação significativa na fase sólida, donde não há formação de gases cuja combustão libertaria o calor necessário à elevação de temperatura e à autossustentação da combustão.

Como fizemos para o esquema da resistência de aquecimento, mostramos nas Figuras 59, 60 e 61 a temperatura e velocidade do gás na câmara de combustão para três tempos diferentes (9000s, 15000 s, 65000s), em que, mais uma vez, as linhas de corrente se referem à velocidade do gás. Estas figuras elucidam como a temperatura e velocidade variam ao longo da câmara de combustão e evoluem ao longo do tempo.

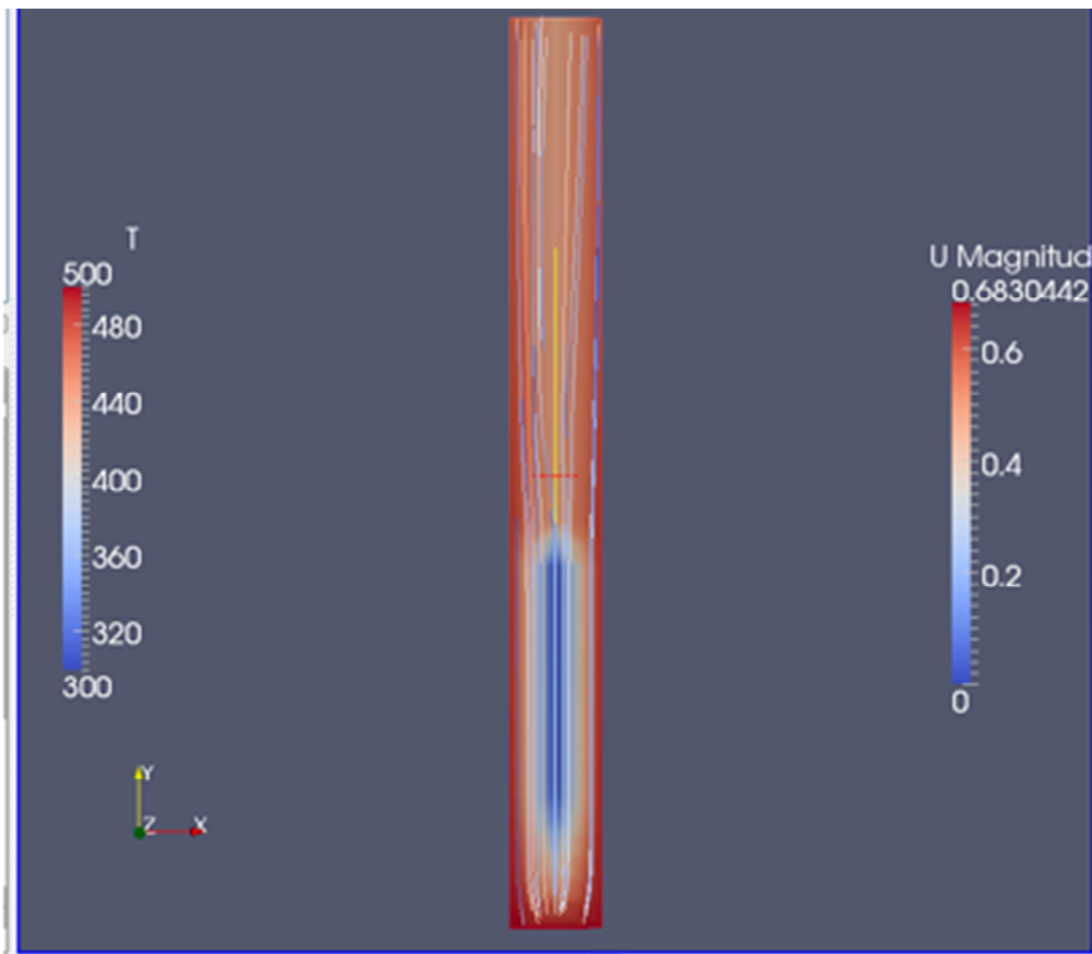


Figura 59 – Velocidade e temperatura do gás para $t = 9000$ s.

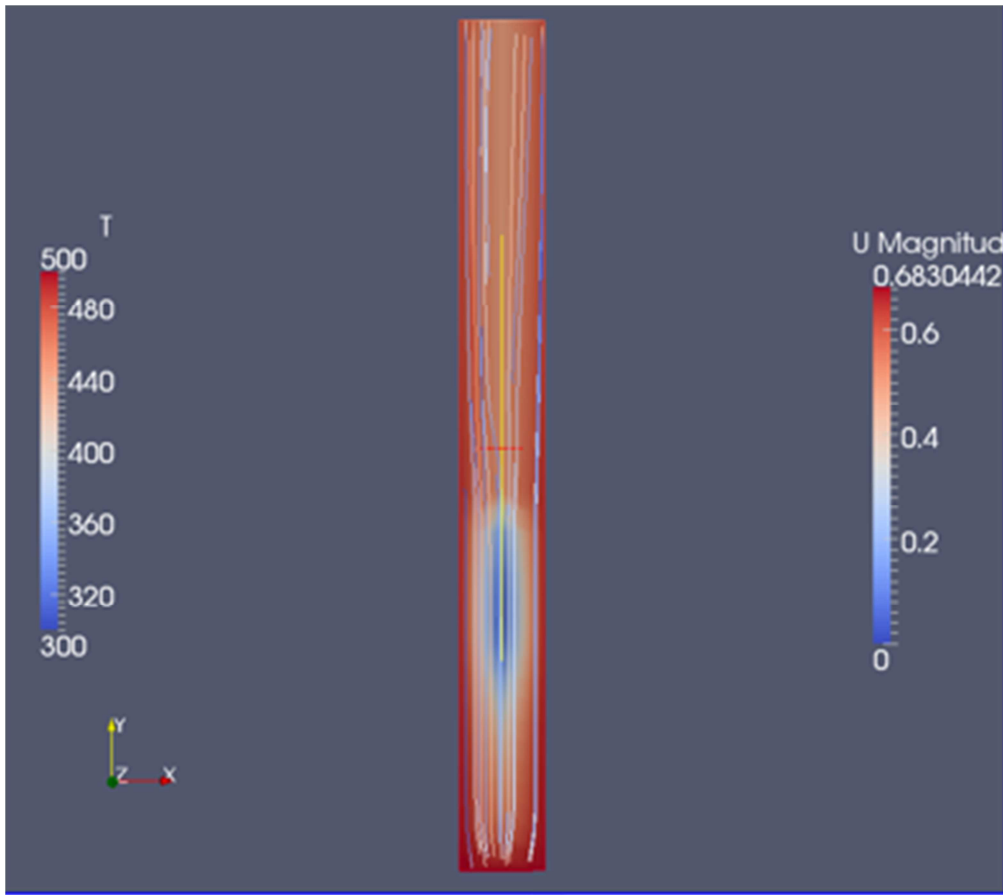


Figura 60 – Velocidade e temperatura do gás para $t = 15000$ s.

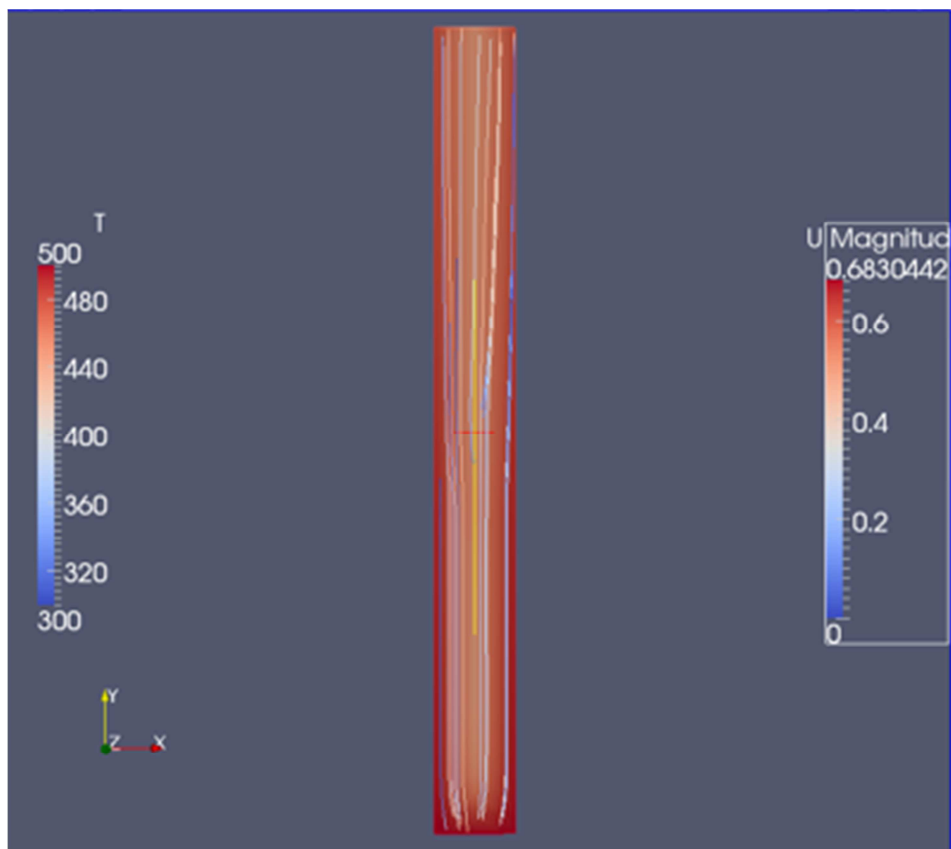


Figura 61 – Velocidade e temperatura do gás para $t = 65000$ s.

4.3.3 Sistema de ignição

A situação mais realista para a simulação da caldeira a biomassa seria a utilização de um esquema de ignição para inicializar a combustão. Como já foi referido, todas as tentativas que foram realizadas neste sentido fracassaram, por que a combustão não era autossustentável, independentemente do tempo durante o qual a ignição estava ativa. Por isso decidimos manter a ignição sempre ligada e analisar os resultados obtidos, recorrendo aos três esquemas anteriormente referidos para a integração numérica das equações. O esquema de *Crank-Nicholson* deu problemas de convergência logo no início da simulação, enquanto os outros dois esquemas deixaram de convergir mais tarde. O esquema de *backward* revelou-se muito instável e deu resultados pouco realistas, como mostra a Figura 62, que representa o perfil de temperatura do sólido em três posições diferentes. Estas

temperaturas são muito oscilantes e muito baixas, inferiores a 300 K. Neste estudo a ignição foi feita na célula 21.

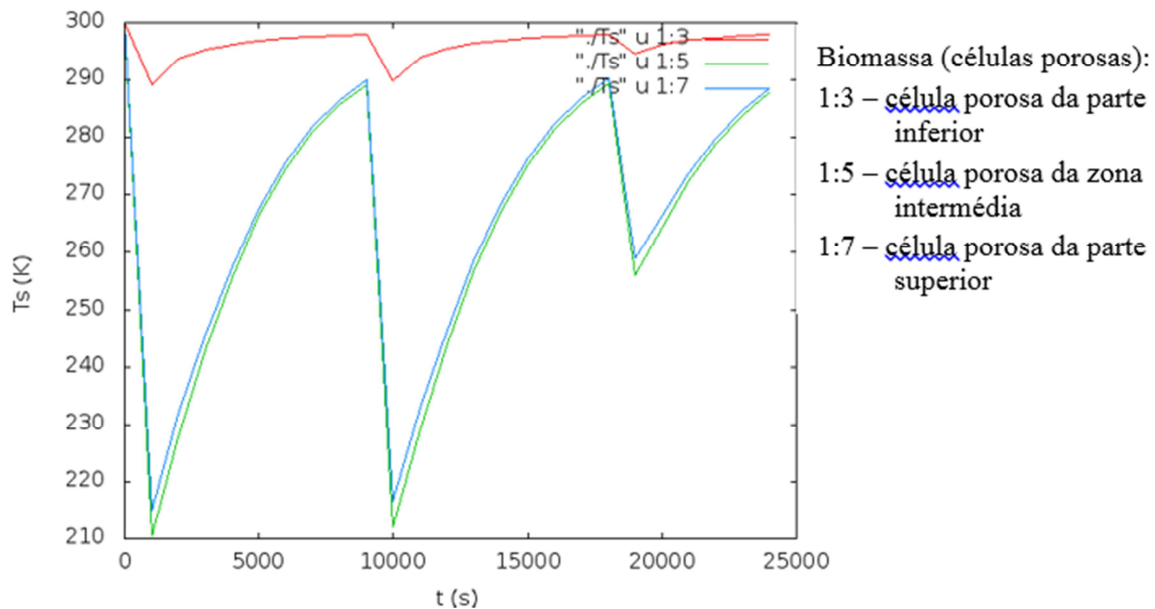


Figura 62 – Variação da temperatura da biomassa com o uso de ignição (*Backward*).

A Figura 63 mostra a temperatura do sólido quando se usa ignição com uma força de 1,5, e se usa o esquema de Euler para fazer a integração numérica. Como se verifica, a temperatura da célula de biomassa onde ocorre a ignição sofre um aumento brusco de temperatura, que estabiliza perto dos 430 K, enquanto nas outras células de biomassa o aumento de temperatura se verifica mais tarde, estabilizando perto dos 380 K. A análise deste gráfico mostra que a temperatura oscila bastante, mesmo quando atinge o patamar. Esta oscilação é mais notória quando se analisa a temperatura do gás, Figura 64, e pode estar na origem dos problemas de convergência que esta alternativa apresenta.

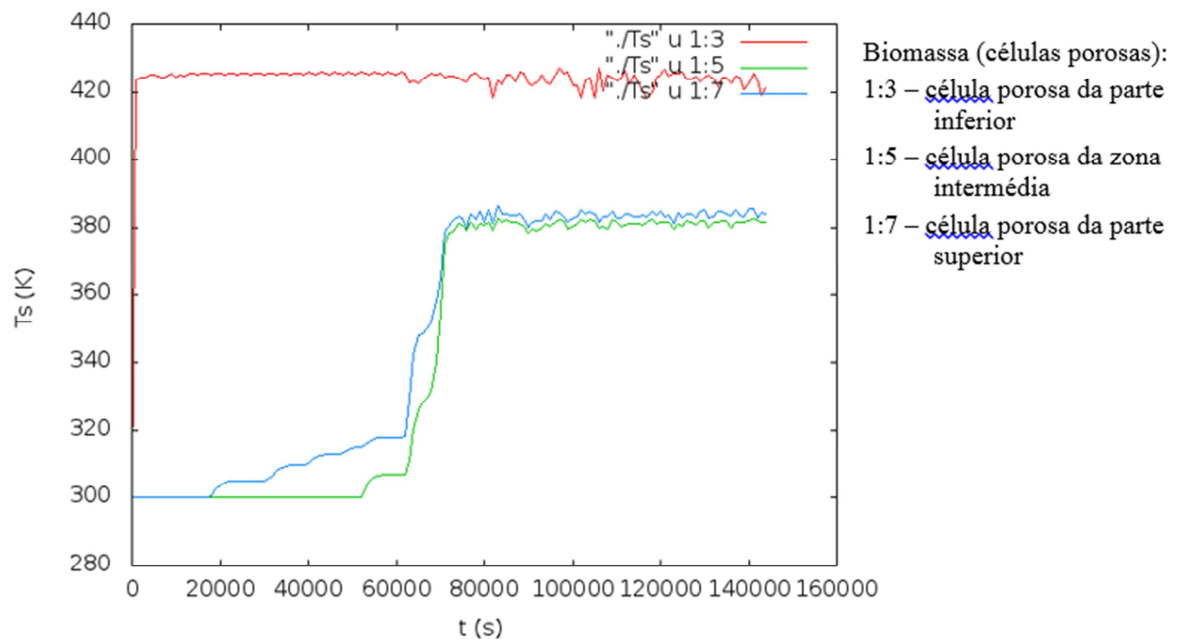


Figura 63 – Variação da temperatura da biomassa com o uso de ignição (*Euler*).

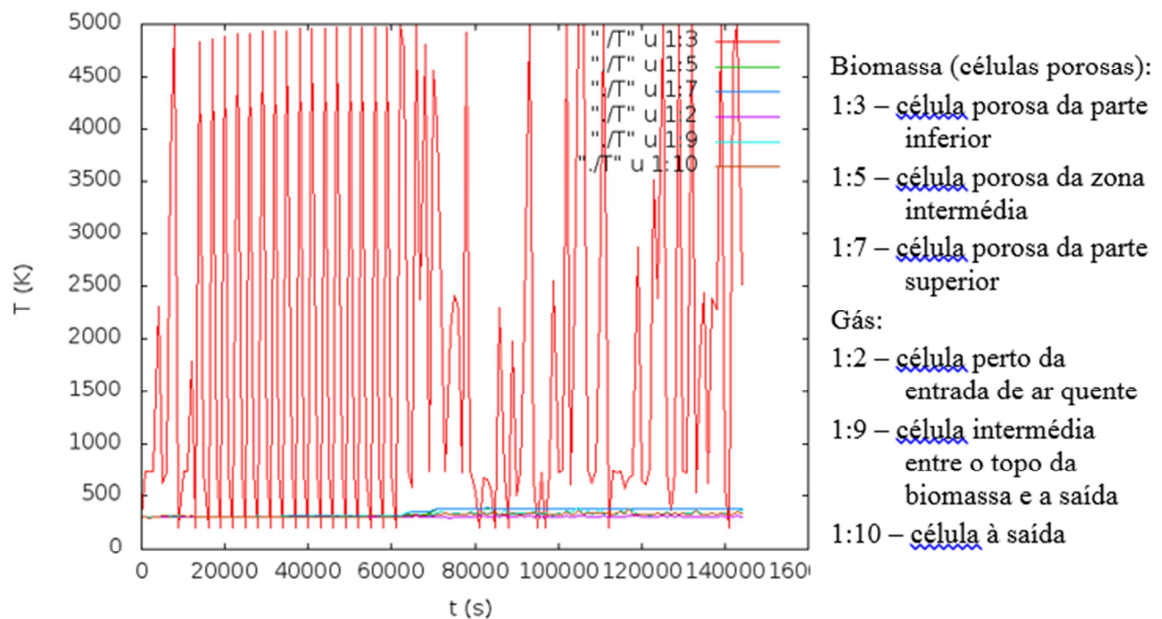


Figura 64 – Variação da temperatura do gás com o uso de ignição (*Euler*).

Durante o tempo que decorreu antes da divergência do processo numérico, isto é, até aos 160 000 s, verificou-se uma pequena variação da porosidade da biomassa, Figura 65, dos 0,46 até aos 0,41, a secagem da biomassa, Figura 66, que fica completa antes dos 60 000 s,

a variação da quantidade de lenhina, Figura 67, enquanto se verifica que a quantidade dos outros componentes da biomassa se mantêm praticamente constantes.

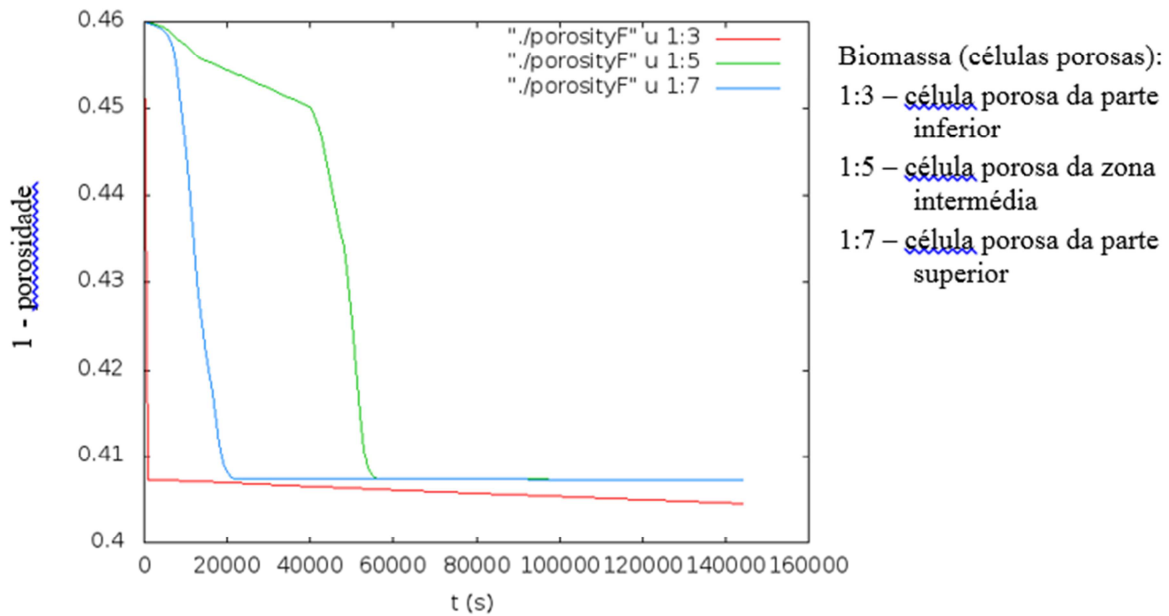


Figura 65 – Variação da porosidade da biomassa com o uso de ignição (*Euler*).

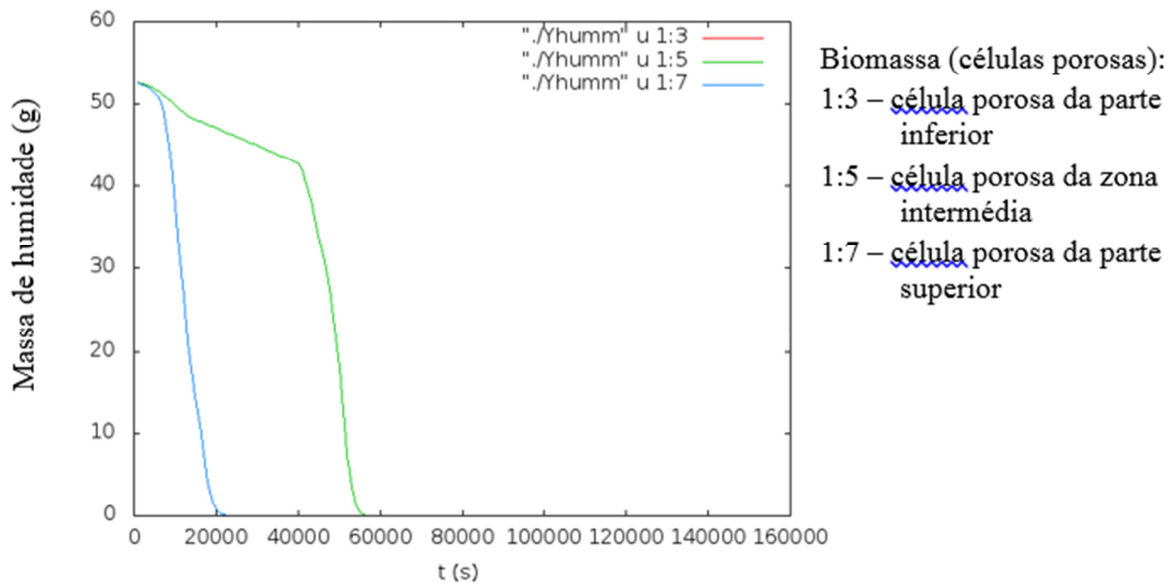


Figura 66 – Variação da quantidade de humidade na biomassa com o uso de ignição (*Euler*).

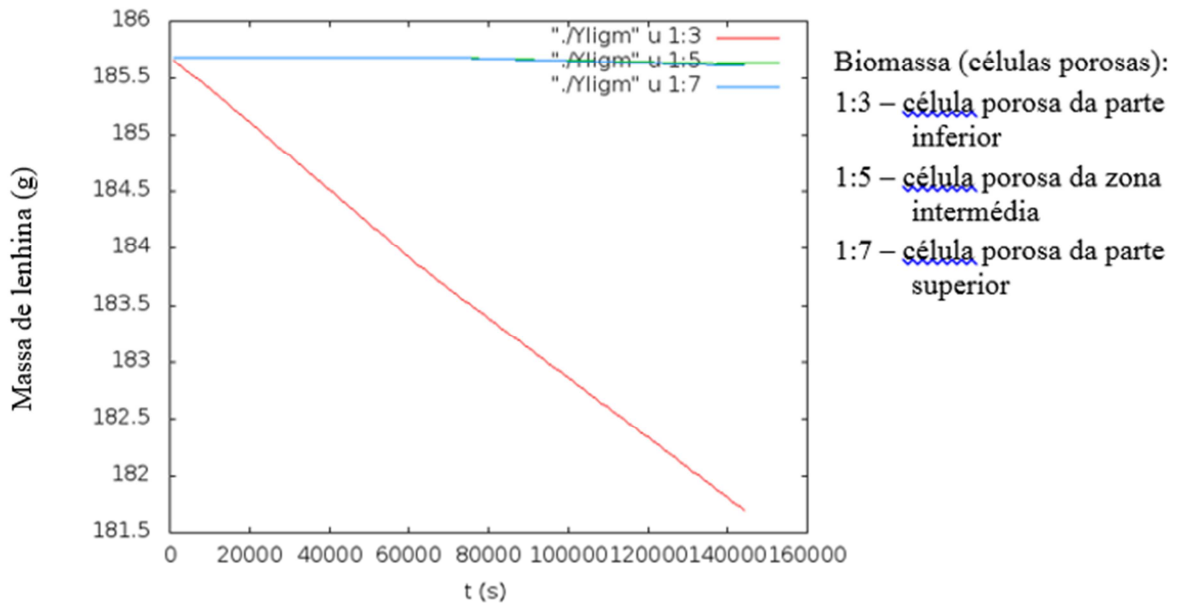


Figura 67 – Variação da quantidade de lenhina com o uso de ignição (*Euler*).

As Figuras 68 a 70 mostram a temperatura e velocidade do gás na câmara de combustão para três tempos diferentes (8000s, 25000s, 120000s), onde as linhas de corrente se referem à velocidade do gás. Estas figuras elucidam como a temperatura e velocidade variam ao longo da câmara de combustão e evoluem ao longo do tempo.

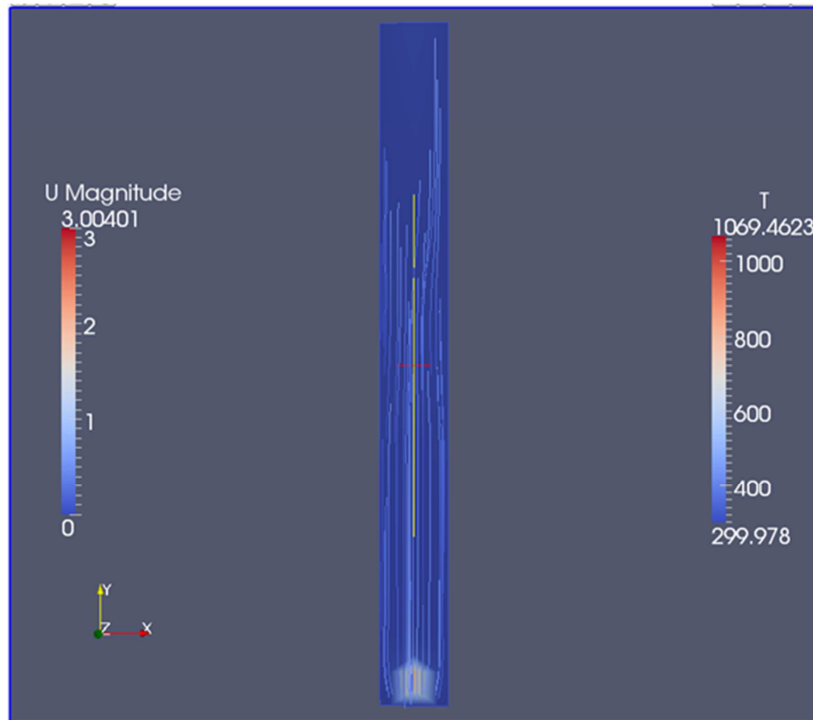


Figura 68 – Velocidade e temperatura do gás para $t = 8000$ s.

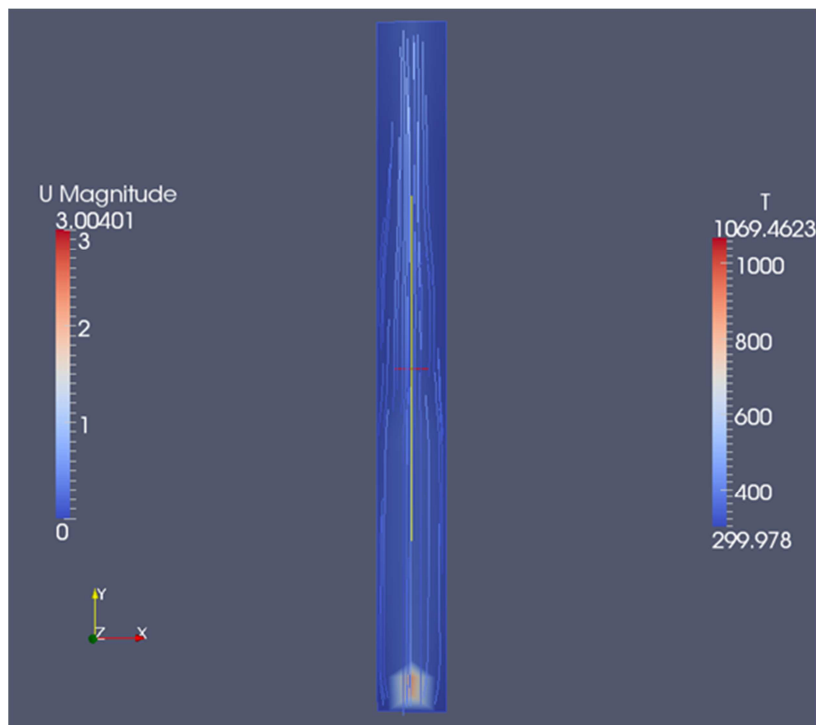


Figura 69 – Velocidade e temperatura do gás para $t = 25000$ s.

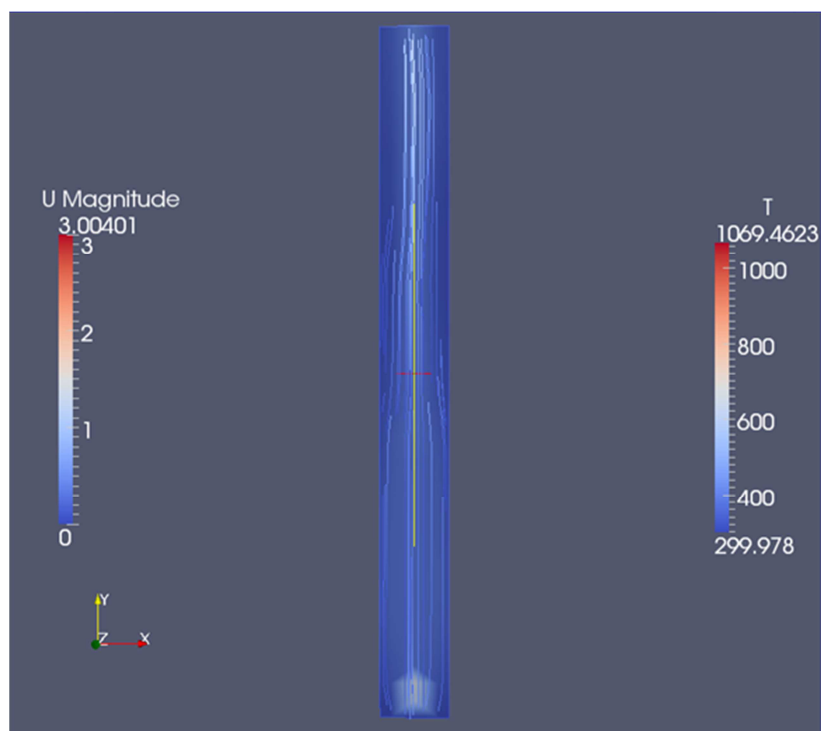


Figura 70 – Velocidade e temperatura do gás para $t = 120000$ s.

4.3.4 Efeito da porosidade

Um dos estudos que fizemos foi o efeito da porosidade na velocidade do gás, principalmente através do leito poroso, para tentar analisar o seu efeito na combustão, pois podia ser que o ar que atravessa o leito fixo não fosse suficiente para manter ativa a degradação térmica da biomassa. As Figuras 71, 72 e 73 mostram os resultados da simulação para três porosidades diferentes, nomeadamente, (0.9), (0.75) e (0.54), em dois tempos diferentes respetivamente. Como se pode ver, a velocidade aumenta com o aumento da porosidade, mas este aumento não é significativo, e não alterou as conclusões anteriores.

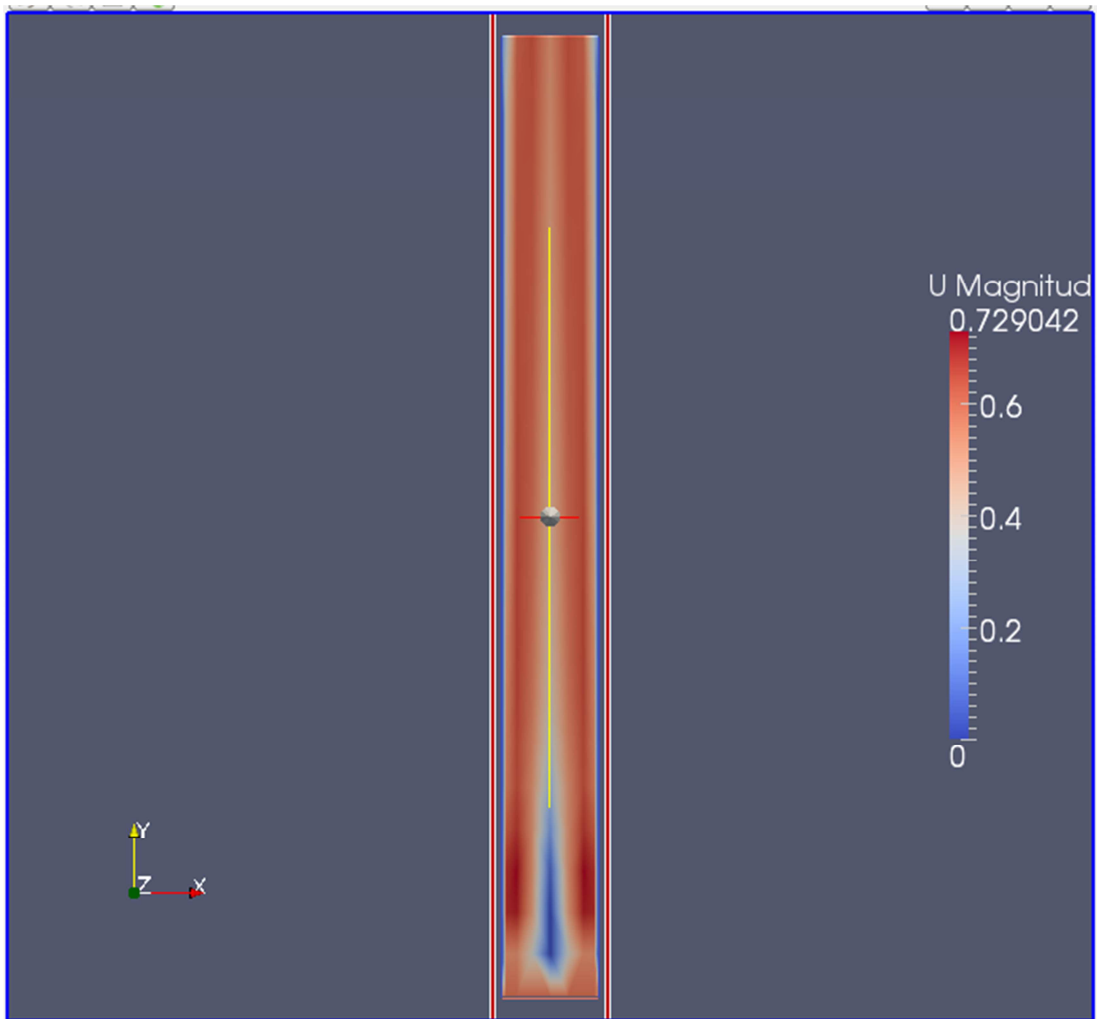


Figura 71 – Velocidade do gás para uma porosidade da biomassa de (0.9) para 200s.

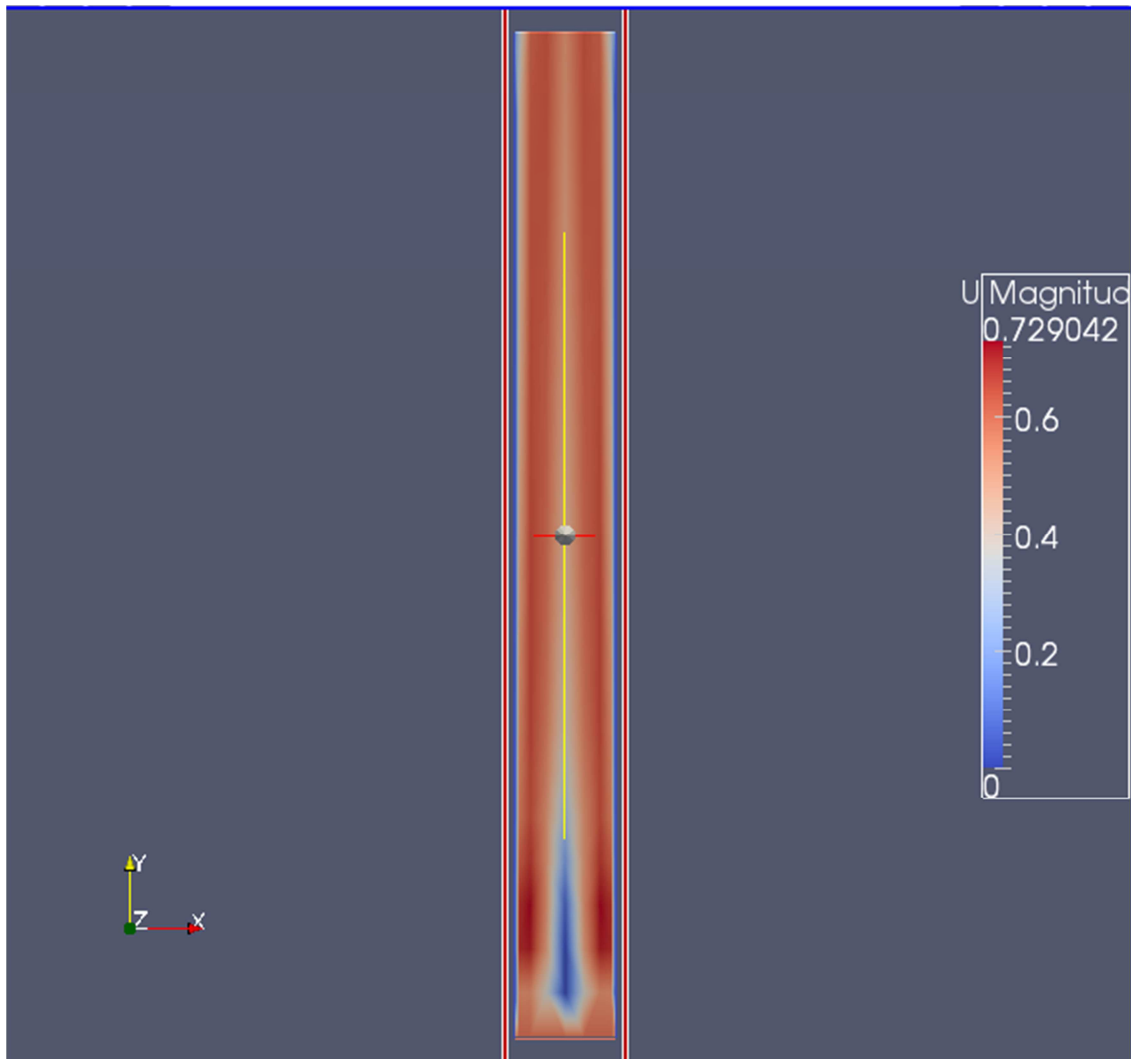


Figura 72 – Velocidade do gás para uma porosidade da biomassa de (0.9) para 1060s.

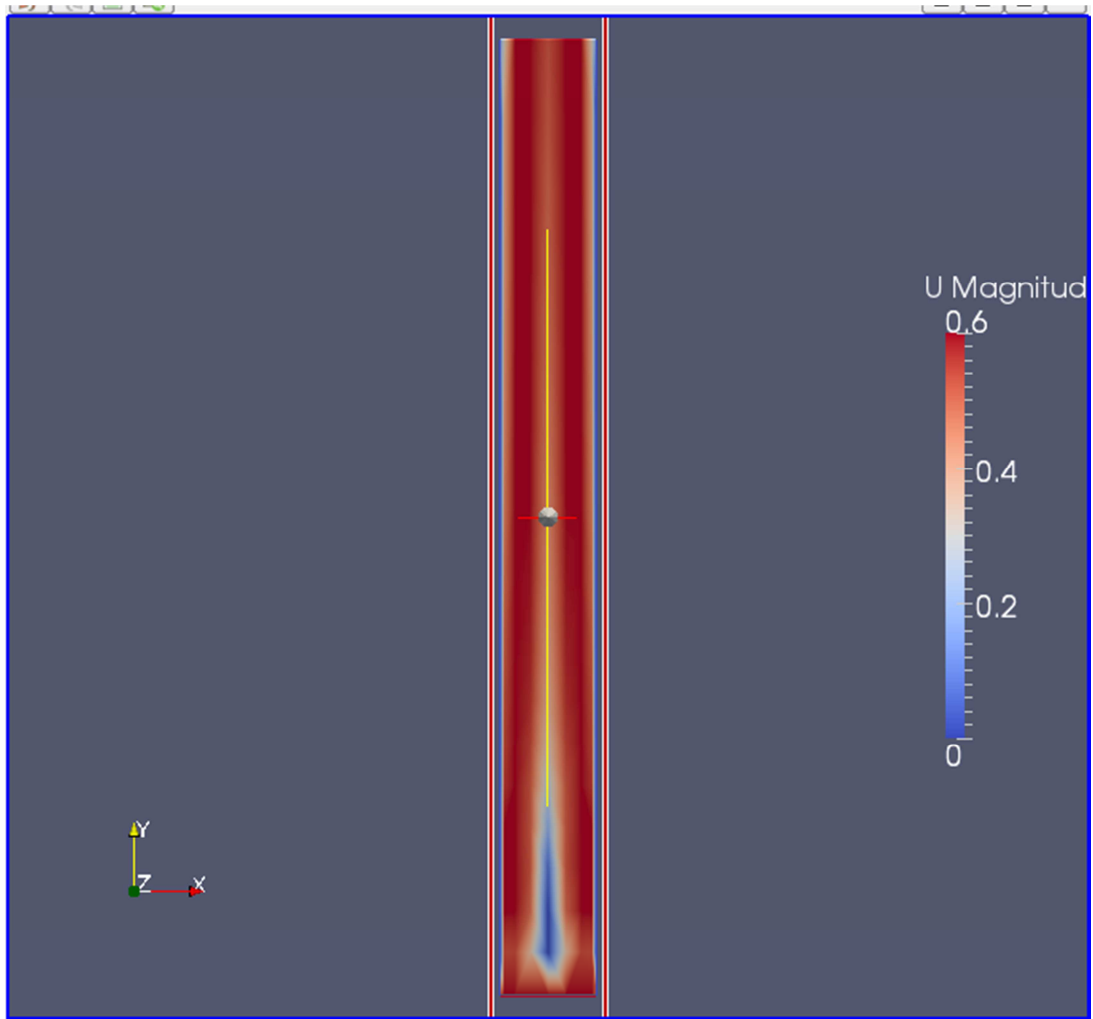


Figura 73 – Velocidade do gás para uma porosidade da biomassa de (0.75) para 200s.

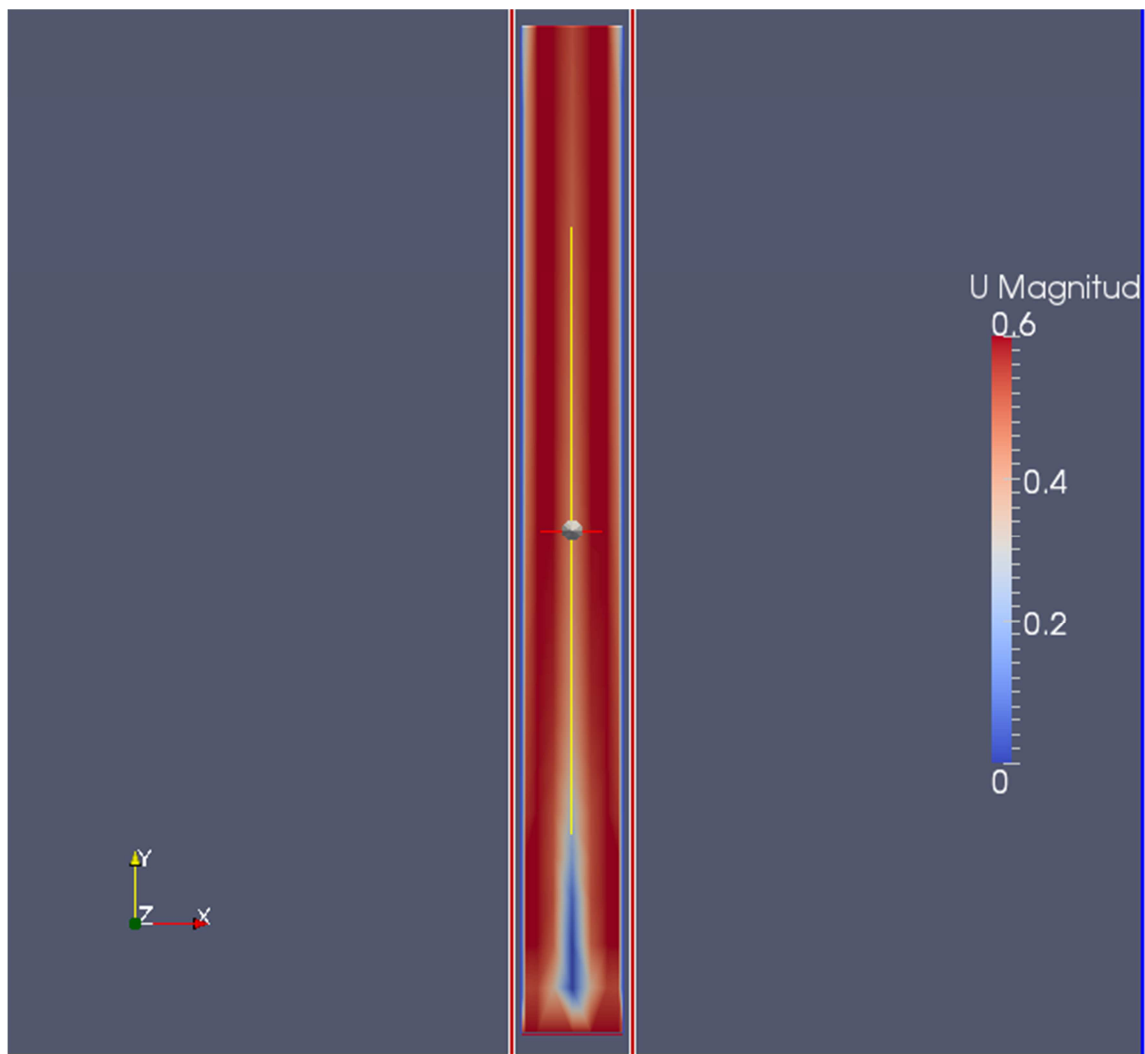


Figura 74 – Velocidade do gás para uma porosidade da biomassa de (0.75) para 1060s.

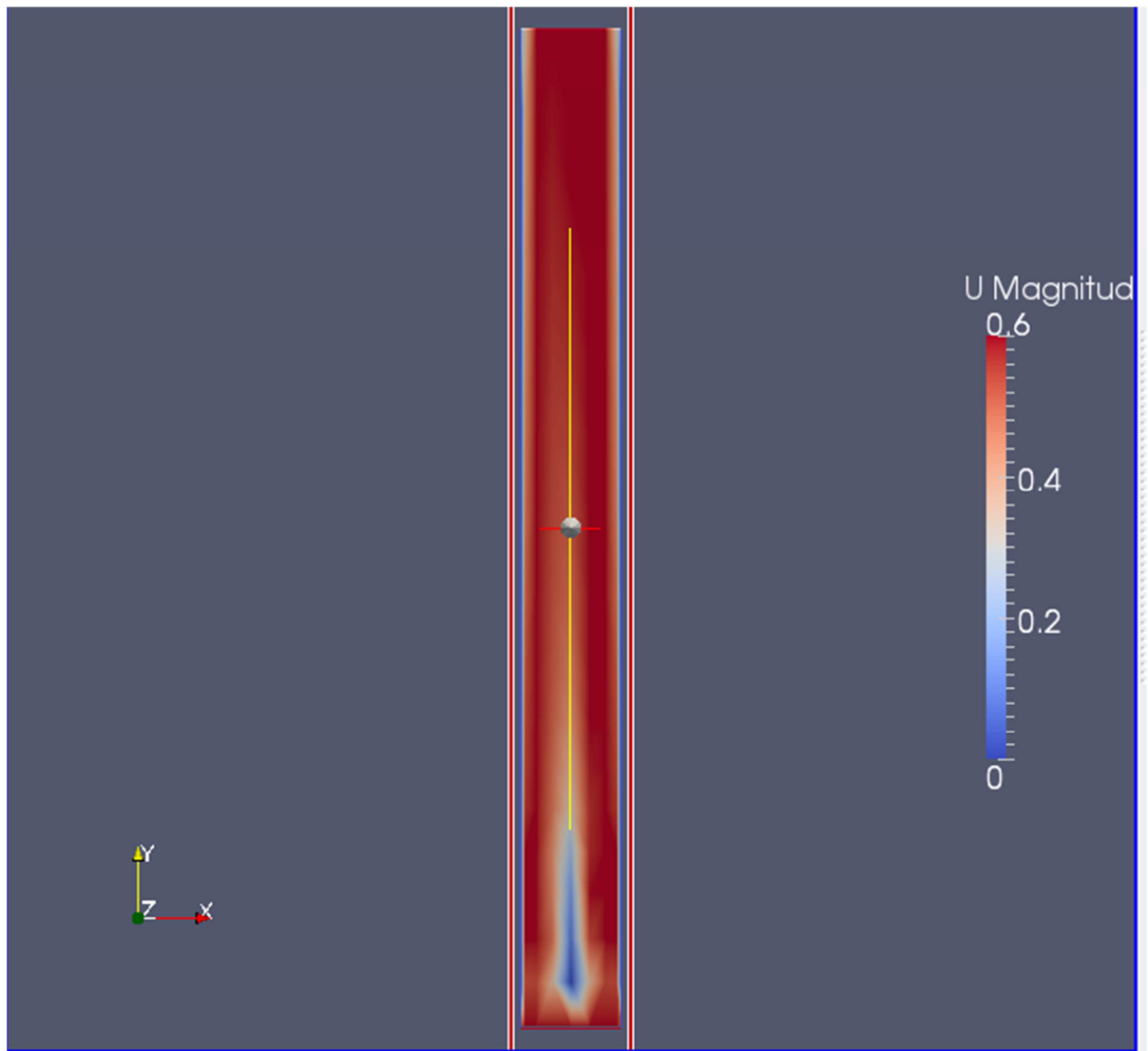


Figura 75 – Velocidade do gás para uma porosidade da biomassa de (0.54) para 200s.

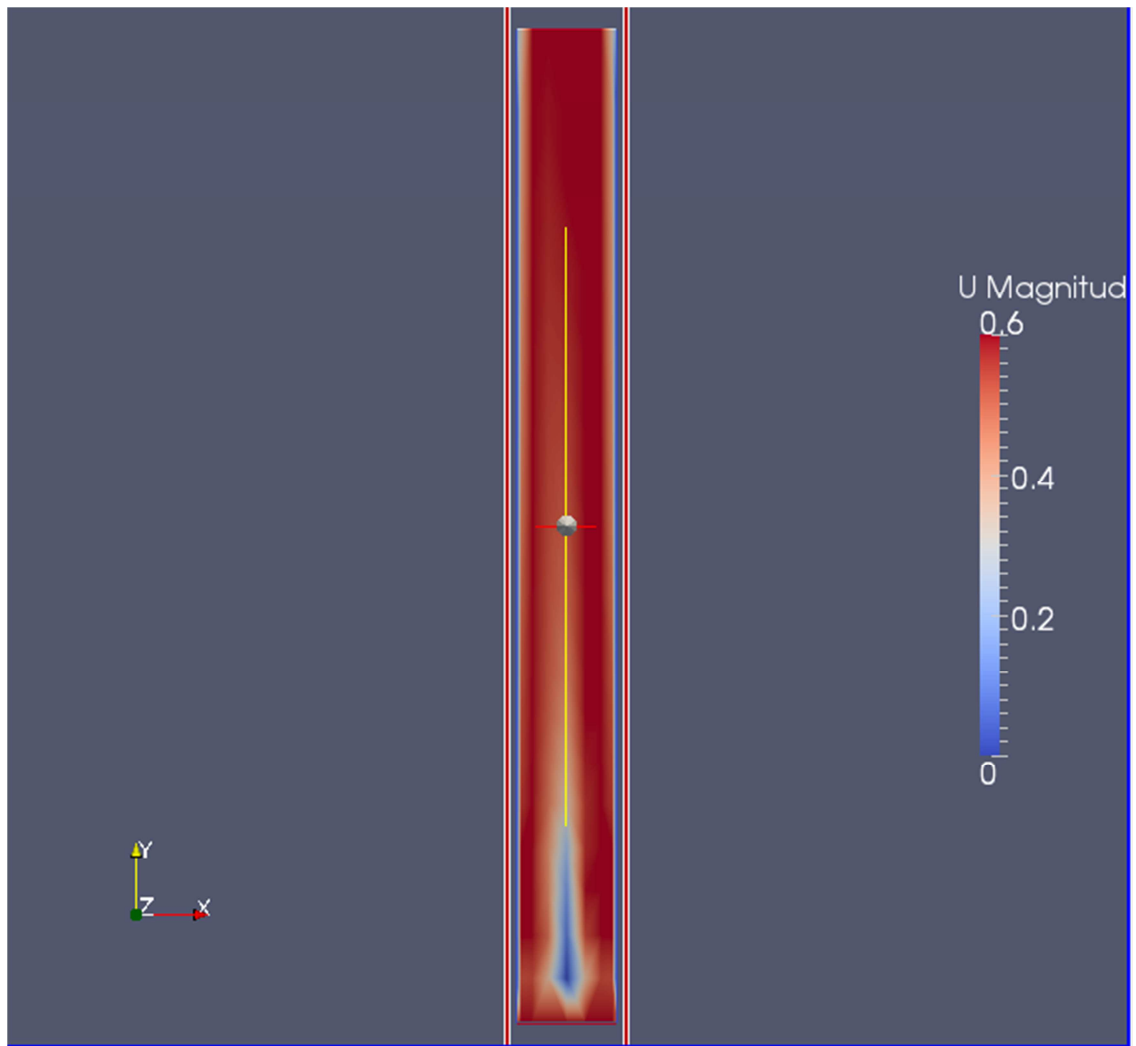


Figura 76 – Velocidade do gás para uma porosidade da biomassa de (0.54) para 1060s.

5. Conclusões e Trabalho Futuro

As reservas limitadas dos combustíveis fósseis, que fazem antever um aumento crescente e significativo do seu preço num futuro mais ou menos próximo, e os problemas ambientais associados à sua utilização, tem levado os governos, os centros de investigação, e as empresas, em geral, a procurarem fontes de energia alternativas que sejam sustentáveis. Neste contexto, surge o presente trabalho que pretende desenvolver um modelo de simulação que permita estudar e otimizar o projeto e operação de caldeiras a biomassa, assim como avaliar as inovações tecnológicas nesta área que surjam no mercado.

Este é um tema premente e relevante para Portugal, que possui um elevado potencial de produção de biomassa, sendo superior a 1000 toneladas/ano a capacidade de produção de *pellets* atualmente instalada. Contudo, muita desta produção destina-se à exportação, por que o mercado nacional de caldeiras a biomassa ainda não é significativo, devido, entre outros fatores, ao elevado custo de aquisição deste tipo de equipamento, que tem igualmente um outro custo associado, que é o de armazenamento do biocombustível sólido.

Para atingir o nosso objetivo, e porque não há nenhuma ferramenta computacional de acesso livre que permita fazer a simulação de uma caldeira de leito fixo para combustão de um sólido poroso, com é o caso da biomassa, optamos por testar o código *BiomassGasificationFoam*, recentemente disponibilizado, que trabalhava com o *OpenFOAM*, e que foi desenvolvido para descrever o processo de gasificação de biomassa em meio inerte durante a análise termogravimétrica deste tipo de matéria-prima, em que o calor necessário à decomposição da biomassa é fornecido através das paredes do reator.

Este código foi adaptado ao nosso estudo através da incorporação da possibilidade de ocorrerem reações de combustão em fase gasosa, dos gases libertados durante a pirólise da biomassa, e de um mecanismo de ignição da biomassa. Para as reações de combustão em fase gasosa recorreu-se ao *solver reactingFoam*, e para a ignição adaptou-se ao nosso caso o código de ignição existente no *XiFoam*.

A utilização do esquema de ignição da biomassa não se revelou adequado, pois verificou-se que a combustão parava sempre que a ignição era inativada, independentemente do tempo que ela estivesse ativa e da força da ignição. Como alternativa, usaram-se outros dois esquemas para iniciar a combustão, que consistiram no uso de uma corrente de ar quente e de uma resistência. Estes esquemas revelaram-se igualmente inadequados para obter a autossustentabilidade do processo de combustão.

A análise dos resultados obtidos permitiu concluir que a extensão das reações de pirólise e gasificação, que são ambas endotérmicas, é muito pequena, senão mesmo nula, pelo que a quantidade gases libertados é igualmente muito pequena, não sendo, por isso, suficiente para libertar a energia necessária à combustão completa da biomassa que permitisse a autossustentabilidade do processo de combustão.

Para tentar ultrapassar esta dificuldade foram testadas várias alternativas, como, por exemplo, a variação da porosidade do leito fixo de biomassa, de modo a aumentar a quantidade de ar em contacto direto com a fase sólida e assim aumentar a velocidade de reação. Mas, mais uma vez esta tentativa foi infrutífera.

Este estudo permitiu concluir que o *solver BiomassGasificationFoam* não se revelou adequado para descrever o processo de combustão da biomassa, o que em parte se pode justificar pelo facto deste *solver* ter sido desenvolvido para descrever o processo de gasificação de biomassa em meio inerte, e em que a biomassa é aquecida através de calor fornecido pelas paredes do reator, não sendo por isso adequado à descrição do processo de combustão da biomassa, em que a combustão deve ser autossustentável, e em que as reações de combustão em fase gasosa são importantes, sendo o calor fornecido pela combustão dos gases libertados pela pirólise e gasificação da biomassa, e não através das paredes do recipiente que contém a biomassa.

Embora possa parecer que o problema reside nas cinéticas das reações em fase gasosa e em fase sólida, pois a extensão das reações é desprezável, tal não nos parece ser o caso, pois

testamos diferentes cinéticas, tendo mesmo usado parâmetros cinéticos irrealistas, mas que fossem de encontro ao que pretendíamos, e, contudo, estas modificações nunca permitiram ultrapassar o nosso problema. Variamos também os coeficientes de transferência de calor e a velocidade do ar, para além de variar a geometria da caldeira e o tipo de malha, e mais uma vez os resultados não foram animadores. O nosso “sentimento” é que o problema está ao nível do modelo matemático, em particular ao nível da descrição do processo de transferência de calor, pois independentemente da energia que as células da malha tinham, em particular aquelas em que havia ignição, verificou-se que essa energia não se transmitia às células vizinhas, pelo menos, não do modo esperado. Por isso, e como indicação para trabalho futuro, indicariamos a necessidade de rever o modelo matemático e o modo como ele está implementado, o que requer a análise do código e conhecimentos de programação em C++.

Referências Documentais

- [1] ALAKANGAS, E.—*The European Standard EN 14961 for Wood Chips and Hog Fuel*.
<file:///C:/Users/dbarbosa/Downloads/Wood%20chip%20size%20VTT%20Finland.pdf>
- [2] ALAKANGAS, E.; SAURANEN, T.; VESISENAHU, T.—*Production Techniques of Logging Residue Chips in Finland*. Training Manual, VTT Energy ENE39/T0039/99, 1999.
- [3] ANPEB—*Relatório: Indústria e Mercado dos Pellets em Portugal*.
<http://www.anpeb.pt/#!/relatorio-mercado-2012/c191s>
- [4] BARBOSA, M.T.C.—*Análise da Utilização de Biomassa e Resíduos Florestais para a Produção de Pellets*. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2008.
- [5] BASU, P.—*Biomass Gasification and Pyrolysis – Practical Design*. Academic Press - Elsevier, Burlington, 2010.
- [6] BLASI, C.D. —*Modeling Chemical and Physical Processes of Wood and Biomass Pyrolysis*. Progress in Energy and Combustion Science, 34, 47-90, 2008.
- [7] BLASI, D.C.; BRANCA, C.; SPARANO, S.; MANTIA, L.B. —*Drying Characteristics of Wood Cylinders for Conditions Pertinent to Fixed-Bed Countercurrent Gasification*. Biomass & Bioenergy, 25(1), 45-58, 2003.
- [8] CHAN, W.C.R.; KELBON, M.; KRIEGER, B.B.—*Modeling and Experimental Verification of Physical and Chemical Processes During Pyrolysis of a Large Biomass Particle*. Fuel, 64(11), 1505-1513, 1985.
- [9] CHEMKIN—*A Software Package for the Analysis of Gas Phase Chemical and Plasma Kinetics*. Reaction Design, 2000.
- [10] CLIMA INSTALADOR.NTE—*Caldeiras de Condensação*
<http://climainstalador.net/caldeiras-condensacao/>
- [11] DEVON OIL & GAS—*Condensing Boilers*
<http://devonoilandgas.co.uk/gas>
- [12] DIAS, J.; COSTA, M.; AZEVEDO, J.L.T.—*Test of a Small Domestic Boiler Using Different Pellets*. Biomass and Bioenergy, 27, 531-539, 2004.
- [13] DISTERM—*Caldeiras a Biomass*
<http://www.disterm.pt/portal/index.php?id=2067&layout=catalogo>
- [14] DUFFY, N.—*Investigation of Biomass Combustion in Grate Furnaces Using CFD*. Ph.D. Thesis in Mechanical and Biomedical Engineering, National University of Ireland, Galway, 2012.

- [15] DUFOUR, A.; OUARTASSI, B.; BOUNACEUR, R.; ZOULALIAN, A. — *Modelling Intra-Particle Phenomena of Biomass Pyrolysis*. Chemical Engineering Research and Design, 89, 2136-2146, 2011.
- [16] ECOAMA—*Soluções a Pellets*
<http://www.ecoama.pt/index.html>
- [17] ECOFOREST—*Estufas, Caldeiras, Pellets, Geotermia*
<http://ecoforest.es/portugues/productos/pellets/calderas-pellets.php?cur=3140>
- [18] ENERGIA.PT—*Soluções Energéticas-Renováveis*
<http://www.energia.pt/renovaveis>
- [19] ENERSTENA—*Condensing Economizers for Biomass Boilers*
<http://www.enerstena.lt/en/products/condensing-economizers-for-biomass-boilers.htm>
- [20] ENREPO—*Salamandras a Pellets*
<http://www.enrepo.pt/>
- [21] EUROPEAN COMMISSION (EC)—*Establishing Guidelines for the Monitoring and Reporting of Greenhouse Gas Emissions Pursuant to Directive 2003/87/EC of European Parliament and of the Council*. Commission Decision 29/01/2004.
- [22] FM GLOBAL.—*FireFOAM*
<http://www.fmglobal.com/page.aspx?id=04010400>
- [23] FOREST—*A Guide to Biomass Heating Standards*
http://www.forestprogramme.com/files/2011/05/FOREST-Standard-Guide_V04_UK.pdf.
- [24] FREEFOAM—*The Cross-Platform CFD Tool Kit*
http://freefoam.sourceforge.net/doc/API/coalChemistryFoam_8C.html
- [25] GEIßLHOFER, A.; HAHN, B.; HARTMANN, H.; HUBER, R.; JAUSCHNEGG, H.; KESSLER, D.; MALISIUS, U.; NILSSON, B.; RAPP, S.; SCHIMDL, H.; STEHLER, A.; WHITFIELD, J.—*Wood Pellets in Europe – State of the Art, Technologies, Activities, Markets*. UMBERA GmbH, St Polten, 2000.
- [26] GEMCO ENERGY—*Advantages of Biomass Pellets*,
<http://www.gemcopelletmill.com/biomass-pellet-mill.html>
- [27] GOV.UK—*Condensing Biomass Boilers Quality for Domestic RHI*
<https://www.gov.uk/government/news/condensing-biomass-boilers-qualify-for-domestic-rhi>
- [28] GRANT—*Condensing Wood Pellet Boilers*
<http://www.grantuk.com/products/wood-pellet-condensing-boilers/>
- [29] HANSEN, M.T.; JEIN, A.R.; HAYES, S.; BATEMAN, P.—*English Handbook for Wood Pellet Combustion*.
http://www.pelletsatlas.info/pelletsatlas_docs/showdoc.asp?id=090313124119&pdf=true

- [30] HEBENSTREIT, B.; SCHNETZINGER, R.; OHNMACHT, R.; HOFTBERGER, E.; HASLINGER, W. —*Efficiency Optimization of Biomass Boilers by a Combined Condensation-Heat Pump System*. in: Proceedings of ECOS 2011, Serbia, 2011.
- [31] HEDENUS, F.; AZAR, C., JOHANSSON, D.J.A.—*Energy Security Policies in EU-25 – The Expected Cost of Oil Supply Disruptions*. Energy Policy, 38, 1241-1250, 2010.
- [32] HEINIMO, J.; JUNGINGERB, M.—*Production and Trading of Biomass for Energy – An Overview of the Global Status*. Biomass and Bioenergy, 33, 1310-1320, 2009.
- [33] HERRERO, J.—*Industrial Wood Pellets, Co-Firing with Coal Takes de Market into Boom Mode*.
<http://jherrerodc.typepad.com/jhsdc/2012/06/industrial-wood-pellets-co-firing-with-coal-takes-the-market-into-boom-mode.html>
- [34] HETAS—*Condensing Biomass Boilers*
<http://www.hetas.co.uk/condensing-biomass-boilers-qualify-domestic-rhi/>
- [35] HKS LAZAR—*Heating Systems*
<http://www.hkslazar.com/>
- [36] INTERIOR EÓLICO—*Situação em Portugal*.
<http://interioreolico.wordpress.com/a-energia-eolica/situacao-em-portugal/>
- [37] KARWANDY, J.—*Pellet Production from Sawmill Residue: A Saskatchewan Perspective*. Forintek Canada Corp. Report n° 2006-29, 2007.
- [38] KHADRA, K.; ANGOT, P.; PARNEIX, S.; CALTAGIRONE, J.P. —*Fictitious Domain Approach for Numerical Modelling of Navier-Stokes Equations*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 34, 651-684, 2000.
- [39] KITCHEN DESIGN GUIDE—*Wood Burning Pellet Stove*.
<http://design.kitchensatlanta.com/2010/01/wood-burning-pellet-stove-mcz-cast-iron-pellet-stoves/>
- [40] KUMAR, A.; CAMERON, J.B.; FLYNN, P.C.—*Biomass Power Cost and Optimum Plant Size in Western Canada*. Biomass and Bioenergy, 24, 445-464, 2003.
- [41] KROPLIN, P.—*The Importance of Small Biomass Stoves for Future Energy Supply from the Point of View of the Builders of Tile Stoves*. Proceedings of the 10th European Conference and Technology Exhibition. Elsevier Applied Science, Amsterdam, 67-69, 1998.
- [42] KWIATKOWSKI, K.; KOROTKO, J.; GRYGLAS, W.; DUDYŃDSKI, M.; BAJER, K. —*Differences in Numerical Modelling of Pyrolysis of Thin and Thick Biomass Particle*. in: 19th International Symposium on Analytical and Applied Pyrolysis, Book of Abstracts, 2012.
- [43] KWIATKOWSKI, K.; ZUK, P.J.; BAJER, K.; DUDYŃSKI, M.—*Biomass Gasification Solver Based on OpenFOAM*. Computer Physics Communications (preprint under review), 2013.

- [44] LA NORDICA EXTRAFLAME – M.L-E- Portugal—*Salamandras, Caldeiras e Recuperadores de calor a Pellets*
<http://lanordica-extraflame.mle-ar.com/>
- [45] LUNDSTROM, A.—*OpenFOAM Tutorial-ReactingFoam*. Chalmers University of Technology, Suécia, 2008.
- [46] MARQUES, F.—*Grupo de Trabalho da Biomassa*. Relatório da Comissão de Agricultura e Mar, Assembleia da República, 2013.
- [47] MICROGREENING—*Condensing Boilers*
<http://micro-green.co.uk/insulating-heating-and-cooling/condensing-boilers.php>
- [48] MÍGUEZ, J.L.; MORÁN, J.C.; GRANADA, E.; PORTEIRO, J.—*Review of Technology in Small-Scale Biomass Combustion Systems in the European Market*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 3867-3875, 2012.
- [49] MIRANDA, P.E.V.—*Combustíveis – Materiais Essenciais para Prover Energia à Nossa Sociedade*. Revista Matéria, 18(03), editorial, 2013.
- [50] MITTAL, R.; IACCARINO, G. —*Immersed Boundary Methods*. Annu. Rev. Fluid Mech., 37, 239-261, 2005.
- [51] MONTEIRO, E.; MANTHA, V.; ROUBOA, A.—*Portuguese Pellets Market: Analysis of the Production and Utilization Constrains*. Energy Policy, 42, 129-135, 2012.
- [52] NORBERT, N.V.—*Agri-Pellets – Perspectives of Pellets from Agricultural Residue*.
<http://www.pelletcentre.info/resources/1012.pdf>
- [53] OBERNBERGER, I.; THEK, G.—*The Pellet Handbook – The Production and Thermal Utilisation of Biomass Pellets*. Earthscan, London, 2010.
- [54] OPENFOAM—*User Guide*. OpenFOAM Foundation, 2011-2013.
- [55] OUTLINE OF EUROPEAN STANDARD EN 303—*Part 5:Heating Boilers for Solid Fuels*
<http://www.vtwoodsmoke.org/pdf/OutlineEN303-5.pdf>
- [56] PAUL O'BRIEN—*Solar Solutions*
<http://www.pobsolar.co.uk/commercial/biomass-boilers.html>
- [57] PELLETS TRADER—*Biomass Trade – Europe*.
http://www.pelletstrader.eu/?page_id=36
- [58] PEREIRA, E.G.; SILVA, J.N.; OLIVEIRA, J.L; MACHADO, C.S. —*Sustainable Energy: A Review of Gasification Technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 4753-4762, 2012.
- [59] PINHEIRO, G.F.; RENDEIRO, G.; PINHO, J.T.—*Densidade Energética de Resíduos Vegetais*. Biomassa & Energia, 2(2), 113-123, 2005.
- [60] PORTEIRO, J.; PATIÑO, D.; COLLAZO, J.; GRANADA, E.; MORAN, J.; MIGUEZ, J.L.—*Experimental Analysis of the Ignition Front Propagation of Several Biomass Fuels in a Fixed-Bed Combustor*. Fuel, 89, 26-35, 2010.

- [61] PR_EN 14785—*Residential Space Heating Appliances Fired by Wood Pellets*- European Committee for Standardization, September, 2003.
- [62] RED 365 ENERGY—*Biomass Systems*
<http://www.red365.it/en/>
- [63] SIKKEMA, R.; STEINER, M.; JUNGINGER, M.; HIEGL, W.; HANSEN, M.T.; FAAIJ, A.—*The European Wood Pellet Markets: Current Status and Prospects for 2020*. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(3), 250-278, 2011.
- [64] SOLAR EARTH—*Caldeiras a Pellets*
<http://www.solarearth.pt/seccao/CALDEIRAS-A-PELLETS/18>
- [65] SOLIUS—*Biomassa Gama Completa de Equipamentos a Pellets*
<http://www.solius.pt/>
- [66] SOUSA, P.L.N.—*Desenvolvimento Tecnológico do Aproveitamento Energético da Biomassa a Nível Industrial*. Tese de Mestrado em Engenharia Química, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 2009.
- [67] SOPRO RADIANTE—*Caldeiras a Pellets*
<http://www.soproradiante.pt/produtos/caldeiras-a-pellets.aspx>
- [68] TEEUWISSE, S.—*Co-Firing Biomass in the Europe at Power Station in Ireland: An Assessment of Pure Energy Crops versus Multi-Product Plantations and Sawmills Residues*. Department of Science, Technology and Society, Utrecht University, Utrecht (n° 99014), 1999.
- [69] THE OPENFOAM FOUNDATION
<http://www.openfoam.org/>
- [70] THEK, G.; OBERNBERGER, I.—*Wood Pellet Production Costs Under Austrian and in Comparison to Swedish Framework Conditions*. *Biomass and Bioenergy*, 27, 671-693, 2004.
- [71] THERMO WATT—*Produtos e caldeiras DOMUSA*
http://www.thermowatt.pt/produtos_domusa_caldeiras_solar_termoacumuladores.htm
- [72] THERMOWATT—*Thermowatt Sistemas Técnicos*.
http://www.thermowatt.pt/linked/qual_o_melhor_sistema_de_aquecimento_central_para_a_minha_casa.pdf
- [73] TRECO—*Powerchip: 20-100 kW Biomass Boilers*.
<http://www.treco.co.uk/products/boiler/powerchip>
- [74] TROIA—*Caldeiras a Pellets*
<http://www.relopa.pt/pt/catalogo/go/climatizacao-aquecimento-caldeiras-pellet>
- [75] TROIA—*Recuperadores a Lenha para Aquecimento*
<http://www.relopa.pt/pt/catalogo/go/climatizacao-aquecimento-recuperadores-e-fogao-a-lenha>

- [76] VAN LOO, S.; KOPPEJAN, J.—*The Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing*. Earthscan, London, 2008.
- [77] VIESSMANN—*Caldeira a Pellets Vitoligno 300–P*.
http://www.viessmann.pt/pt/habitacoes_unifamiliares_geminadas/produtos/biomassa/vitoligno300.html
- [78] VIESSMANN—*Climate of Innovation*
http://www.viessmann.pt/pt/sobre_a_viessmann/novidades/nova-vitoligno-100-s.html
- [79] VIMASOL—*Equipamentos a Biomassa*
<http://www.vimasol.pt/s/95>
- [80] VIMASOL PELLETS—*Simulador*.
<http://pellets.vimasol.pt/s/72>
- [81] VIVARELLI, F.—*Pellet Markets: Analysis, Projections and Policy Recommendations*. ETA-Florence Renewable Energies Report, Italy, 2009.
- [82] WEEDHOF, M.W.—*Modeling the Pyrolysis of Biomass Particles*. Master's Thesis, Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Netherlands, 2010.
- [83] WELLER, H.G.; TABOR, G.; JASAK, H.; FUREBY, C.—*A Tensorial. Approach to Computational Continuum Mechanics Using Object-Oriented Techniques*. Computers in Physics, 12(6), 620-631, 1998.
- [84] YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D.H.; ZHENG, C.—*Characteristics of Hemicellulose, Cellulose and Lignin Pyrolysis*. Fuel, 86, 1781-1788, 2007.
- [85] XIFOAM.C—*File Reference*
http://freefoam.sourceforge.net/doc/API/XiFoam_8C.html
- [86] ZANTIA—*Energias Renováveis*
<http://www.zantia.com/products/overview.php>

Anexo A. Ficheiros de Dados

Neste anexo dá-se uma visão global dos vários ficheiros que contêm a informação necessária para realizar a simulação (isto é, o pré-processamento).

Existem essencialmente cinco pastas: “0”, “chemkin”, “constant”, “probes” e “system”. Na pasta “0” estão os ficheiros de introdução de dados (*input*), nomeadamente:

Df – ficheiro em que se introduz o tensor correspondente ao valor inicial da resistência viscosa, **K** (equação (14)), que irá permitir calcular a resistência nos poros do material sólido. Para todas as condições fronteiras é usada a opção *calculada (calculated)* para permitir o cálculo desta resistência ao longo da simulação. Para o campo interno introduz-se um valor fixo que corresponderá à resistência inicial nos poros.

G – ficheiro relacionado com o fluxo de energia por radiação, em que se usa como condição fronteira a *MarshakRadiation* com emissividade igual a 1 para a entrada (*inlet*), paredes (*wall*) e saída (*outlet*).

N2 – ficheiro com o valor inicial da fração mássica de nitrogénio na caldeira e na corrente de ar alimentada. Como condições fronteira usa-se o *valor fixo (fixedValue)* para a entrada e paredes, e *gradiente nulo (zeroGradient)* para a saída.

O2 - ficheiro com o valor inicial da fração mássica de oxigénio na caldeira e na corrente de ar alimentada. Como condições fronteira usa-se o *valor fixo* para a entrada e paredes, e *gradiente nulo* para a saída.

p – ficheiro com o valor da pressão manométrica na caldeira e à saída. Como condições fronteira usa-se *gradiente nulo* para a entrada e paredes, o que irá permitir o seu cálculo durante a simulação, e *valor fixo* à saída.

p_amb – ficheiro com o valor da pressão manométrica ambiente. Como condições fronteira usa-se *gradiente nulo* para a entrada e paredes, e *valor fixo* à saída.

porosityF – ficheiro que define o campo de porosidade (γ). O valor introduzido é $(1 - \gamma)$, pelo que o valor será zero para as células na fase gasosa e diferente de zero para as células na fase sólida.

porosityF0 – ficheiro que inicializa o campo de porosidade, em que se introduz o valor de $(1 - \gamma)$ como sendo igual a zero, ou seja, o campo de porosidade é inicializado considerando que existe apenas fase gasosa. As condições fronteiras são todas *valor fixo*.

T – ficheiro com a temperatura, em kelvin, do gás à entrada e no campo interno. Como condições fronteira usa-se *valor fixo uniforme* à entrada, e *gradiente nulo* à saída e nas paredes.

Ts – ficheiro com a temperatura inicial, em kelvin, do sólido. As condições fronteira usadas são todas *gradiente nulo*.

U – ficheiro com a velocidade do gás à entrada em metros por segundo (m/s). Como condições fronteira usa-se *gradiente nulo* à saída, o que irá permitir o seu cálculo durante a simulação, e *valor fixo* à entrada e nas paredes.

Yash – ficheiro com a fração mássica inicial de cinza. Como condições fronteira usa-se *gradiente nulo* à saída, e *valor fixo* à entrada e nas paredes.

Ycel - ficheiro com a fração mássica inicial de celulose na biomassa. Como condições fronteira usa-se *gradiente nulo* à saída, e *valor fixo* à entrada e nas paredes.

Ychar - ficheiro com a fração mássica inicial de carvão (material carbonado/carbono fixo). Como condições fronteira usa-se *gradiente nulo* à saída, e *valor fixo* à entrada e nas paredes.

Yhem - ficheiro com a fração mássica inicial de hemicelulose na biomassa. Como condições fronteira usa-se *gradiente nulo* à saída, e *valor fixo* à entrada e nas paredes.

Ylig - ficheiro com a fração mássica inicial de leninha na biomassa. Como condições fronteira usa-se *gradiente nulo* à saída, e *valor fixo* à entrada e nas paredes.

Yhum - ficheiro com a fração mássica inicial de humidade na biomassa. Como condições fronteira usa-se *gradiente nulo* à saída, e *valor fixo* à entrada e nas paredes.

Ydefault e **Y0default** – ficheiros de inicializam os valores das frações mássicas e massas dos componentes sólidos como sendo iguais a zero.

Esta pasta contém igualmente os ficheiros em *Fortran*, e as correspondentes versões executáveis, que foram desenvolvidos para a criação do campo poroso (*poro.dat*, *poro.f90* e o executável, *poro*) e para definir a variação da temperatura ao longo do tempo, se necessário (*a.out*).

Na pasta *chemkin* existem dois ficheiros: *chem.inp.none* e *therm.dat*.

chem.inp.none – ficheiro que identifica os elementos e as espécies químicas presentes na fase gasosa, e que está associado ao *reactingFoam*.

therm.dat – ficheiro com as constantes para o cálculo da entalpia, capacidade calorífica e entropia das diferentes espécies gasosas, para duas gamas de temperatura, de 200 a 1000 K e de 1000 a 5 000 K. Estas constantes são as que vão ser usadas para calcular o calor de reação a partir dos entalpias de formação das espécies que participam nessa reação. O significado dos diferentes valores e as equações usadas para o cálculo daquelas propriedades pode ser encontrado em [9,45].

A pasta *constant* contém a pasta *polyMesh*, onde se encontra o ficheiro *blockMeshDict*, que contém a informação relativa à criação da malha definindo os vértices, condições fronteiras, número de células e o número de blocos para o corpo em estudo. Esta pasta contém igualmente outros ficheiros relacionados com a malha que foi definida, nomeadamente, os ficheiros: *boundary*, *faces*, *points*, *owner* e *neighbour*

Para além da pasta *polyMesh*, na pasta *constant* existem outros ficheiros que contêm informação relativa a propriedades físico-químicas, regime de fluxo, entre outras. No nosso estudo foram usados os seguintes ficheiros:

chemistryProperties – neste ficheiro são definidos os modelos para os cálculos cinéticos das reações em fase gasosa e em fase sólida, assim como os parâmetros cinéticos (fator pré-exponencial de Arrhenius, energia/temperatura de ativação), propriedades físicas das espécies gasosas (massa molar, coeficientes para o cálculo das capacidades caloríficas e entalpias, e gamas de temperatura), e parâmetros para o cálculo das propriedades de transporte (A_s e T_s)

combustionProperties – ficheiro para as definições da ignição, necessárias para utilização do programa que foi instalado no *solver BiomassGasificationFoam*. Neste ficheiro pode-se definir a localização onde ocorre a ignição, o diâmetro da ignição (i.e., as células onde a ignição estará ativa), a duração (definindo o início e o fim da ignição, em segundos) e a força da ignição, que é o valor pelo qual a entalpia é multiplicada nas células em que a ignição está ativa (o que corresponde a um fornecimento de calor extra a estas células para provocar a auto-sustentação do processo de combustão).

g – ficheiro com o valor da aceleração da gravidade.

heatTransferProperties – ficheiro onde se define o modelo de transferência de calor, fornecendo o valor de alguns parâmetros necessários ao seu cálculo, como sejam: o raio dos poros, a área superficial por unidade de volume do sólido, e os coeficientes de transferência de calor no sólido e na fronteira sólido/gás.

pyrolysisProperties – ficheiro que contém o modelo de pirólise, podendo-se desativar, se desejado, a pirólise. Este ficheiro contém igualmente os parâmetros inerentes ao modelo, nomeadamente a profundidade de absorção e o coeficiente de emissão

radiationProperties – ficheiro onde se define as propriedades relativas à transferência de calor por radiação, nomeadamente: o modelo e o valor da emissividade (ϵ), absorvidade (a) e coeficiente de dispersão (E), podendo a transferência de calor por radiação ser ativada ou desativada.

solidThermophysicalProperties – ficheiro que contém as propriedades dos componentes sólidos (biomassa), nomeadamente: propriedades de transporte, de radiação, termodinâmicas (capacidades caloríficas e entalpias de formação) e densidade.

thermophysicalProperties – ficheiro onde se define o modelo térmico a usar na simulação, as espécies inertes (no nosso caso será o N_2), e a localização dos ficheiros com as propriedades físicas, como seja o *chemistryReader*.

turbulenceProperties – ficheiro onde se define o tipo de fluxo: laminar ou turbulento. No nosso estudo usamos fluxo laminar, para situações de fluxo turbulento será necessário definir o tipo de modelo de turbulência e correspondentes propriedades

A pasta **system** contém ficheiros com informação relativa ao tempo de simulação, aos algoritmos para resolução numérica das equações e para extração dos valores finais.

controlDict - ficheiro com informação relativa ao tipo de *solver* que vai ser usado na simulação e em que condições vai ser usado, nomeadamente: *application*, *startTime*, *stopTime* e *endTime*, que são os parâmetros principais. Um outro parâmetro importante é o passo de integração, *deltaT*, que indica o incremento de tempo usado na resolução das equações diferenciais.

decomposeParDict_old – ficheiro que permite obter uma melhor eficiência do algoritmo de simulação através de uma divisão de partições que permite processar as simulações em paralelo.

fvSchemes – ficheiro em que se escolhe o método a usar para a simulação numérica, nomeadamente para a integração das equações diferenciais.

fvSolution – ficheiro onde se definem as tolerâncias e algoritmos a serem usados. No nosso estudo foi usado o PISO e o PIMPLE simultaneamente. O algoritmo PIMPLE (PISO-SIMPLE) é usado tanto no *BiomassGaseificationFoam*, como no *reactingFoam*. O ciclo principal contém duas entradas corretivas para resolver o conjunto pressão-momento influenciado pela distribuição da energia e espécies. A equação da conservação de massa e os termos geradores são resolvidos em cada iteração correspondente ao ciclo principal. No *fvSolution* existem três algoritmos principais: o PISO (Pressure-Implicite Split-Operator), o SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) e o PIMPLE (PISO-SIMPLE). Estes algoritmos correspondem a processos iterativos para resolver as equações de velocidade, pressão (PISO E SIMPLE), equações conservação de momento, conservação de massa e conservação de energia (PIMPLE). O PISO é usado para problemas transientes, e o SIMPLE para problemas de estado estacionário.

probesDict - este ficheiro é usado para indicar a localização dos pontos que queremos analisar (imprimir), fazendo por isso parte do pós-processamento do *OpenFOAM*. O ficheiro *probesDict*, da pasta *system*, onde é chamado a partir do *controlDict*, permite analisar a evolução ao longo do tempo. Este ficheiro contém as variáveis que vão ser analisadas, como por exemplo, a pressão (p) ou a velocidade (U), e a localização na malha onde se pretende analisar os resultados, chamado por *probesLocations*. Este é o comando que se chamará no terminal do *OpenFOAM* para examinar a evolução dos valores ao longo

do tempo nos pontos escolhidos. A diferença principal entre o *sampleDict* e o *ProbesDict* é que o *sampleDict* permite analisar ao longo de um plano, enquanto o *ProbesDict* faz a análise num ponto exato numa célula.