



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

## **Culturas energéticas: produção de biomassa e bioenergia.**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente

**Autor**

**Ana Luísa Diogo Ferreira**

**Orientadores**

**Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas**

**Doutora Valéria Reva**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes, Professor da  
Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo, Professor da  
Universidade de Coimbra  
Doutora Valéria Reva, Investigadora da ADAI/UC



Associação para o Desenvolvimento da  
Aerodinâmica Industrial



Universidade de Trás-os-Montes e Alto  
Douro

**Coimbra, Julho, 2015**



## **Agradecimentos**

Uma dissertação de mestrado é um trabalho individual, no entanto, apenas é possível com a colaboração de várias pessoas.

Ao Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas e à Doutora Valéria Reva pela disponibilidade demonstrada em orientar esta dissertação de mestrado. Um agradecimento especial à Doutora Valeria Reva por todo o auxílio concedido e acompanhamento ao longo destes meses.

Uma palavra de agradecimento também ao Professor Abílio José F. N. Sobral, Departamento de Química, UC, e ao Doutor Pedro S. Pereira Silva, Departamento de Física, UC, pelo apoio dado na realização dos testes XRF.

Aos meus amigos que me foram incentivando nos momentos mais difíceis, em especial ao Bruno, Carolina e Sofia por todo o apoio prestado na etapa final.

Aos meus pais e irmã pela compreensão, paciência e apoio que sempre prestaram estando sempre disponíveis para me ouvirem.



## Resumo

Nas últimas décadas tem-se verificado uma crescente preocupação a nível ambiental, tanto no que se refere aos gases de efeito de estufa, como à necessidade de reduzir o uso de combustíveis fósseis. A energia proveniente da biomassa é uma alternativa vantajosa pelo que, neste estudo, é feita uma abordagem a uma das possíveis fontes de biomassa: as culturas energéticas.

O objetivo geral deste trabalho é um estudo aprofundado do conceito das culturas energéticas, da sua produção na Europa e a nível mundial visando a aplicação da experiência existente em Portugal. As culturas energéticas lenhosas usadas como biocombustível na combustão direta são o objeto do estudo. O objetivo particular é determinar o potencial energético e caracterizar os resíduos provenientes da combustão (cinzas) para três espécies lenhosas a ser instaladas em Portugal com o perfil de culturas energéticas: choupo, eucalipto e acácia. As amostras de *pellets* e biomassa residual florestal de eucalipto são consideradas como referência para a análise do processo de combustão e formação de cinzas.

Para atingir os objetivos foi feita uma exaustiva revisão bibliográfica abrangendo as questões de classificação e cultivo de culturas energéticas e de processos de conversão de biomassa para bioenergia. Os ensaios de combustão direta foram realizados no calorímetro cónico e, para a avaliação química das cinzas, recorreu-se a análise de fluorescência de raios X (XRF).

Observou-se um comportamento distinto entre as espécies estudadas no decorrer da combustão e na quantidade e qualidade de cinzas resultantes do processo. Maior quantidade de material lenhoso e maior densificação na biomassa, contribuíram para o potencial energético das espécies. Verificou-se também que as amostras de espécies com maior quantidade de material lenhoso (*pellets* e choupo) contêm menor teor de elementos químicos responsáveis pela formação de cinzas e, por conseguinte, menor quantidade de cinza. As amostras de espécies com presença de resíduos de folhagem (biomassa residual florestal, eucalipto e acácia-mimosa) apresentam maior quantidade de elementos químicos responsáveis pela formação de cinzas, dando origem a uma maior quantidade das mesmas.

Palavras-chave: Biomassa, Culturas energéticas, Choupo, Eucalipto, Acácia.



## Abstract

In recent decades there has been a growing environmental concern, with regard to greenhouse gases as well as the need to reduce the use of fossil fuels. Energy from biomass is an advantageous alternative and therefore, in this study, an approach is made to one of the possible sources of biomass: energy crops.

The overall objective of this study is an in-depth study of the concept of energy crops, of its production in Europe and worldwide, aimed at the implementation of the existing experience in Portugal. The woody energy crops used as biofuel in direct combustion are the subject of the study.

The aim of this paper is to provide an in-depth study of the concept of energy crops, its production in Europe and worldwide, aimed at the implementation of the existing experience in Portugal. The woody energy crops used as biofuel in direct combustion are the main goal of the study. The particular goal is to determine the energy potential and characterize the wastes from the combustion (ashes) for three woody species to be installed in Portugal with the profile of energy crops: poplar, eucalyptus and acacia. Samples of pellets and of residual forest biomass from eucalyptus are considered as a reference for the analysis of the combustion process and ashes formation.

In order to achieve the aims of this paper, an exhaustive literature review was made, covering the issues of classification and cultivation of energy crops, as well as biomass conversion processes for bioenergy. Direct combustion trials were performed in a conical calorimeter and, for the chemical evaluation of the ashes, the x-ray fluorescence analysis (XRF) was used.

There was a distinct behaviour between the species studied in the course of combustion and also in the quantity and quality of the ashes resulting from the process. A higher amount of woody material and a higher biomass densification contributed to the energy potential of the species. It was also found that the samples of species with a larger amount of woody material (pellets and poplar) contain less content of chemical elements responsible for the formation of ashes and, consequently, a lesser amount of ash. Samples of species with the presence of foliage waste (residual forest biomass, eucalyptus and

acacia) show a higher amount of chemical elements responsible for the formation of ashes, resulting in a greater amount of these.

**Keywords** Biomass, Energy crops, Poplar, Eucalyptus, Acacia.

---

## Índice

Índice de Figuras .....	x
Índice de Tabelas .....	x
Siglas .....	xi
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Objetivos .....	3
2. ESTADO DA ARTE .....	5
2.1. Biomassa .....	5
2.2. Processos de conversão de biomassa para energia .....	6
2.2.1. Processos de conversão termoquímicos .....	6
2.2.2. Processos de conversão bioquímicos .....	11
2.2.3. Impacto ambiental derivado da produção de bioenergia .....	12
2.3. Culturas energéticas .....	16
2.3.1. Classificação .....	16
2.3.2. Sistemas de cultivo .....	19
2.3.3. Culturas energéticas no mundo .....	20
2.3.4. Culturas energéticas em Portugal .....	22
2.3.5. Vantagens e desvantagens das culturas energéticas .....	23
2.4. Culturas energéticas lignocelulósicas .....	24
2.4.1. Choupo .....	25
2.4.2. Eucalipto .....	26
2.4.3. Acácias .....	29
3. MATERIAIS E METODOS .....	31
3.1. Amostragem .....	31
3.2. Testes no calorímetro cónico .....	33
3.3. Determinação da quantidade e composição química das cinzas .....	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	35
4.1. Resultados dos testes no calorímetro cónico .....	35
4.1.1. Taxa de perda de massa .....	35
4.1.2. Taxa de libertação de calor e energia total libertada .....	38
4.2. Resultados dos testes de determinação da quantidade e composição química das cinzas .....	41
5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS .....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	53
ANEXOS .....	59

## Índice de Figuras

Figura 3.1: Amostras recolhidas de choupo (a), eucalipto (b) e acácia (c); Amostras trituradas para combustão de choupo, eucalipto e acácia (d), <i>pellets</i> e biomassa residual (e).....	32
Figura 4.1: Evolução das curvas de perda de massa .....	36
Figura 4.2: Evolução das curvas de perda de massa (valores médios) ao longo da combustão .....	37
Figura 4.3: Taxa de variação de massa (média) ao longo da combustão .....	37
Figura 4.4: Taxa de libertação de calor .....	39
Figura 4.5: Composição química das cinzas da amostra nº 1 de <i>pellets</i> a 15KV (a) e 50KV (b) .....	46
Figura 4.6: Composição química das cinzas da amostra nº 1 de biomassa residual florestal de eucalipto a 15KV (c) e 50KV (d) .....	47

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Quantidade de cinzas resultante da combustão a 550°C de biocombustíveis .	14
Tabela 3.1: Teor de humidade (%) das três espécies em estudo .....	33
Tabela 4.1: Tempos de ignição.....	35
Tabela 4.2: Dados para o cálculo do valor do PCI.....	39
Tabela 4.3: Energia total libertada .....	40
Tabela 4.4: Massa final das amostras em estudo após a combustão .....	41
Tabela 4.5: Composição química (mg/kg base seca) e teor de cinzas (% de peso em base seca) de espécies folhosas e coníferas, <i>Pinus Pinaster</i> e <i>Eucalyptus globulus</i> .....	42
Tabela 4.6: Gama de concentração dos principais elementos formadores de cinzas presentes no biocombustível (a) e nas cinzas (b) para espécies coníferas .....	43
Tabela 4.7: Composição química das cinzas da amostra de <i>pellets</i> e de biomassa residual florestal de eucalipto a 15KV e 50KV .....	44
Tabela 4.8: Elemento químico presente nas cinzas e respectiva influencia em efeitos causados .....	49

---

## Siglas

Br – Bromo

C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> – Etileno

C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> – Etano

Cd – Cádmio

CH<sub>4</sub> – Metano

CLCR – Culturas lenhosas de curta rotação

CO – Monóxido de carbono

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

Cr – Crómio

FGECs – First generation bioenergy crops

GEE – Gases de efeito de estufa

H<sub>2</sub> – Hidrogénio

H<sub>2</sub>S – Sulfeto de hidrogénio

HCl – Cloreto de hidrogénio

Hg – Mercúrio

HRR – Heat Release Rate

M<sub>b,h</sub> – Teor de humidade em base húmida

M<sub>b,s</sub> – Teor de humidade em base seca

N – Nitrogénio

N<sub>2</sub>O – Óxido nitroso

NH<sub>3</sub> – Amoníaco

NO – Monóxido de azoto

NO<sub>2</sub> – Dióxido de azoto

ODT – Oven dried ton

Pb – Chumbo

PCI – Poder calorífico inferior

PCS – Poder calorífico superior

S – Enxofre

SGECs – Second generation bioenergy crops

SO<sub>2</sub> – Dióxido de enxofre

SO<sub>3</sub> – Óxido sulfúrico

TGECs – Third generation bioenergy crops

UE – União Europeia

V – Vanádio

Zn – Zinco

## 1. INTRODUÇÃO

O padrão de consumo de energia no mundo alterou-se com a industrialização sucessiva das economias do Sudeste da Ásia e do Brasil e, recentemente, com o ritmo crescente da industrialização da China e da Índia que impulsionou um aumento na procura energética, conduzindo a um aumento no uso de combustível fóssil e do seu preço (Sims *et al.*, 2006; Wright, 2006).

### 1.1. Enquadramento

As preocupações ambientais, a disponibilidade limitada de combustíveis fósseis e os altos preços de energia impuseram a necessidade da redução do consumo de energia primária e uma diversificação das fontes de energia, (Ferreira *et al.*, 2009) dando origem ao desenvolvimento de produtos a partir de recursos renováveis e incentivando os governos, em todo o mundo, a apoiar a transição para uma economia de base biológica a fim de reduzir as emissões dos gases de efeito de estufa responsáveis pelas alterações climáticas (Muylle *et al.*, 2015; Camarsa *et al.*, 2015; Borkowska e Molas, 2013).

O primeiro grande passo foi dado com a criação do protocolo de Quioto, um protocolo mundial, em que a nível europeu, os países membros da União Europeia (UE) se comprometeram a reduzir as suas emissões coletivas em 8%, face aos níveis de 1990 até 2012 (European Commission, 2015). Mais tarde, e como forma de combate à grave crise económica, social e ambiental sentida na união europeia, a comissão europeia e os seus estados-membros propuseram a “Estratégia Europa 2020” cujas metas visam reduzir a dependência da energia importada, não só tornando a UE energeticamente auto-suficiente, como combater as alterações climáticas, aumentar a segurança energética da UE e reforçar a sua competitividade. Para tal, os três principais objetivos estipulados foram a redução de 20% nas emissões de gases com efeito de estufa (GEE) em relação aos níveis de 1990, o aumento da fração do consumo de energia da UE produzidos a partir de recursos renováveis para 20% e uma melhoria de 20% na eficiência energética da UE (European Commission, 2014).

Embora a UE esteja a fazer bons progressos no sentido de cumprir os seus objetivos energéticos para 2020, recentemente, a comissão europeia propôs um quadro de política de clima e energia para 2030 cujo objetivo é a redução das emissões de GEE em 40% abaixo dos níveis de 1990 e o aumento da quota das energias renováveis para, pelo menos, 27% do consumo energético da UE até 2030, garantido o cumprimento do objetivo da redução das emissões em pelo menos 80% até 2050 (Gioti Papadaki, 2012; European Commission, 2014; Camarsa *et al.*, 2015).

Vários estudos confirmam que o futuro da energia pode estar fortemente ligado à extração de produtos de alto valor a partir da fonte de biomassa, sendo os principais substitutos renováveis das matérias-primas de origem fóssil as culturas energéticas, os resíduos agroflorestais e os resíduos das indústrias conexas (Muyllé *et al.*, 2015; Laurent *et al.*, 2015; Ferreira *et al.*, 2009; Sims *et al.*, 2006).

A biomassa é a mais antiga fonte de energia que a humanidade conhece desde os tempos antigos e a sua energia é a mais abundante e versátil entre as energias renováveis no mundo (Ferreira *et al.*, 2009; Dipti e Priyanka, 2013). Existem inúmeros tipos e fontes de biomassa, uma ampla gama de tecnologias de conversão e potenciais utilizações finais. Encontrar as combinações mais eficientes dos três elementos anteriormente mencionados é o principal desafio para o futuro desenvolvimento da produção de bioenergia da UE numa perspetiva ambiental (European Environmental Agency, 2013)

Ainda que se afirme que a transição para uma sociedade com baixas emissões de carbono é um pilar essencial da “Estratégia Europa 2020” (Camarsa *et al.*, 2015), a descarbonização total da economia até 2050 (em que a bio economia europeia prevê um papel de liderança em 2030 para produção e conversão da biomassa) está ameaçada no sector da biomassa devido à precoce e completa eliminação dos subsídios para o cultivo de plantações perenes dedicadas às culturas energéticas (Borkowska e Molas, 2013).

Na produção de bioenergia a partir de biomassa, é dada uma particular atenção às culturas energéticas que podem ser convertidas em energia para aquecimento, em eletricidade (de combustão ou mecanização) e biocombustíveis (por exemplo bioetanol, biodiesel e biogás). Na UE é esperado que as culturas energéticas venham a ter grande parte da sua contribuição nos setores de energia e transportes (Laurent *et al.*, 2015).

## 1.2. Objetivos

Devido a uma grande variedade de espécies de culturas energéticas atualmente cultivadas para a produção de biocombustível, como objetivo geral deste trabalho foi estipulado um estudo aprofundado do conceito das culturas energéticas e da sua produção na Europa e outros países do mundo a fim de aplicar a experiência existente em Portugal. O trabalho foca-se nas culturas energéticas lenhosas utilizadas como biocombustíveis para a combustão direta, tendo sido dada particular atenção aos resíduos provenientes da combustão (cinza sólida) e ao seu impacto a nível ambiental e de manutenção de equipamentos.

Para alcançar o objetivo foi realizada uma revisão bibliográfica exaustiva de forma a compreender a tipologia de plantações energéticas a ser instaladas em Portugal. Principal atenção foi dada a três espécies: choupo (*Populus alba.*), eucalipto (*Eucalyptus globulus*) e acácia-mimosa (*Acacia dealbata*). O choupo é uma espécie bem estudada em termos da sua produtividade e condução das plantações, sendo uma espécie de referência. Estudos recentes desenvolvidos em Portugal (Santos, 2009) apontam o eucalipto como uma espécie potencial de plantações de curta rotação com fim energético. A acácia é uma planta invasora que se encontra em abundância em zonas rurais abandonadas do Centro de Portugal, aumentando o risco de incêndios florestais, pelo que o seu estudo como potencial planta energética será de grande importância.

A produção sustentável de culturas energéticas desempenha um papel central numa economia de base biológica e é um grande desafio para garantir a sua integração em termos de recursos de terra e água do país. Ao mesmo tempo, o aumento da procura de biomassa para bioenergia constitui grandes desafios para a agricultura no sentido de não comprometer a produção de alimentos, pelo que todo o conhecimento sobre vantagens e desvantagens de plantações energéticas é essencial.



## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. Biomassa

O termo “biomassa” compreende “o material orgânico não fossilizado e biodegradável proveniente de plantas, animais e microrganismos; inclui produtos, subprodutos, resíduos e restos da agricultura, da silvicultura e indústrias afins, bem como a não fossilizada e biodegradável fração orgânica dos resíduos industriais e municipais; inclui também gases e líquidos recuperados a partir da decomposição de matéria orgânica não fossilizada e biodegradável” (MRG 2007; Ferreira *et al.*, 2009). A biomassa constitui a matéria-prima para a produção de diferentes tipos de biocombustíveis: sólidos (estilha, *pellets*, briquetes), líquidos (metanol, etanol, diesel), e gasosos (gás de síntese, o biogás, hidrogênio) (Sims *et al.*, 2006).

São inúmeras as vantagens do uso da biomassa para a produção de energia, entre as quais se encontram benefícios ambientais (redução das emissões de GEE), energéticos (redução da dependência dos recursos não renováveis), sociais (criação de emprego), prevenção de incêndios florestais, melhoria da produtividade florestal e desenvolvimento rural. Dipti e Priyanka (2013) e FNR (2009) afirmam que a biomassa não só está disponível em grandes quantidades, como tem a considerável vantagem de ser a única fonte de energia renovável que pode ser armazenada e utilizada na produção de biocombustível quando necessários.

Existe, no entanto, alguma ponderação a considerar relacionada com o uso e com a produção de biomassa para fins energéticos. Há precauções na quantidade de produção anual de biomassa para que a produção de alimentos não seja afetada e o equilíbrio ecológico garantido (FNR, 2009). Uma forte aposta nas plantações energéticas pode conduzir à redução da biodiversidade. Relativamente à produção de bioenergia neutra de CO<sub>2</sub>, a biomassa, apenas quando produzida por meios sustentáveis, emite para a atmosfera durante a sua conversão, a mesma quantidade de carbono que foi absorvida pela planta durante o seu crescimento. Apenas neste contexto a utilização de biomassa não contribui para a acumulação de CO<sub>2</sub> na atmosfera (Ferreira *et al.*, 2009). Entretanto, a utilização da biomassa para produção de bioenergia pode conduzir à emissão de algumas substâncias

prejudiciais para o ambiente (particularmente quando se trata de conversão de biomassa para bioenergia através de combustão).

No âmbito do presente trabalho, é evidenciada a biomassa lignocelulósica: a biomassa vegetal proveniente de resíduos agrícolas ou culturas energéticas lenhosas, constituída por polímeros de celulose, hemicelulose e lignina. Devido à sua abundância e capacidade de renovação é considerada em todo o mundo uma potencial matéria-prima para a produção sustentável de bioenergia. A biomassa lignocelulósica utiliza-se sobretudo na produção de biocombustível sólido de combustão direta. Também pode ser hidrolisada e os açúcares resultantes utilizados para a produção de etanol e outros biocombustíveis (Yuan *et al.*, 2008; Zheng *et al.*, 2014; Phitsuwan *et al.*, 2013; Laurent *et al.*, 2015).

## **2.2. Processos de conversão de biomassa para energia**

Existem vários processos de conversão de biomassa em energia sendo subdivididos em duas principais tecnologias de processo: decomposição termoquímica (que inclui os processos de combustão, pirólise, gaseificação) e a conversão bioquímica (que abrange a digestão anaeróbia e a fermentação). A escolha do processo tem em consideração vários fatores como o tipo de energia final desejada, as normas ambientais, o tipo e a quantidade de biomassa disponível, os fatores específicos do projeto e as políticas governamentais. A escolha de um método de conversão não é apenas um questão técnica, mas acima de tudo uma questão económica: quanto mais complexo o procedimento, maior o custo final da fonte de energia (Silva *et al.*, 2013).

### **2.2.1. Processos de conversão termoquímicos**

Os processos termoquímicos recorrem a uma fonte de calor para converter biomassa em biocombustíveis. São processos adequados para espécies herbáceas de baixa humidade, como biomassa derivada de pastos, vegetação lenhosa não adequada para produção a de madeira ou resíduos provenientes do sector florestal e agrícola. A pirólise, combustão e gaseificação são os processos termoquímicos abordados sendo a quantidade de oxigénio presente ao longo do processo o fator que mais difere entre eles. (Ferreira *et al.*, 2009; European Environment Agency, 2013; Santos, 2009)

### **Pirólise**

A pirólise da biomassa é o processo de decomposição termoquímica da matéria orgânica a temperaturas que rondam os 500°C e difere da combustão uma vez que o processo ocorre na total, ou quase total, ausência de oxigénio. É necessária uma fonte de calor externa e é obtida uma mistura de gases, líquidos e sólidos com altos poderes caloríficos que podem ser aplicados em diversas áreas, tanto na indústria química como no sector da energia (Ferreira *et al.*, 2009; Santos, 2011; IEA, 2007).

A granulometria da biomassa, composição química, temperatura do reator, velocidade ou taxa de aquecimento e o tempo de residência da fase gasosa, influenciam a qualidade e quantidade dos produtos da pirólise (Lora *et al.*, 2012; Santos, 2011). No que concerne à influência das propriedades da biomassa, pode dizer-se que a humidade e a densidade são as que maior peso têm. Quanto menor a humidade da biomassa, mais leve será o processo da pirólise e, conseqüentemente, menor será a necessidade de uma decomposição rígida dos seus constituintes (Santos, 2011).

A fração sólida obtida no processo é o principal produto da pirólise, o carvão vegetal. Constituído essencialmente por cinza e carbono, podem ser aproveitados diretamente como combustível ou na produção de carvão ativado substituindo o carvão e a lenha em fornos na indústria siderúrgica (Lora *et al.*, 2012; Santos, 2011). O carvão vegetal tem o dobro da densidade energética do material de origem e queima a uma temperatura superior (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008).

O produto líquido é composto por um óleo vegetal, também conhecido por óleo de pirólise, bio óleo bruto, biocombustível, líquido de madeira, alcatrão pirolenhoso, entre outros. Facilmente transportado e armazenado, possui reduzidas quantidades de nitrogénio e enxofre e pode ser usado em câmaras de combustão, turbinas e motores a *diesel*, substituindo gradualmente os derivados do petróleo devido ao seu alto valor calorífico (Ferreira *et al.*, 2009; Lora *et al.*, 2012; Santos, 2011; Silva *et al.*, 2013).

O gás típico da pirólise da biomassa é composto por gases não condensáveis como hidrogénio (H<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), podendo também estar presentes hidrocarbonetos e alguns gases indesejados como sulfeto de hidrogénio (H<sub>2</sub>S) e amoníaco (NH<sub>3</sub>), que poderão necessitar de ser removidos do gás de síntese, dependendo da utilização final do gás (Lora *et al.* 2012; Saidur *et al.* 2011).

A pirólise inclui uma distinção baseada no tipo de taxa de aquecimento, podendo classificar-se em pirólise lenta e pirólise rápida. A pirólise lenta baseia-se numa moderada taxa de aquecimento a cerca de 450°C, com um tempo de residência no reator elevado, o que favorece a formação de carvão vegetal. A pirólise rápida tem uma rápida taxa de aquecimento com curtos tempos de residência, tanto da partícula de biomassa quanto da fase gasosa (voláteis e gases) maximizando as quantidades de bio óleo produzido sendo inferior a quantidade de carvão vegetal resultante (Verissimo, 2014).

A principal vantagem da pirólise como pré-tratamento de biomassa é o aumento da sua densidade energética visto que o principal produto é o carvão vegetal (Lora *et al.*, 2012).

### **Gaseificação**

A gaseificação consiste na conversão termoquímica da biomassa em combustíveis gasosos através da oxidação parcial da biomassa a elevadas temperaturas (800°C - 1200°C) sendo necessária a presença de um agente gaseificador, podendo este ser ar, vapor de água, oxigénio ou uma combinação de ambos (Lora *et al.*, 2012; Saidur *et al.*, 2011).

São vários os fatores que influenciam a eficiência do processo: características físico-químicas da biomassa, agente de gaseificação, tempo de residência, uso ou ausência de catalisadores e a razão de equivalência, ou seja, o fator de ar. O fator de ar corresponde à quantidade de combustível versus quantidade de agente gaseificador utilizado (Lora *et al.*, 2012; Verissimo, 2014).

Os produtos resultantes da gaseificação são o gás de síntese e as cinzas. O gás contém maioritariamente CO e H<sub>2</sub>, além de CH<sub>4</sub>, pequenas quantidades de CO<sub>2</sub> e ainda reduzidos vestígios de hidrocarbonetos tais como etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) e etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), gases inertes e contaminantes como pequenas partículas de carvão, alcatrão e cinzas (Ferreira *et al.*, 2009; International Energy Agency, 2007). O poder calorífico do gás e a sua composição dependem das condições de operação do gaseificador, nomeadamente do agente gaseificador utilizado e da temperatura a que ocorre o processo. O gás síntese tem diversas aplicações entre as quais se destaca a produção de H<sub>2</sub> e combustíveis líquidos, queima direta para geração de energia elétrica e matéria-prima para a indústria química. Pode também ser usado para a produção de gás natural sintético, uma alternativa ao gás natural ainda que demasiado dispendiosa (Lora *et al.* 2012; Santos 2009; Boerrigter e

---

Rauch 2006). Diferentes aplicações requerem diferentes concentrações dos componentes do gás, no entanto, independentemente da aplicação pretendida, o gás síntese deve cumprir requisitos de qualidade quanto ao seu poder calorífico, concentração dos seus componentes e impurezas presentes. Uma limpeza do gás é por vezes necessária e consiste na eliminação de componentes químicos nocivos ao meio ambiente e à saúde humana, entre os quais o enxofre (S) (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2002).

### **Combustão**

A combustão de biomassa é o principal método de conversão de biomassa para energia, responsável por mais de 90% da contribuição global para a bioenergia. Considera-se que a combustão de biomassa é um processo livre de carbono pois o CO<sub>2</sub> resultante do processo foi previamente capturado pelas plantas. Consiste numa sequência de reações químicas pela qual um combustível, em presença de oxigénio, se dissocia quimicamente libertando a sua energia química armazenada (reação exotérmica). Os gases quentes podem ser utilizados diretamente ou transformados em energia mecânica ou electricidade em diferentes equipamentos, tais como, fogões, fornos, caldeiras, turbinas a vapor, turbogeradores, entre outros (Silva *et al.*, 2013; IEA, 2007).

A seleção e o *design* de qualquer sistema de combustão de biomassa são determinados pelas características físico-químicas do combustível, legislação ambiental em vigor, custos e desempenho dos equipamentos necessários ou disponíveis, bem como a energia e capacidade necessárias (calor, electricidade) (Berndes *et al.*, 2008).

Distinguem-se os sistemas de combustão de grande e pequena escala. Sistemas de grande escala (ou escala industrial) utilizam combustíveis de baixa qualidade (resíduos florestais, *pellets* industriais); para os sistemas de pequena escala (ou escala doméstica) é necessário um combustível de alta qualidade (lenha, briquetes, *pellets* de uso doméstico). Quanto menor for a instalação de combustão, maiores as exigências relativas à qualidade dos combustíveis e à sua homogeneidade. (Berndes *et al.*, 2008).

O tipo de combustível influencia o processo de combustão e determina o sistema de alimentação de combustível e a tecnologia de combustão adequados devido às diferentes características. Os parâmetros de grande relevância são: dimensão e homogeneidade das partículas, teor de humidade, massa volúmica, densidade energética, poder calorífico superior e inferior, teor em voláteis e teor em cinzas (Berndes *et al.* 2008).

Em relação à dimensão das partículas, os biocombustíveis podem estar disponíveis como material-a-granel (por exemplo, aparas de madeira, pequenas partículas provenientes da serragem) ou material-unidade (por exemplo, fardos de palha, lenha). Pequenas partículas de combustível necessitam de menor tempo de permanência na câmara de combustão e quanto mais homogêneas as partículas, melhor a qualidade do combustível e o controle do processo de combustão (Berndes *et al.*, 2008).

O teor de humidade dos biocombustíveis apresenta grande variação de acordo com o tipo biomassa, armazenamento e pré-tratamento a que foi sujeita: por exemplo, teor de humidade de 25 a 60% em peso (base húmida) para casca ou subprodutos de serragem, e abaixo de 10% em peso (base húmida) para *pellets* e resíduos de processamento de madeira seca. Elevado teor de humidade reduz a eficiência do sistema de combustão (saída de calor da caldeira/entrada de energia do combustível (Berndes *et al.* 2008).

A densidade de diferentes biocombustíveis é altamente variável, existindo uma significativa diferença entre folhosas e coníferas (resinosas). As madeiras de folhosas têm densidade mais elevada, o que influencia o volume da câmara de combustão, a proporção de entrada de energia e as características de combustão do combustível (Berndes *et al.*, 2008).

A densidade energética representa a relação entre o conteúdo energético do combustível e o volume que este ocupa influenciando o transporte e armazenamento do biocombustível bem como a sua aplicação em determinados equipamentos. A baixa densidade energética dos combustíveis sólidos (lenha, palha, resíduos) dificulta o seu armazenamento e transporte (Berndes *et al.*, 2008).

A porosidade do combustível influencia a sua reatividade (perda de massa por unidade de tempo) e conseqüentemente o seu comportamento de desvolatilização (Berndes *et al.*, 2008).

O poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI) dependem do tipo e origem da biomassa, teor de humidade e cinzas. O PCS corresponde ao calor libertado por unidade de massa de combustível, estando toda a água formada durante a combustão em fase líquida e apresentando, tanto a água como o gás de combustão, igual temperatura, correspondendo à temperatura do combustível antes da combustão. O PCS da biomassa geralmente varia entre 18 e 22MJ/kg em base seca. O PCI é definido como o calor libertado por unidade de massa de combustível estando a água formada durante a

---

combustão em fase gasosa e apresentando, tanto a água como o gás de combustão, igual temperatura, correspondente à temperatura do combustível antes da combustão (Berndes *et al.*, 2008).

O teor de componentes voláteis refere-se à fração de biomassa que se decompõe termicamente passando para a fase gasosa na forma de gases combustíveis voláteis, e influencia a decomposição térmica dos combustíveis sólidos (Berndes *et al.*, 2008). Geralmente a biomassa contém alto teor de componentes voláteis (entre 70 e 86% de peso em base seca) em comparação com o carvão, tornando-a num combustível altamente reativo.

O teor em cinzas depende do tipo de biomassa podendo variar entre os 0,1% e os 46,4% em base seca (Berndes *et al.*, 2008).

Os produtos decorrentes da combustão completa são o vapor de água (H<sub>2</sub>O), CO<sub>2</sub>, excesso de oxigénio e azoto (N<sub>2</sub>). Para além destes elementos formam-se poluentes gasosos como óxidos de azoto (por exemplo monóxido de azoto (NO) ou dióxido de azoto (NO<sub>2</sub>)), NH<sub>3</sub>, óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), óxidos de enxofre (por exemplo dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e óxido sulfúrico (SO<sub>3</sub>)), cloreto de hidrogénio (HCl), cinzas e partículas contaminantes como chumbo (Pb), zinco (Zn), cádmio (Cd) entre outros. Podem ainda surgir produtos resultantes da combustão incompleta como CO, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> e carbono não queimado (Nussbaumer, 2003).

O uso da biomassa para combustão tem algumas desvantagens comparando com a utilização de combustíveis fósseis. O menor poder calorífico, a baixa densidade energética e o elevado teor de humidade afetam a eficiência e o rendimento energético da combustão. No entanto, a qualidade dos combustíveis pode ser melhorada por tecnologias de pré-tratamento aplicadas de acordo com a qualidade do combustível (Berndes *et al.*, 2008).

### **2.2.2. Processos de conversão bioquímicos**

As tecnologias de conversão bioquímica incluem fermentação para a produção de etanol e digestão anaeróbia para produção de gás enriquecido em metano.

#### **Fermentação**

A fermentação é um processo biológico que habitualmente visa a produção de etanol a partir de culturas de açúcar e culturas de amido ricas em açúcares e celulose (por

exemplo batata, milho, beterraba e cana-de-açúcar). É uma tecnologia simples e baseia-se na mistura de biomassa com água em tanques quentes chamados fermentadores. Pela ação de microrganismos (geralmente leveduras), o açúcar das plantas é convertido em álcool, e o produto final é o etanol, sendo este posteriormente destilado (Silva *et al.*, 2013).

No que concerne ao tipo de biomassa a ser convertida, influenciará o custo do produto final: biomassa à base de amido tem menores custos que a matéria-prima que contem açúcares, no entanto, esta requer um processamento adicional; os materiais de celulose, como a madeira, têm maior disponibilidade mas necessitam de uma preparação mais dispendiosa (Ferreira *et al.*, 2009).

### **Digestão anaeróbia**

A digestão anaeróbia consiste num conjunto de processos onde bactérias, na ausência de oxigénio, decompõem material biodegradável proveniente de alimentos, animais mortos, culturas verdes (culturas energéticas como milho, girassol e sorgo sacarino) entre outros, em biogás, visando a recuperação de metano (International Energy Agency, 2007).

O biogás é um dos possíveis produtos finais da digestão anaeróbia. É composto maioritariamente por CH<sub>4</sub> (cerca de 50% a 75%) e CO<sub>2</sub> e pequenas quantidades de H<sub>2</sub>O (2 a 7%), H<sub>2</sub>S, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub> entre outros gases residuais. Após purificado, o biogás pode ser utilizado para produção de eletricidade e / ou calor, integrado em redes de gás natural ou usado como combustível em meios de transporte. A produção de biogás é vantajosa em relação a outro tipo de energias renováveis, uma vez que apresenta um poder calorífico semelhante ao do gás natural emitindo menos quantidade de GEE (FNR, 2009; Gonçalves, 2012).

### **2.2.3. Impacto ambiental derivado da produção de bioenergia**

Diferentes qualidades de biocombustível advêm de uma ampla gama de fontes de biomassa disponíveis para utilização térmica. Algumas especificações, tais como tamanho de partícula, teor de água, teor de cinzas, tipo de combustível, entre outros, são importantes parâmetros que definem a qualidade do biocombustível e o seu impacto ambiental. (Berndes *et al.*, 2008).

Dos diversos processos de conversão de biomassa em energia, são múltiplos os resíduos resultantes prejudiciais a vários níveis. Já no que concerne ao processo de combustão em particular, os principais resíduos são as cinzas e as emissões de gases.

Os principais elementos químicos presentes nos biocombustíveis responsáveis pela formação de cinzas são o cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), sódio (Na), ferro (Fe) e fósforo (P). Os elementos minoritários são manganês (Mn), Zn, níquel (Ni), crômio (Cr), Cd e cobre (Cu). Geralmente os elementos principais têm influência na fusão de cinzas e conseqüentemente nos processos de deposição de resíduos (escória) e corrosão do equipamento de combustão, enquanto os elementos minoritários têm uma maior relevância nos impactos ambientais provenientes das emissões de partículas e na posterior possibilidade de utilização das cinzas (Telmo *et al.*, 2010).

Elementos químicos presentes na biomassa tais como mercúrio (Hg), Cd, vanádio (V), bromo (Br) e Cr contêm elevado potencial de volatilização durante a combustão podendo contaminar o solo, água, ar e as plantas das áreas próximas do local da combustão (Vassilev *et al.*, 2014).

As concentrações de nitrogénio (N) e enxofre (S) na biomassa são de grande importância, uma vez que originam emissões gasosas prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana. Assim, um dos principais impactos ambientais da combustão de biocombustíveis sólidos consiste nas emissões de NO<sub>x</sub>, sendo o nitrogénio o responsável pela formação dos óxidos de azoto, por exemplo NO<sub>2</sub>. No que concerne ao S, após a combustão da biomassa, cerca de 40 a 90% permanece nas cinzas e o restante é transformado e emitido na forma de SO<sub>2</sub> e em menores quantidades na forma de SO<sub>3</sub>. Emissões apenas são esperadas com concentrações de S acima dos 0.2% em peso da biomassa. No entanto, espécies lenhosas contêm geralmente quantidades relativamente baixas destes elementos químicos não sendo um ponto crítico neste tipo de biomassa (Francescato *et al.*, 2009; Telmo *et al.*, 2010).

Se cultivada em solos sujeitos à aplicação de adubos ou outros resíduos líquidos, ou se co alimentada a carvão, a biomassa pode conter metais pesados que posteriormente estarão presentes nas cinzas (Horta *et al.*, 2010; International Energy Agency, 2007).

Após a combustão de biomassa, a maioria dos metais pesados, cuja quantidade depende da tipologia e cultivo de biomassa, subsiste nas cinzas. Por exemplo, cinzas da

combustão de palha de cereais contêm quantidades significativamente menores de metais pesados do que cinzas de biomassa lenhosa o que se deve, geralmente, ao longo período de rotação das espécies lenhosas, aumentando a acumulação, as velocidades de deposição em florestas e originando um menor valor de pH do solo que posteriormente aumenta a solubilidade da maioria dos metais pesados (Berndes *et al.*, 2008).

A quantidade e qualidade de cinzas, bem como os elementos de volatilização dependem das temperaturas ao longo do processo de combustão. O estudo de Vassilev *et al.*, (2013a) indica que a quantidade de cinzas resultantes de combustões a 1100-1500°C é cerca de 7 a 59% (% peso) menor que cinzas provenientes de combustões a 500°C.

Relativamente à influência do tipo de biomassa na quantidade de cinzas em base seca (bs), a Tabela 2.1 apresenta alguns exemplos.

**Tabela 2.1:** Quantidade de cinzas resultante da combustão a 550°C de biocombustíveis

<b>Biocombustível</b>	<b>Quantidade de cinzas (% de peso em bs)</b>
Casca	5.0 – 8.0
Estilha ( <i>woodchips</i> ) com casca (floresta)	1.0 – 2.5
Estilha ( <i>woodchips</i> ) sem casca (industrial)	0.8 – 1.4
Serrim de madeira	0.5 – 1.1
Resíduos (ramos/ folhagem) biomassa lenhosa	3.0 – 12.0
Palhas e cereais	4.0 – 12.0
Miscanthus	2.0 – 8.0

Adaptado: Berndes *et al.*, 2008

De acordo com a Tabela 2.1, palha e cereais usualmente originam grandes volumes de cinzas, enquanto biomassa lenhosa apresenta menores volumes das mesmas ainda que os seus resíduos apresentem também valores elevados. Também o combustível contaminado com impurezas minerais origina superior quantidade de cinzas (Berndes *et al.* 2008; International Energy Agency, 2007).

Combustíveis com reduzido teor de cinzas são mais adequados para a utilização térmica do que combustíveis com elevado teor de cinzas, o que se deve ao fato de quanto menor o teor em cinzas, mais simples a combustão da biomassa e o transporte,

armazenamento e utilização ou eliminação das cinzas. Elevados teores de cinzas exigem maiores preocupações no sistema de combustão, desde o tipo do permutador de calor, sistema de limpeza do permutador de calor e tecnologia de precipitação de poeiras (Berndes *et al.*, 2008).

Entretanto, é necessário ter em conta a temperatura de combustão comparativamente à temperatura de fusão de cinzas. Baixa temperatura de fusão de cinzas numa combustão com altas temperaturas pode dar origem ao *slagging*. Espécies lenhosas não são críticas pois possuem elevadas temperaturas de fusão de cinzas, no entanto, cinzas de palha de cereais começam a sinterizar e fundir a valores mais baixos de temperatura, facto que deve ser considerado na escolha do equipamento de controlo de temperatura necessário para o forno (Francescato *et al.* 2009; Berndes *et al.* 2008).

#### **Potenciais utilizações das cinzas de biomassa**

As concentrações de metais pesados nas cinzas de biomassa, tais como Cu, Zn, Mn, Pb, Cd, Cr, Hg e Ni, são de importância considerável para uma sustentável utilização das cinzas. Quando aplicadas em quantidades moderadas, a concentração dos metais pesados das cinzas não prejudica o desenvolvimento das culturas nem a atividade microbiana do solo (Horta *et al.*, 2010). As cinzas de biomassa têm diferentes potenciais de utilização, entre eles correção do solo e adubação, produção de materiais de construção e absorventes, e, ocasionalmente, síntese e produção de minerais, cerâmica e outros materiais. No que concerne à possível utilização de cinzas na agricultura, está dependente da natureza das cinzas, do acesso à terra nas proximidades, tipos de solo e dos níveis de nutrientes existentes no solo. A presença de Ca nas cinzas pode reduzir a acidez do solo criando condições favoráveis à melhoria da fertilidade, não sendo necessário o habitual procedimento da calagem, evitando também a emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera que ocorre aquando a aplicação de calcário como corretivo alcalinizante. Por conseguinte há um aumento de PH, redução da lixiviação ácida de elementos perigosos do solo para a corrente de água, diminuição da toxicidade da planta, melhor ambiente para alguns microorganismos e melhoria na textura, areação e capacidade de retenção de água do solo (Horta *et al.*, 2010; Vassilev *et al.*, 2013b).

## 2.3. Culturas energéticas

### 2.3.1. Classificação

Embora o termo “culturas energéticas”<sup>1</sup> seja desconhecido para alguns, este conceito está presente desde que as culturas agrícolas e florestais e os seus resíduos serviram como fonte principal de energia, até a descoberta do óleo em 1859 (Dipti e Priyanka., 2013).

Na sua maioria, culturas energéticas são espécies de plantas com rápido crescimento, elevada produção de biomassa, tolerantes a stresses bióticos e abióticos, com baixos requisitos para pré-tratamentos biológicos, químicos ou físicos (Borkowska e Molas, 2013; Phitsuwan *et al.*, 2013). Sem elevados requisitos de qualidade do solo, podem ser cultivadas em solos pobres em nutrientes, locais ameaçados pela erosão, com necessidade de reabilitação, ou em locais impróprios para agriculturas. No entanto, os requisitos meteorológicos são bastante variados. Estudos demonstram que existe uma correlação entre a disponibilidade de água e os rendimentos de produção de biomassa e que os fatores hidrológicos afetam as espécies de diferentes formas. Como exemplo, *miscanthus x giganteus* alcança melhores rendimentos em verões quentes e húmidos devido à intolerância a baixas temperaturas e necessidade de humidade; *Virginia fanpetals* necessita de ambos os requisitos (temperatura e precipitação) de forma moderada. A baixa necessidade de água são características de algumas espécies de gramíneas, o que pode indicar estabilidade de produção, independentemente da quantidade de precipitação durante a estação de crescimento. Já o salgueiro exige uma quantidade significativa de água ao invés do que se verifica no choupo, que apresenta melhor adaptação ao stresse hídrico (Aylott *et al.*, 2008; Borkowska e Molas, 2013).

Também a época de colheita influencia o nível de rendimento das culturas: quando colhido no outono, o rendimento biológico de *miscanthus* é completo; no entanto, a colheita pode realizar-se na primavera, aquando a perda de folhas. Ainda que exista diminuição de rendimento entre 25 a 50%, a qualidade do combustível aumenta, uma vez que a biomassa é seca e pode ser facilmente armazenada enquanto a matéria orgânica e os

---

<sup>1</sup> Como culturas energéticas entende-se qualquer material vegetal plantado ou cultivado com a finalidade de produzir grande volume de biomassa utilizada posteriormente na produção de diferentes tipos de biocombustíveis.

---

nutrientes são devolvidos o solo. Assim, a estratégia de produção ideal, independentemente do nível de rendimento, também depende das necessidades de combustível do setor de energia e das considerações ecológicas (Venendaal *et al.*, 1997).

Na maioria das culturas energéticas com plantação de curta rotação, o espaçamento entre plantas e o ciclo de corte são os aspetos agronómicos que mais influenciam a produção de biomassa. Também a adubação e a preparação do solo podem afetar significativamente a eficiência energética (Nassi *et al.*, 2010). Como exemplo, rendimentos de culturas anuais, como milho e trigo, estão dependentes de uma significativa quantidade de fertilizantes de nitrogénio no solo. Por outro lado, culturas perenes e arbóreas, podem alcançar maior produção biomássica com um *input* mais baixo deste mesmo fertilizante (Weih, 2010).

Existem várias classificações de culturas energéticas. De acordo com Sims *et al.* (2006) e Yuan *et al.* (2008), as culturas energéticas podem ser classificadas em quatro grupos de acordo com a tipologia de matéria-prima, considerando que muitas das suas espécies vegetais são polivalentes, produzindo mais do que um tipo de produto de energia:

- Oleaginosas como colza, girassol, oliveira, palmeira, coco e amendoim podem ser utilizados diretamente usando o óleo vegetal como um combustível de aquecimento ou indiretamente quando refinado para produção de biocombustíveis para uso em meios de transporte, tais como ésteres de biodiesel.
- Cereais como cevada, trigo, milho, sorgo e centeio podem ser utilizados como um combustível sólido ou como matéria-prima para produção de biogás quando colhidos antes do amadurecimento do grão, usando a colheita inteira (grão e palha) e também na produção de etanol, a partir dos seus grãos, ou como combustível sólido quando aproveitada a palha. Por sua vez, o milho e o sorgo são também usados para produção de etanol celulósico a partir da palha de milho e palha de sorgo.
- Culturas de açúcar e amido como batata, beterraba e cana-de-açúcar utilizam-se para produção de etanol a partir da fermentação de amido e glucose. O etanol utiliza-se diretamente como um combustível, ou em misturas com gasolina.
- Culturas energéticas lignocelulósicas como miscanthus, switchgrass (*Panicum virgatum*), e culturas de curta rotação de salgueiro, choupo e eucalipto são utilizadas para produção de calor e eletricidade diretamente através da combustão ou indiretamente na produção de biocombustíveis como metanol e etanol celulósico.

Com base na produção de biomassa e na sua utilização, ou seja, nos seus possíveis produtos finais, as culturas energéticas classificam-se nas seguintes categorias (Dipti e Priyanka, 2013):

- Culturas bioenergéticas de primeira geração (FGECs) como milho, cana-de-açúcar, óleo de palma e colza produzem os biocombustíveis de primeira geração. A partir da fermentação de açúcares produzem etanol e da transesterificação de óleos vegetais produzem biodiesel. Geralmente os biocombustíveis produzidos são misturados com combustíveis líquidos fósseis, podendo ser também cultivados com fins alimentares, originando uma competição por terras e aumento dos preços dos bens alimentares.
- Culturas bioenergéticas de segunda geração (SGECs) apresentam maior eficiência que FGECs. São diversos tipos de culturas desde culturas celulósicas a culturas de hidrocarbonetos puros. Geralmente culturas lignocelulósicas dão origem a biocombustíveis com maior conteúdo energético (GJ/ (há × ano)) que FGECs. Os biocombustíveis de segunda geração evitam muitas das preocupações ambientais devido à capacidade de fixação de CO<sub>2</sub> por parte de algumas culturas lenhosas. Estas podem também oferecer um maior potencial de redução de custos devido a culturas oleaginosas que contêm óleos vegetais não alimentares que não competem com o óleo alimentar proveniente de outras culturas.
- Culturas bioenergéticas de terceira geração (TGECs) incluem plantas boreais, plantas CAM, *Eucalyptus spp.* e microalgas. As plantas boreais e CAM são potenciais fontes de matérias-primas para fermentação direta da celulose e o eucalipto para a produção de bioenergia através da conversão térmica. A partir das algas é produzido biodiesel e um número de TGECs oleaginosas tem vindo a ser testado para a produção do mesmo, entre as quais o coco e o amendoim. Estas culturas podem contribuir na redução de emissões de GEE através da captura de CO<sub>2</sub> libertado por centrais de energia ou por geração de biomassa por meio da fotossíntese.
- Culturas bioenergéticas Dedicadas (Decs) incluem culturas celulósicas como árvores de cultivo de curta rotação e arbustos. Estas culturas são formadas por biomassa celulósica, que, por sua vez, é constituída principalmente por celulose, hemicelulose e lignina. É uma biomassa naturalmente resistente e por conseguinte, requer tecnologias avançadas para a sua conversão em combustíveis líquidos. A maioria dos biocombustíveis avançados ou de segunda geração são provenientes das DEcs e

alguns exemplos destas culturas são o eucalipto (*Eucalyptus spp.*), choupo (*Populus spp.*), salgueiro (*Salix spp.*), gramíneas perenes como capim-amarelo (*Phalaris arundinacea*) switchgrass (*Panicum virgatum*) e oleaginosas não comestíveis, como a mamona (*Ricinus communis*) e pinhão-manso (*Jatropha curcas*). São culturas propostas como uma estratégia de produção de energia sem comprometimento alimentar ou do ambiente. Os seus requisitos de recursos genéticos para pré-tratamentos biológicos, químicos ou físicos são mais “amigos” do ambiente e terão uma maior contribuição para a mitigação das mudanças climáticas. As DEC são benéficas a alguns serviços dos ecossistemas, incluindo a absorção de carbono, aumento da biodiversidade, mitigação de salinidade e a melhoria da qualidade do solo e freático.

Uma colheita de culturas energéticas deve ser caracterizada, não só pela alta produção de biomassa, mas também pela sua viabilidade económica no crescimento, na colheita e no armazenamento, de acordo com as circunstâncias específicas do mercado naquele momento, de forma a exigir baixos requisitos de entrada e de cultivo que, posteriormente, levarão a uma alta eficiência energética e a um baixo impacto ambiental (International Energy Agency, 2007).

### **2.3.2. Sistemas de cultivo**

A escolha do local de cultivo depende de diversos fatores tais como paisagem, visibilidade, acesso viário, proximidade de uma central de processamento de bioenergia, tipo de solo, disponibilidade de água, historial de doenças e de pragas, história arqueológica e possibilidade de cultivo de outras culturas. Alguns possíveis locais de cultivo podem estar sob proteção especial ou sujeitos a políticas locais que inibam a produção de determinadas culturas. Culturas arbóreas também podem afetar a visibilidade de caminhos atingindo a comodidade visual da população. Por outro lado, algumas plantações podem contribuir positivamente para variações na paisagem e na biodiversidade, fornecerem abrigo, proteção do vento e prover valor recreativo. Se for um local com escassez de fontes de biomassa para o abastecimento de uma indústria ou fazendas, fará também todo o sentido a produção de uma cultura energética (International Energy Agency, 2007).

De acordo com FNR (2013), existem vários sistemas de cultivo das culturas energéticas sendo a maioria cultivada em sistemas de rotação, isto é, um sistema no qual numa determinada área são plantadas diversas culturas, procedendo-se a uma rotação anual.

Algumas espécies, como por exemplo o milho, são "compatíveis consigo mesmas" em termos de rotação de culturas e podem ser cultivados na mesma área por anos consecutivos. Outras espécies, ao invés, como a colza, requerem uma pausa de 3 a 4 anos antes do novo cultivo.

Culturas plurianuais são outra opção: quando semeadas ou plantadas, podem ser utilizados por um longo período, até 30 anos. As operações de decape de curta rotação fortalecem o rápido crescimento de espécies de árvores como choupos e salgueiros, plantadas em fileiras e colhidas uma vez a cada 3-5 anos, brotando novamente de seguida. Inicialmente, as culturas energéticas plurianuais eram uma opção pouco usada ao contrário das culturas anuais, mas o nível de interesse por estas está a aumentar de forma significativa.

Recentemente surgiram sistemas de cultivo inovadores, relacionados com o cultivo de culturas mistas (várias espécies cultivadas no mesmo campo) e a utilização de sistemas em duas colheitas num ano. Como exemplo, a colheita de grão de centeio é realizada na primavera e posteriormente o sorgo ou milho são colhidos no outono. Este tipo de cultivo permite cobertura vegetal ao longo de todo o ano evitando a erosão do solo consistindo numa interessante opção como estratégia diversificada e ambientalmente correta para a produção (ou plantação) de culturas energéticas.

Outra escolha de cultivo é o agro-florestal que se baseia numa combinação de espécies com diferentes durações de crescimento: espécies de árvores de rápido crescimento são plantadas em fileiras enquanto espécies de culturas anuais são plantadas em blocos de terra entre árvores. Em sistemas como este, as fileiras de árvores contribuem numa redução da erosão do solo causada pelo vento e pela água e existe uma maior garantia na obtenção de rendimentos (FNR, 2013).

### **2.3.3. Culturas energéticas no mundo**

Já nos anos 90, algumas culturas energéticas eram cultivadas visando a produção de biocombustíveis: em França, Alemanha, Áustria e Itália eram cultivadas

oleaginosas para produção de biodiesel e na Suécia salgueiros eram plantados para produção de calor e outras formas de energia (Venendaal *et al.*, 1997).

Condições de cultivo e localização geográfica influenciam o rendimento das culturas bioenergéticas. Como exemplo, devido à irrigação ao longo do crescimento da cultura, registaram-se elevados rendimentos em culturas como o sorgo e miscanthus na Europa central e do sul rondando entre os 30 e 40 odt/ha. Por outro lado, na Suécia, o rendimento do salgueiro sob condições comerciais foi estimado entre 8 e 10 odt/ha e, em muitos casos até menores valores (Venendaal *et al.*, 1997).

De acordo com Panoutsou *et al.* (2011), as principais culturas energéticas cultivadas para biocombustíveis sólidos na UE são: miscanthus no Reino Unido, Alemanha, Espanha e Portugal; salgueiro no Reino Unido, Suécia e Alemanha; capim-amarelo na Finlândia e na Suécia e choupo em Itália e Espanha.

Nos EUA, as principais espécies usadas para a produção de etanol são miscanthus e switchgrass (Phitsuwan *et al.*, 2013; Yuan *et al.*, 2008). Nos países asiáticos, sorgo e miscanthus são cultivados na China, ao passo que a cana-de-açúcar selvagem é promissora na Índia. Na Tailândia, variedades de mandioca amarga foram promovidas para a produção de etanol, devido aos baixos requisitos de cultivo desde o seu plantio à colheita e ao alto teor de carboidratos (Phitsuwan *et al.*, 2013).

Estimou-se que, em meados de 2011, cerca de 5,5 milhões de hectares de terras agrícolas fossem usadas para culturas bioenergéticas (maioritariamente oleaginosas) o que correspondia a 3,2% da área total de cultura e cerca de 1% da superfície agrícola utilizada na UE. A colza era a mais cultivada ocupando cerca de 80 a 85% da área total de culturas energéticas e pequenas porções eram ocupadas por girassol, milho, centeio, trigo e beterraba. Uma elevada concentração destas culturas eram encontradas na Alemanha (quase 60% da área de culturas energéticas totais da UE), França (> 25%), Reino Unido (8%) e grandes áreas também na Polónia, República Checa, Suécia, Espanha e Itália (Panoutsou *et al.* 2011). Culturas oleaginosas eram processadas em biodiesel, o restante usado para a produção de culturas de etanol (11%), biogás (7%), e plantas perenes que eram utilizadas principalmente para produção de eletricidade e de calor (1%) (Panoutsou *et al.*, 2011).

#### **2.3.4. Culturas energéticas em Portugal**

Em Portugal, são escassas as culturas de biomassa lenhosa cultivadas para fins energéticos e as existentes são de âmbito experimental. Têm sido realizados estudos que permitem compreender os fatores que influenciam a rentabilidade biomássica, desde espécies, sistemas de cultivo, manutenção, gestão de água, entre outros, que permitem avaliar a possibilidade da expansão a curto prazo das culturas energéticas lenhosas (Patrício *et al.*, 2013).

Um ensaio experimental com culturas lenhosas de curta rotação (CLCR), foi realizado na região norte de Portugal (Patrício *et al.*, 2013), envolvendo espécies como o salgueiro, choupo e freixo, sendo que, para o choupo e salgueiro, foram cultivados clones e espécies locais com o objetivo de avaliar “sistemas de produção de biomassa, efeitos ambientais das CLCR, ciclo de carbono, conteúdo energético de combustíveis lenhosos, potencial regional de produção de biomassa e de energia e análise do ciclo de vida e sustentabilidade”. As produções de biomassa deste estudo foram baixas comparativamente a resultados obtidos na bibliografia disponível, contudo, o ensaio não reuniu as condições ideais de uma talhadia de curta rotação devido à ausência de fertilização e de controlo de infestantes, bem como a existência de alguma escassez hídrica. Rendimentos mencionados por Patrício *et al.* (2013) provenientes de estudos de outros autores na década de 90 foram também reduzidos devido à inadequada proveniência das espécies clonadas, danos causados por pragas, doenças e gelo. Concluiu-se que a escolha das espécies bem como a sua melhoria genética e o local onde são implementadas são fatores cruciais para o sucesso da produção de biomassa (Patrício *et al.*, 2013).

Outro estudo foi realizado no instituto superior de agronomia de Lisboa (Carneiro *et al.*, 2014) visando a avaliação de espécies lenhosas bem adaptadas aos períodos de seca no verão: três espécies de acácias como possíveis culturas energéticas lenhosas no clima mediterrâneo. Carneiro *et al.* (2014) afirmaram que em algumas regiões da Europa, nomeadamente no Mediterrâneo, verões secos limitam a utilidade de algumas espécies de culturas energéticas lenhosas que não se adaptam ao clima. Sendo a acácia, tal como o eucalipto, uma espécie de grande adaptabilidade ao stresse, é considerada promissora na produção de bioenergia. Tendo em conta o problema ambiental gerado pela abundância de acácias no território português, o estudo de uso da espécie para a produção de bioenergia torna-se de grande importância. Foram estudadas três espécies de acácia: A.

---

*melanoxylon*, *A. pycnantha* e *A. dealbata*; o eucalipto foi utilizado como espécie de referência. A *A. pycnantha* obteve resultados satisfatórios na produção de biomassa, mesmo na ausência de rega, concluindo-se que pode ser uma espécie em competição com o eucalipto, apresentando elevado potencial de produção de biomassa para energia. Por outro lado, a acácia-mimososa (*A. dealbata*) apresentou baixo crescimento, baixa sobrevivência e fraca produção de biomassa, desfecho surpreendente tendo em consideração o forte carácter invasivo da espécie nos ecossistemas portugueses.

### **2.3.5. Vantagens e desvantagens das culturas energéticas**

A aposta nas culturas energéticas para produção de bioenergia é uma questão polémica. Recentemente, Camarsa *et al.* (2015) e Laurent *et al.* (2015) esclarecem que o cultivo de algumas plantas dedicadas à produção de biocombustíveis acarreta impactos negativos sobre o meio ambiente, nomeadamente no que toca às emissões de gases de efeito estufa. Como exemplo, os autores supra citados e a International Energy Agency (2007) identificam as culturas de milho e colza que, requerendo a utilização de fertilizantes nitrogenados, geram emissões de N<sub>2</sub>O, gás com efeito de estufa e um potencial de aquecimento global cerca de 300 vezes superior ao CO<sub>2</sub>. Outra questão é a competição por terras entre culturas energéticas e culturas cultivadas para alimentação humana e animal que têm implicações na segurança alimentar e que poderão ter originado o aumento do preço das principais culturas alimentares em 2007/2008. Por fim, alertam e vão de encontro à opinião de European Environmental Agency (2013b) no respeitante às mudanças no uso da terra (por exemplo, a conversão de florestas ou pastagens em terras agrícolas,) e na diminuição da biodiversidade e fertilidade do solo e aumento das emissões de CO<sub>2</sub> em que se traduz. Estudos revelam que a transição em terrenos de cultivo para a produção de bioenergia irá causar uma diminuição de 85% na biodiversidade até 2020 (European Environmental Agency, 2013b).

Outro impacto negativo prende-se com o facto de uma grande quantidade de culturas energéticas implicar altas exigências hídricas, conduzindo ao aumento da procura de água, quer a partir de irrigação ou por fontes naturais (Allen *et al.*, 2014).

Entre as culturas convencionais anuais, as de cereais (centeio e cevada) e girassóis têm habitualmente um melhor perfil ambiental. Às culturas de trigo, milho, batata, beterraba e à colza é-lhes atribuída a responsabilidade de um maior impacto

ambiental negativo. Assim, é habitual que culturas com o propósito de produção de biocombustíveis na maioria das regiões, apresentem elevada necessidade de nutrientes variando de acordo com os países e as respetivas práticas agrícolas (European Environmental Agency, 2013b).

Em meados de 2013, os países com maiores impactos ambientais no cultivo de biomassa para a produção de energia eram a Alemanha e França, onde a sua produção e respetiva área apresentou um descomedido aumento nos últimos 10 anos. Na UE a produção de colza aumentou em 93% entre 2000 e 2009 de acordo com o Eurostat. Os principais países a contribuir para esse aumento foram a Alemanha, Roménia, Hungria, todos os países bálticos, Polónia, Eslováquia, Irlanda e Suécia” (European Environmental Agency, 2013b).

Entretanto, Sims *et al.* (2006) afirmaram que as emissões líquidas de carbono provenientes da geração de uma unidade de bioenergia são entre 10 a 20 vezes mais baixas que as emissões de geração a partir de combustíveis fósseis. Além disso, a energia fóssil consumida na produção de condutores bioenergéticos constitui uma pequena fração da produção total de energia. O rácio (saída/entrada) de energia na maioria das culturas energéticas anuais, como milho e trigo, varia entre 2 e 18, contrastando com o que se verifica em espécies perenes, como miscanthus ou cana-de-açúcar, em que o rácio é de 30 e 50 respetivamente (Nassi *et al.*, 2010).

Outra vantagem passa pela melhoria das paisagens e possibilidade de novos habitats de vida selvagem (International Energy Agency, 2007). A despovoação, o aumento de emprego nas zonas rurais e a possibilidade de uma renda adicional para os agricultores tornam a introdução de culturas energéticas não-alimentares desejáveis (Ferreira *et al.*, 2009; Nassi *et al.*, 2010).

## **2.4. Culturas energéticas lignocelulósicas**

A biomassa lignocelulósica é a biomassa vegetal proveniente de resíduos agrícolas ou culturas energéticas lenhosas, constituída por polímeros de celulose, hemicelulose e lignina.

Embora em meados de 2011, a área de cultivo que visava a produção de bioenergia fosse pouco significativa, o seu potencial futuro com culturas energéticas lenhosas pode tornar-se considerável por diversas razões:

- Ainda que os resíduos lignocelulósicos provenientes de setores florestais sejam uma opção prioritária devido ao baixo custo na geração de calor e energia em diversas tecnologias de conversão, as culturas energéticas lignocelulósicas garantem a disponibilidade de biomassa local o ano todo;
- Desde madeira, a resíduos secos e celulósicos, a biomassa lignocelulósica é uma matéria-prima na produção de biocombustíveis de segunda geração e dentro dos próximos 10 anos espera-se que estes tipos de tecnologias se tornem mais económicas, promovendo a sua potencialidade comercial;
- Culturas lignocelulósicas apresentam geralmente maior eficiência na mitigação dos GEE que as culturas arvenses rotacionais, pois exigem menores requisitos de entrada apresentando maior rendimento energético por hectare. A maioria das culturas lignocelulósicas necessita de inferiores condições de qualidade do solo em comparação com as culturas arvenses de rotação, obtendo rendimentos aceitáveis mesmo em terras de baixa produtividade (Panoutsou *et al.*, 2011).

#### **2.4.1. Choupo**

O choupo (género *populus*) é uma árvore de tronco caracteristicamente alto e direito, folha caduca e pode atingir cerca de 30 metros de altura. O seu habitat natural é em solos húmidos, férteis e profundos, próximo das margens de cursos de água, sendo oriundo de regiões de clima temperado e frio do Hemisfério Norte (Santos, 2009; Intelligent Energy Europe, 2009).

Ainda que tolerante a uma ampla gama de condições de solo, o choupo é pouco tolerante a altos teores de metais pesados no solo, solos mal drenados, adequando-se melhor ao clima mediterrânico, pela sua grande sensibilidade a geadas (Venendaal *et al.*, 1997; Intelligent Energy Europe, 2009).

É apontado por alguns autores como uma das culturas energéticas lenhosas de curta rotação mais promissoras em clima temperado devido ao seu elevado rendimento, rápido crescimento, técnicas de sequenciamento de genoma e da transformação disponível, que possibilitam uma melhoria mais rápida das suas características hereditárias e interesse ecológico em termos de baixas exigências de entrada e manutenção da biodiversidade (Nassi *et al.*, 2010; Venendaal *et al.*, 1997; Yuan *et al.*, 2008). Cultivado como plantaço

de curta rotação, com colheitas em intervalos muito curtos (1-5 anos), as produções biomássicas obtidas são muito variáveis (Nassi *et al.*, 2010).

### **Estudos de produtividade do choupo**

Na Alemanha, na década de 90, o choupo foi testado em diferentes tipos de solo, concluindo-se que o seu cultivo era mais adequado em terras agrícolas antigas do que em terras outrora florestadas. Foram registados rendimentos na primeira rotação entre 3 e 30 t/ (há × ano) de matéria seca, com uma média esperada entre 10 a 15 t/ (há × ano). Em Itália, dois clones de choupo sob irrigação obtiveram rendimentos superiores, com valores entre 15 e 20 t/ (há × ano) de matéria seca (Venendaal *et al.*, 1997).

Em 1999, uma média de produção de 8 t/ (há × ano) de matéria seca em solos férteis do Norte e Centro da Europa foram registados para CLCR. No entanto, para as mesmas regiões, valores superiores entre 10 e 15 t/ (há × ano) foram registados para cultivo intensivo e em excelentes condições de gestão. O valor de produção de 10 t/ (há × ano) é indicado como o valor padrão em cultivo intensivo para que o produtor consiga obter um retorno admissível (Patrício *et al.*, 2013).

Em 2010, no sul da Europa diferentes intervalos de colheita (1, 2 e 3 anos) da CLCR de choupo, foram avaliados num ciclo de produção de 12 anos. Foi registada uma elevada eficiência energética, tendo sido o intervalo de colheita de 3 anos o mais rentável, com menores exigências de entrada incluindo menores consumos de energia não renovável. Foi concluído que CLCR de choupo com um ciclo de produção de 12 anos e um ciclo de corte de 3 anos pode contribuir para a sustentabilidade agronómica e ambiental devido ao seu alto rendimento, eficiência energética e influência positiva sobre a fertilidade do solo e sobre o meio ambiente, dada a baixa necessidade de nutrientes e de pesticidas (Nassi *et al.*, 2010).

Outros investigadores têm revelado balanços energéticos positivos em que os rácios energéticos (*output/input*) de CLCR do choupo variam entre 20 e 55, dependendo das condições de crescimento e dos *inputs* e tendo em conta fronteiras para o sistema (Nassi *et al.*, 2010).

### **2.4.2. Eucalipto**

O eucalipto (género *eucalyptus*) é originário da Austrália e é uma espécie de folhosas com troncos apurados e esguios (45 a 60 metros de altura), de rápido

crescimento, elevada produção, elevada absorção de água e nutrientes do solo. Apresenta uma alta tolerância a ambientes adversos sendo facilmente adaptável a secas, fogos, resistência a insetos, tolerância à acidez e baixa fertilidade do solo. Contudo, não é tolerante a longos períodos de geada e requer uma quantidade mínima de água, obtendo maiores rendimentos em solos com abundância hídrica, não compactos e com elevado teor de cálcio. Por conseguinte, em Portugal os eucaliptais são abundantes na zona litoral, principalmente na região centro (Lima *et al.*, 1998; Rockwood *et al.*, 2008).

Particularmente na sua cultura intensiva, diversos são os impactos negativos do eucalipto nos recursos hídricos, solo e biodiversidade. Eucaliptais industriais substituem as espécies nativas e esta competição de uso do solo origina uma elevada probabilidade de serem eliminados habitats de espécies raras e ameaçadas em prol do cultivo do eucalipto (Albuquerque, 2009). No que concerne à absorção da água dos solos por parte do eucalipto, esta depende do volume pluviométrico da região de cultivo: em casos de reduzida precipitação, o eucalipto recorre à água armazenada nas camadas superficiais do solo. No entanto, vários estudos indicam que o eucalipto é uma das espécies com maior eficiência de produção de biomassa visto que, por litro de água consumido, produz maior quantidade de biomassa que outras culturas (Vital, 2007). Relativamente ao impacto no solo, o eucalipto devolve ao solo quase tudo o que dele absorve. Após a colheita, permanecem no local as cascas e folhas que contêm cerca de 70% dos nutrientes totais da planta e se incorporam no solo como matéria orgânica. Além da reposição de nutrientes, verificam-se outros efeitos benéficos sobre diversas propriedades do solo, como capacidade de armazenamento de água, drenagem e aeração (Conselho de Informações sobre Biotecnologia, 2008; Vital, 2007).

### **Estudos de produção do eucalipto**

Contrariamente a outras espécies florestais, o eucalipto apresenta uma rápida capacidade de produção biomássica ao longo de todo o ano, no entanto, existe a possibilidade de diminuição do seu crescimento no Inverno (Santos, 2009).

Ainda que o seu cultivo origine impactos negativos, nos últimos anos tem sido vista como uma espécie de potencial produto energético, sendo cultivada como cultura lenhosa de curta rotação de forma a maximizar a sua produtividade. O seu cultivo tem-se intensificado nos últimos anos, nomeadamente em países tropicais nos quais rotações tao

curtas quanto 5 anos originaram rendimentos tão elevados como 70 m<sup>3</sup>/ha/ano (Rockwood *et al.*, 2008).

Também em regiões de clima mediterrânico, como Portugal, o eucalipto, nomeadamente o *Eucalyptus globulus* é a espécie que mais interesse tem suscitado devido aos diferentes benefícios que acarreta o seu cultivo, ocupando em 2010 uma área que correspondia a 26% da área florestal do país. Ainda que em Portugal seja maioritariamente usado como matéria-prima de pasta de papel, o seu elevado rendimento anual pode ser decisivo para o sector energético. (Pinto *et al.*, 2013; Santos 2009).

Registaram-se distintas produções de biomassa no território nacional. A diferença deve-se à pluviosidade anual que a cada 100mm adicionais aumenta a produtividade em cerca de 0,9 t/ (há × ano). Foi registada uma produtividade de 17,6 t/ (há × ano), 9,5 t/ (há × ano) e 6,1 t/ (há × ano) na região Norte Litoral, Centro Litoral e Região Vale do Tejo, respetivamente (Santos, 2009).

No instituto superior de agronomia de Lisboa, estacas enraizadas de eucalipto foram usadas como espécies de referência para um estudo de avaliação de produtividade biomássica. O eucalipto foi apontado como a segunda espécie com maior produção, alcançando rendimentos de apenas 1 e 3,5 t/ha após 1 e 2 anos de cultivo sob irrigação, sendo que, em condições de ausência hídrica, a espécie não sobreviveu após o primeiro ano. Os rendimentos foram provavelmente reduzidos devido ao alto PH do solo e presença de carbonato de cálcio ativo no solo (Carneiro *et al.*, 2014).

Alguns autores mencionam rendimentos de 7,5 t/ (há × ano) de matéria seca, no entanto, são referidas produções superiores de 11 a 14 t/ (há × ano) de matéria seca em culturas de rotação de três anos e 20 odt/ (há × ano) em culturas de rotação de dois anos na Grécia (Santos, 2009; Venendaal *et al.*, 1997). Apesar do Conselho de Informações sobre Biotecnologia (2008) afirmar que o eucalipto não necessita de grandes quantidades de produtos químicos no seu desenvolvimento, sendo suficiente a ação de organismos vivos no controlo de pragas e o uso de medidas de manipulação integradas, são vários os fatores que afetam a produtividade do eucalipto, como as condições hídricas, as condições de fertilização e o tempo dos ciclos de rotação (Venendaal *et al.*, 1997).

### 2.4.3. Acácias

A acácia é oriunda das zonas subtropicais e tropicais da Austrália, África, Ásia e América. Com cerca de 500 exemplares de espécies, as folhas da acácia podem ser compostas ou filodiada e com flores amarelas (Folha Viva, 2004).

As acácias são, na sua maioria, espécies resistentes ao frio e apresentam grande adaptabilidade a solos calcários. Introduzida em Portugal com fins ornamentais e posteriormente utilizada como espécie florestal de auxílio na fixação do solo, algumas espécies de acácia rapidamente se tornaram subespontâneas e, actualmente, algumas detêm o estatuto de invasoras (Fernandes *et al.* 2013; Folha Viva, 2004).

A acácia-mimososa (*A. dealbata*) é presumivelmente a espécie invasora mais agressiva no território nacional estando presente em todas as regiões do país com maior ocupação nos terrenos frescos, como vales e margens de cursos de água. A sua expansão ocorre particularmente após a ocorrência de incêndios florestais e/ou perturbações no solo, visto que a sua germinação é beneficiada por estes acontecimentos (Albuquerque, 2009; Carneiro *et al.*, 2014).

Uma espécie é considerada invasora quando tem a capacidade de originar populações reprodutoras em elevado número, afastadas da planta primitiva e a um ritmo elevado, independentemente das perturbações que possam ocorrer no meio que as rodeia, apresentando grande adaptabilidade ao stress. No caso destas espécies, a sua expansão não está ao alcance do domínio do homem e, ao formarem densos povoamentos, dificultam o crescimento da vegetação nativa, eliminando espécies já existentes na área envolvente. Para além da diminuição da biodiversidade, a acácia-mimososa é responsável pelo aumento da erosão do solo e diminuição do fluxo dos cursos de água. Assim, a introdução da espécie está proibida no território nacional de acordo com a legislação portuguesa (Albuquerque 2009; Marchante *et al.*, 2014; Carneiro *et al.*, 2014).

O controlo de espécies invasoras pode ser realizado com recurso a meios químicos (aplicação de herbicidas), após a aplicação dos meios mecânicos (corte da planta rente ao solo). Ainda que a técnica de controlo cause efeitos prejudiciais aos ecossistemas, é considerada uma estratégia eficiente a aplicar na flora que se pretende eliminar, nomeadamente na acácia-mimososa (Albuquerque 2009; Fernandes *et al.*, 2013).

### **Estudos de produção da acácia**

Foi realizado um estudo em Portugal para avaliação de espécies lenhosas, bem adaptadas às secas do Verão, como potenciais culturas energéticas, tendo sido analisadas três espécies de acácias: *A. melanoxylon*, *A. pycnantha* e *A. dealbata*. A espécie que apresentou maior produção de biomassa foi a *A. pycnantha*. A acácia-mimososa apresentou baixo crescimento, baixa sobrevivência e reduzida produção de biomassa mesmo sob condições de irrigação. Os resultados foram inesperados tendo em consideração o forte carácter invasivo da acácia-mimososa nos ecossistemas portugueses, ainda que alguns fatores significativos, como relações simbióticas com bactérias fixadoras de nitrogénio, não tenham sido considerados, influenciando presumivelmente a baixa produção de biomassa verificada. Os resultados sugerem também que a capacidade de crescimento desta espécie invasora esteja parcialmente relacionada com a germinação facilitada pela passagem de um fogo e/ou perturbações no solo, bem como pelo armazenamento de quantidades significativas de sementes no solo a longo prazo, condições que não se verificaram no estudo (Carneiro *et al.*, 2014).

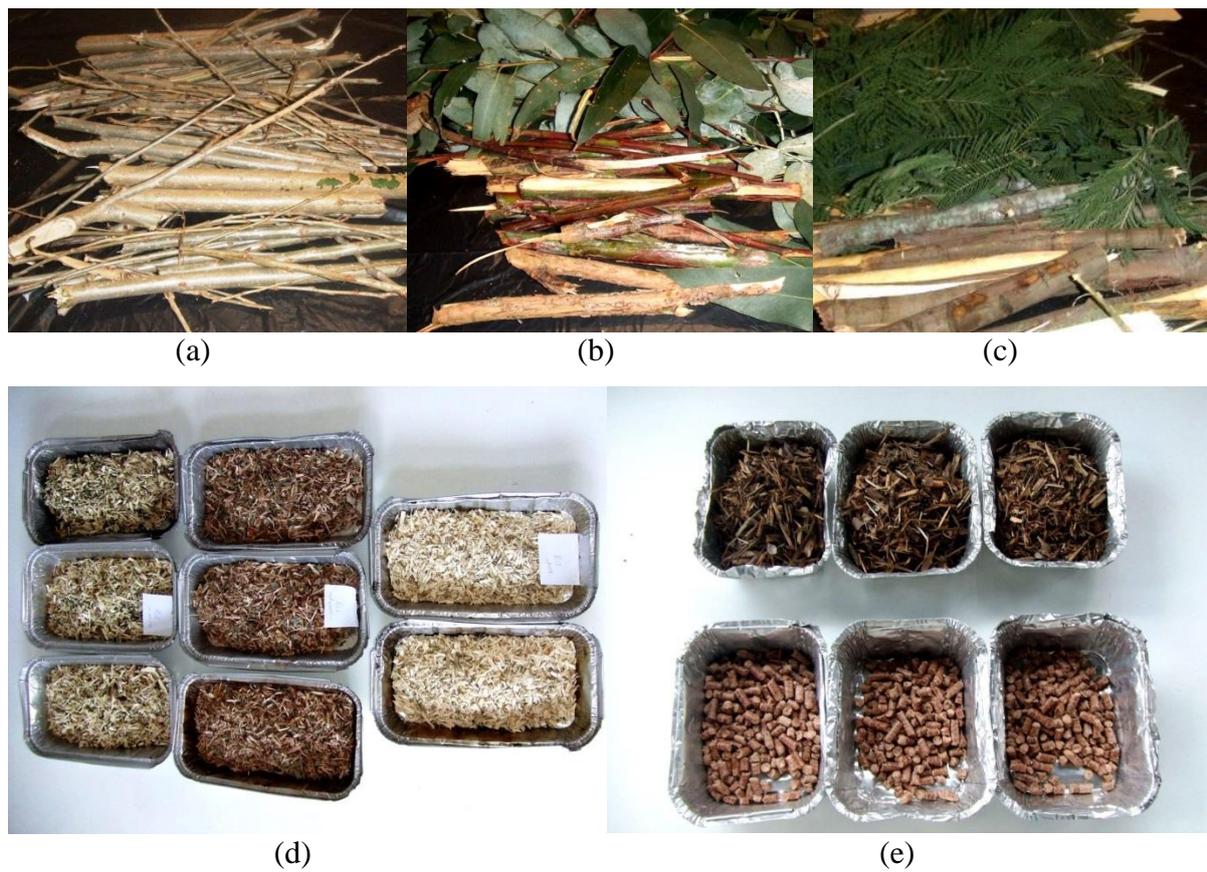
### 3. MATERIAIS E METODOS

#### 3.1. Amostragem

No âmbito de estudo, foram usados dois grupos de amostras (Figura 3.1). O primeiro grupo é constituído por amostras de referência, nomeadamente *pellets* (de uso doméstico) e biomassa florestal residual. A sua seleção deve-se ao facto de serem considerados como a fonte de biomassa mais usada para produção de bioenergia em escalas doméstica (*pellets*) e industrial (biomassa residual). Os *pellets* foram recolhidos de um saco comercial (15kg) enquanto a biomassa florestal residual, resultante de exploração florestal em eucaliptal (*Eucalyptus globulus*), foi colhida de um parque de recolha de biomassa em Penela.

O segundo grupo de amostras é representado por espécies potencialmente cultivadas para produção de energia: choupo (*Populus alba*), eucalipto (*Eucalyptus globulus*) e acácia (*Acacia dealbata*). As amostras foram recolhidas em março e colocadas ao ar livre durante um mês visando a perda de humidade. Após a secagem, as amostras foram trituradas numa trituradora laboratorial (Retsch-Mühle) usando a grelha de 1cm.

As amostras de *pellets* e choupo representam a biomassa lenhosa de melhor qualidade comparativamente com as amostras de biomassa florestal residual, de eucalipto e da acácia devido a ausência de resíduos de folhagem. Os *pellets* de uso doméstico são fabricados a partir de biomassa lenhosa de alta qualidade (em Portugal, madeira de *Pinus pinaster*) enquanto o choupo, espécie de folha caduca, foi recolhido na ausência de resíduos de folhagem sendo apenas constituído por biomassa lenhosa.



**Figura 3.1:** Amostras recolhidas de choupo (a), eucalipto (b) e acácia (c); Amostras trituradas para combustão de choupo, eucalipto e acácia (d), *pellets* e biomassa residual (e)

Antes da realização dos testes, foi identificado o teor de humidade (%) das amostras. De cada uma das espécies amostrada, 50 gramas foram colocadas na estufa durante 24h a 105°C.

O teor de humidade em base seca ( $M_{b.s.}$ ) expressa a massa de água presente em relação à massa da madeira seca e é calculado com base na equação (Francescato *et al.*, 2009):

$$M_{b.s.} = \frac{m_i - m_f}{m_f} \times 100\% \quad (3.1)$$

O teor de humidade em base húmida ( $M_{b.h.}$ ) expressa a massa de água presente em relação à massa de madeira húmida. Esta medida é geralmente utilizada na comercialização de combustíveis de madeira. É calculado pela expressão (Francescato *et al.*, 2009):

$$M_{b.h.} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100\% \quad (3.2)$$

Ambas as equações têm em conta os valores da massa inicial ( $m_i$ ) e massa final ( $m_f$ ) da amostra e na Tabela 3.1 são apresentados os resultados do teor de humidade em base seca e base húmida das amostras de acácia, eucalipto e choupo.

**Tabela 3.1:** Teor de humidade (%) das três espécies em estudo

<b>Amostras</b>	<b><math>M_{b.s.}</math></b>	<b><math>M_{b.h.}</math></b>
Acácia	13.83	12.15
Eucalipto	27.24	21.41
Choupo	13.91	12.21

Apesar de ter sido aplicado o mesmo procedimento na preparação das amostras, verificaram-se diferentes teores de humidade para as espécies estudadas, o que se deve à forma como espécies diferentes reagem à secagem. Apurou-se que o valor de teor de humidade em base seca mais elevado corresponde ao eucalipto, com um valor de 27,24%, praticamente o dobro do teor de humidade do choupo e acácia que apresentaram valores semelhantes entre si, 13,91% e 13,83% respetivamente.

### 3.2. Testes no calorímetro cónico

Os testes de inflamabilidade no calorímetro cónico foram realizados de acordo com a norma ISO 5660-1. Este teste visa a determinação da variação da massa de diferentes amostras de biomassa ao longo da combustão, verificando igualmente o tempo que demora a iniciar-se a ignição. O calorímetro cónico utilizado é composto por uma resistência elétrica posicionada debaixo de um cone metálico que fornece calor à amostra durante o ensaio, sendo o fluxo de calor de aproximadamente 16 KW/m<sup>2</sup>. O suporte para a amostra encontra-se conetado a uma balança eletrónica com resolução de 0,01gramas que regista os dados a cada 0,38 segundos e os exporta para suporte informático. Para facilitar a ignição da amostra recorreu-se a uma chama-piloto e o tempo de ignição foi medido

manualmente, com recurso a um cronómetro, tendo a contagem sido iniciada aquando a aproximação da chama-piloto.

### **3.3. Determinação da quantidade e composição química das cinzas**

A análise qualitativa da composição química das cinzas (metais) foi realizada apenas para as amostras de *pellets* e biomassa residual florestal de eucalipto. O procedimento foi realizado no Departamento de Física da Universidade de Coimbra com recurso à fluorescente-X-ray analisador SEA6000VX. Os testes foram realizados com duas voltagens (15KV e 50KV), uma vez que nem todos os elementos químicos presentes nas cinzas seriam identificáveis num baixo nível de radiação.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Resultados dos testes no calorímetro cônico

#### 4.1.1. Taxa de perda de massa

Para cada variedade de amostra foram realizadas três réplicas do ensaio, de modo a garantir a validade dos resultados, com exceção da amostra do choupo que contou com apenas dois ensaios devido à falta de material. Em todos os ensaios as amostras dos cinco tipos de biomassa continham 50 gramas. Os *pellets* e a biomassa residual florestal eram de granulometria  $3 < d \leq 6\text{mm}$ , sendo  $d$  o diâmetro de partícula. Os gráficos representativos dos resultados obtidos expõem uma massa inicial entre 190 e 200 g dado que o peso do suporte das amostras foi tido em conta.

Os tempos de ignição registados nos ensaios do calorímetro cônico para as amostras de *pellets*, biomassa residual, eucalipto, acácia e choupo são indicados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1:** Tempos de ignição

Amostra	Tempo ignição [seg]	Tempo médio ignição [seg]
<i>Pellets</i>	98,73	100,05
	101,05	
	100,36	
Biomassa residual florestal (eucalipto)	23,02	23,19
	23,78	
	22,76	
Eucalipto	24,95	24,34
	23,75	
	24,31	
Acácia	26,7	26,33
	23,88	
	28,41	
Choupo	22,65	22,56
	22,47	

Os *pellets* iniciaram a sua ignição consideravelmente mais tarde do que as restantes amostras. Na análise dos valores apresentados na Tabela 4.1 é necessário ter em

conta os valores de humidade (Tabela 3.1) que foram mais elevados para as amostras de eucalipto (27.24%) comparativamente com as amostras de choupo e acácia. Assim sendo, assume-se que, caso as três espécies apresentassem valores semelhantes de teor de humidade, o tempo de ignição para as amostras de eucalipto seria consideravelmente inferior aos tempos de ignição do choupo e acácia.

Os gráficos da Figura 4.1 apresentam as curvas de perda de massa das amostras de biomassa residual florestal de eucalipto e *pellets* (a), eucalipto, acácia e choupo (b).

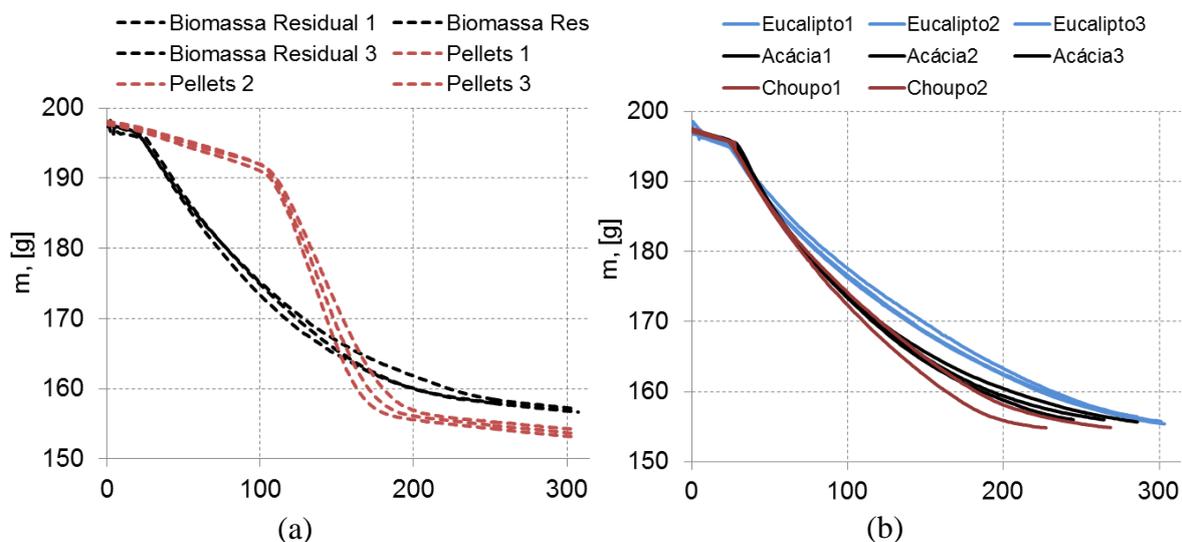
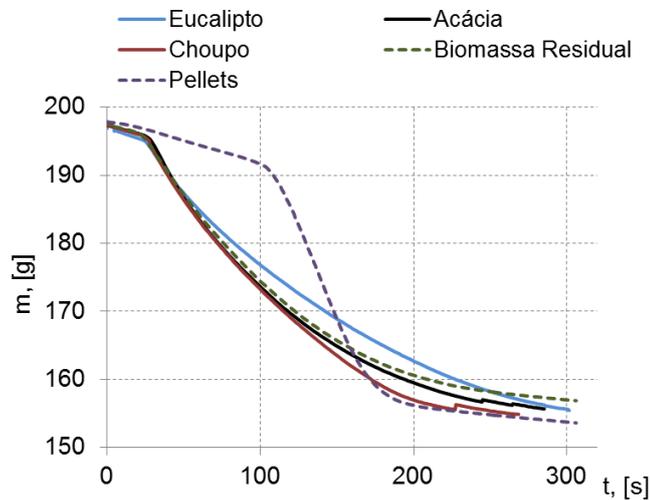


Figura 4.1: Evolução das curvas de perda de massa

No que concerne ao gráfico (a), a fase inicial de combustão, correspondente à secagem, é curta para as amostras de biomassa residual florestal de eucalipto e notavelmente mais prolongada para as amostras de *pellets*. Após a ignição, aos 23 segundos na biomassa residual florestal, inicia-se uma perda de massa acentuada até ao final da combustão em chama. Já nas amostras de *pellets*, após a ignição ao 100º segundo, a curva de perda de massa apresenta um declive muito acentuado e a fase de combustão em chama finaliza-se com menor valor de massa comparativamente às amostras de biomassa residual. De acordo com os resultados do gráfico (b), as três amostras em estudo demonstram um comportamento idêntico na fase inicial da combustão, contudo, verifica-se uma perda de massa ligeiramente mais acentuada nas amostras de choupo e acácia. Após a extinção da chama, as três espécies apresentam semelhantes valores de massa.

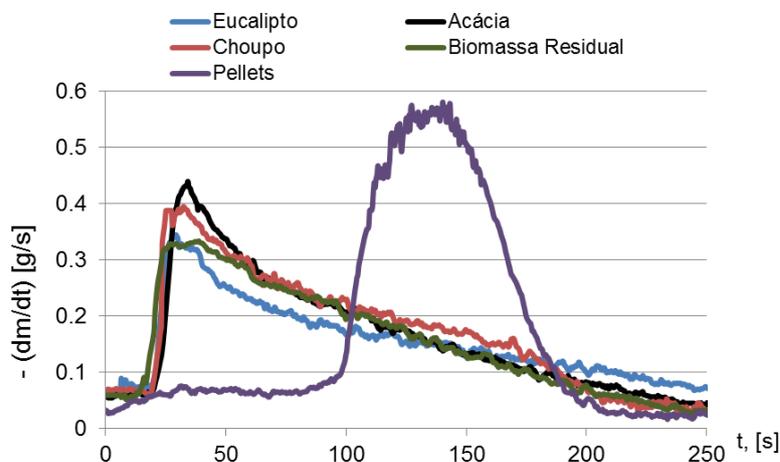
O gráfico da Figura 4.2 apresenta as curvas de perda de massa (valores médios) das amostras de eucalipto, acácia, choupo, biomassa residual florestal e *pellets*.



**Figura 4.2:** Evolução das curvas de perda de massa (valores médios) ao longo da combustão

Os *pellets* apresentam diferente comportamento comparativamente às restantes amostras: têm uma fase de secagem consideravelmente mais longa e, por conseguinte, um tempo de ignição mais demorado devido à sua elevada densidade, prolongando a fase de evaporação de água e iniciando a significativa perda de massa mais tarde e de forma repentina. Relativamente ao fim do processo de combustão, a acácia e o choupo apresentam menor duração do ensaio.

O gráfico da Figura 4.3 apresenta os valores médios da taxa de variação de massa ao longo da combustão para as cinco amostras em estudo.



**Figura 4.3:** Taxa de variação de massa (média) ao longo da combustão

A amostra de *pellets* atinge o pico da taxa de variação de massa após uma longa fase de secagem. As restantes amostras, com fases de secagem mais curtas, atingem o pico da taxa de variação de massa mais cedo. O pico da amostra de *pellets* é o mais acentuado, o que corresponde a uma intensa libertação de calor. A acácia é a amostra com o segundo maior valor do pico. Após alcançarem o valor máximo da taxa de variação de massa, as amostras de choupo, eucalipto, acácia e biomassa residual apresentam uma perda de massa mais lenta, o que pode corresponder a uma libertação de calor mais uniforme e menos intensa.

#### 4.1.2. Taxa de libertação de calor e energia total libertada

Com os valores das taxas de perda de massa ( $\dot{m}$ ) verificadas nos testes de calorímetro cónico, e PCI calculados através dos dados retirados de bibliografia, obtém-se a taxa de libertação de calor (HRR – *Heat Release Rate*) das amostras em estudo de acordo com a seguinte equação (Bryant e Mulholland, 2008):

$$HRR = \dot{m} \times PCI \quad (4.1)$$

A taxa de libertação de calor representa o calor libertado por unidade de tempo. Os valores do PCI [J/g] foram calculados com base na equação (4.2 (CEN/TS 14918, 2005) tendo em conta o valor do PCS [J/g], a humidade da amostra em base seca ( $M$ ) e o teor de H, O e N em base seca mássica:  $w(H)_s$ ,  $w(O)_s$ , e  $w(N)_s$ .

$$PCI = [PCS - 212,2 * w(H)_s - 0,8(w(O)_s + w(N)_s)] * (1 - 0,01 * M) - 24,43 * M \quad (4.2)$$

A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros anteriormente mencionados para as amostras de biomassa residual florestal de eucalipto, *pellets*, eucalipto, acácia e choupo que permitiram o cálculo do PCI:

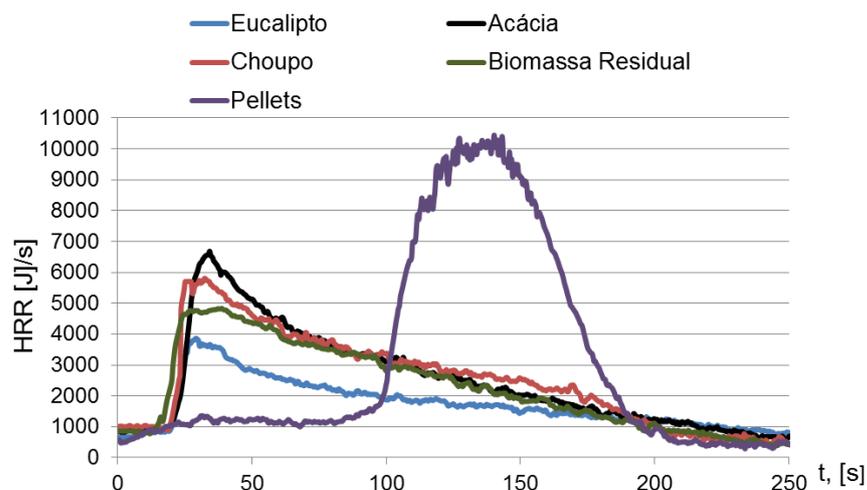
**Tabela 4.2:** Dados para o cálculo do valor do PCI

Amostra	PCS <sub>b,s</sub> [MJ/kg]	w(H) <sub>s</sub> (%)	w(O) <sub>s</sub> (%)	w(N) <sub>s</sub> (%)	M <sub>b,s</sub> (%)	PCI (MJ/kg)
Biomassa residual (eucalipto)	17.6 *	5.8*	47.2*	0.2*	9,69	14.51
Pellets	--	--	--	--	--	18***
Eucalipto	17.6*	5.8*	47.2*	0.2*	27.24	11.21
Acácia	19.3**	5.7*	46.2*	0.2*	13.83	15.21
Choupo	18.8*	6.0*	45.4*	0.2*	13.91	14.71

Fonte: \* Telmo *et al.* (2010); \*\* UTAD; \*\*\* (Knoef, 2005)

Para os valores do choupo, foram assumidos os valores apresentados para *Populus euro-americana*, e os valores da acácia de  $w(H)_s$ ,  $w(O)_s$ , e  $w(N)_s$  correspondem aos valores de espécies de “*hardwood* nacional”. Para o cálculo do PCI foram adaptados os valores de PCS da madeira das respectivas espécies, pelo que não ficou reflectida a presença de folhagem nas amostras de biomassa residual, eucalipto e acácia (Telmo *et al.* 2010). No caso do eucalipto, a presença de folhagem rica em extractivos pode eventualmente aumentar o valor do poder calorífico.

Obtido o valor do PCI para cada espécie, é possível verificar a taxa de libertação de calor de cada amostra a partir do gráfico da Figura 4.4.



**Figura 4.4:** Taxa de libertação de calor

De acordo com a equação (4.1), o gráfico tem um aspeto similar às curvas de taxa de perda de massa. O pico de HRR está relacionado com o pico de taxa de perda de massa, e a diferença no posicionamento das curvas de HRR comparativamente às curvas de perda de massa para as várias amostras pode ser ainda mais acentuada devido aos valores do PCI.

Relativamente à energia total libertada, foi calculada a partir da seguinte expressão:

$$Q[J] = \int_0^t \left[ \frac{-dm}{dt} * PCI \right] dt = \Delta m * PCI = (m_i - m_f) * PCI \quad (4.3)$$

A Tabela 4.3 indica os valores do PCI, a variação de massa ( $-\Delta m$ ) e os valores da energia total libertada calculada com base na equação (4.3) por kg de amostra (Q [MJ/kg]).

**Tabela 4.3:** Energia total libertada

Amostra	PCI [MJ/kg]	$-\Delta m$ [kg]	Q [MJ/kg]
Biomassa residual (eucalipto)	14.51	0.0408	11.85
<i>Pellets</i>	18	0.0444	15.97
Eucalipto	11.21	0.0411	9.21
Acácia	15.21	0.0415	12.61
Choupo	14.71	0.0424	12.47

O maior valor de energia total libertada verificou-se para a amostra de *pellets* (15.97 MJ/kg) e o menor para amostra de eucalipto (9.21 MJ/kg). Os valores da Tabela 4.3 confirmam a influência da densificação da biomassa e do teor de humidades na quantidade de energia total libertada. Quanto maior a densidade da biomassa (amostras de *pellets*), maior a energia libertada. Relativamente ao teor de humidade, quanto maior o seu valor (amostra de eucalipto), menor a energia libertada no decorrer da combustão.

## 4.2. Resultados dos testes de determinação da quantidade e composição química das cinzas

A quantidade e qualidade de cinza resultante da combustão de biomassa lignocelulósica são bastante variáveis e dependem de vários fatores tais como: tipo de biomassa (espécie, composição, idade da planta), processos e condições de crescimento (uso de fertilizantes e pesticidas, tempo e técnica de colheita e tipo de solo), fração de biomassa queimada (casca, folhas, madeira), pré-tratamento aplicado, processo de combustão (tecnologia de combustão e temperatura de combustão) (Horta *et al.* 2010; Vassilev *et al.* 2013a).

Após os ensaios no calorímetro cônico, a massa final das amostras representa maioritariamente a quantidade de resíduos resultantes da combustão, cujos valores são os apresentados na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4:** Massa final das amostras em estudo após a combustão

<b>Amostra</b>	Eucalipto	Acácia	Choupo	<i>Pellets</i>	Biomassa residual
<b>m<sub>f</sub> (g)</b>	8.94	8.55	7.61	5.62	9.17

Os resultados obtidos vão de encontro ao valores das referências bibliográficas apresentados anteriormente na Tabela 2.1. Verificou-se que a presença de material lenhoso de boa qualidade e/ou material residual (folhagem, bicada e ramos), influencia a quantidade de cinzas. Menor quantidade de cinza corresponde à amostra de *pellets*, produzidos a partir de lascas de madeira e/ou serrim de madeira. Ao invés, maior quantidade de cinza corresponde às espécies folhosas que contêm elevada presença de resíduos como folhagem, ramos e bicada (tal como a amostra de biomassa residual florestal de eucalipto), pelo que o seu teor químico terá uma elevada quantidade de elementos formadores de cinzas, como será verificado posteriormente.

Devido à impossibilidade de identificar e quantificar a composição química das amostras em estudo, a sua estimativa foi feita com base no estudo de Telmo *et al.* (2010), tendo sido adaptados os valores para espécies coníferas e folhosas, em geral, e *Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*, em particular. A Tabela 4.5 apresenta os valores da composição química das espécies referidas e a quantidade de cinzas resultantes da sua combustão. O conhecimento da composição química da biomassa utilizada no processo de

combustão é de grande importância, uma vez que determina a composição química de cinzas.

**Tabela 4.5:** Composição química (mg/kg base seca) e teor de cinzas (% de peso em base seca) de espécies folhosas e coníferas, *Pinus Pinaster* e *Eucalyptus globulus*

	<b>Na</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>Fe</b>	<b>P</b>	<b>Cinzas (%)</b>		
<b>Espécies coníferas</b>	63.67	600.67	55.33	30.67	30.67	27.40	0.3		
<i>Pinus pinaster</i>	98.5	492	1	58.5	49	5.7	0.2		
<b>Espécies folhosas</b>	166.89	2418.83	539.39	42.17	46.61	432.18	0.6		
<i>Eucalyptus globulus</i>	19.5	3100	106.5	83.5	53	1285.6	0.5		
	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>F</b>	<b>Cl</b>	<b>Br</b>
<b>Espécies coníferas</b>	45.83	21.5	1.4	0.55	0.01	0.44	0.53	27.93	0.03
<i>Pinus pinaster</i>	72	31	1.52	0.46	0.003	0.29	0.9	23	0
<b>Espécies folhosas</b>	66.5	39.4	0.95	0.46	0.04	0.49	1.14	39.68	0
<i>Eucalyptus globulus</i>	34.5	80	0.32	0.616	0.016	0.44	0.9	11.7	0

Adaptado: Telmo *et al.* (2010)

A madeira das espécies folhosas apresenta maiores concentrações de Mn, Zn e Cu e dos principais elementos formadores de cinzas Na, K, Ca, Mg, Fe e P, dando origem a uma quantidade superior de cinzas comparativamente às espécies coníferas.

Para a mesma espécie, a qualidade do combustível, nomeadamente a quantidade de material lenhoso, é determinante para o conteúdo químico das cinzas. A Tabela 4.6 apresenta a relação entre os principais elementos químicos formadores de cinzas presentes no biocombustível e nas cinzas resultantes da combustão a 550°C para espécies coníferas.

**Tabela 4.6:** Gama de concentração dos principais elementos formadores de cinzas presentes no biocombustível (a) e nas cinzas (b) para espécies coníferas

<b>Elementos presentes no biocombustível [mg/kg] (bs)</b>	<b>Estilha (<i>woodchips</i>)</b>	<b>Casca (abeto)</b>
Silício (Si)	440-2900	2000– 11000
Cálcio (Ca)	2900-7000	7700-18000
Magnésio (Mg)	310-800	960-2400
Potássio (K)	910-1500	1500-3600
Sódio (Na)	20-110	71-530
Fósforo (P)	97-340	380-670

(a)

<b>Concentração (%) de elementos presentes nas cinzas (bs)</b>	<b>Estilhas (<i>woodchips</i>)</b>	<b>Casca (abeto)</b>
Si	4-11	7-17
Ca	26-38	24-36
Mg	2.2-3.6	2.4-5.6
K	4.9-6.3	5-9.9
Na	0.3-0.5	0.5-0.7
P	0.8-1.9	1-1.9

(b)

Adaptado: Berndes *et al.* (2008)

A partir da Tabela 4.6 é possível verificar que a estilha, composta por maior quantidade de material lenhoso comparativamente com a casca de árvore, contém menor quantidade de elementos responsáveis pela formação de cinzas.

Os resultados da análise qualitativa da composição química das cinzas realizada para as amostras de *pellets* (P1, P2, P3) e biomassa residual florestal de eucalipto (BR1, BR2, BR3) são apresentados na Tabela 4.7 onde são identificados os elementos químicos presentes, bem como a intensidade do espectro de cada elemento químico (Acps) e o nível de energia registado quando o espectro do elemento químico é “visível” (ROI KeV).

Os resultados obtidos são qualitativos, isto é, a intensidade de espectro não corresponde à quantidade (mg/kg ou % de massa) de determinado elemento químico presente na amostra de cinzas. Entretanto, a comparação da intensidade do espectro para o mesmo elemento químico entre amostras diferentes, permite obter conclusões relativamente à presença quantitativa do elemento nas amostras.

**Tabela 4.7:** Composição química das cinzas da amostra de *pellets* e de biomassa residual florestal de eucalipto a 15KV e 50KV

Voltagem	Elementos	ROI keV	Acps					
			P1	P2	P3	BR1	BR2	BR3
<b>15KV</b>	Potássio (K)	3.16 - 3.46	10870	12523	9775	15356	19015	18887
	Cálcio (Ca)	3.54 - 3.84	37735	43307	37372	32420	43318	46618
	Manganês (Mn)	5.73 - 6.07	3617	3349	3302	3755	2225	2134
	Ferro (Fe)	6.23 - 6.57	15471	12270	11720	4470	24032	5204
	Crômio (Cr)	5.25 - 5.58	2583	1698	1786		1173	1199
	Titânio (Ti)	4.35 - 4.67	1821	1678	1769	985	904	785
	Níquel (Ni)	7.29 - 7.65	2981	2807				
	Magnésio (Mg)	1.12 - 1.39	151	160	153			162
	Silício (Si)	1.60 - 1.88	610	715	528			487
	Enxofre (S)	2.17 - 2.45	679	736	573	401	489	476
	Zinco (Zn)	8.44 - 8.82				5982	3226	4410
	Chumbo (Pb)	10.34 - 10.74				4624		
	Cloro (Cl)	2.48 - 2.77				791	922	866
Cobre (Cu)	7.86 - 8.23					4149	6086	
<b>50KV</b>	Potássio	3.16 - 3.46	224	245	222	248	279	266
	Cálcio	3.54 - 3.84	420	501	404	400	509	493
	Manganês	5.73 - 6.07	80	87	72	69	65	51
	Ferro	6.23 - 6.57	491	431	333	85	1450	134
	Crômio	5.25 - 5.58	80	61	63			
	Titânio	4.35 - 4.67	120	121	123			
	Níquel	7.29 - 7.65	45	28	27		24	
	Zinco	8.44 - 8.82	98	82	71	78	65	67
	Estrôncio (Sr)	13.92 -14.36	522	555	487	367	340	363
	Rubídio (Rb)	13.16 -13.59	162			172	151	
	Chumbo	10.34 -10.74	27	28	158	20	21	20
	Cobre	7.86 - 8.23		34	30	27	29	26
	Brômio (Br)	11.70 -12.12						33

Nota: P1, P2, P3 - amostras de *pellets*; BR1, BR2, BR3 amostras de biomassa florestal residual

Da análise da composição química das cinzas é possível identificar alguns dos elementos químicos maioritariamente responsáveis pela formação nas cinzas (K, Ca, Mg, Fe, entre outros) bem como alguns dos elementos que habitualmente têm menor presença na biomassa mas que, ainda assim, contribuem para a formação de cinzas, como por exemplo o Cr, Ni, Zn e Cu.

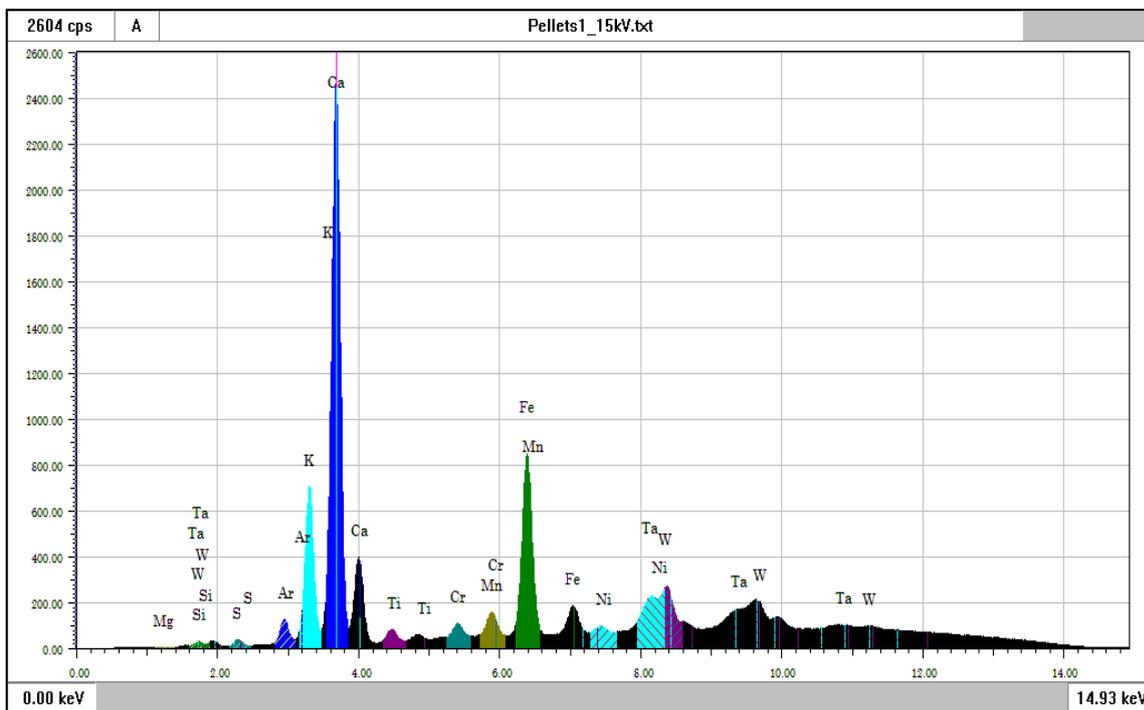
As amostras de biomassa residual apresentam intensidades consideravelmente superiores de K, o que significa que o elemento tem uma presença em quantidades superiores nas amostras de biomassa residual comparativamente às amostras de *pellets*. Ao invés, as amostras de *pellets* apresentam espectros com intensidades superiores de Fe, Mn, Ti e Cr. Quanto ao Mg e Si, apresentam espectros com maior intensidade nas amostras de *pellets* visto que, nas amostras de biomassa residual, os seus espectros são visíveis apenas numa das amostras. O Zn, Pb, Cl e Cu nas amostras de *pellets* e o Ni na amostra de biomassa residual, não apresentam espectros visíveis a 15KV e expõem espectros com baixa intensidade a 50KV. Assim, a ausência de espectros indicou quais os elementos ausentes nas amostras de cinzas.

A presença de K e Cl nas amostras de biomassa florestal residual pode resultar na formação de cloretos alcalinos, que em contacto com S, também com uma intensidade considerável na amostra, originará a oxidação/corrosão do equipamento de combustão devido às reações de sulfatação.

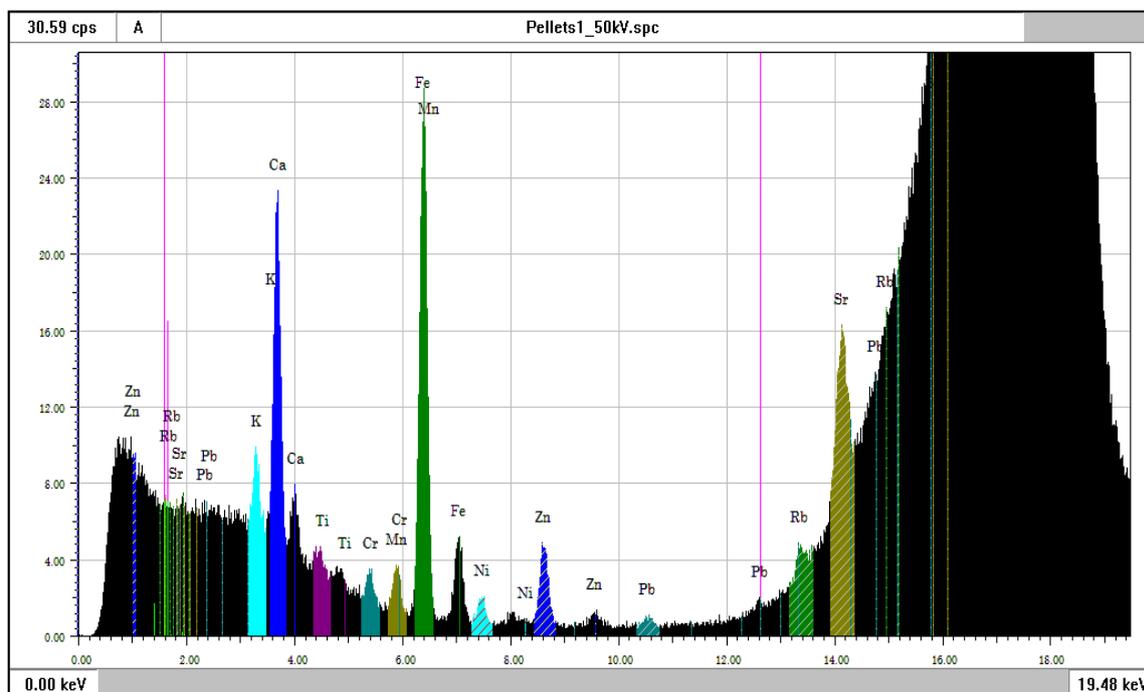
Nos gráficos das Figura 4.5 e Figura 4.6 são apresentados os resultados da análise da composição química das cinzas para a amostra número 1 de *pellets* e de biomassa residual, nas duas voltagens estudadas (15KV e 50KV). Os gráficos das restantes amostras encontram-se em anexo. O eixo das abcissas representa os valores dos níveis de energia (KeV) e o eixo das ordenadas a intensidade do espectro do respetivo elemento químico presente nas cinzas.

A análise de composição química de cinzas provenientes da combustão das amostras de *pellets* e de biomassa residual florestal de eucalipto evidencia, mais uma vez, a importância da qualidade da biomassa. Os resultados obtidos para *pellets* e biomassa residual podem ser de certa forma extrapolados para as amostras de choupo, acácia e eucalipto. Ao contrário das amostras de choupo, compostas somente por material lenhoso, as amostras de acácia e eucalipto têm grandes quantidades de resíduos de folhagem. Assim sendo, é de esperar que as cinzas resultantes de combustão de choupo contenham uma

menor quantidade de elementos prejudiciais para o ambiente e manutenção do equipamento de combustão, comparativamente com as cinzas de acácia e eucalipto.

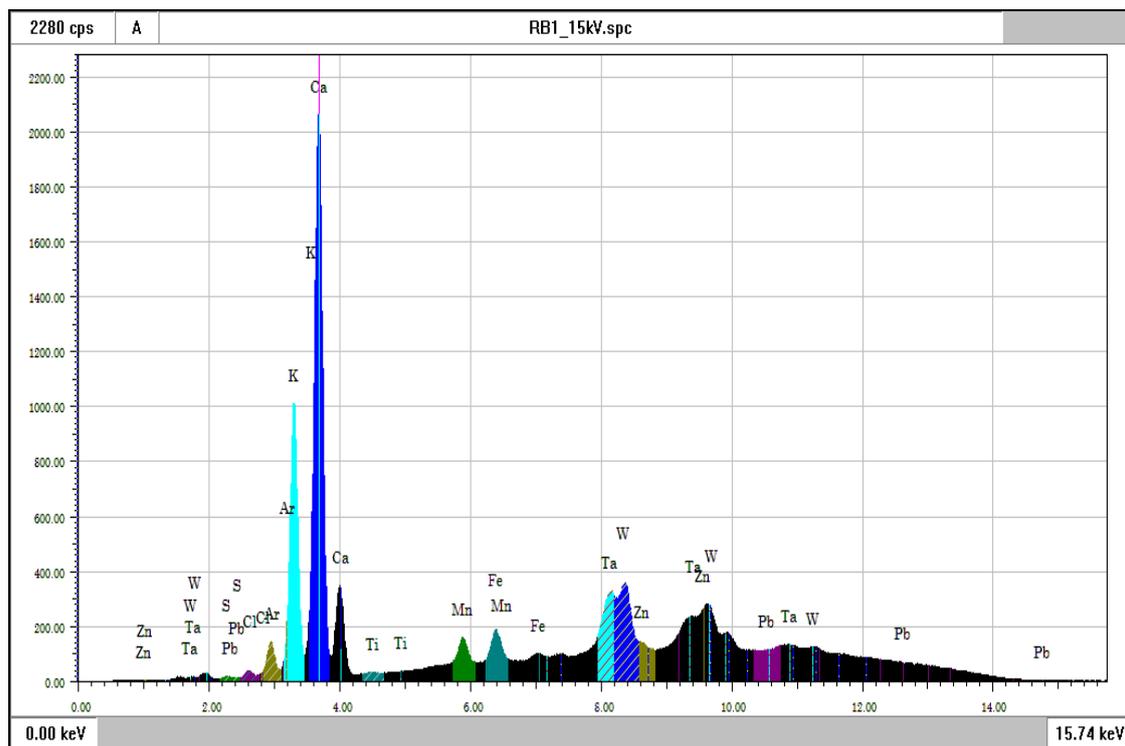


(a)

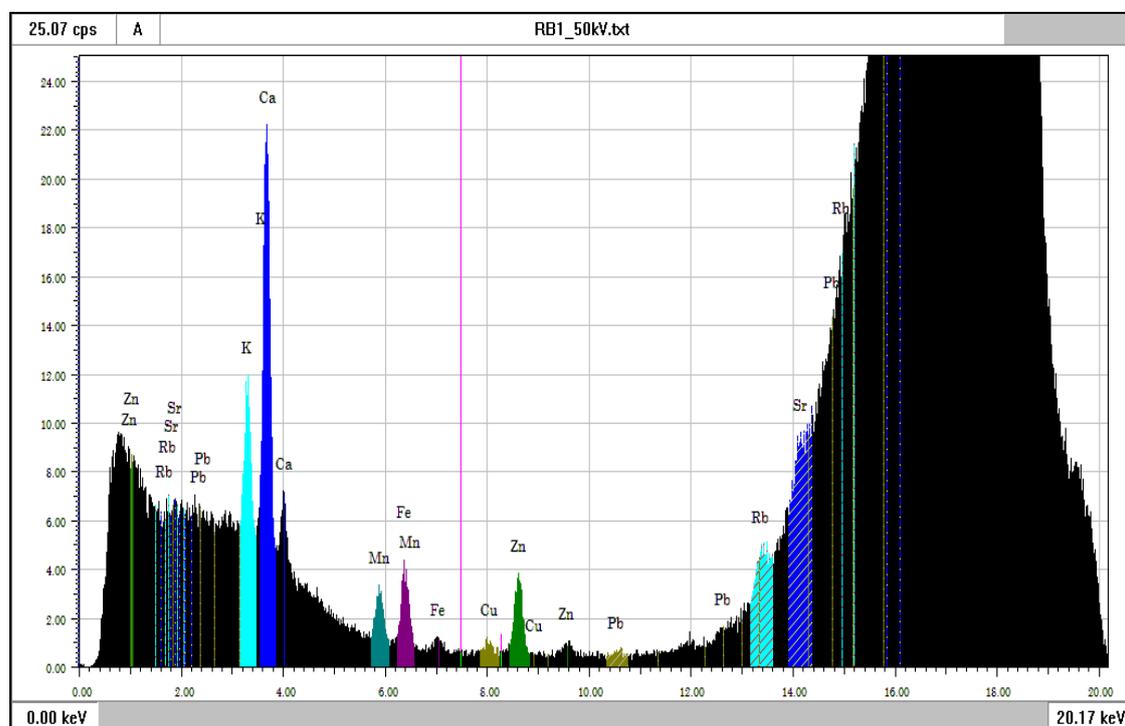


(b)

Figura 4.5: Composição química das cinzas da amostra nº 1 de pellets a 15KV (a) e 50KV (b)



(c)



(d)

**Figura 4.6:** Composição química das cinzas da amostra nº 1 de biomassa residual florestal de eucalipto a 15KV (c) e 50KV (d)

### **Temperatura de fusão de cinza**

A fusão de cinzas pode iniciar-se a diferentes temperaturas dependendo da composição da biomassa e das cinzas.

Ca e em certa medida Al e Ti são elementos responsáveis pelo aumento da temperatura de fusão de cinzas enquanto K, Si, P, S e, ocasionalmente, Fe, Mg e Na contribuem para a sua diminuição. Como exemplo, a presença numa gama média/alta de K e Si, origina compostos como  $\text{SiO}_2$  e  $\text{K}_2\text{O}$  que, em determinado rácio, contribuem para a diminuição da temperatura de fusão das cinzas (Vassilev *et al.*, 2014). Já Berndes *et al.* (2008) realçam Ca e Mg como responsáveis pelo aumento da temperatura de fusão das cinzas e K e Na pela diminuição.

### **Problemas tecnológicos**

Problemas nos equipamentos de combustão, como *slagging* e corrosão, dependem de diversos fatores incluindo o tamanho da partícula, a associação e o comportamento de espécies minerais, as temperaturas ao longo da combustão e temperaturas de fusão das cinzas (Vassilev *et al.*, 2014).

Biomassa que contenha uma forte presença de elementos com baixa temperatura de fusão (por exemplo K e Na) irá dar origem ao *slagging*: derretendo a temperaturas inferiores à da combustão, os produtos da combustão sofrem uma abrupta cristalização que dará origem a cinza viscosa, que adere às paredes do equipamento ou se deposita no seu fundo (Vassilev *et al.*, 2014).

No que concerne à corrosão, alguns dos compostos responsáveis são por exemplo os cloretos alcalinos: K e Na juntamente com Cl formam cloretos alcalinos e, quando sulfatados, originam a oxidação e corrosão do material. Uma relação de rácio S:Cl abaixo de 2 na biomassa é prejudicial devido às reacções anteriormente mencionadas.

Assim, a presença de K e Na no biocombustível é prejudicial a vários níveis (Francescato *et al.*, 2009; Vassilev *et al.* 2013b; Berndes *et al.*, 2008). Entretanto, Vassilev *et al.* (2013b) afirma que biocombustíveis com reduzidos teores de Cl, Si e cinzas e elevados teores em Ca, originam *slagging* incrustações e problemas de corrosão mais facilmente controláveis.

A Tabela 4.8 resume o efeito causado por determinados elementos químicos na formação de cinzas e na sua temperatura de fusão, bem como o efeito posterior no equipamento de combustão e emissões de gases.

**Tabela 4.8:** Elemento químico presente nas cinzas e respectiva influencia em efeitos causados

<b>Elemento</b>	<b>Efeito</b>
Cloro	Emissões de HCl, corrosão e diminuição da temperatura de fusão das cinzas
Nitrogénio	Emissões de N <sub>2</sub> O e NO <sub>x</sub>
Enxofre	Emissões de SO <sub>x</sub> e corrosão
Flúor	Emissões de HF e corrosão
Potássio	Corrosão, diminuição da temperatura de fusão das cinzas, formação de aerossóis
Sódio	Corrosão, diminuição da temperatura de fusão das cinzas e formação de aerossóis
Magnésio	Aumento da temperatura fusão das cinzas
Cálcio	Aumento da temperatura de ponto de fusão de cinzas
Metais pesados	Emissões e formação de aerossóis

Adaptado: Berndes *et al.* (2008)



## 5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Foram estudadas três espécies, nomeadamente, a acácia, o eucalipto e o choupo, tendo em vista a potencialidade do seu cultivo para os fins energéticos. A produção de bioenergia recorrendo ao processo de combustão direta foi enfatizada neste trabalho. As amostras de *pellets* e de biomassa florestal residual de eucalipto foram amostras de referência na análise de parâmetros da combustão e da quantidade de resíduos da combustão.

Relativamente aos testes no calorímetro cónico, a amostra de *pellets* (biomassa densificada) apresentou maior variação de perda de massa após a ignição e maior valor da energia total libertada (cerca de 15,97 MJ/kg). O menor valor de energia libertada correspondeu à amostra de eucalipto (9,21 MJ/kg).

Da análise da quantidade de cinzas resultantes do processo de combustão concluiu-se que os *pellets* apresentaram o menor valor de massa final ao invés do verificado na biomassa residual florestal de eucalipto que apresentou o maior valor de massa final entre as cinco amostras em estudo. Os resultados vieram confirmar que a biomassa que contém maior quantidade de resíduos de folhagem na sua constituição (o caso das amostras de biomassa florestal residual, acácia e eucalipto) origina maior quantidade de cinzas comparativamente com a biomassa que apresenta maior presença de material lenhoso na sua constituição (*pellets* e choupo).

Nos resultados dos testes XRF, nas amostras de cinzas resultantes da combustão foram identificados diversos elementos químicos (Fe, Ca, K, Mg, Cl, Si, entre outros) importantes na formação de cinzas e na posterior manutenção dos equipamentos de combustão, bem como alguns dos elementos químicos com menor presença na biomassa mas também com influencia na formação de cinzas (Cu, Cr, Zn, Ni, entre outros) sendo responsáveis maioritariamente pelos efeitos negativos causados no meio ambiente. A comparação da intensidade dos espectros para as amostras de *pellets* e biomassa residual florestal de eucalipto permite concluir que os *pellets* têm maior quantidade de Mn, Fe, Cr, Ti e menor quantidade de K. A ausência de espectros indicou os elementos que não aparecem nas amostras de cinzas.

Ainda que não tenham sido analisadas as composições químicas das cinzas para todas as amostras, os resultados podem ser extrapolados: a amostra de *pellets* composta maioritariamente por material lenhoso, tal como a amostra de choupo, contem menor quantidade de elementos prejudiciais à manutenção dos equipamentos de combustão. Ao invés, a biomassa residual de eucalipto, com significativas quantidades de folhagem tal como as amostras de eucalipto e acácia, contem elementos propícios a originar problemas de *slagging* e corrosão nos equipamentos de combustão.

Finalizado o trabalho proposto, conclui-se que o tipo de biomassa das espécies de culturas energéticas (devido à sua composição química e bioquímica) influencia a quantidade e a qualidade de cinzas. Relativamente às espécies lenhosas estudadas, a presença de folhagem pode piorar a qualidade do combustível, em termos de poderes caloríficos, quantidade e qualidade de cinzas, o que se traduz nos efeitos a nível ambiental e na manutenção dos equipamentos de combustão.

No que concerne a trabalhos futuros, é importante descobrir que plantas produzem maiores quantidades de energia, tendo também em conta os impactos ambientais significativos, e chegar a conclusões sobre as várias espécies e os seus produtos finais. Algumas culturas energéticas levantam questões sobre a competitividade do uso de terras entre culturas energéticas e culturas com fins alimentares, o que pode ter implicações na segurança alimentar. No entanto, se algumas das culturas energéticas de cereais, oleaginosas e culturas de amido e açúcar vão priorizar a sua produção visando produção de energia ignorando a necessidade alimentar, o mesmo não se verifica nas culturas lignocelulósicas uma vez que não apresentam caráter alimentar. Também o cultivo das culturas lignocelulósicas é mais “amigo” do ambiente. É então, de extrema importância que as culturas energéticas lignocelulósicas sejam desenvolvidas em vários aspetos, desde a plantação até à sua colheita. A seleção de espécies adequadas ao tipo de solo, condições climáticas da região (e suas variações ao longo do ano) e os métodos de cultivo são cruciais para otimizar as culturas de biomassa dedicadas de uma forma integrada e sustentável, visando maximizar os benefícios ambientais e minimizar os possíveis impactos negativos.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (2002). *Atlas de energia elétrica do Brasil*. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro\\_atlas.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf).
- Agência Nacional de Energia Elétrica (2008). *Atlas de energia elétrica do Brasil 3ª edição*. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_capa\\_sumario.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_capa_sumario.pdf).
- Albuquerque, A (2009). *Gestão de eucaliptais invadidos e não invadidos por acácia dealbata e os seus impactos na herpetofauna*. Tese de Mestrado em Ecologia e Gestão Ambiental. Departamento de Biologia Animal - Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Allen, B., Kretschmer, B., Baldock, D., Menadue, H., Nanni, S., Tucker, G (2014). Birdlife Europe, European Environmental Bureau and Transport & Environment. IEEP, London. Institute for European Environmental Policy. *Space for energy crops – assessing the potential contribution to Europe 's energy future*.
- Aylott, M., Casella, E., Tubby, I., Street, N.R., Smith, P., Taylor, G. (2008). *Yield and spatial supply of bioenergy poplar and willow short-rotation coppice in the UK*. *New Phytologist*, 178, pp. 358–370.
- Berndes, G., Baxter, L., Coombes, P., Delcarte, J., Evald, A., Hartmann, H., Jansen, M., Koppejan, J., Livingston, W., Loo, S.V., Madrali, S., Moghtaderi, B., Nägele, E., Nussbaumer, T., Obernberger, I., Oravainen, H., Preto, F., Skreiberg, O., Tullin, C., Thek, G. (2008). *The Handbook of Biomass Combustion & Co-firing*. Earthscan.
- Boerrigter, H. & Rauch, R. (2006). *Review of applications of gases from biomass gasification*. In: *Handbook Biomass Gasification*. pp. 33.
- Borkowska, H. & Molas, R. (2013). *Yield comparison of four lignocellulosic perennial energy crop species*. *Biomass and Bioenergy*, 51, pp. 145–153.
- Bryant, R. & Mulholland, G. (2008). *A guide to characterizing heat release rate measurement uncertainty for full-scale fire tests*. *Fire and Materials*, 32, pp. 121–139.
- Camarsa, G., Toland, J., Hudson, T., Nottingham, S., Jones, W., Eldrige, J., Severon, M., Rose, C., Sliva, J., Joosten, H., Thévignot, C. (2015). *Life and climate change mitigation*. Life Environment. European Commission.
- Carneiro, M., Moreira, R., Gominho, J., Fabião, A. (2014). *Could control of invasive acacias be a source of biomass for energy under mediterranean conditions?*. *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 37, pp. 187–192.
- Conselho de Informações sobre Biotecnologia (2008). *Guia do eucalipto, oportunidades para um desenvolvimento sustentável*. Disponível em: UE 2015; Acedido a 20 de Abril de 2015. : [http://ec.europa.eu/clima/policies/eccp/first/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/eccp/first/index_en.htm).

Dipti & Priyanka (2013). *Bioenergy crops an alternative energy*. International Journal of Environmental Engineering and Management, Vol.4, nº 3, pp.265–272. Disponível em <http://www.ripublication.com/>.

European Commission (2015). *European climate change programme*. European Commission. Acedido a 20 de Abril de 2015 no web site: UE 2015: [http://ec.europa.eu/clima/policies/eccp/first/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/eccp/first/index_en.htm).

European Commission (2014). *Taking stock of the europe 2020 strategy*. Communication from the comission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and committee of the regions.

Elbersen B.S., Fritsche, U., Eerens, H., Overmars, K., Lesschen, J.P., Staritsky, I., Zulka, K.P., Brodski. L., Hennenberg, K., (2013). *Review of the EU bioenergy potential from a resource-efficiency perspective*. Background report to EEA study. European Environment Agency. Alterra, Wageningen.

Fernandes, M., Devy-Vareta, N. & Rangan, H. (2013) . *Plantas exóticas invasoras e instrumentos de gestão territorial. O caso paradigmático do género Acacia em Portugal*. Revista de Geografia e ordenamento do território, nº 4, pp.83–107. Disponível em <http://cegot.org/ojs/index.php/GOT/article/view/135>.

Ferreira, S., Moreira, N.A. & Monteiro, E. (2009). *Bioenergy overview for Portugal*. Biomass and Bioenergy, 33, pp.1567–1576.

FNR (2013). *Bioenergy the multifaceted renewable energy*. Acedido a 15 de Março de 2015 no web site da FNR: <http://international.fnr.de/renewable-resources/bioenergy/solid-biomass/>.

FNR (2009). *Bioenergy: Plants, raw materials, products*. Acedido a 15 de Março de 2015 no web site da FNR: <http://international.fnr.de/renewable-resources/bioenergy/solid-biomass/>.

Francescato, V., Antonini, E. & Bergomi, L. (2009). *Wood Fuels Handbook*. AIEL - Italian Agriforestry Energy Association.

Gioti Papadaki, O. (2012). *European environmental policy and the strategy "Europe 2020"*. Regional Science Inquiry Journal, IV(1), pp.151–158.

Gonçalves, C.D.C. (2012). *Modelação do processo de digestão anaeróbia da forsu à escala industrial*. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Técnico de Lisboa.

Horta, C., Lupi, S., Anjos, O., Almeida, J., (2010). *Avaliação do potencial fertilizante de dois resíduos da indústria florestal*. Revista de Ciências Agrárias, pp.147–159. Disponível em <http://repositorio.ipcb.pt/handle/10400.11/1032>

Intelligent Energy Europe (2007). *Biomass for power generation and CHP*. Disponível em: [www.iea.org](http://www.iea.org).

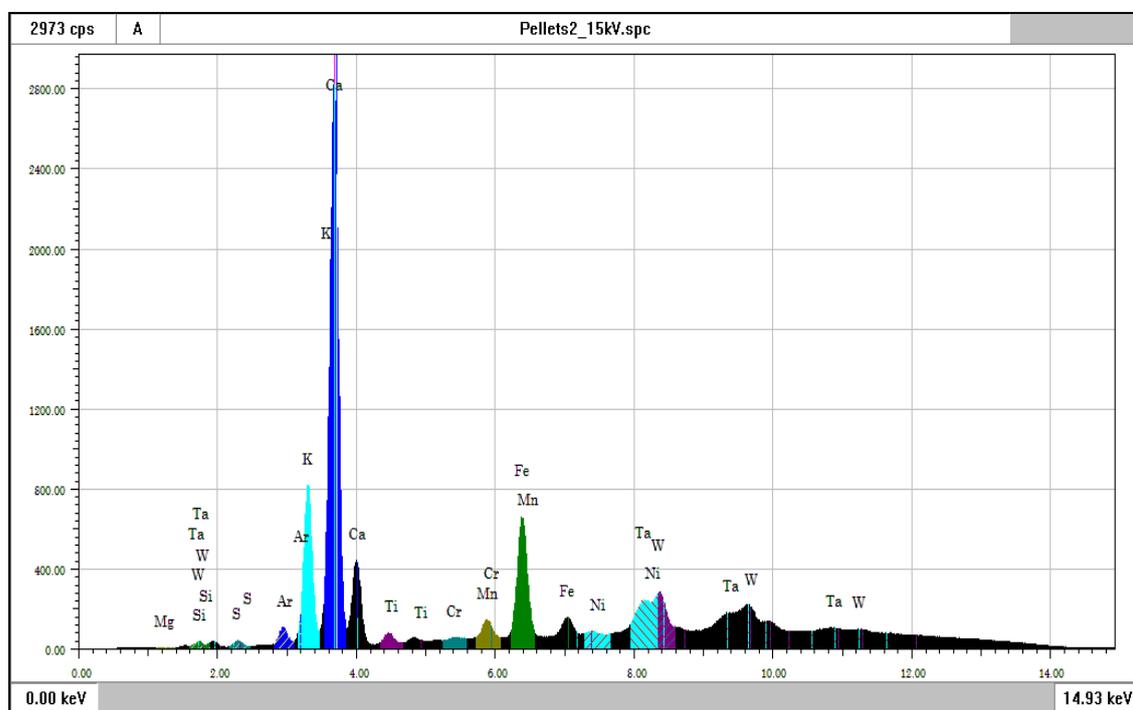
- Intelligent Energy Europe (2009). *Energy from field energy crops - a handbook for energy producers*. Jyväskylä Innovation Oy, P.O. Box 27, FI
- International Energy Agency (2007). *Bioenergy Project Development & Biomass Supply*. , Good practice guidelines p.66. Head of Publications Service.
- Knoef, H.A..(2005). *Handbook on Biomass Gasification*.
- Laurent, A., Pelzer, E., Loyce, C., Makowski, D. (2015). *Ranking yields of energy crops: A meta-analysis using direct and indirect comparisons*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 46, pp.41–50.
- Lima, H., Chambel, A., Alves, J., Francisco, P. (1998). *Impacte da cultura de eucaliptos sobre os recursos hidricos subterrâneos da serra de Ossa*. 4º Congresso da água.
- Lora, E.E.S., Andrade, R.V., Ángel, J.D., Leite, M.A., Rocha, M.H., Sales, C.A., Mendoza, M.A., Coral, D.S. (2012). *Gaseificação e pirólise para conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis*. Biocombustíveis - Volume 1. pp. 412–498.
- Marchante, E., Morais, M.C., Marchante, H., Reis, C.S., Gamela, A., Carvalho, V., Freitas, H. (2014). "Acacia Dealbata". Acedido a 2 de Junho de 2015 no web site Invasoras.pt: <http://invasoras.pt/gallery/acacia-dealbata/>.
- Melany Ferreira (2004). *Espécies exóticas e ornamentais*. FolhaViva Número 26, Ano VII, Janeiro/Março 2004. Jornal dos Clubes da Floresta do Projecto Prosepe, Floresta conVida.
- MRG (2007) *COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES.COMMISSION DECISION of 18 July 2007 establishing guidelines for the monitoring and reporting of greenhouse gas emissions pursuant to Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council*.
- Muylle,H., Hulle, S.V., Vliegheer, A., Baert, J., Bockstaele, E.V., Roldán-Ruiz, I. (2015). *Yield and energy balance of annual and perennial lignocellulosic crops for bio-refinery use: A 4-year field experiment in Belgium*. European Journal of Agronomy, 63, pp. 62–70.
- Nassi, N.,Guidi, W., Ragolini, G., Tozzini, C., Bonar, E. (2010). *Biomass production and energy balance of a 12-year-old short-rotation coppice poplar stand under different cutting cycles*. GCB Bioenergy, 2, pp. 89–97.
- Nussbaumer, T. (2003). *Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction*. Energy and Fuels, 17, pp. 1510–1521.
- Panoutsou, C., Elbersen, B., Bottcher H. (2011). *Energy crops in the European context*. Biomass futures. Biomass Futures project funded by the Intelligent. Energy Europe Programme.

- Patricio, M., Nunes, L., Saraiva, A.D., Azevedo, J.C. (2013). *Produção potencial de biomassa em culturas energéticas lenhosas no Norte de Portugal*. 7º Congresso Florestal Nacional.
- Phitsuwan, P., Sakka, K. & Ratanakhanokchai, K.(2013). *Improvement of lignocellulosic biomass in planta: A review of feedstocks, biomass recalcitrance, and strategic manipulation of ideal plants designed for ethanol production and processability*. Biomass and Bioenergy, 58, pp. 390–405.
- Pinto, A., Fernandes, P.M., Espinosa-Prieto, J., Loureiro, C.(2013). *FIREglobulus : Estudo experimental do comportamento e efeitos do fogo em eucaliptal*. Silva Lusitana, pp. 143–151.
- Rockwood, D.L., Rudie, A.W., Ralph, S.A., Zhu, J.Y., Winandy, J.E. (2008). *Energy product options for Eucalyptus species grown as short rotation woody crops*. International Journal of Molecular Sciences, 9, pp. 1361–1378.
- Saidur, R., Abdelaziz, E.A., Demirbas, A., Hossain, M.S., Mekhilef, S., (2011). *A review on biomass as a fuel for boilers*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, pp. 2262–2289. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>
- Santos, J.M.C.F, (2009). *Avaliação da biomassa de plantas bioenergéticas*. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente- Tecnologias Ambientais. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa.
- Santos, K.G. (2011). *Aspectos fundamentais da pirólise de biomassa em leito de jorro: Fluidodinâmica e cinética do processo*. Tese de Doutoramento em Engenharia Química. Faculdade de Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia.
- Silva, V., Monteiro, E. & Rouboa, A. (2013). *An analysis on the opportunities , technology and potential of biomass residues for energy production in Portugal*. In: Materials and processes for energy: Communicating current research and technological developments. pp. 190–201.
- Sims, Ralphe. H., Hastings Astley, Schlamadinger Bernhard, Taylors Gail and Smith Pete (2006). *Energy crops: Current status and future prospects*. Global Change Biology, 12, pp. 2054–2076.
- Telmo, C., Lousada, J. & Moreira, N. (2010). *Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood*. Bioresource Technology, 101, pp. 3808–3815. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.021>.
- Vassilev, S. V., Baxter, D. & Vassileva, C.G., Andersen, L.K. (2013a). *An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification*. Fuel, 105, pp. 40–76.

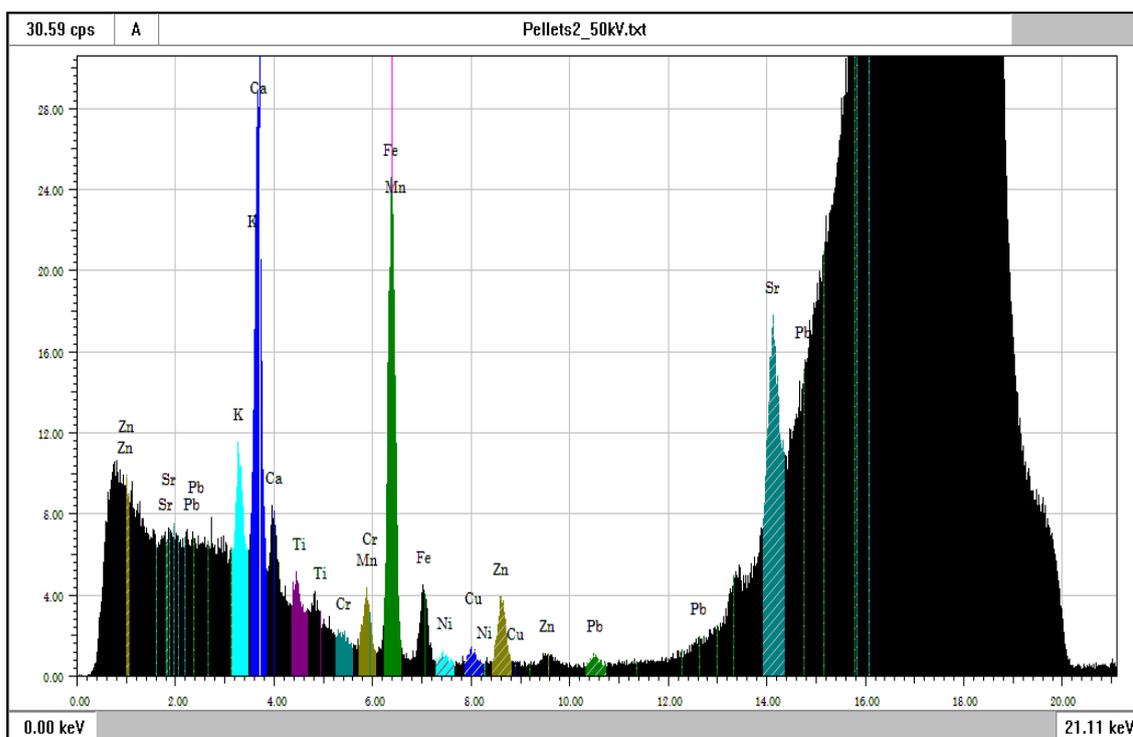
- Vassilev, S. V. , Baxter, D. & Vassileva, C.G., Andersen, L.K. (2013b). *An overview of the composition and application of biomass ash.: Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges*. Fuel, 105, pp. 19–39.
- Vassilev, S. V., Baxter, D. & Vassileva, C.G. (2014). *An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part II. Ash fusion and ash formation mechanisms of biomass types*. Fuel, 117 (Part A), pp. 152–183.
- Venendaal, R., Jørgensen, U. & Foster, C.A. (1997). *European energy crops: A synthesis*. Biomass and Bioenergy, 13, pp. 147–185.
- Verissimo, G.L. (2014). *Estudo computacional da gaseificação de bagaço de cana-de-açúcar em um reator de leito fluidizado*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Vital, M.H.F. (2007). *Impacto ambiental de florestas de eucalipto*. Revista do Bndes, Vol.14, nº28, pp. 235–276.
- Weih, M. (2010). *Perennial energy crops: Growth and management*. Soils, plant growth and crop production, Vol 3. © Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS).
- Wright, L. (2006). *Worldwide commercial development of bioenergy with a focus on energy crop-based projects*. Biomass and Bioenergy. 30, pp. 706–714.
- Yuan, J.S., Tiller, K.H., Al-Ahmad, H., Stewart, N.R., Stewart Jr, C.N. (2008). *Plants to power: bioenergy to fuel the future*. Trends in Plant Science, Vol.13, nº8, pp. 421–429.
- Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., Li, Y. (2014). *Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production*. Progress in Energy and Combustion Science, 42, pp. 35–53.



## ANEXOS

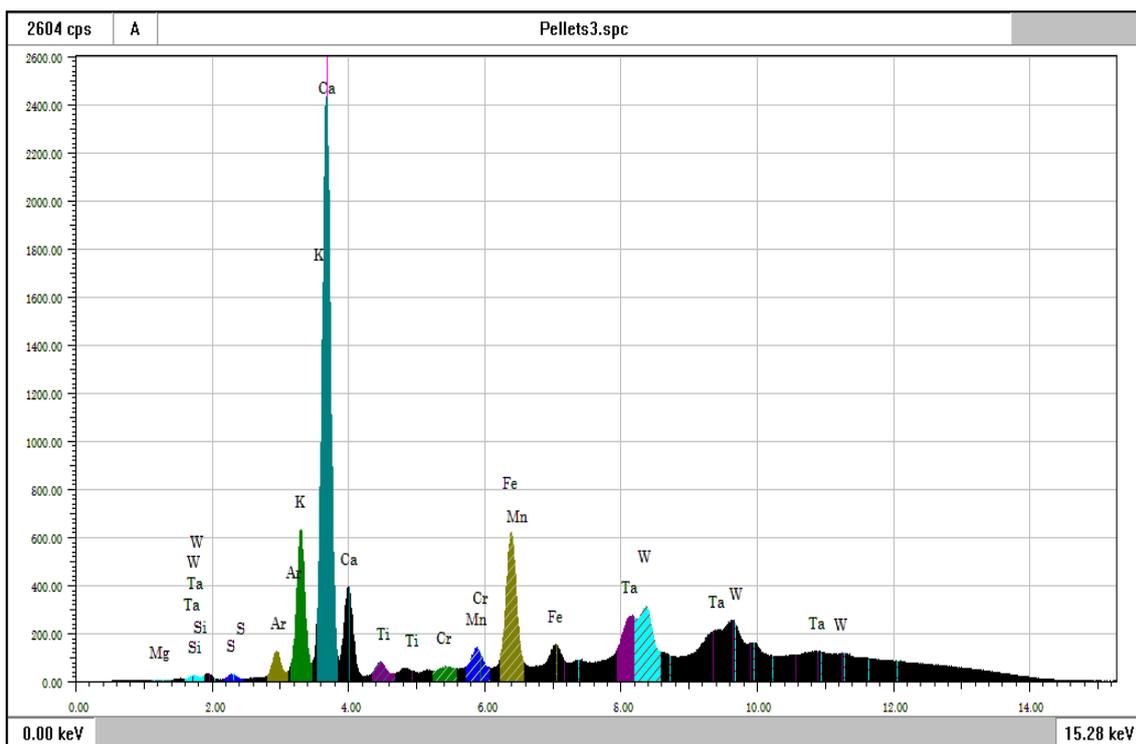


(a)

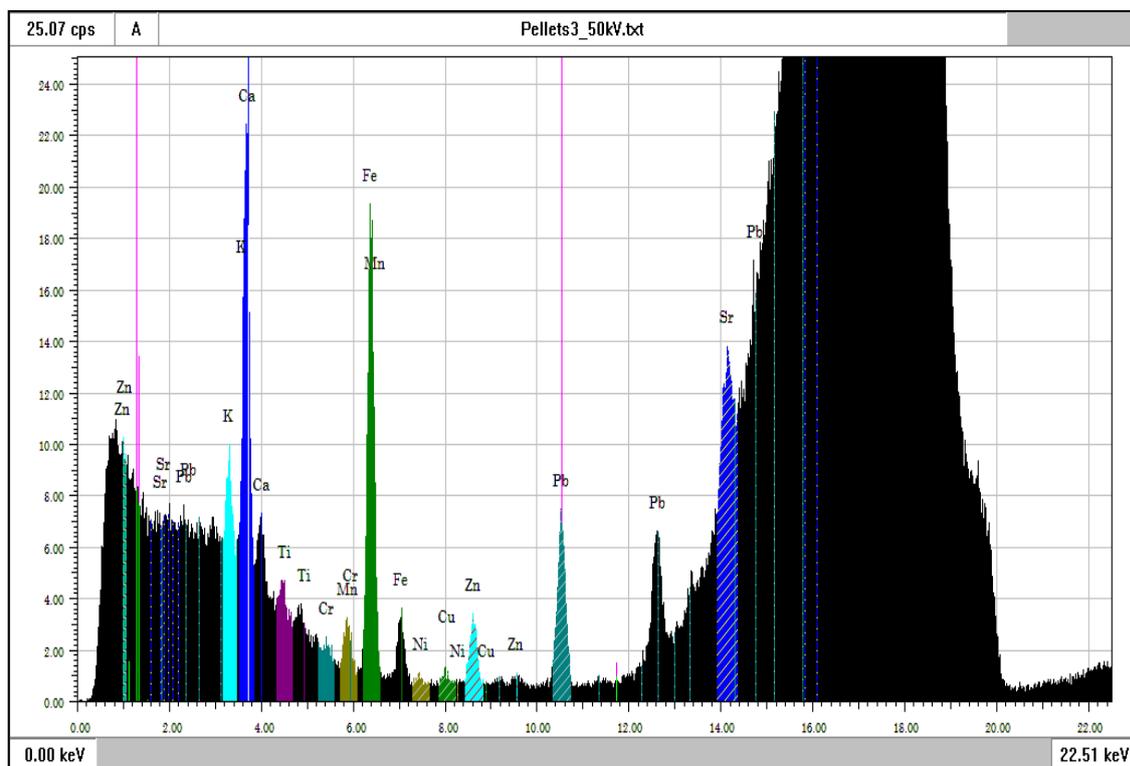


(b)

**Anexo 1:** Composição química das cinzas da 2ª réplica da amostra de *pellets* a 15KV (a) e 50KV (b)

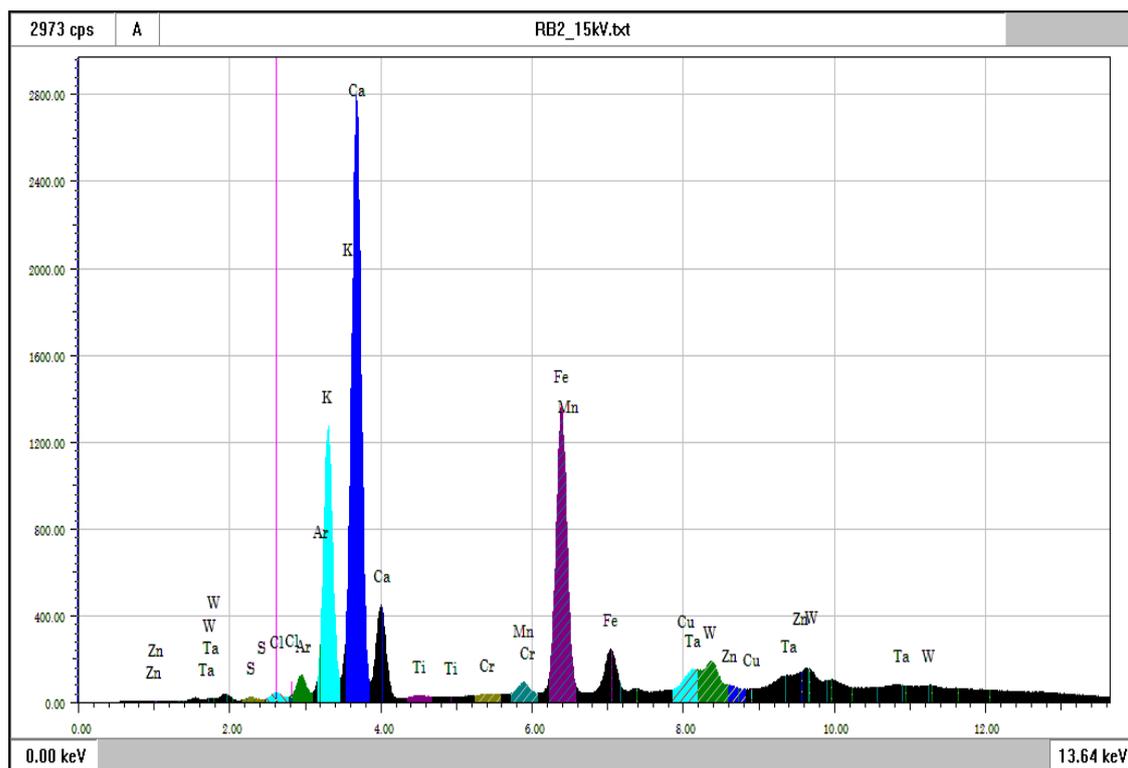


(c)

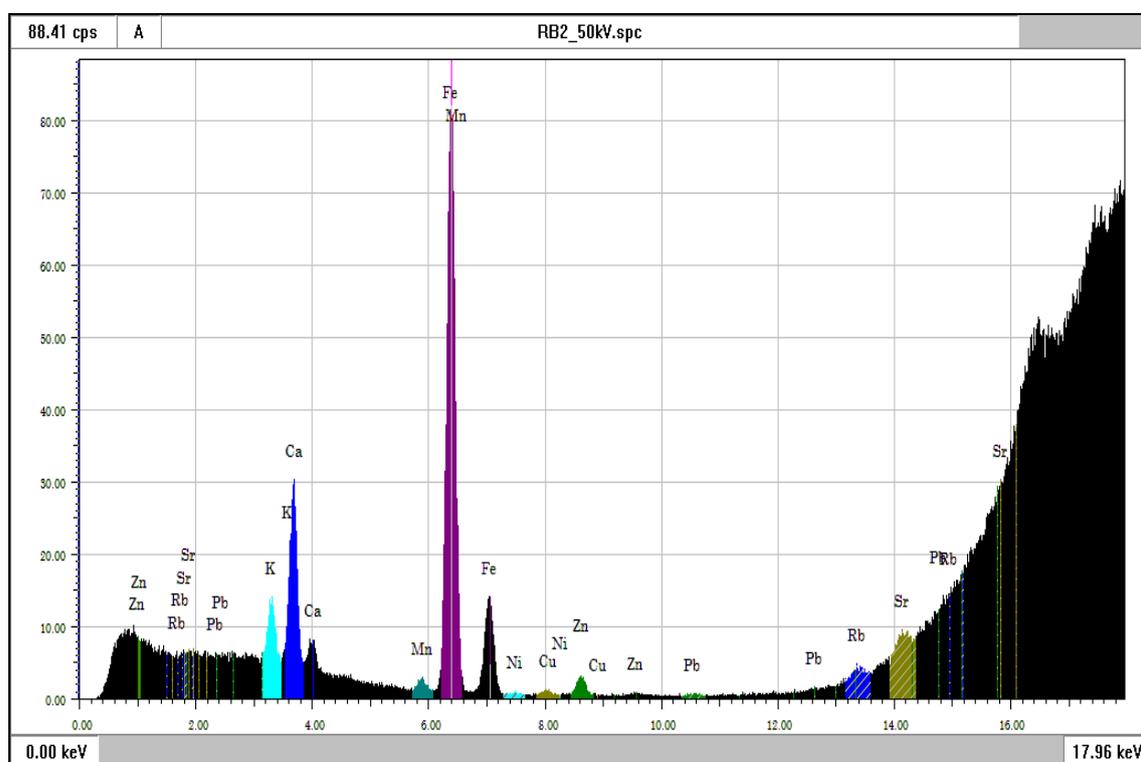


(d)

**Anexo 2:** Composição química das cinzas da 3ª réplica da amostra de *pellets* a 15KV (c) e 50KV (d)

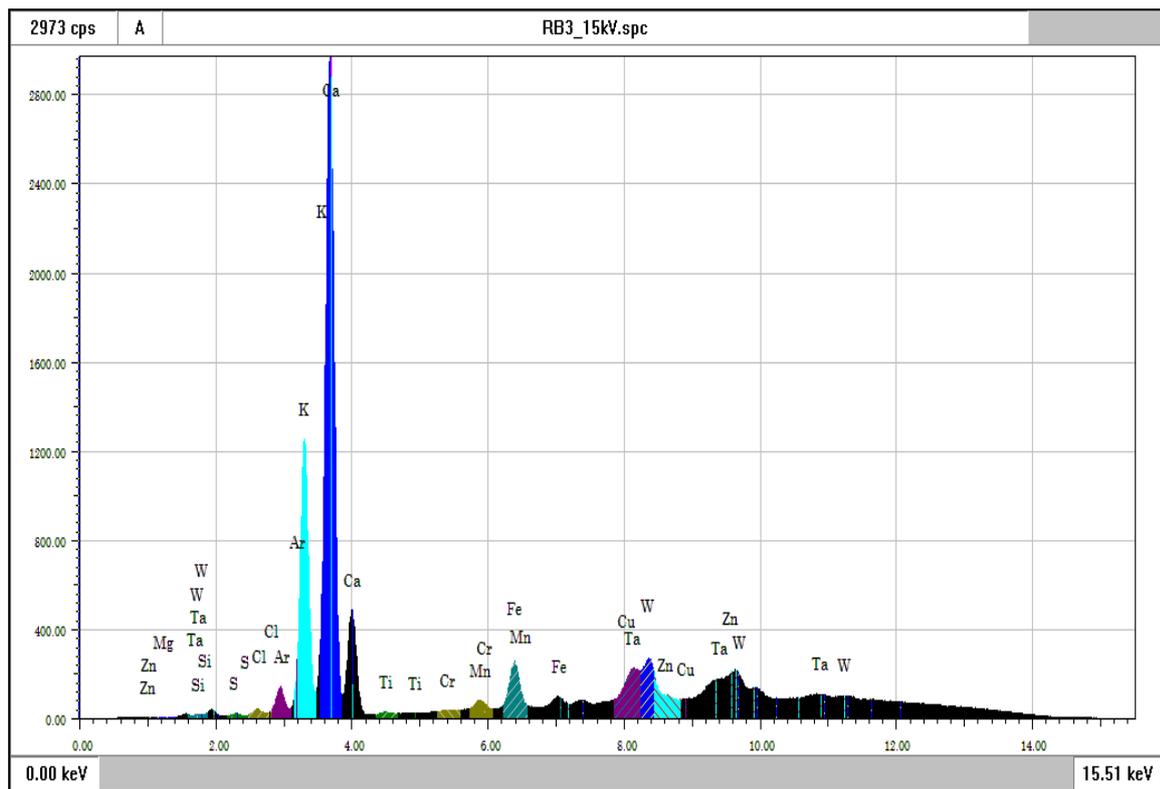


(e)

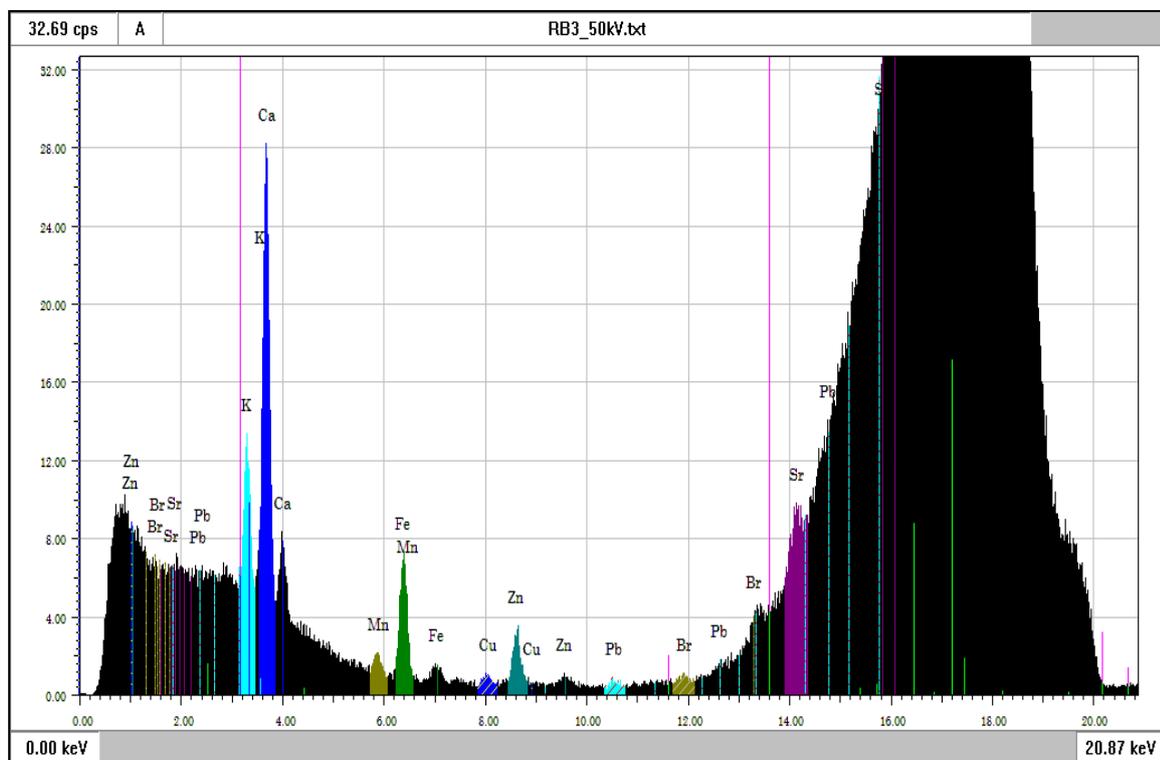


(f)

**Anexo 3:** Composição química das cinzas da 2ª réplica da amostra de biomassa residual florestal de eucalipto a 15KV (e) e 50KV (f)



(g)



(h)

**Anexo 4:** Composição química das cinzas da 3ª réplica da amostra de biomassa residual florestal de eucalipto a 15KV (g) e 50KV (h)