



Instituto Politécnico de Portalegre  
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO EM  
BIOMASSA DO ALTO ALENTEJO**  
**Departamento de Tecnologia e Design**

Gonçalo Lourinho

Novembro 2012

*"There is no substitute for energy. The whole edifice of modern life is built upon it. Although energy can be bought and sold like any other commodity, it is not just another commodity but the precondition of all commodities, a basic factor equally with air, water and earth"*

*EF Schumacher, Energy International*



## Agradecimentos

O trabalho não poderia ter sido realizado sem a estreita colaboração da AREANATEjo – Agência Regional de Energia e Ambiente do Norte Alentejano e Tejo –, como parte integrante das actividades inseridas no “ALTERCEXA”, projecto aprovado e financiado no âmbito do POCTEP. O autor gostaria de agradecer ao Eng.º Tiago Gaio e à Eng.ª Hélia Pereira todas as diligências realizadas tendo em vista a obtenção da informação cartográfica de base, assim como as frutuossas discussões tidas no dia-a-dia e nas reuniões de trabalho. Um muito obrigado, também, ao Eng.º Rui Pedro Henriques pela enorme e decisiva ajuda na modelação dos dados em SIG. Finalmente, uma palavra de agradecimento ao Prof. Paulo Brito pelos valiosos comentários, sugestões e orientações durante o período de realização do trabalho.

## Resumo

Em Portugal, a opção de promover a utilização de fontes de energia renovável arrasta consigo benefícios não apenas em termos da prevenção da diminuição dos recursos fósseis e redução da dependência energética, mas também ao nível do desenvolvimento estratégico das economias regionais. A valorização energética dos resíduos orgânicos associados à biomassa é, deste modo, um assunto de grande relevância nos dias de hoje, em especial nas comunidades ditas rurais.

O presente trabalho faz uma avaliação do potencial de produção de resíduos biomássicos de origem agro-florestal no Alto Alentejo, numa perspectiva de valorização energética da biomassa por processos de conversão termoquímicos. A metodologia é centrada no recurso, do tipo *bottom-up*, e foca-se na estimativa do potencial técnico de produção de biomassa na região com base em informação cartográfica e estatística actual. Os resultados são integrados num Sistema de Informação Geográfica (SIG) e a informação obtida georreferenciada. As componentes do potencial em biomassa analisadas são: área efectiva (em ha), disponibilidade de biomassa (em ton secas/ha) e potencial energético (em MWhe/ano). O potencial de resíduos agrícolas e florestais do Alto Alentejo estimou-se em 4.000 ton secas/ano e de 40.000 ton secas/ano, respetivamente. Esta quantidade de biomassa possui um potencial energético de 43.700 MWhe/ano, equivalente a 100% da energia elétrica consumida nos municípios de Alter do Chão, Crato e Sousel no ano de 2010. O sobreiro, a azinheira e o eucalipto possuem o maior potencial na floresta; na actividade agrícola, a vegetação herbácea e o olival constituem os resíduos mais importantes. Realiza-se uma análise primária à viabilidade da localização e das características de uma central termoelétrica de 10MVA na região, tendo-se concluído que a biomassa disponível não é suficiente para abastecer a instalação energética prevista. Soluções alternativas e espécies mais representativas em termos de exploração foram discutidas, tendo-se verificado que a opção de aproveitamento mais promissora para a região é a combustão ou gaseificação de resíduos em instalações descentralizadas de pequena dimensão.

## Abstract

In Portugal, the option of promoting the use of renewable energy sources yields benefits not only at preventing the depletion of fossil fuels and energy dependency on external sources, but also in terms of strategic development of regional economies. The energy valorization of the organic residues linked with biomass is, therefore, a very significant topic nowadays, especially on rural communities.

This work assesses the potential for the generation of biomass residues, both from forest and agricultural sources, in a region of Portugal (Alto Alentejo), with a perspective of energy valorization of the biomass by means of thermochemical conversion processes. The model uses a bottom-up and resource-focused approach, estimating the technical potential of bioenergy in the region based on current cartographic and statistical data. The results are integrated into a Geographical Information System (GIS) from which georeferenced information is obtained. The analyzed components related with the biomass potential are: effective area (in ha), biomass availability (in dry ton/ha) and energy potential (in MWhe/year). The potential of agricultural and forest residues in Alto Alentejo is estimated at 4000 dry ton/year and 40000 dry ton/year, respectively. This amount of biomass corresponds to an energy potential of 43700 MWhe/year, equivalent to 100% of the combined consumption of electricity in Alter do Chão, Crato and Sousel municipalities in 2010. Cork oak, holm oak and eucalyptus have the highest forest potentials; in terms of agricultural activity, herbaceous vegetation and olive yards are the most important residues. A primary analysis is done on the suitability of the location and characteristics of a 10MVA biomass power plant in the region and it was concluded that not enough biomass is available to supply the energy facility. Alternative solutions and the most representative species exploitable in the territory are also discussed and it was found that the most promising option for the region is combustion or gasification of residues in small scale facilities.

## Índice Geral

<b>Lista de Caixas .....</b>	<b>9</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>10</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>11</b>
<b>PARTE I – RESUMO ALARGADO DO TRABALHO.....</b>	<b>14</b>
<b>1 Introdução e formulação do problema</b>	<b>15</b>
1.1 Enquadramento e justificação do trabalho.....	15
1.2 Definição do problema e hipóteses .....	16
1.3 Motivação e objectivos .....	16
1.4 Metodologia geral e ferramentas utilizadas .....	17
1.4.1 Ferramenta de análise: “Quantum GIS” .....	17
1.4.2 Estrutura e organização do trabalho .....	17
<b>2 Revisão de Literatura</b>	<b>19</b>
2.1 Introdução .....	19
2.1.1 A energia e o progresso humano .....	19
2.1.2 O ressurgir das renováveis .....	22
2.1.3 As alterações climáticas e o ambiente .....	23
2.2 A biomassa como combustível.....	26
2.2.1 Introdução geral à bioenergia .....	26
2.2.2 Classificação e tipos de biomassa .....	28
2.2.3 Composição química da biomassa.....	30
2.2.4 Propriedades da biomassa como combustível .....	31
2.3 Processos de conversão de biomassa .....	35
2.3.1 Processos termoquímicos de conversão.....	35
2.3.2 Processos bioquímicos de conversão .....	41
2.4 Potencial em biomassa.....	42
2.4.1 Definição de potenciais .....	42
2.4.2 Global.....	43
2.4.3 Europa .....	45
2.4.4 Portugal .....	47
2.4.5 Outros países .....	50
2.5 Modelos de estimativa de biomassa .....	51
2.5.1 Biomassa florestal .....	51
2.5.2 Biomassa agrícola.....	54
2.5.3 Ferramentas relevantes na avaliação do potencial da bioenergia .....	56

<b>PARTE II – O POTENCIAL EM BIOMASSA .....</b>	<b>57</b>
<b>3 Material e Métodos</b>	<b>58</b>
3.1 Caracterização da área em estudo.....	58
3.1.1 O Alto Alentejo em revista .....	58
3.2 Metodologia .....	59
3.2.1 Sumário do procedimento utilizado.....	59
3.2.2 Coberto florestal e agrícola da área em estudo .....	60
3.2.3 Restrições ao potencial biomássico da área em estudo .....	63
3.2.4 Disponibilidade de biomassa .....	66
3.2.5 Potencial energético .....	67
<b>4 Resultados e Discussão</b>	<b>69</b>
4.1 Resultados.....	69
4.1.1 Área efectiva.....	69
4.1.2 Disponibilidade de biomassa .....	70
4.1.3 Potencial energético .....	72
4.2 Discussão .....	74
4.2.1 Distribuição espacial do potencial em biomassa .....	74
4.2.2 Central de biomassa de Portalegre .....	74
4.2.3 Soluções alternativas .....	75
4.2.4 Principais espécies exploráveis .....	76
<b>PARTE III – CONCLUSÕES .....</b>	<b>77</b>
<b>5 Conclusão</b>	<b>78</b>
5.1 Conclusões gerais .....	78
5.1.1 Sumário do trabalho e resultados obtidos .....	78
5.1.2 Limitações técnicas e principais contributos .....	79
5.2 Propostas de estudos futuros.....	80

## **Índice de Caixas**

<b>Caixa 1</b> – Principais impactos das alterações no sistema climático [22].....	24
<b>Caixa 2</b> – Factores associados ao uso da biomassa [109].....	27
<b>Caixa 3</b> – Tipos de gaseificadores e suas características principais [26,42,43,110,111].....	38
<b>Caixa 4</b> – Sumário de definições dos 5 potenciais reconhecidos na literatura [24,65].....	42
<b>Caixa 5</b> – Sumário de metodologias de avaliação do potencial de biomassa [67].....	45

## **Índice de Figuras**

<b>Figura 1</b> – Consumo mundial de combustíveis fósseis entre 1990 e 2035 [9,10]. .....	20
<b>Figura 2</b> – Relação entre o consumo e as reservas de petróleo, carvão e gás natural de 1980 a 2006. [9]. .....	21
<b>Figura 3</b> – A biomassa tem origem na captação da energia do sol, dióxido de carbono e água, produtos que estão na base da fotossíntese [33]......	27
<b>Figura 4</b> - Estrutura molecular da celulose [33]......	30
<b>Figura 5</b> - Estrutura molecular de uma hemicelulose típica, o xilano. [33]......	31
<b>Figura 6</b> - Exemplo de duas unidades estruturais de lenhina [33]......	31
<b>Figura 7</b> - Relação entre o poder calorífico e a humidade de um combustível biomássico. [37]......	33
<b>Figura 8</b> – Esquema exemplificativo dos processos de conversão termoquímicos e respectivos produtos [45]. .....	35
<b>Figura 9</b> – Diferentes etapas na combustão de uma partícula de biomassa, em termos de perda de volume em função do tempo. [38]. .....	36
<b>Figura 10</b> - Enquadramento geográfico do Alto Alentejo (distrito de Portalegre) e da área em estudo (concelhos de Alter do Chão, Arronches, Avis, Castelo de Vide, Crato, Marvão, Monforte, Portalegre e Sousel). .....	59
<b>Figura 11</b> - Classificação da área em estudo de acordo com os declives.....	64
<b>Figura 12</b> - Classificação da área em estudo de acordo com o critério de distância à via... ..	64
<b>Figura 13</b> - Classificação integrada de acordo com os critérios de distância e declive.....	65
<b>Figura 14</b> – Distribuição geográfica das famílias de biomassa consideradas no projecto. ....	70
<b>Figura 15</b> – Distribuição, por concelho, do potencial em biomassa (produção em toneladas/ano) do Alto Alentejo.....	72
<b>Figura 16</b> – Distribuição, por concelho, do potencial em biomassa (energia em MWh/ano) do Alto Alentejo.....	73

**Figura 17** – Distribuição espacial do potencial em biomassa (produção em ton/ano) no Alto Alentejo.....74

**Figura 18** – Localização e área de influência da central termoelétrica a biomassa de Portalegre.....75

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1</b> - Normas ASTM para a análise elementar da biomassa [33].....	32
<b>Tabela 2</b> - Normas ASTM para a análise imediata da biomassa [33]. .....	32
<b>Tabela 3</b> – Comparação entre os processos de gaseificação e combustão [26,40].....	38
<b>Tabela 4</b> – Reacções elementares de gaseificação [41].....	38
<b>Tabela 5</b> – Dados típicos relativos às condições da reacção e aos produtos resultantes de processos de pirólise (rápida, intermédia e lenta) e gaseificação [26,44].. .....	40
<b>Tabela 6</b> - Sumário do potencial de oferta da bioenergia no longo prazo para um conjunto de categorias, assim como os principais pressupostos que determinam esse potencial.....	44
<b>Tabela 7</b> - Resultados agregados da disponibilidade de biomassa na Europa (EU27) [76]....	46
<b>Tabela 8</b> – Resultados, por espécie florestal e agrícola, do potencial de produção de biomassa e potencial energético da região de Marvão [81]. .....	48
<b>Tabela 9</b> – Sumário de factores de biomassa encontrados na literatura (biomassa florestal). Estes factores são utilizados para converter biomassa comercial em biomassa total (ton/m <sup>3</sup> ) [47,50,54,82,83]. .....	52
<b>Tabela 10</b> – Sumário de factores de biomassa encontrados na literatura (biomassa florestal). Estes factores são utilizados para converter a área ocupada por cada espécie em biomassa anual (ton/ha/ano) [47,50,54,82,83]. .....	52
<b>Tabela 11</b> – Sumário e descrição de diversas equações de biomassa disponíveis na literatura. Estas equações permitem estimar a quantidade de biomassa acima do solo (em kg por árvore) através da relação entre essa biomassa e o diâmetro do tronco e/ou a altura [88,92–95]. .....	54
<b>Tabela 12</b> – Sumário de factores de biomassa encontrados na literatura (biomassa agrícola). Estes BF são usados para converter a área ocupada por cada espécie em biomassa total anual [47,82,96–99]. .....	55
<b>Tabela 13</b> – Dados usados na construção da base de dados SIG referente ao Alto Alentejo. ....	60
<b>Tabela 14</b> – Requisitos em matéria de dados para a estimativa do potencial em biomassa. ....	60
<b>Tabela 15</b> – Sumário dos parâmetros utilizados na definição das áreas efectivas de cada espécie florestal presente na COS'2007 (classificação nível 4). .....	61

<b>Tabela 16</b> – Sumário dos pressupostos utilizados na definição das áreas efectivas de cada espécie agrícola presente na COS'2007 (classificação nível 4). .....	62
<b>Tabela 17</b> – Classificação integrada de acordo com os critérios de distância e declive.....	65
<b>Tabela 18</b> - Sumário da produtividade de resíduos (em ton secas/ha/ano) para cada uma das famílias de biomassa florestal consideradas [47,82,83].....	66
<b>Tabela 19</b> - Sumário da produtividade de resíduos (em ton/ha/ano) para cada uma das famílias de biomassa agrícola consideradas [47,82,83].....	67
<b>Tabela 20</b> - Sumário do PCI (em GJ/ano) de cada uma das famílias de biomassa consideradas [47].....	68
<b>Tabela 21</b> – Resultados, por família de biomassa e concelho, da área efectiva de produção de biomassa residual de origem florestal. ....	69
<b>Tabela 22</b> – Resultados, por família de biomassa e concelho, da área efectiva de produção de biomassa residual de origem agrícola.....	70
<b>Tabela 23</b> – Resultados, por família de biomassa e concelho, da disponibilidade de biomassa residual de origem florestal (em ton secas/ano). ....	71
<b>Tabela 24</b> – Resultados, por família de biomassa e concelho, da disponibilidade de biomassa residual de origem agrícola.....	71
<b>Tabela 25</b> – Resultados, por família de biomassa e concelho, do potencial energético em biomassa residual de origem florestal.....	72
<b>Tabela 26</b> – Resultados, por família de biomassa e concelho, do potencial energético em biomassa residual de origem agrícola. ....	73

## Parte I

### Resumo alargado do trabalho

# Capítulo 1

## Introdução e formulação do problema

*Neste capítulo pretende-se fazer uma breve apresentação e enquadramento do trabalho, assim como descrever os objectivos a alcançar com o trabalho, incluindo a estrutura e as fases do mesmo.*

### 1.1 Enquadramento e justificação do trabalho

A bioenergia é uma das fontes mais importantes de energias renováveis, visto que se encontra disponível no estado líquido, no estado gasoso e sobretudo no estado sólido, sendo por isso uma das mais apropriadas para armazenar energia [1]. A bioenergia, como energia obtida a partir da biomassa, é uma das alternativas aos combustíveis fósseis, tendo condições para ser uma solução efectiva aos problemas de natureza ambiental e energética com que a sociedade actual está a ser confrontada. Efectivamente, a biomassa é a única energia renovável que pode ser convertida em combustíveis gasosos, líquidos ou sólidos por meio de tecnologias de conversão conhecidas. Actualmente, a partir dela pode produzir-se energia numa grande variedade de formas, que vão desde a energia térmica para aquecimento até ao fornecimento de combustíveis para aplicações móveis, nomeadamente, para os transportes. Assim, a biomassa tem potencial para poder oferecer um suporte de desenvolvimento estrutural sustentável das áreas rurais em Portugal e, em particular, no Alentejo.

Existem, basicamente, três tipos de materiais biomássicos e que se classificam de acordo com a sua origem. Culturas energéticas que são cultivadas principalmente para a produção de energia e cuja função é capturar a radiação solar e armazená-la na biomassa; exemplos de colheitas de energia são a colza, o girassol, o *miscanthus* e o milho. Resíduos agrícolas e florestais que são gerados na colheita de cereais, nas podas e cortes de árvores, tais como, por exemplo, palhas, pontas das podas da vinha e olival, resíduos resultantes de podas, limpezas e desramações de florestas; estes resíduos são especialmente adequados para a utilização como fontes de energia para as próprias unidades agrícolas no sentido de aumentar o rendimento das cadeias de cultivo. Por fim, referência ainda para os subprodutos e resíduos orgânicos que são gerados no processamento da biomassa para criação de produtos alimentares e que podem ser valorizados energeticamente; os subprodutos incluem os resíduos orgânicos das indústrias agro-alimentares, os efluentes da agro-pecuária e os resíduos do processamento industrial da madeira e de fibras vegetais; os resíduos orgânicos incluem os resíduos domésticos e as lamas dos efluentes domésticos e industriais, como por exemplo os resíduos da produção alimentar [1].

Estes tipos de biomassa podem ser tratados por processos químicos, bioquímicos ou termoquímicos com o objectivo de produzirem energia sob diferentes formas, nomeadamente, eléctrica, mecânica ou calorífica. Os tratamentos podem ser divididos em: processos termoquímicos (combustão, gaseificação, pirólise e liquefacção) e processos bioquímicos (digestão anaeróbia e fermentação) [2,3].

Sendo o Alentejo uma região do país onde a agricultura e a agro-indústria são uma das apostas estratégicas de desenvolvimento, a valorização energética de recursos

endógenos e resíduos agro-industriais surge como um meio de contribuição bastante interessante para o desenvolvimento estratégico da região [4]. A promoção do uso sustentável da biomassa para produção de energia é, assim, um assunto de extrema relevância nos dias de hoje, assumindo alguma importância face aos objectivos ambientais e energéticos estabelecidos, tanto a nível nacional como europeu (Objectivos EU: 20-20-20 até 2020 [5]). Por outro lado, dentro do objectivo nacional em aumentar em 100 MW a capacidade instalada em produção de energia eléctrica a partir de recursos biomássicos, a região do Alto Alentejo esteve posicionada como uma das candidatas a receber uma central de biomassa de 10 MW, que requereria para o seu funcionamento biomassa produzida na região.

Neste sentido, torna-se imprescindível conhecer em pormenor as quantidades de resíduos biomássicos de origem agro-florestal disponíveis na região do Alto Alentejo, sendo este o objectivo central neste trabalho.

## 1.2 Definição do problema e hipóteses

O problema abordado no presente trabalho pode ser formulado sob a forma da seguinte questão:

- Será possível, com base na informação geoestatística disponível, analisando informação numa base de dados especializada como os SIG, avaliar as quantidades disponíveis de biomassa num determinado contexto geográfico?

Com base na questão formulada, e de forma a auxiliar o trabalho realizado, estruturaram-se as seguintes hipóteses:

H1) A actividade agro-florestal produz um conjunto de resíduos e sub-produtos que podem ser aproveitados em termos energéticos e a conversão desta biomassa, designada de residual, tem por esta razão potencial económico.

H2) A região do Alto Alentejo possui um elevado potencial biomássico. Esta hipótese baseia-se no facto da floresta e da agricultura constituírem uma das suas apostas estratégicas de desenvolvimento.

H3) A avaliação das quantidades de biomassa florestal disponíveis num determinado contexto geográfico tem necessariamente de incluir limitações técnicas de acesso ao recurso relativas à orografia do terreno e à distância à rede viária. Por sua vez, em termos agrícolas devem considerar-se factores de disponibilidade para estimar quantidade de resíduos de forma mais real.

H4) É possível modelar, com recurso a ajuda computacional para integrar as diversas variáveis, toda a informação relativa à estimativa das quantidades específicas de biomassa produzidas por uma dada família de resíduos, dentro de um determinado território.

## 1.3 Motivação e objectivos

O presente trabalho foi motivado pelo diminuto desenvolvimento do sector da bioenergia na região do Alto Alentejo, nomeadamente no que diz respeito à existência de um adequado mapeamento da disponibilidade de biomassa residual no território (espelhado no número de investigações de carácter local encontradas na literatura

científica), tendo esta condicionante sido já apontada como uma das causas prováveis para a não concretização de alguns investimentos previstos para a região. O objectivo geral do trabalho consiste, essencialmente, em:

- 1) Apresentar uma análise metódica e sistemática no que concerne à quantificação e mapeamento do potencial biomássico das famílias de biomassa mais representativas do Alto Alentejo, numa perspetiva de valorização energética da sua biomassa por processos de conversão termoquímicos com base em cartografia de ocupação do solo;

Como objectivos secundários, mas não menos importantes, destacam-se:

- 1) Contribuir para a existência de informação base que permita a avaliação da viabilidade da implementação de instalações energéticas a biomassa na região, nomeadamente no que diz respeito às necessidades em matéria-prima de uma central de biomassa de 10 MVA;
- 2) Identificar as famílias de biomassa mais representativas no que diz respeito ao potencial em biomassa e avaliar a sua distribuição geográfica e espacial no território, de modo a definir eventuais caminhos e escalas de exploração do recurso.

## 1.4 Metodologia geral e ferramentas utilizadas

### 1.4.1 Ferramenta de análise SIG: “QuantumGIS”

O Quantum GIS (QGIS) é um Sistema de Informação Geográfica (SIG) *open source* e multiplataforma que permite criar, visualizar e analisar informação geoespacial sob a forma de uma base de dados especializada. Apesar da tradicional produção de mapas ser uma das funções do *software* de mais fácil compreensão, as funcionalidades básicas da aplicação vão muito para além disso, sendo a análise e manipulação de dados geoespaciais uma das suas capacidades com maior utilidade do ponto de vista da engenharia. Alguns tipos básicos de análise incluem o cálculo de distâncias e áreas, podendo os resultados ser visualizados em mapa ou tabulados para apoio a decisões em projectos que possuam uma grande componente espacial.

Desta forma, através do QGIS qualquer variável passível de georreferenciação pode ser estudada e a disponibilidade e produção de biomassa residual não constitui, naturalmente, excepção. A aplicação foi escolhida devido ao seu carácter *open source* e à sua versatilidade em termos de análise da informação geoespacial, tendo constituído uma ferramenta essencial na concretização dos objectivos do trabalho.

### 1.4.2 Estrutura e organização do trabalho

Com o presente trabalho pretendeu-se resolver de forma teórica e simulada um problema concreto relacionado com a avaliação e quantificação do potencial em biomassa de uma região de Portugal, especificamente o Alto Alentejo. O trabalho foi dividido em três partes e cinco capítulos no sentido de o estruturar de forma metódica, partindo-se de uma análise mais geral ao tema da bioenergia, até à situação particular da avaliação do seu potencial concreto. Foram utilizadas ferramentas e modelos teóricos próprios da engenharia florestal e ambiental, devidamente sustentados, de modo a ser

possível solucionar o problema sem perder de vista a objectividade da ciência e da engenharia.

Na Parte I, onde se incluem os capítulos 1 e 2, foram expostos conceitos fundamentais relacionados com o trabalho em si, nomeadamente em termos de contexto e importância do mesmo, motivação e objectivos, metodologia geral e ferramentas utilizadas e revisão da literatura, bem como o que se pensa ser a contribuição deste trabalho para o desenvolvimento do sector da biomassa, no sentido do seu aproveitamento numa região do interior do país de carácter marcadamente rural. Na revisão de literatura, deu-se uma ideia da importância da energia no desenvolvimento da humanidade e na importância que este conceito fundamental, nas suas diversas formas, acabou por ter no progresso da civilização. Alinhavou-se o contexto científico associado às alterações climáticas desde meados do séc. XIX, quando Fourier iniciou os seus trabalhos sobre os climas passados e as potenciais causas da sua variação, até à primeira década do séc. XXI e às assustadoras conclusões dos diversos relatórios periódicos do IPCC. Generalidades acerca das características da biomassa como combustível, incluindo a definição do conceito, os seus diversos tipos e a sua composição, foram apresentadas. Processos de conversão desta biomassa por meios termoquímicos foram expostos e processos de conversão da mesma biomassa por via bioquímica foram mencionados. Apresentou-se o largo espectro de estimativas do potencial da biomassa, diferenciando potenciais e resumindo metodologias. Primeiro, foi analisada a relevância da biomassa a nível global e europeu, nomeadamente através da revisão de um conjunto de trabalhos dedicados ao assunto. Estudou-se, seguidamente, o papel da biomassa em Portugal, revendo-se uma série de trabalhos focadas na avaliação do potencial deste recurso energético no território nacional. Comentou-se, ainda, um conjunto de investigações de relevo sobre o mesmo assunto, porém com contextos geográficos diferentes. Por fim, aludiu-se aos diferentes modelos de estimativa de biomassa, revendo conceitos e métodos, e diferenciando a componente florestal da componente agrícola.

Na Parte II, onde estão contidos os capítulos 3 e 4, reviram-se os objectivos específicos do trabalho e passou-se sumariamente em revista a região do Alto Alentejo do ponto de vista geográfico e socioeconómico. Descreveu-se, também, a metodologia utilizada no solucionar do problema formulado, sempre de forma detalhada, metódica e estruturada, de modo a ser possível a sua reprodução noutros contextos geográficos. Seguidamente foram apresentados e discutidos os resultados do trabalho, tendo-se estimado o potencial da bioenergia no território segundo três valências fundamentais, como sejam a área agro-florestal efectiva, a disponibilidade de biomassa e o potencial energético. Foi ainda analisada a distribuição espacial do recurso e sugeridas localizações para unidades produtoras de energia, tendo este factor como referência. Foi realizada uma crítica, do ponto de vista técnico, à potência atribuída à central termoeléctrica a biomassa prevista para Portalegre, devido à escassez de recursos na região para abastecer uma central da dimensão projectada.

Na Parte III, foi efectuada uma síntese das principais evidências retiradas dos resultados obtidos e também de que forma estes podem ser traduzidos em vantagens competitivas para o sector de actividade da bioenergia e para o crescimento económico da região, através da discussão dos principais contributos do trabalho. Foram ainda deixadas algumas notas, do ponto de vista técnico, sobre as principais limitações encontradas no desenvolvimento do trabalho, assim como uma visão genérica das implicações e potencial do trabalho, tendo em vista propostas de estudos futuros.

## Capítulo 2

### Revisão da literatura

*Neste capítulo realiza-se um levantamento exaustivo e respectivo sumário da produção científica efectuada na área de estudo em que se insere o trabalho. A revisão das matérias envolvidas no trabalho decorrerá segundo as seguintes fases: (1) Estabelecimento de um conjunto de questões que guiarão a pesquisa, (2) Aprendizagem de conceitos e teorias, (3) Reflexão sobre a aprendizagem, (4) Estado do conhecimento.*

#### 2.1 Introdução

##### 2.1.1 A energia e o progresso humano

Imagine-se que se pretende ter uma ideia acerca do nível de desenvolvimento de algumas nações do mundo. Um bom ponto de partida para dar início à tarefa seria olhar para o consumo de energia primária de cada uma delas e retirar as primeiras conclusões a partir daí. De facto, nos tempos modernos, a palavra desenvolvimento pode entender-se quase como um sinónimo da palavra energia, dada a importância crucial que esta tem no progresso humano. Na verdade, esta importância fundamental da energia não se limita a ser apenas uma constatação dos dias de hoje, uma vez que já nos primórdios da civilização o seu papel foi fundamental no estabelecimento da condição humana. As necessidades energéticas do Homem tornam-se relevantes, desde logo, por uma questão de sobrevivência e, assim, não é surpreendente que a energia – e o seu uso diversificado – seja vista como um factor chave na história da humanidade.

Efectivamente, é amplamente reconhecido na literatura [6–8] que a energia é essencial para o avanço da civilização. Numa perspectiva puramente termodinâmica pode afirmar-se que os fluxos e conversões de energia nas suas diversas formas sustentam e delimitam a vida de todos os seres vivos e, por consequência, influenciam também organismos muito mais complexos, como as sociedades e as civilizações [7]. O mais simples progresso humano não pode ocorrer sem transformar ou aproveitar a energia que faz parte da natureza, pelo que é inevitável que a disponibilidade e qualidade das fontes energéticas, bem como os seus modos de conversão, tenham deixado profundas impressões na jornada do homem até aos dias de hoje. Inúmeros imperativos energéticos têm moldado a vida na Terra, impondo limites na energia capaz de ser usada pelos homens. Deste modo, é possível interpretar o papel da energia na história do mundo de uma forma determinista, com o destino do homem a consistir numa procura contínua por novos níveis de complexidade, só possíveis pelo domínio de fluxos energéticos cada vez mais poderosos [7]. Esta nova perspectiva divide a evolução da espécie humana em distintas eras energéticas, realçando a importância de saltos tecnológicos que permitem o acesso a processos de conversão de energia mais eficientes e flexíveis [7].

Segundo Smil [7], a primeira era energética teve início ainda na pré-história quando o *Homo sapiens* conseguiu adquirir o controlo de novos fluxos energéticos, como o fogo e a agricultura. Esta era primordial teve o seu auge na domesticação de animais para trabalhar nos campos, bem como no aproveitamento do fogo para a produção de metais e outros elementos duráveis que permitiram o transporte de cargas cada vez mais

pesadas, já depois da invenção da roda [7,8]. A segunda grande transição apenas teve lugar vários milénios depois; o seu aparecimento não foi tão universal, mas a influência tida foi sem dúvida importante. Até então, o homem confiava apenas na energia da biomassa (recorrendo ao fogo) e na utilização indirecta da energia solar através da agricultura, mas, graças ao seu intelecto, algumas sociedades tradicionais foram capazes de superar os limites físicos impostos pelos seus próprios músculos e surgiram os moinhos de vento e as azenhas, simples mas engenhosas invenções desenhadas para adaptar dois fluxos energéticos renováveis (o vento e a água) às necessidades humanas. A terceira grande era energética – substituição dos animais por máquinas a vapor e da energia da biomassa pelos combustíveis fósseis – inicia-se há apenas alguns séculos num número reduzido de países europeus, tendo-se espalhado por todo o mundo ocidental já durante o século XX [7]. De facto, segundo T. Abbasi et al [8] a situação começou a mudar já na segunda metade do século XVIII. A primeira mina de carvão de que há registos começou a laborar numa base comercial em 1750, nos Estados Unidos, e logo este hidrocarboneto se tornou no combustível preferido para alimentar a máquina a vapor já que gerava mais calor em combustão do que quantidades equivalentes de biomassa. Com o alargar da Revolução Industrial desde Inglaterra até outras partes do planeta, o uso do carvão alastrou-se de forma proporcional. O mundo entrava definitivamente na era dos combustíveis fósseis. Cerca de 100 anos após a primeira exploração comercial de carvão, dava-se aquela que é considerada a primeira extracção de petróleo (em 1857 na Roménia) e o mundo passava a consumir de forma crescente este tipo de combustíveis até ao ponto de extrema dependência em que se encontra hoje, onde as necessidades energéticas mundiais são largamente satisfeitas através do uso de combustíveis fósseis [8]. A grande questão que importa colocar em relação a este assunto é “por quanto tempo vai o mercado energético global continuar a depender dos combustíveis fósseis?”[9]. Segundo o IEO 2011 [10], a factura energética suportada por estes combustíveis ainda será cerca de 80 % em 2035. Esta é, aliás, uma tendência já esperada como resultado da crescente industrialização de países sub-desenvolvidos e do uso ineficiente da energia à escala planetária. Assim, como ilustrado na Figura 1, a procura de energia para satisfazer as necessidades do consumo humano vai continuar a aumentar e a base desse aumento será a energia fóssil. A tendência de consumo destes combustíveis tem sido e continuará a ser crescente e o consumo mundial de petróleo tenderá a ser sempre superior ao de carvão e gás natural [9].

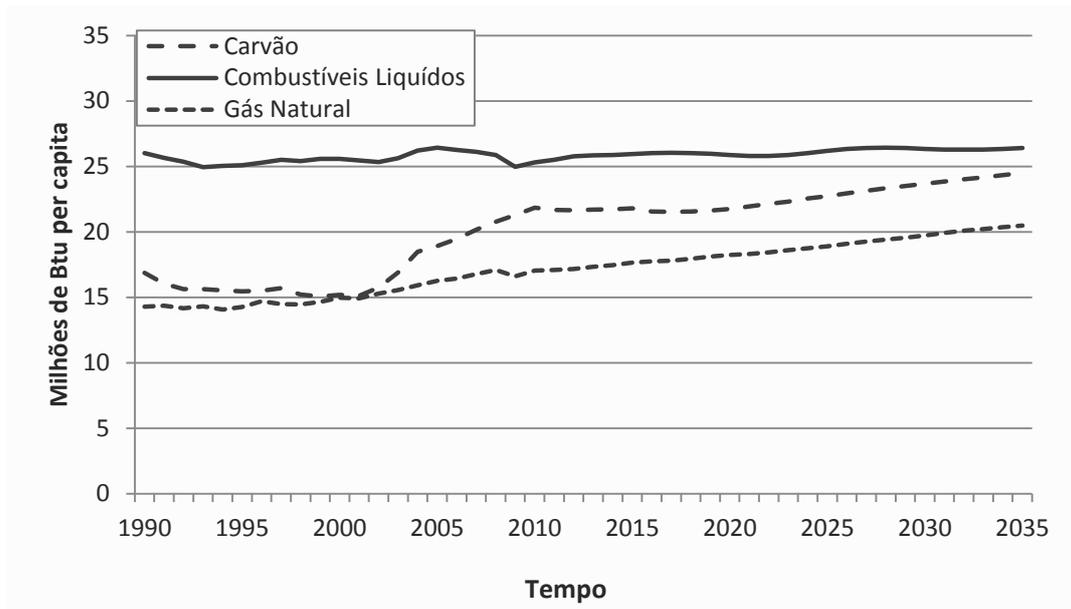
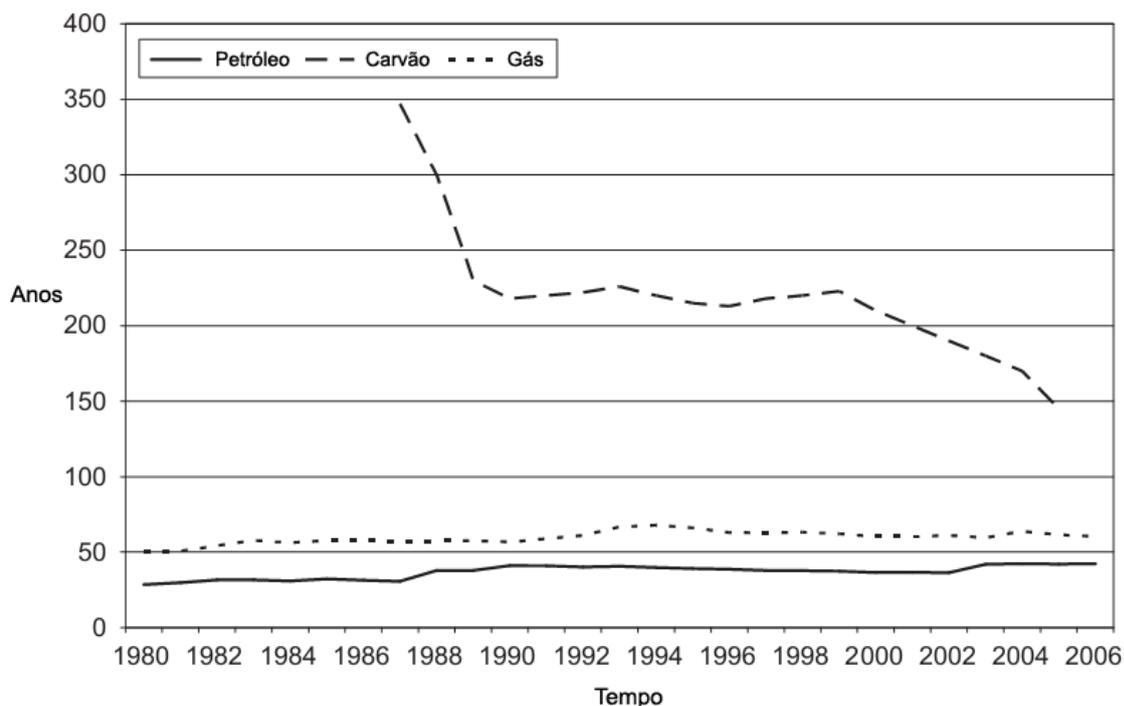


Figura 1 – Consumo mundial de combustíveis fósseis entre 1990 e 2035 [9,10].

De acordo com Shafiee et al [9], é possível estimar o momento em que os combustíveis fósseis vão atingir o limite através da razão entre o seu consumo e as reservas existentes. Assim, na Figura 2, ilustra-se a tendência seguida pelo consumo global e as reservas de petróleo, carvão e gás natural no período de tempo entre 1980 a 2006, sendo possível verificar que a relação entre o consumo e as reservas de petróleo e gás natural se manteve aproximadamente constante nos últimos 40 e 60 anos, respectivamente. Isto indica que, ao contrário do que se possa pensar, as reservas destes dois combustíveis aumentaram ao mesmo ritmo do consumo nas últimas décadas. Quanto ao carvão, a tendência é claramente negativa tendo as suas reservas decrescido de 350 para 150 anos em pouco mais de duas décadas. Finalmente, pode ainda concluir-se que a média do quociente consumo/reservas entre os anos 1980 e 2006 andou à volta dos 40, 200 e 70 anos para petróleo, carvão e gás natural, o que por outras palavras quer dizer que mantendo o consumo destes recursos fósseis ao nível do ano 2006 as suas reservas serão suficientes para mais 40, 200 e 70 anos, respectivamente. No entanto, sabe-se que o consumo global de energia terá tendência a aumentar com um forte suporte nos hidrocarbonetos, pelo que os números serão forçosamente mais baixos. Ainda segundo Shafiee [9], uma previsão mais “realista” aponta para que as reservas de petróleo e gás não durem mais de quatro décadas, e as reservas de carvão sejam suficientes para pouco mais de um século.



**Figura 2** – Relação entre o consumo e as reservas de petróleo, carvão e gás natural de 1980 a 2006. [9].

Deste modo, fica clara a importância crítica dos combustíveis fósseis na sociedade actual, bem como o peso considerável que a sua utilização tem no bem-estar das populações e no crescimento económico dos países. Assim, e em concordância com Yoda [11], o grande desafio da humanidade para as próximas décadas estará em conciliar de forma harmoniosa os três grandes vectores da sociedade contemporânea, a economia, a energia e o ambiente. Como poderá o Homem alcançar o crescimento económico, ter comida suficiente e, ao mesmo tempo, preservar e conservar o ambiente? A resposta não é clara, mas por aquilo que ficou demonstrado atrás, parece certo que os combustíveis fósseis não se apresentam como uma solução sustentável para o futuro; a

verdade é que a civilização actual se apoia num modelo energético que a médio prazo não garante reservas suficientes para a manutenção do progresso social e económico do mundo. Segundo Khan e Mariun [12] seria possível sustentar a civilização humana até ao final do século XXI, explorando as reservas de carvão e urânio (fissão nuclear), mas isso seria apenas o adiar do problema já que, eventualmente, surgiria sempre a necessidade de usar novas fontes energéticas para assegurar as necessidades ambientais e sociais do planeta. Algures no futuro, será necessário um qualquer salto tecnológico que permita ao Homem ultrapassar a barreira que lhe é imposta pela energia que consegue aproveitar, sob pena de ver a civilização regredir de forma severa. Na verdade, e tendo em conta o tema do trabalho, reconheça-se que é bastante improvável que sejam as energias renováveis *per si* a providenciar tal avanço. Estas fontes de energia terão, juntamente com o nuclear, um papel importante no paradigma energético pós-combustíveis fósseis, mas não possuem capacidade para suportar todo o peso energético de uma sociedade humana que caminha de forma desmesurada para atingir uma população de 8500 milhões em 2035 [13]. Essa função estará reservada para algo com um potencial mais alargado, um avanço tecnológico tal que terá a capacidade de mudar o destino da humanidade, tal como sucedeu há milénios com a descoberta do fogo.

### *2.1.2 O ressurgir das renováveis*

De acordo com T. Abbasi et al [8], a primeira grande onda no sentido de minimizar a dependência dos combustíveis fósseis e apostar nas renováveis teve lugar no início da década de 70 do século passado, quando o mundo atravessou a sua primeira crise petrolífera. Em 1973, a Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEC) restringiu o abastecimento de petróleo ao mercado e o efeito na economia global foi tremendo, uma vez que o aumento do custo do petróleo significou, em termos práticos, um aumento dos custos de produção de todos os outros produtos dele derivados. Para além disso, esta crise teve, também, o condão de alertar e aumentar a consciência ambiental de todos, pois começou-se a ter ideia que uma das principais causas de poluição estava relacionada com o uso de combustíveis fósseis em larga escala [9]. Pouco tempo depois, em 1979, chegou a segunda crise petrolífera da história, na forma de mais um aumento significativo do preço do crude exclusivamente por razões políticas, logo seguida, um ano depois, por uma guerra entre dois países ricos em reservas do chamado “ouro negro” - o Irão e o Iraque. Da guerra entre estas duas nações do médio-oriente, fez parte um ataque massivo às infraestruturas ligadas à exploração do petróleo, dada a sua importância económica [9]. Esta opção teve implicações a nível global, arrastando o ocidente para uma acentuada crise petrolífera e contribuindo para as primeiras reflexões sobre a importância do tema “segurança energética”. De facto, as nações do ocidente começaram a pensar que estar numa situação de dependência extrema de países tão instáveis política e socialmente, poderia ter graves consequências ao nível da oferta de combustíveis já que se corria sempre o risco de ver o seu preço aumentar, a sua produção diminuir ou, até mesmo, a sua exportação ser restringida [9].

E foi deste modo, com o tópico da “segurança energética” a ser visto como um problema de “segurança nacional”, que o mundo começou a olhar para os combustíveis ditos tradicionais – especialmente aqueles baseados no petróleo e no carvão – como uns “vilões” que abriam a possibilidade do mundo ruir. As grandes refinarias e centrais térmicas, até ali vistas como sinónimo de progresso, começaram a ser olhadas de outro modo, não só por colocarem em perigo o ambiente, mas também por poderem ter um grande peso no “bolso” das pessoas [9]. Assim, ao mesmo tempo que alguns países apostavam no nuclear ou no carvão em detrimento do petróleo, as energias renováveis começavam a solidificar a sua posição no mercado energético, nomeadamente em termos de I&D. Estas fontes de energia tinham taxas de renovação contemporâneas e,

portanto, regeneravam-se constantemente. Ainda mais importante, eram capazes de oferecer uma energia limpa, sem prejuízo para o ambiente, ao contrário da energia fóssil. Porém, em meados da década de 80 do passado século, o preço do crude voltou a descer e todo o ímpeto ganho pelas renováveis até ali foi-se desvanecendo e, pouco depois, já nos anos 90, o papel destas fontes de energia no mix energético mundial continuava a ser apenas marginal. Apesar de tudo, estas novas tecnologias não foram esquecidas e quando em 2008 o mundo enfrentou o terceiro choque petrolífero da história e se deparou com o petróleo a valer cerca de 100 USD por barril, os recursos renováveis já tinham ganho um balanço significativo, principalmente devido à grande atenção dos *media* para os problemas ambientais e para a questão das alterações climáticas.

### *2.1.3 As alterações climáticas e o ambiente*

A história da raça humana e das suas culturas está intimamente ligada ao clima do passado, que abriu e fechou janelas ao progresso e desenvolvimento da civilização. O conhecimento sobre os paleoclimas constitui, então, um passo decisivo no entendimento de como o homem chegou até onde se encontra hoje. As primeiras investigações científicas sobre os climas passados e as potenciais causas da sua variação tiveram início ainda na primeira metade do século XIX. Quem primeiro se debruçou sobre o tema foi o físico francês Joseph Fourier no seu *On the Temperatures of the Terrestrial Sphere and Interplanetary Space* [14], onde coloca a questão sobre quais os factores que determinam a temperatura média global da atmosfera. Nesse seu trabalho, Fourier conclui que a superfície da Terra emite radiação infravermelha e que o fluxo total de energia emitido deve igualar o fluxo total de energia absorvido através da radiação solar incidente. Porém, um problema surgiu. Dos cálculos do balanço radiativo da Terra, Fourier obtinha uma temperatura da atmosfera muito inferior à da fusão da água o que não correspondia às observações e, deste modo, foi levado a admitir a existência de um qualquer mecanismo que fosse responsável pelo aumento de temperatura observado. Ocorreu-lhe que esse tal mecanismo pudesse ser semelhante a uma estufa [14], isto é, a atmosfera deveria ser capaz de interceptar parte da radiação infravermelha emitida pela superfície, evitando o seu escape total para o espaço exterior [15].

Apesar de brilhante, Fourier nunca conseguiu obter uma base científica convincente para a discrepância que tinha encontrado e foi apenas com os trabalhos do químico e engenheiro irlandês John Tyndall que se fez alguma luz sobre o assunto. No seu laboratório, Tyndall foi o primeiro a realizar experiências concretas (utilizando um espectrofotómetro de desenho próprio) sobre a capacidade de absorção e emissão de radiação infravermelha por parte de alguns gases constituintes da atmosfera [16,17]. Realizou experiências com alguns dos componentes presentes no ar, tendo concluído que, por um lado, gases como o azoto e o oxigénio eram praticamente transparentes à radiação infravermelha e que, por outro, o dióxido de carbono, o metano e o vapor de água eram opacos a essa mesma radiação, absorvendo-a [18,19]. Estavam assim identificados os primeiros gases com efeito de estufa (GEE) e estava também explicada a discrepância de Fourier: a presença de GEE na atmosfera gerava um efeito de estufa natural responsável pela temperatura média global de 15°C, em lugar dos expectáveis 18°C negativos que se verificariam na sua ausência [15].

Daí em diante, a influência da concentração atmosférica de GEE na temperatura começou a interessar os cientistas e a possibilidade da existência de uma relação entre as actividades humanas e o clima foi avançada primeiramente, embora sem grande preocupação, pelo químico sueco Svante Arrhenius nos seus trabalhos sobre o efeito da variação da concentração de CO<sub>2</sub> na temperatura média global da atmosfera. Mais tarde,

em 1938, o engenheiro Guy Stewart Callendar foi mais longe e, com base na análise de séries de temperatura em dezenas de estações meteorológicas e na observação do recuo dos glaciares, declarou que o aumento da temperatura média global verificado desde o início do século XX era provocado pelas emissões de CO<sub>2</sub> resultantes do uso dos combustíveis fósseis. Na altura, as afirmações de Callendar foram recebidas com bastante cepticismo e o problema só ficou devidamente esclarecido anos mais tarde quando Gilbert Plass se dedicou ao estudo do modo como o CO<sub>2</sub> absorve a radiação infravermelha nos vários níveis da atmosfera e concluiu que o aumento da sua concentração provocava efectivamente um aumento da temperatura [15,20]. A explicação deste fenómeno estava encontrada: quando se aumenta a concentração de CO<sub>2</sub> a radiação infravermelha que é emitida passa a ter origem, em média, a uma maior altitude na troposfera. Deste modo, como a temperatura é mais baixa a maiores altitudes, de acordo com as leis da teoria da radiação a quantidade total de radiação infravermelha emitida é menor, pelo que se cria um desequilíbrio entre o fluxo radiativo absorvido pela Terra e o fluxo radiativo emitido pela Terra no infravermelho. Esse equilíbrio radiativo tem de ser repostado e a resposta natural do sistema é a de aumentar a temperatura da baixa atmosfera [15,19].

Avançando no tempo, verifica-se que nos últimos 20 anos o interesse na questão das alterações climáticas tem ido muito para além da curiosidade científica e a vertente política tem dominado as discussões sobre o tema. Assim, em 1992, durante a Cimeira da Terra na cidade do Rio de Janeiro, foi apresentada a Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas (UNFCCC) com o objectivo de materializar o resultado das discussões sobre o clima iniciadas no final da década de 1980, tendo esta convenção contribuído para a definição de um conjunto de linhas de orientação destinadas ao combate às alterações climáticas a nível global. Mais tarde, na sequência do compromisso voluntário assumido na UNFCCC surgiu, durante a terceira Conferência das Partes em 1997, o Protocolo de Quioto. Este Protocolo teve como ponto central o estabelecer de metas de redução obrigatórias das emissões GEE para o conjunto de países desenvolvidos, de 5% no período de cumprimento do acordo 2008-2012, relativamente aos níveis de emissões de 1990. Apesar das inúmeras cimeiras e conferências, cujos contornos são essencialmente políticos, a questão das alterações climáticas não é

**Caixa 1** – Principais impactos das alterações no sistema climático [22].

1) Sem a redução das emissões mundiais de GEE, o IPCC prevê um aumento da temperatura global na ordem dos 1,8 - 4,0°C acima dos níveis de 1980-1999, em 2100. O limite dos 2.0°C acordado pela União europeia seria atingido entre 2040 e 2030 em todos os cenários.

2) A extensão de gelo do Ártico diminuiu cerca de 10% por década, desde 1979. Em Setembro de 2007 a extensão mínima do coberto de gelo era metade da extensão mínima normal nos anos 50.

3) A subida do nível médio dos oceanos tem acelerado nos últimos 15 anos. O IPCC prevê uma subida de 0.18 - 0.59m acima dos níveis de 1990, em 2100.

4) Os glaciares alpinos perderam cerca de dois terços do seu volume entre 1850 e 2009. A sua extensão reduzir-se-á cerca de um terço em relação aos níveis actuais, se o aumento da temperatura global atingir os 2°C.

5) A acidificação das águas dos oceanos está a ocorrer em resultado do aumento da concentração atmosférica de CO<sub>2</sub>. Os recifes de coral, importantes comunidades de biodiversidade, estão em perigo, não só pela acidificação dos oceanos, mas também pelo aumento da temperatura das águas. Em 2100 o pH dos oceanos pode atingir 7,8, o que corresponde a um aumento de 150% quando comparado com os valores pré-industriais.

um assunto encerrado em termos científicos. Na verdade, é hoje globalmente aceite que o aumento da concentração antropogénica de GEE (nomeadamente CO<sub>2</sub>) conduz a um aumento da temperatura média global, mas existem, no entanto, opiniões muito dispersas quanto à magnitude deste aumento relacionadas, essencialmente, com o impacto dos fenómenos de *feedback* positivo que, em teoria, têm potencial para elevar as consequências das mudanças no clima global a um nível catastrófico. Uma das visões mais respeitadas pelas instâncias internacionais, onde a preocupação no que diz respeito à influência das actividades humanas no clima é cada vez mais generalizada, é a do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC), criado em 1988 com a missão de analisar a problemática do clima e das suas alterações. No seu quarto relatório de avaliação [21], esta organização conclui que “o observado aumento da temperatura média global desde meados do século XX está muito provavelmente relacionado com o aumento da concentração de GEE de origem antropogénica” e que “mesmo com uma redução adequada dos níveis de GEE na atmosfera o aumento de temperatura e a subida do nível médio dos oceanos continuariam durante décadas devido às escalas temporais associadas aos processos climáticos” [21]. Na Caixa 1 encontram-se resumidas as principais consequências das eventuais alterações climáticas no futuro [21,22].

Pelo cenário descrito até aqui fica claro que o modelo socioeconómico actual depende substancialmente da produção e do consumo de energia, tanto para se manter como para evoluir, sendo esta dependência fortemente suportada por combustíveis de origem fóssil. Estes combustíveis não possuem reservas infinitas, e o seu impacto é negativo a nível ambiental, especificamente naquilo que se relaciona com as emissões de GEE para a atmosfera. Desde 1990, o ano de referência do Protocolo de Quioto, as emissões mundiais de CO<sub>2</sub> aumentaram de 20,9Gt para 28,8Gt [13] e a sua concentração atmosférica passou de 278 ppm (partes por milhão) antes da revolução industrial, para um valor médio de 387 ppm no ano de 2009 [22], pelo que possivelmente se caminha para que algumas das consequências das alterações no clima descritas anteriormente possam mesmo tornar-se realidade. Para além disto, é bastante notório que o actual paradigma de desenvolvimento da sociedade é insustentável a médio/longo prazo e uma transição para um mix energético com maior peso de energias renováveis seja, quiçá, necessária. Estas fontes de energia renovam-se constantemente, tendo por isso um potencial infinito; devido ao seu carácter limpo e endógeno, considera-se que constituirão (juntamente com a energia nuclear) parte essencial do modelo energético do futuro, com a bioenergia a assumir um natural destaque devido às suas potencialidades, por exemplo, ao nível do aproveitamento energético da biomassa residual agrícola e florestal, vertente que se explora de seguida e constitui, precisamente, o tema central do trabalho.

## 2.2 A biomassa como combustível

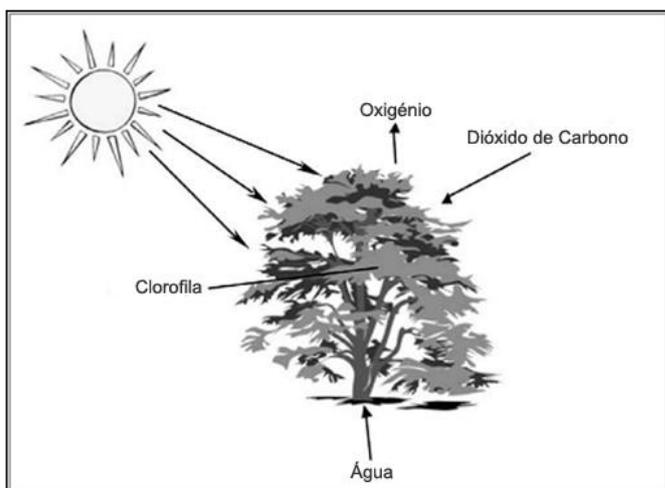
### 2.2.1 Introdução geral à bioenergia

A importância vital da bioenergia ao longo da história é um facto inegável. Desde o amanhecer dos tempos que este recurso tem sido o principal manancial de abastecimento das necessidades energéticas do homem e as civilizações passadas terão sido as primeiras – e talvez as maiores - testemunhas disso mesmo. A biomassa foi a fundação sobre a qual as primeiras sociedades se ergueram e pode mesmo dizer-se que as florestas significaram na antiguidade aquilo que o petróleo significa nos dias de hoje [23].

Assim, devido a estes antecedentes históricos, não chega a ser surpreendente o facto de a bioenergia continuar a desempenhar um papel bastante relevante nas necessidades energéticas de mais de 1/3 da população mundial [23]. Na verdade, uma das maiores curiosidades relacionadas com esta forma de energia está ligada a isso mesmo. Por um lado, a bioenergia é a principal fonte energética de uma série de países e regiões mais pobres (p. ex. Butão 86%, Nepal 97%, Ásia 16%, Sahel (África) 81%, África 31% [24]), sendo o seu aproveitamento feito através da obtenção de combustíveis não refinados usados de maneira estritamente tradicional. Esta bioenergia é, portanto, uma prática profundamente enraizada no quotidiano dos países em desenvolvimento, como fonte de energia dominante nas necessidades diárias das populações, importância essa que não surge sem custos humanos, sociais e ambientais bastante elevados. Esses custos, sabe-se, resultam da forma bastante simples como é feita a conversão de energia já que em aplicações residenciais se recorre, normalmente, ao uso generalizado de fogueiras a céu aberto ou a simples fornos a lenha para providenciar as fontes de luz e calor tão necessárias para a vida diária das populações [23]. Por outro lado, e ao mesmo tempo, a energia obtida a partir da biomassa é amplamente considerada como um dos vectores energéticos com maior potencial de crescimento nos países industrializados, devido à sua versatilidade para alimentar os serviços energéticos, tanto ao nível dos transportes como da produção de electricidade e calor. Esta bioenergia, apelidada colectivamente de “moderna”, está ainda numa fase de transição e implementação nos países industrializados e representa um desafio na medida em que nada garante que a sua crescente importância no mix energético mundial será efectuada de uma maneira ambiental e socialmente correcta [23]. Mesmo assim, e perspectivando uma redução dos custos de produção e conversão, espera-se que a “forma” mais moderna da bioenergia consolide a sua posição no mix energético do futuro, algo reforçado pela crescente tendência na procura de fontes de energia neutras em termos de emissões de dióxido de carbono e justificando, também desta maneira, o interesse numa exploração mais aprofundada do tema nas próximas linhas.

A terminologia usada na área da bioenergia é, geralmente, motivo de alguma confusão devido à enorme variedade de fontes passíveis de serem classificadas como biomassa e, por isso, acaba por ser perfeitamente natural que a sua definição surja na literatura como tendo vários significados, uns mais abrangentes que outros. Uma das definições usadas como referência é a constante na Directiva 2001/77/CE que designa a biomassa como a “fracção biodegradável de produtos e resíduos da agricultura (incluindo substâncias vegetais e animais), floresta e indústrias conexas, bem como a fracção biodegradável dos resíduos industriais e urbanos” [25]. Esta definição, apesar de bastante relevante em termos do significado prático do conceito, nada nos diz acerca da origem científica do termo, pelo que, de uma forma mais genérica, se pode afirmar que a biomassa abrange todo o material biológico contemporâneo (não fóssil) com origem na conversão de energia solar em matéria vegetal, através da fotossíntese [1,26,27].

De facto, a biomassa pode ser considerada como uma forma de armazenar a energia do sol, pois toda ela tem origem na captação da energia dos raios solares pela clorofila das plantas durante a fotossíntese. Apesar da eficiência global do processo de conversão ser bastante baixa (cerca de 1%) [1], a natureza conseguiu dar resposta a duas questões chave associadas a todas as tecnologias de aproveitamento da energia solar: em primeiro lugar, como captar a energia quando ela se encontra disponível e, depois, como armazená-la para que possa ser usada quando o sol não brilha. Efectivamente, e tal como ilustrado na Figura 3, através da fotossíntese as plantas convertem o dióxido de carbono presente na atmosfera e a água absorvida pelas raízes em matéria orgânica que irá dar origem à estrutura da planta em si. A energia do sol é, então, concentrada e armazenada nas ligações químicas dos componentes estruturais das plantas (caules, troncos, etc.), podendo ser novamente libertada quando as ligações entre as moléculas adjacentes de carbono, oxigénio e hidrogénio são quebradas por processos biológicos ou termoquímicos [1]. Outra condicionante fundamental ultrapassada pelo engenho da natureza foi a das emissões de GEE, uma vez que o carbono orgânico libertado durante a conversão da biomassa é reciclado através do ciclo biogeoquímico do carbono. Neste processo, o CO<sub>2</sub> absorvido durante o crescimento das plantas é simplesmente devolvido à atmosfera, pelo que em termos gerais se considera que a bioenergia é neutra em termos carbónicos e não contribui para o aumento concentração deste gás na atmosfera. É a



**Figura 3** – A biomassa tem origem na captação da energia do sol, dióxido de carbono e água, produtos que estão na base da fotossíntese [33].

**Caixa 2** – Factores associados ao uso da biomassa [109].

#### A. Factores ambientais

- + Redução das emissões de CO<sub>2</sub> e de outros gases poluentes para a atmosfera. Se usada de forma sustentável a bioenergia é neutra em termos carbónicos.
- + Diminuição dos problemas ambientais associados à erosão e à desertificação.
- + Contribuição para a limpeza das matas e para a regeneração das florestas.
- + Redução do risco de incêndios e maior facilidade na sua extinção.
- + Melhoria do panorama fitossanitário associado às florestas e redução do risco de pestes e outras pragas.
- + Diminuição da deposição não controlada de resíduos e subprodutos. As cinzas obtidas no processo de combustão servem como fertilizante.
- Potenciais problemas se a extracção da matéria biológica não for “amiga do ambiente”: perda de nutrientes, erosão, alcalinização dos solos irrigados, alteração dos ecossistemas e perda de biodiversidade.
- Efeitos negativos do uso de maquinaria pesada: compactação do solo, alteração das paisagens, poluição sonora, poluição atmosférica.

#### B. Factores não-ambientais

##### B.1. Económicos

- + Diversificação das fontes energéticas
- + Aumento da segurança no que diz respeito aos preços da energia.
- + Diminuição do nível de dependência do exterior e menor susceptibilidade à instabilidade política e social dos países exportadores.
- + Menores custos no transporte da electricidade devido à localização descentralizada da sua produção.

capacidade fotossintética das plantas que lhes confere a designação de neutralidade carbónica, significando apenas que não é introduzido qualquer “carbono novo” na atmosfera. Porém, não é totalmente correcto classificar a bioenergia de “limpa”, uma vez que existem alguns problemas de natureza ambiental relacionados com a sua exploração que ainda não foram resolvidos. A produção e transporte de biomassa, por exemplo, requerem frequentemente *inputs* de energia não renovável (combustíveis fósseis) e podem, também, estar associados a problemas de degradação dos solos e dos recursos hídricos. Este problema é amplamente reconhecido na literatura [1,26–29], mas muitas vezes “esquecido” pela opinião pública em geral. Mesmo assim, é inegável que o uso adequado da biomassa é bastante desejável por possuir enormes potencialidades, havendo poucas dúvidas que esta fonte de energia irá desempenhar um papel bastante relevante como um dos combustíveis sustentáveis do futuro [23,29,30]. Para além disso, não terá sido por acaso que o interesse nesta forma de energia tenha disparado de forma

abrupta nos últimos tempos. Na verdade, de acordo com McKendry [1], existem diversos estímulos que justificam toda esta atenção. Em primeiro lugar, estão os desenvolvimentos tecnológicos mais recentes no que diz respeito às técnicas de conversão de biomassa e culturas energéticas que prometem aplicações mais eficientes e menos onerosas, ao que se junta a necessidade de introduzir novas culturas - não relacionadas com a produção de alimentos - como estímulo para a agricultura. Salvo em algumas regiões na Ásia e em África a capacidade de produção agrícola suplanta em muito as necessidades, pelo que os agricultores recebem para manter os campos não cultivados. Estas culturas menos intensivas possuem também benefícios ambientais derivados da redução do uso de fertilizantes e pesticidas. Em segundo lugar nesta hierarquia de incentivos à utilização da bioenergia estão as questões relacionadas com as alterações climáticas e a segurança energética dos países, uma vez que esta forma de energia possui um carácter endógeno e se encontra disponível em quase todas as regiões do globo. A produção de biomassa pode ainda gerar emprego e contribuir para a mitigação do êxodo das populações rurais [1,31]. Na Caixa 2 são listadas as principais externalidades associadas à utilização da biomassa como um vector energético moderno.

#### **B.1. Sociais**

- + Mais emprego devido ao crescimento do mercado associado à bioenergia.
- + Desenvolvimento sustentável: redução do uso de energia fóssil.
- + Desenvolvimento rural e melhoria da equidade entre regiões. Impacto positivo no sector industrial e nas oportunidades de emprego das comunidades rurais.
- + Mitigação do despovoamento das áreas rurais.

### **2.2.2 Classificação e tipos de biomassa**

Os recursos energéticos identificados como biomassa são muito diversos e representam um vasto leque de produtos e materiais de origem biológica. Deste modo, encontra-se bastante clara a necessidade de obter um sistema de classificação simples e entendível que permita, por exemplo, agrupar os materiais biomássicos de acordo com as suas propriedades e características principais. Actualmente, podem encontrar-se na literatura diversas classificações [1,27,28,32] que variam de acordo com a visão e opinião dos autores. Tendo em vista os objectivos delineados, no presente trabalho considera-se que existem, basicamente, três tipos de biomassa que se classificam de acordo com a sua origem:

- 1) Culturas energéticas, que são cultivadas principalmente para a produção de combustíveis e cuja função é capturar a radiação solar e armazená-la em termos de biomassa; exemplos de culturas energéticas são a colza, o girassol, o *miscanthus* e o milho [1].
- 2) Resíduos agrícolas e florestais que são gerados na colheita de cereais, nas podas e cortes de árvores, tais como, por exemplo, palhas, pontas das podas da vinha e olival, resíduos resultantes de podas, limpezas e desramações de florestas; estes resíduos são especialmente adequados para a utilização como fontes de energia para as próprias unidades agrícolas no sentido de aumentar o rendimento das cadeias de cultivo [1].
- 3) Subprodutos e resíduos orgânicos que são gerados no processamento de materiais para criação de produtos alimentares e que podem ser valorizados energeticamente; os subprodutos incluem os resíduos das indústrias agro-alimentares, os efluentes da agro-pecuária e os resíduos do processamento industrial da madeira e de fibras vegetais; os resíduos orgânicos incluem os resíduos domésticos e as lamas dos efluentes domésticos e industriais, como por exemplo os resíduos da produção alimentar [1].

A biomassa pode ainda ser categorizada em dois grupos principais, dependendo da sua proveniência ser directa ou derivada [33]:

- 1) Biomassa primária que inclui madeira, plantas e folhas (lenhinocelulose); e ainda culturas e outros produtos vegetais (carboidratos);
- 2) Biomassa residual ou secundária que inclui todos os desperdícios sólidos e líquidos provenientes de resíduos sólidos urbanos, esgotos, resíduos animais e humanos; gases provenientes de aterros (metano); e outros resíduos agrícolas e florestais;

A biomassa lenhinocelulósica corresponde à parte fibrosa do material constituinte das plantas e, tal como a designação indica, a celulose e a lenhina são os seus principais constituintes. Um bom exemplo de uma biomassa deste tipo é o de qualquer planta lenhosa, isto é, plantas vasculares que são capazes de produzir madeira como tecido de suporte aos seus caules perenes localizados acima da superfície do solo. Tipicamente, estas plantas são caracterizadas por um crescimento bastante lento e compostas por fibras fortemente agrupadas, o que lhes confere uma superfície externa (casca) bastante sólida [1]. As plantas lenhosas incluem, em termos gerais, árvores, arbustos e cactos e podem ser divididas em duas classes distintas: (1) herbáceas e (2) não herbáceas. As plantas herbáceas possuem folhas e caules que morrem anualmente no final da sua estação de crescimento. Em contraste, as plantas não herbáceas são plantas lenhosas que possuem caules acima da superfície do solo que permanecem vivos e florescem ano após ano [33]. O arroz e o trigo são exemplos da primeira classe, enquanto a vinha e árvores como a azinheira, sobreiro e pinheiro são exemplos da segunda. Enquanto o “corpo” da planta ou árvore (tronco, ramos, folhas, etc.) é lenhoso, os frutos são uma fonte de carboidratos, amido e açúcares. Este fruto, ao contrário dos materiais lenhosos, é digerível pelos humanos e, por isso, largamente usado na alimentação. Quando comparados com os compostos lenhosos, os carboidratos são bastante mais fáceis de dissolver, pelo que é bastante mais fácil produzir combustíveis líquidos a partir deles por técnicas de fermentação ou outros processos [33].

A biomassa secundária é obtida durante as várias etapas de produção da biomassa primária, com destaque para os resíduos provenientes dos núcleos urbanos e industriais (RSU – Resíduos Sólidos Urbanos, madeira de demolição, serradura) e das actividades humanas (agrícolas e florestais). A biomassa gerada pela actividade

doméstica do homem inclui, essencialmente, a fracção orgânica dos RSU (desperdícios alimentares, folhas, resíduos provenientes de cortes de relva), pelo que resíduos não orgânicos como plásticos, metais e vidro não são considerados. Os efluentes de estações depuradoras de águas residuais e os óleos (gorduras) vegetais passíveis de transformação em biocombustíveis estão também incluídos e constituem uma importante fonte de biomassa. A biomassa residual proveniente de actividade agrícola engloba todos os resíduos gerados pela agricultura (herbáceos ou não herbáceos), mas também resíduos agro-alimentares (produção de azeite, fabrico de frutos secos ou indústrias vinícolas), que se podem utilizar directamente como combustível ou como matéria-prima para obtenção de outros combustíveis. A biomassa secundária gerada pela floresta inclui, por sua vez, todos os subprodutos gerados pelas acções de gestão e manutenção da massa florestal, como podas, desbastes, desramações ou cortes finais.

A biomassa residual de origem agrícola (excluindo a indústria agro-alimentar) e florestal constituem, precisamente, o tipo de biomassa estudada e abordada neste trabalho.

### 2.2.3 Composição química da biomassa primária

A biomassa primária é uma mistura complexa de diversos materiais orgânicos, tais como carboidratos, gorduras e proteínas a que se juntam pequenas quantidades de sódio, fósforo e outros minerais. A biomassa pode, então, ser caracterizada pela sua estrutura, ou seja, pelos seus componentes principais: extractos, fibras ou componentes da parede celular (lenhina, celulose e hemicelulose) e minerais formadores de cinzas [33]:

- 1) Extractos: substâncias presentes nos tecidos vegetais ou animais que podem ser separadas por tratamentos com solventes e recuperadas pela evaporação da solução. Incluem óleos, resinas, gomas, gorduras, entre outros.
- 2) Parede celular: está na base da força estrutural da planta, permitindo que esta se mantenha acima do solo sem grande suporte. Uma parede celular típica é composta por carboidratos e lenhina. Os carboidratos são, basicamente, fibras de celulose e hemicelulose que reforçam a estrutura da planta; a lenhina tem a função de manter estas fibras agrupadas.
- 3) Cinzas: constituem a componente inorgânica da biomassa

A celulose (Figura 4) é o composto orgânico mais abundante no planeta e também um dos principais componentes estruturais das paredes de fibra das plantas lenhosas. É um hidrato de carbono de cadeia longa, um polissacarídeo, ou seja, um polímero natural com estrutura cristalina composta por milhares de unidades de glicose. As moléculas de celulose são lineares e ligam-se umas às outras por ligações intermoleculares relativamente fortes, que a tornam bastante estável e resistente a ataques químicos ou biológicos. A celulose é, ainda, um dos principais componentes da madeira, representando cerca de 40 a 60% da sua massa seca [1,26,33].

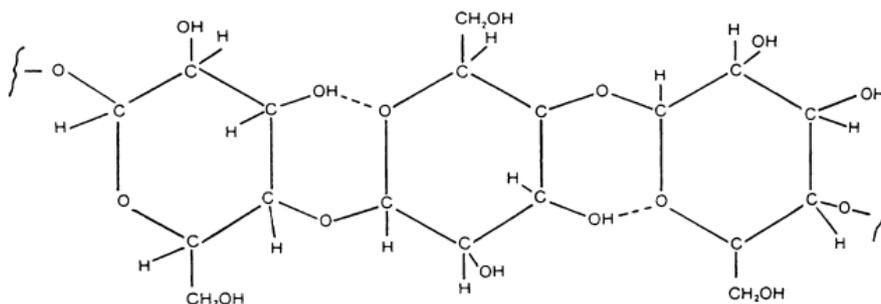
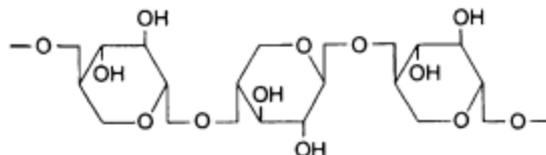


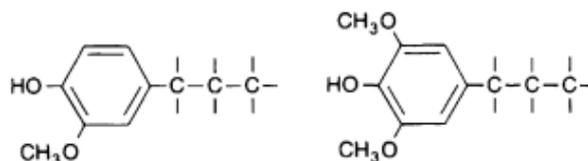
Figura 4 - Estrutura molecular da celulose [33].

A hemicelulose, por outro lado, caracteriza-se por não possuir uma estrutura cristalina ordenada, ou seja, amorfa, que pouca resistência estrutural confere à planta. Consiste num grupo de carboidratos de cadeia curta com ramificações (glicose, xilose, arabinose) e representa 20 a 40% da massa de madeira seca. A Figura 5 mostra o arranjo molecular de uma molécula típica de hemicelulose, o xilano [1,26,33].

A lenhina é um dos componentes mais importantes e abundantes do reino vegetal e consiste num polímero aromático amorfo (Figura 6), não solúvel em água e de difícil degradação. Proporciona integridade estrutural às plantas, actuando como uma barreira física que retarda a degradação da celulose e da hemicelulose. Constitui 10 a 25% da massa seca de madeira [1,26,33].



**Figura 5** - Estrutura molecular de uma hemicelulose típica, o xilano. [33].



**Figura 6** - Exemplo de duas unidades estruturais de lenhina [33].

#### 2.2.4 Propriedades da biomassa como combustível

A caracterização física e química da biomassa assume-se como uma informação fundamental da caracterização das suas propriedades como combustível sólido. Na literatura [27,32,34,35], podem encontrar-se diferentes indicadores usados para quantificar estas propriedades, dos quais os mais importantes são: (1) Análise elementar, (2) Análise imediata, (3) Poder calorífico e (4) Densidade aparente. A determinação experimental destas propriedades está regulamentada pelas normas ASTM E-870-06 [1,27,33].

##### *Análise elementar*

A análise elementar de um combustível é determinada experimentalmente em laboratório e quantifica as percentagens dos elementos individuais do material, especificamente, as percentagens mássicas de carbono, hidrogénio, azoto, enxofre, oxigénio e cinzas. As normas ASTM utilizadas para a determinação experimental da composição elementar da biomassa encontram-se listadas na Tabela 1.

**Tabela 1** - Normas ASTM para a análise elementar da biomassa [33].

<b>Constituinte da biomassa</b>	<b>Métodos analíticos</b>
Carbono, Hidrogénio	ASTM E-777
Azoto	ASTM E-778
Oxigénio	Por diferença
Cinzas	ASTM D-1102 para biomassa lenhosa

*Análise imediata*

A análise imediata é, também ela, determinada experimentalmente em laboratório mas quantifica as percentagens mássicas em termos de componentes gerais, o que inclui parâmetros como humidade, matéria volátil, carbono fixo e cinzas, tratando-se de um processo relativamente simples e pouco dispendioso. As normas usadas na sua determinação encontram-se resumidas na Tabela 2.

**Tabela 2** - Normas ASTM para a análise imediata da biomassa [33].

<b>Constituinte da biomassa</b>	<b>Métodos analíticos</b>
Humidade	ASTM E-871 para biomassa lenhosa
Matéria volátil	ASTM E-872 para biomassa lenhosa
Carbono fixo	Por diferença
Cinzas	ASTM D-1102 para biomassa lenhosa

O teor de humidade é uma característica bem vincada da biomassa e a sua determinação é feita através do protocolo fornecido pela norma ASTM E-871. Segundo este procedimento, uma amostra de combustível com 50g é aquecida num forno com circulação natural de ar até 103°C, sendo o processo repetido até deixar de ocorrer variação de massa da amostra. A diferença entre a massa da amostra inicial e a massa da amostra seca corresponde ao teor de humidade do combustível [33,36]. A humidade da biomassa pode variar entre 10 e 70% [1].

A matéria volátil, por sua vez, corresponde ao material libertado durante o aquecimento da biomassa, na forma de gases voláteis condensáveis e não condensáveis. A sua determinação é feita em ambiente controlado, aquecendo a amostra de combustível até uma dada temperatura. Especificamente, a fracção de voláteis é determinada através do aquecimento de uma amostra com cerca de 1g num cadinho coberto, durante 7 minutos, até 950°C. Decorrido esse tempo, o cadinho é retirado e depois de arrefecida a amostra é pesada para determinar a variação de massa relacionada com a perda de material volátil [33].

A quantidade de cinzas diz respeito a todo o material inorgânico que resta após a combustão da biomassa e os seus constituintes principais são a sílica, o alumínio, o ferro e o cálcio. A norma ASTM D-1002 especifica que o teor de cinzas deve ser determinado através do aquecimento de uma amostra de 2g de biomassa lenhosa num cadinho descoberto, a uma temperatura de cerca de 600°C, até todo o carbono ser queimado. Findo este processo, a amostra é arrefecida e pesada, determinando-se a quantidade de cinzas [33]. O carbono fixo é a matéria sólida que resta depois da desvolatilização da biomassa e pode ser determinado através da subtracção das percentagens de humidade, matéria volátil e cinzas de uma amostra [33].

### Poder calorífico

O poder calorífico é uma indicação da energia específica armazenada quimicamente na biomassa, sendo uma das propriedades mais importantes de um combustível porque determina qual o seu valor energético. Pode ser determinado experimentalmente ou calculado através dos resultados da análise elementar ou imediata do combustível [34]. Normalmente, o poder calorífico distingue-se em poder calorífico superior e inferior. O poder calorífico superior (PCS) é definido como a quantidade de calor libertado por unidade de massa (ou volume) de combustível, aquando da sua combustão, incluindo o calor latente de vaporização da água. No fundo, trata-se da quantidade máxima de energia térmica potencialmente recuperável de uma fonte de biomassa. Experimentalmente, pode ser determinado através do uso de um calorímetro, seguindo o procedimento descrito na norma ASTM D-2015 [33]. O poder calorífico inferior (PCI) é definido como a quantidade de calor libertado durante a combustão completa de um combustível, subtraindo a energia necessária para evaporar o seu conteúdo em água [33]. A biomassa lenhosa possui um poder calorífico inferior ao do carvão. Geralmente, altos teores de elementos químicos como o carbono e o hidrogénio significam poderes caloríficos elevados [32]. A Figura 7 ilustra a relação entre o poder calorífico (superior e inferior) e o teor em água (humidade) de um combustível biomássico. Da sua observação, retira-se que existe uma correlação negativa entre as duas propriedades uma vez que à medida que o teor em humidade aumenta, tanto o poder calorífico inferior como o superior diminuem. Por outro lado, verifica-se que a curva que representa o PCS se encontra sempre acima da curva que representa o PCI, o que já era expectável visto que o valor do PCS inclui a energia relativa à condensação da água durante a combustão. Para além disso, notar que para uma humidade de cerca de 87%, o PCI atinge um valor nulo, o que invalida qualquer tentativa de extracção de energia [26,37].

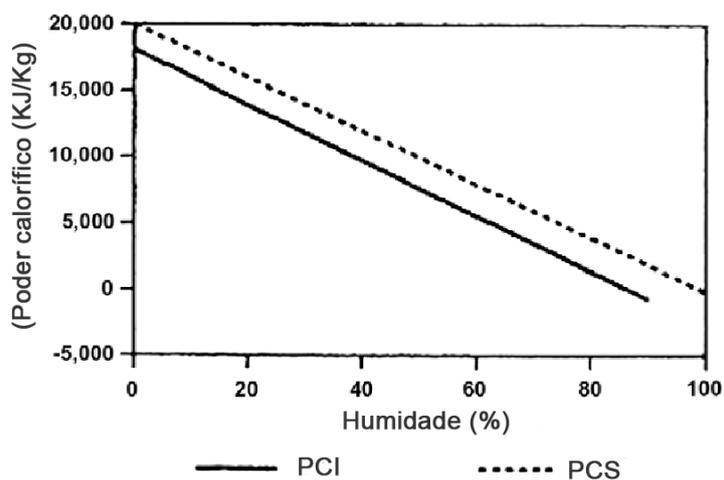


Figura 7 - Relação entre o poder calorífico e a humidade de um combustível biomássico. [37].

### Densidade aparente

A densidade aparente corresponde a uma medida do espaço ocupado por uma determinada quantidade de biomassa e pode ser expressa como a fracção entre a massa e o volume total do conjunto, incluindo os espaços vazios entre partículas. A sua

determinação é feita segundo o procedimento descrito na ASTM E-873-06 que envolve o uso de uma caixa de tamanho normalizado (305 mm x 305 mm x 305 mm), para a qual se despeja a biomassa de uma altura de 610mm. A densidade é determinada dividindo a massa de material biomássico pelo volume da caixa [33].

Como é sabido, a maioria da biomassa possui baixas densidades o que se traduz em desvantagens que incluem baixos poderes caloríficos por unidade de volume, custos de transporte elevados, grande exigência em termos de armazenamento, limitações em termos de tecnologias aplicáveis e dificuldades no controlo do processo de conversão [32]. De modo a superar estas limitações recorre-se, frequentemente, à densificação do material biomássico usando técnicas como a briquetagem e a peletização através das quais se removem os espaços intra e inter-partículas de biomassa [32].

## 2.3 Processos de conversão de biomassa

### 2.3.1 Processos termoquímicos de conversão

A biomassa pode ser tratada por diferentes processos termoquímicos que, tal como o nome sugere, usam energia térmica e alguns catalisadores químicos para produzir energia numa grande variedade de formas, que vão desde o aquecimento (produção de calor) até ao fornecimento de electricidade. Tal como ilustrado na Figura 8, a energia armazenada nas ligações químicas dos componentes que constituem a biomassa pode ser libertada directamente como calor, via combustão, ou transformada em combustíveis sólidos (p. ex. carvão activado), líquidos (p. ex. biocombustíveis), ou gasosos (p. ex. gás de síntese ou amoníaco) via pirólise, liquefacção ou gaseificação. De seguida, apresenta-se uma pequena revisão dos princípios e aplicações respeitantes à conversão de biomassa por processos termoquímicos [2,26,31].

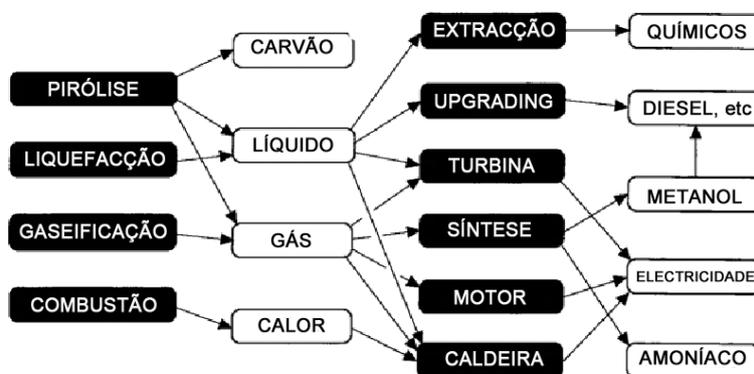
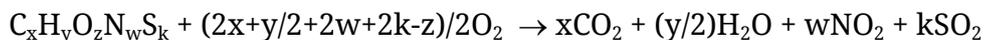


Figura 8 – Esquema exemplificativo dos processos de conversão termoquímicos e respectivos produtos [45].

#### Combustão

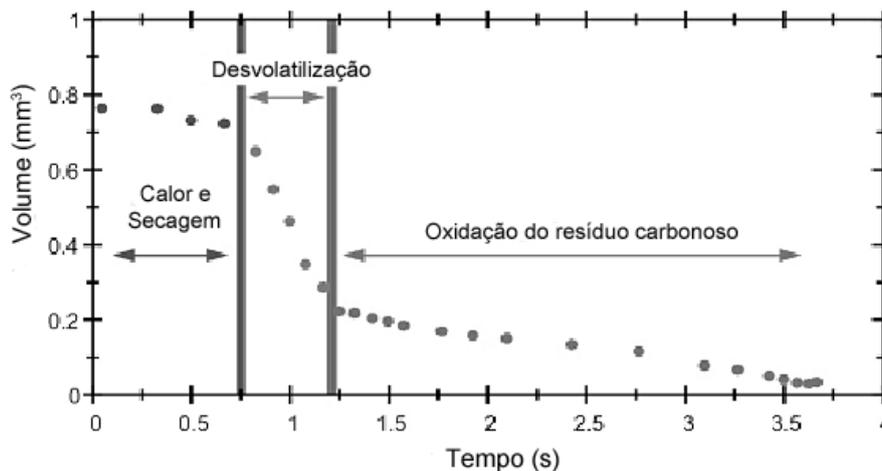
A combustão é um dos processos mais elementares de recuperação energética de um combustível, sendo também um dos exemplos mais antigos de obtenção de luz e calor. Actualmente, esta técnica é uma das tecnologias de conversão mais bem estabelecidas em termos comerciais, utilizando cerca de 97% da produção de combustíveis sólidos à escala mundial [26]. Na verdade, segundo McKendry [2], a combustão representa um dos meios mais utilizados na produção de calor, podendo ainda estar directamente ligada à produção de electricidade, através da utilização de equipamentos como caldeiras, fornos, fornalhas e turbinas de vapor, a que estão associados eficiências relativamente elevadas.

De convenção, a combustão pode ser considerada como um método de obtenção directa de calor que envolve a oxidação da biomassa por meio do oxigénio presente no ar a uma temperatura de cerca de 800-1000°C, tendo apenas como subprodutos, no caso de a combustão ser completa, água, dióxido de carbono, cinzas e calor, de acordo com a equação:



Geralmente, o processo integra um mecanismo complexo que pode ser enquadrado em quatro fases distintas, resumidas no esquema da Figura 9 [38]:

- 1) Aquecimento/Secagem, que se inicia aquando da introdução da biomassa na fornalha e onde se dá a evaporação da humidade à sua superfície, geralmente a temperaturas inferiores a 100°C. Como a evaporação da humidade contida no combustível usa energia térmica libertada pelo processo de combustão em si, esta fase caracteriza-se por uma diminuição da temperatura da câmara de combustão, o que se torna problemático para biomassas com teores de humidade superiores a 50-60%. Numa situação destas a evaporação de toda a água contida no combustível requer, normalmente, uma quantidade de energia tal que o calor libertado deixaria de ser suficiente para manter o processo de combustão.
- 2) Pirólise, onde se dá a desvolatilização da biomassa na ausência de oxigénio (a temperaturas de 200-500°C) e a formação de hidrocarbonetos leves, asfaltos (ou alcatrões) e *char* (resíduo carbonoso), que se mantém no estado sólido.
- 3) Gaseificação, que constitui o passo intermédio da decomposição térmica do material, desta vez na presença de oxigénio em quantidades inferiores à estequiométrica. Ocorre, geralmente, a temperaturas dos 750°C aos 900°C.
- 4) Combustão, etapa onde ocorre a oxidação do resíduo resultante da fase de desvolatilização/decomposição térmica, essencialmente composto por carbono e cinzas.



**Figura 9** – Diferentes etapas na combustão de uma partícula de biomassa, em termos de perda de volume em função do tempo. [38].

Os sistemas de combustão de biomassa podem ser divididos em aplicações de pequena e grande escala. As aplicações de pequena escala estão geralmente relacionadas com a produção de calor a nível doméstico e constituem uma das utilizações clássicas da biomassa. De facto, num passado não muito distante, este uso tradicional da biomassa achava-se perfeitamente generalizado através do uso de lareiras e pequenos fornos, aplicações que ainda hoje possuem uma grande relevância em comunidades predominantemente rurais [31,39]. Algumas das limitações deste tipo de aplicação, da qual Portugal constitui um exemplo clássico, são as baixas eficiências dos sistemas de conversão (por vezes apenas 10% [39]) e as elevadas perdas de calor por condução e convecção. Actualmente, porém, existem no mercado sistemas de aquecimento bastante modernos cujas eficiências podem atingir 70-90%, e que usam combustíveis biomássicos standardizados, por exemplo peletes. O uso deste tipo de sistemas pode ser observado a grande escala nos países escandinavos, e também na Áustria e na Alemanha. A Suécia, em particular, desenvolveu um mercado bastante significativo para a indústria dos

peletes [31,39]. Os sistemas de combustão a larga escala integram, tipicamente, centrais térmicas onde é possível queimar biomassa de vários tipos, tendo em vista a produção de calor ou vapor para produção de electricidade. No que diz respeito a este tipo de aplicações, a experiência portuguesa possui já um interessante conjunto de infraestruturas, que contemplam, por exemplo, as centrais de Mortágua (9MW), Ródão (14MW), Constância (13MW), Figueira da Foz (28MW), Setúbal (12,5MW), Sertã (3MW) e Belmonte (2MW). O rendimento deste tipo de centrais térmicas ronda, normalmente, os 20-40% [31].

### Gaseificação

A gaseificação é um processo com uma história já longa e as primeiras aplicações científicas sobre o tema tiveram início ainda durante o século XVIII. De acordo com Rezaiyan e Cheremisinoff [40], quem primeiro se interessou sobre o assunto foi o engenheiro e inventor escocês William Murdoch, que em 1792 iniciou as suas experiências de decomposição térmica do carvão e de outros materiais, obtendo um combustível gasoso (gás de síntese) que usou para iluminar sua casa [40]. Estava dado o primeiro passo para o desenvolvimento do processo básico da gaseificação. Tempos depois, o mesmo Murdoch teve a brilhante ideia de aplicar esta tecnologia na iluminação das fábricas de James Watt (conhecido pelo desenvolvimento da máquina a vapor) em Birmingham e o gás de síntese não tardou a ser objecto de utilização generalizada na iluminação pública das principais cidades da altura. Primeiro, em localidades como Londres e Westminster (1812), e depois em Baltimore (1816), Boston e Nova Iorque (1826). Já na primeira metade do século XX, surgiam as primeiras aplicações de gaseificação de biomassa e a sua utilização na produção de gases sintéticos, produtos químicos e hidrogénio era já uma realidade [40].

A gaseificação é, então, uma forma de conversão já bastante conhecida, que pode ser entendida como a decomposição termoquímica da biomassa em gases combustíveis (p. ex.  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  e  $CH_4$ ), na presença de quantidades limitadas de oxigénio (tipicamente 35% da quantidade estequiométrica para a existência de uma combustão completa) ou de outros agentes oxidantes tais como vapor ou dióxido de carbono [26]. Quando o ar ou o oxigénio são usados como agentes oxidantes, a gaseificação pode ser considerada uma combustão parcial, ainda que as diferenças entre os dois processos sejam claras e estejam bastante documentadas. Rezaiyan e Cheremisinoff [40] realizaram uma comparação detalhada das diferenças entre os dois processos e as conclusões desse estudo encontram-se resumidas na Tabela 3. O gás obtido do processo de conversão é bastante mais versátil que a biomassa sólida original e pode ser usado na geração de calor e vapor, na produção de hidrogénio e na síntese de compostos químicos [3,26,40]. Os reactores onde ocorre o processo de gaseificação operam, geralmente, a temperaturas de 800-900°C e podem, também, ser divididos em quatro zonas distintas [3,41]: a “zona de secagem”, onde a biomassa é libertada do seu conteúdo em humidade (geralmente elevado); a “zona de pirólise”, na qual os voláteis do combustível são removidos na forma de hidrocarbonetos simples,  $CO$ ,  $CO_2$ , *tar* e *char*; a “zona de redução”, onde se dá a gaseificação completa dos componentes da biomassa, com a produção do gás de síntese através de uma série de reacções endotérmicas; e a “zona de combustão”, onde a matriz residual de *char* é queimada, dando origem a mais produtos gasosos e ao calor necessário para alimentar as reacções da “zona de redução”. Na Tabela 4 apresentam-se os principais equilíbrios presentes no processo de gaseificação. Normalmente, os sistemas de gaseificação de biomassa apresentam diferentes tecnologias no que diz respeito aos reactores onde ocorre o processo. Um excelente sumário das vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de gaseificadores, e uma comparação detalhada das suas características, pode ser encontrado em trabalhos de McKendry [42] e Warnecke

**Caixa 3** – Tipos de gaseificadores e suas características principais [26,42,43,110,111].

Os gaseificadores podem ser de dois tipos distintos, com variações dentro de cada um:

**A) Leito Fixo.** Tradicionalmente, tem sido o gaseificador mais usado no processo de conversão, com temperaturas de operação a rondar os 1000°C. Dependendo da direcção do fluxo de ar, estes gaseificadores podem ser classificados em: *updraft* (contra-corrente), *downdraft* (co-corrente) e *cross-flow* (fluxo cruzado).

**A.1 Updraft.** É o gaseificador mais simples de todos. A biomassa é introduzida no topo e o ar injectado na base, criando-se então um sistema em contra-corrente. No seu movimento descendente, a biomassa é primeiramente seca na “zona de secagem” para logo depois ser decomposta e convertida em gases voláteis e resíduo carbonoso na “zona de pirólise”. Ainda antes de atingir a “zona de combustão”, a corrente gasosa do processo é convertida em CO e H<sub>2</sub> na “zona de redução”.

**A.2 Downdraft.** Este tipo de gaseificador é um dos sistemas de gaseificação mais difundidos hoje em dia. A biomassa, introduzida a partir do topo, e o fluxo de ar, injectado pelo meio, movem-se na mesma direcção, o que leva as “zonas de redução e combustão” a aparecerem em ordem inversa. Ao contrário dos gaseificadores *updraft*, o gás produzido tem baixos teores de alcatrão já que este tem a oportunidade de ser decomposto por cracking térmico ao ser sujeito a altas temperaturas na “zona de combustão”.

**A.3 Cross-flow.** Nestes gaseificadores a biomassa é adicionada pelo topo do reactor e tem um percurso descendente. O ar, por sua vez, é introduzido de um dos lados, enquanto os gases resultantes do processo são retirados do lado oposto, no mesmo plano horizontal. A “zona de combustão” forma-se junto à entrada de ar e as “zonas de secagem e pirólise” situam-se num patamar superior. O gás resultante possui, normalmente, altos teores de alcatrões.

[43], respectivamente. Na Caixa 3 apresenta-se uma pequena revisão das conclusões desses e de outros estudos considerados relevantes.

**Tabela 3** – Comparação entre os processos de gaseificação e combustão [26,40].

Características	Gaseificação	Combustão
Objectivo	Criação de produtos utilizáveis a partir de resíduos de baixo valor	Geração de calor ou destruição de resíduos
Tipo de processo	Conversão termoquímica com quantidades limitadas de oxigénio	Combustão completa usando oxigénio em excesso (ar)
Composição do gás bruto	H <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub> e partículas	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> e partículas
Produtos / subprodutos sólidos	Resíduo carbonoso e escórias	Cinzas residuais e volantes
Gestão dos resíduos	O resíduo carbonoso pode ser valorizado como combustível; as escórias podem ser usadas em materiais de construção;	As cinzas são recolhidas, tratadas e depositadas como materiais perigosos ou vendidas como matéria-prima para a produção de betão.
Pressão	Atmosférica ou superior	Atmosférica

**Tabela 4** – Reacções elementares de gaseificação [41]

Reacção	ΔH (kJ/mol)
$2CO + O_2 \leftrightarrow 2CO_2$	+ 246,4
$C + O_2 \leftrightarrow CO_2$	+408,8
$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	-206
$CH_4 + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 4H_2$	-165
$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	-172
$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	-131

**B) Leito Fluidizado.** Em gaseificadores deste tipo, a biomassa é introduzida por baixo e fluidizada por um agente gasificante (ar, azoto ou vapor). A fluidização do leito permite uma maior transferência de calor para a biomassa o que conduz a maiores eficiências de conversão. Existem de uma forma geral dois tipos de leitos fluidizados: o leito fluidizado borbulhante e o leito fluidizado circulante. Os meios fluidificantes normalmente usados são materiais de sílica ou alumina capazes de operar a altas temperaturas.

**B.1 Circulante.** Nestes sistemas o material que constitui o leito circula entre o reactor e um separador ciclónico. Nesta circulação, o material do leito e o *char* são devolvidos ao reactor, enquanto as cinzas são removidas do sistema.

**B.2 Borbulhante.** Num sistema borbulhante o ar é injectado por uma grelha na base do reactor, acima da qual o leito fluidizado se mistura com a biomassa que é, posteriormente, decomposta termicamente, produzindo um gás com baixa carga de alcatrões.

Segundo Faaij [39], este tipo de instalações ganhou alguma projecção no início da década de 90 com a aplicação de gaseificadores de fluxo ascendente e descendente a serem testados para produção de calor e electricidade através do uso de motores diesel ou a gás. Países como a Finlândia tiveram particular sucesso no desenvolvimento deste tipo de tecnologia, destacando-se neste campo a Bioneer. Actualmente, podem encontrar-se no mercado gaseificadores de leito fixo que, acoplados a motores diesel ou a gás, atingem rendimentos relativamente modestos, na ordem dos 15-25% [39]. Aplicações de maior potência (> 10MW) estão regra geral associadas a reactores de leito fluidizado circulante. Este tipo de tecnologia tem sido bastante utilizado em países como a Itália, a Áustria, a Suécia e a Alemanha na produção de gás de síntese e calor de processo. A gaseificação pode ainda ser usada na produção de combustíveis como o metanol, o hidrogénio, o biodiesel, o éter bio-dimetílico (bio-DME) ou o gás natural sintético (SNG), com base em processos do tipo Fischer-Tropsch [31].

#### *Pirólise*

A pirólise é um processo de decomposição termoquímica que ocorre em condições não oxidativas, sendo usado na conversão de biomassa em produtos sólidos (*char*), líquidos (bio-óleo) e gasosos (gases não condensáveis como H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e CO). Segundo Zhang et al [26], um processo de pirólise típico compreende três etapas essenciais. A primeira, designada de pré-pirólise, ocorre a uma temperatura entre 120-200°C e favorece uma ligeira perda de massa devido à quebra de ligações intermoleculares e à libertação de pequenas quantidades de H<sub>2</sub>O, CO e CO<sub>2</sub>. Na segunda etapa, que corresponde ao processo principal de pirólise, dá-se a decomposição sólida da biomassa, com uma perda de massa significativa e a formação de *char*. A última etapa engloba a desvolatilização contínua do *char* anteriormente formado, através da quebra das ligações C-H e C-O [26]. Dependendo da temperatura da reacção e do tempo de residência da biomassa, a pirólise pode ser classificada operacionalmente em pirólise lenta, intermédia e rápida. Na Tabela 5 apresenta-se uma comparação entre a gaseificação e os diferentes processos de pirólise, relativamente às condições da reacção e aos produtos resultantes [26,44].

**Tabela 5** – Dados típicos relativos às condições da reacção e aos produtos resultantes de processos de pirólise (rápida, intermédia e lenta) e gaseificação [26,44].

Tipo	Condições	Líquidos	Char	Gases
Rápida	Temperatura moderada (cerca de 500°C), tempo de residência curto ~1s	75%	12%	13%
Intermédia	Temperatura moderada (cerca de 500°C), tempo de residência moderado ~10-20s	50%	20%	30%
Lenta (carbonização)	Temperatura baixa (cerca de 400°C), tempo de residência da fase sólida bastante longo	30%	35%	35%
Gaseificação	Temperatura alta (cerca de 800°C), tempo de residência da fase sólida e gasosa bastante longo	5%	10%	85%

A pirólise rápida caracteriza-se por apresentar temperaturas moderadas, elevadas taxas de aquecimento (na ordem das centenas °C/min) e tempos de residência curtos (~1s), favorecendo a formação de líquidos e inibindo a formação de *char*. O líquido obtido pode ser considerado um produto com alto potencial como combustível – apesar do PCI relativamente baixo, na ordem dos 16-19 MJ/Kg [26] -, sendo composto por uma fase aquosa que contém uma série de compostos orgânicos oxigenados de baixo peso molecular e uma fase não aquosa (*tar*) que inclui uma grande variedade de compostos orgânicos aromáticos de peso molecular mais elevado [26]. Este bio-óleo pode substituir o fuel-óleo ou o diesel em motores, turbinas e caldeiras, ou ser usado na produção de químicos, podendo ainda ser transformado (via hidrogenação ou cracking catalítico) em combustíveis de maior qualidade (diminuição do conteúdo em O<sub>2</sub> e remoção de alcalinos) [2,26,39,45,46]. Por sua vez, as técnicas de pirólise lenta ou convencional, com tempos de residência relativamente longos e temperaturas mais baixas, são usadas na produção de carvão vegetal desde tempos idos. O produto resultante da sua aplicação, o *char* ou carvão vegetal (*charcoal* na nomenclatura anglosaxónica), pode ser utilizado numa grande variedade de áreas, desde aplicações domésticas (cozinha e aquecimento), a aplicações na indústria metalúrgica ou química para a produção de carvão activado, fogo-de-artifício, absorventes e fármacos [26]. A pirólise intermédia constitui, tal como o nome indica, um processo que se situa entre a pirólise rápida e a convencional, direccionado, ainda assim, para a obtenção de produtos em fase líquida, através do uso de temperaturas moderadas e tempos de residência também eles moderados.

### Liquefacção

A liquefacção directa é um processo termoquímico que ocorre a baixa temperatura e alta pressão (300°C e 10MPa), durante o qual a biomassa sofre uma despolimerização, sendo decomposta em pequenos fragmentos moleculares (monómeros) aos quais é adicionada água ou outro solvente de forma a obter um hidrocarboneto líquido de características oleosas (para além de *char* e gases) [2,26]. Enquanto técnica, a liquefacção possui algumas similaridades com a pirólise, pois ambas estão direccionadas para a obtenção de combustíveis líquidos, havendo, no entanto, diferenças a nível operacional. Especificamente, pode dizer-se que a liquefacção é um processo que opera a temperaturas inferiores às da pirólise, mas requer pressões mais elevadas (5–20 MPa para a liquefacção vs. 0.1–0.5 MPa para a pirólise [26]) e o uso de catalisadores, para além de uma maior complexidade em termos tecnológicos (reactores e sistema de alimentação da matéria-prima). Como o processo decorre em meio aquoso, a liquefacção dispensa qualquer processo prévio de secagem (ao contrário da pirólise), pelo que é adequada para a conversão de materiais biomássicos com altos teores de humidade, como a biomassa aquática, lixos e efluentes orgânicos [26].

### *2.3.1 Processos bioquímicos de conversão*

Para além de uma conversão termoquímica, a biomassa pode ainda ser transformada em energia e outros produtos através da acção de microrganismos biológicos. Assim, pode dizer-se que a energia armazenada nos materiais biomássicos pode ser convertida biologicamente em combustíveis líquidos (p. ex. etanol), via fermentação, ou gasosos (p.ex. biogás), via digestão anaeróbia [2,31].

#### *Fermentação*

A fermentação é um processo bastante simples usado na produção de etanol a partir de culturas ricas em amido e açúcar. Tipicamente, a biomassa é triturada, misturada com água, e o amido nela contido convertido em açúcares por acção enzimática, com as leveduras a serem responsáveis pela posterior transformação desses açúcares em etanol [2,31]. Como resultado do processo de fermentação é produzido, para além do álcool, um resíduo sólido que pode ser valorizado como alimento para animais ou, no caso da cana-de-açúcar, um bagaço, que pode ser aproveitado como combustível em caldeiras. A conversão de biomassa lenhinocelulósica através da fermentação é um processo mais complexo devido à presença de longas cadeias de polissacarídeos de difícil degradação, mas, todavia, também possível [2,31].

#### *Digestão anaeróbia*

A digestão anaeróbia pode ser entendida como a conversão directa da biomassa (material orgânico) num biogás constituído essencialmente por CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e quantidades residuais de outros gases [2,31]. Especificamente, este biogás é produzido através da acção de bactérias em ambiente anaeróbio, podendo ser usado para a produção de electricidade através de motores de combustão interna ou turbinas a gás com uma eficiência de conversão biomassa - electricidade na ordem dos 10-16%. A eficiência global do sistema pode ainda ser melhorada com sistemas de recuperação de calor [2,31]. A digestão anaeróbia é uma tecnologia com provas dadas e já bem desenvolvida comercialmente, havendo aplicações disponíveis a diferentes escalas. Desde aplicações mais comuns, em pequenas explorações agrícolas (volume do reactor <150m<sup>3</sup>), até sistemas de larga escala, com reactores de volumes superiores a 7000m<sup>3</sup> e potências da ordem de alguns MW. Países como a Holanda, a Alemanha e a Dinamarca têm sido os grandes impulsionadores da tecnologia, com o caso português a ficar bastante aquém do potencial existente [2,31]. Segundo [31], a experiência portuguesa resume-se a algumas dezenas de sistemas de pequena escala implementados nos anos 80, dos quais menos de metade continuam, ainda, em operação.

## 2.4 Potencial em biomassa

### 2.4.1 Introdução e definição de potenciais

A avaliação do potencial da bioenergia tem constituído um tema recorrente na literatura científica, com vários trabalhos publicados nos últimos tempos [47–50]. O principal foco destes trabalhos tem sido, por um lado, estimar o potencial energético associado à biomassa residual proveniente da agricultura [49,51,52] e da floresta [48,53–55], ou, por outro, avaliar o potencial biomássico de uma região ou país [47,50,56–64], com a contribuição específica dos resíduos agrícolas e florestais a surgirem como um resultado parcial do trabalho. As metodologias usadas nestes estudos consistem, basicamente, na definição de áreas de produção para cada cultura, seguida da aplicação de produtividades de biomassa (i. e rácios da quantidade de resíduos por cultura) e factores de disponibilidade (i.e fracção de resíduos efectivamente disponíveis para produção de energia) de modo a determinar a quantidade de energia que pode ser gerada a partir desses resíduos.

Nesta secção, realiza-se uma revisão do estado da arte da avaliação do potencial da bioenergia, dando especial relevância aos estudos que partilham pontos comuns com os objectivos do presente trabalho. Uma vez que a globalidade os trabalhos revistos difere em termos de amplitude geográfica, a revisão encontra-se estruturada do geral para o particular, partindo da análise de estudos que pretendem avaliar o potencial da bioenergia a nível mundial, para estudos que pretendem estimar o potencial da bioenergia de um dado país ou região.

Antes disso, porém, importa perceber a forma como os diferentes tipos de potencial são distinguidos na literatura. Efectivamente, quando se verifica qual a origem de fontes de energia renovável como a solar, a eólica ou a biomassa, verifica-se que todas elas derivam da actividade solar e considerando que num período de tempo suficientemente largo o fluxo de energia solar que chega à Terra é praticamente constante, conclui-se que o potencial teórico destas fontes de energia, i.e o total de energia nelas contida, pouco diz sobre a variação da disponibilidade do recurso num dado território [24]. Neste sentido, quando se procura avaliar o potencial de uma fonte de energia, no caso a bioenergia, devem ter-se em conta um conjunto de factores geográficos (p. ex. o uso do solo ou a orografia do terreno), técnicos (p. ex. tipo de conversão), económicos (p. ex. custos salariais) e de implementação (p. ex. legislação) que afectam, eles sim, de forma significativa a disponibilidade efectiva do recurso de região para região. Tendo

**Caixa 4** – Sumário de definições dos 5 potenciais reconhecidos na literatura [24,65].

**1) Potencial teórico.** Total de energia contido na biomassa no território considerado, limitado apenas por um conjunto de barreiras físicas e biológicas fundamentais.

**2) Potencial geográfico.** Fracção do potencial teórico existente em áreas consideradas adequadas para o aproveitamento do recurso.

**3) Potencial técnico.** Fracção do potencial geográfico limitada por um conjunto de características técnicas inerentes à exploração do recurso, incluindo a eficiência de transformação da energia contida na biomassa.

**4) Potencial económico.** Fracção do potencial técnico passível de ser explorada em condições económicas competitivas com outras aplicações energéticas.

**5) Potencial de implementação.** Fracção do potencial económico que pode ser implementada num determinado local, num certo período de tempo, tendo em conta todo um conjunto de restrições institucionais e sociais, assim como incentivos e abertura em termos políticos.

em conta estes aspectos, Smeets et al [65] e Hoogwijk [24] definiram cinco tipos de potencial, apresentando-se na Caixa 4 um pequeno sumário dessa classificação.

#### *2.4.2 Global*

A bioenergia representa, actualmente, um papel cada vez mais importante no mix energético mundial, constituindo mesmo cerca de 10% [66] da energia primária consumida, a grande maioria na sua forma mais tradicional. Alguns estudos, particularmente os apresentados por Berndes et al [67] e Fischer [68], sugerem um comportamento crescente para esta tendência, com os níveis de penetração da bioenergia nos mercados energéticos do futuro a situarem-se na ordem dos 10 a 50%. Em 2020, a Agência Internacional de Energia (AIE) prevê que o papel desta fonte de energia a nível global atinja os 26% em termos de energia primária [66]. A verdadeira extensão deste crescimento, porém, dependerá sempre de inúmeros aspectos, destacando-se desde logo a sua disponibilidade efectiva. Deste modo, fica claro que conhecer as quantidades de biomassa efectivamente disponíveis para produção de energia é absolutamente crucial para se estimar a possível contribuição da bioenergia no cenário energético mundial, com a tarefa a instituir-se, inclusivamente, como um desafio de grande interesse também pela aptidão que possui no delinear das políticas energéticas nacionais e no estabelecimento de estratégias e metas para a utilização do recurso [69,70].

Na literatura têm surgido vários trabalhos [24,67,68,70–73] que procuram responder, precisamente, ao desafio de avaliar o potencial da bioenergia à escala global. Estes estudos, no geral, demonstram que, para cada uma das diferentes fontes de resíduos, o potencial disponível é bastante significativo e excede consideravelmente o consumo de energia actual. No entanto, a distinção entre potenciais apresentada na secção anterior nem sempre é feita de forma clara e as diferenças em termos de complexidade, tempo de escala e resolução geográfica de estudo para estudo são também acentuadas, pelo que a comparação entre os resultados reportados acaba por ser uma tarefa complicada. Mesmo assim, numa revisão de literatura recente, Offermann et al [70], propuseram-se analisar 17 estudos de avaliação do potencial global da bioenergia, quase todos concentrados no potencial energético da biomassa a longo prazo (horizonte de 2050). No cenário mais favorável, os autores concluíram que o potencial da bioenergia atinge cerca de 1500 EJ/ano, valor mais de três vezes superior ao consumo de energia primária no ano de 2010 [70]. No entanto, e por outro lado, uma parte substancial dos trabalhos apresenta potenciais inferiores ou muito próximos ao papel da bioenergia no mix energético mundial no mesmo ano, facto que, por si só, dá uma ideia da incerteza associada à quantificação do potencial desta fonte energética, particularmente a uma escala mais global.

Ainda neste domínio, Hoogwijk et al [73] procuraram perspectivar o impacto de uma série de factores no potencial global da bioenergia em 2050. Para isso, desenvolveram dois cenários (um optimista e outro pessimista) onde agruparam a biomassa em sete categorias. A Tabela 6 apresenta um pequeno sumário do conjunto de categorias e pressupostos usados na quantificação dos potenciais obtidos. Como se vê, o potencial global da bioenergia define-se em termos muito amplos, com os resultados a indicarem um potencial entre os 33-1130 EJ/ano, com o cenário mais pessimista a admitir que a biomassa seria proveniente apenas de resíduos e o mais optimista a considerar o uso de culturas energéticas intensivas.

**Tabela 6** - Sumário do potencial de oferta da bioenergia no longo prazo para um conjunto de categorias, assim como os principais pressupostos que determinam esse potencial.

<b>Categoria de biomassa</b>	<b>Principais pressupostos e observações</b>	<b>Potencial de oferta em 2050</b>
Categoria I – Produção de biomassa em terrenos agrícolas excedentes	Biomassa produzida em terrenos agrícolas excedentes, depois de satisfeita a procura de alimentos para pessoas e gado. Área disponível entre 0-2.6 Gha e produtividade entre 10-20 ton/ha/ano.	0-988 EJ
Categoria II – Produção de biomassa em terrenos excedentes degradados	Biomassa produzida em terrenos degradados ou marginais ainda adequados para reflorestação. Área disponível entre os 430-580 Mha e produtividade entre 1-10 ton/ha/ano.	8-110 EJ
Categoria III – Resíduos agrícolas	Resíduos associados à produção processamento de alimentos (fontes primárias e secundárias). Estimativas retiradas de vários estudos. O potencial depende dos factores de produtividade e da área agrícola total disponível.	10-32 EJ
Categoria IV – Resíduos florestais	Resíduos associados à produção e processamento das florestas (fontes primárias e secundárias). O potencial (sustentável) das florestas mundiais não é claro devido a muitas destas áreas estarem protegidas. Estimativas baseadas em dados da literatura.	10-16 EJ (+32 de resíduos de biomateriais)
Categoria V – Resíduos animais (excrementos)	Biomassa associada a excrementos animais. Estimativas baseadas em dados da literatura. Dependente do crescimento dos animais e da taxa de recuperação dos resíduos.	9-25EJ
Categoria VI – Resíduos orgânicos	Resíduos associados à actividade humana, p. ex. resíduos sólidos municipais. Estimativas baseadas em dados da literatura. Fortemente dependente do desenvolvimento económico e do consumo.	1-3EJ
Categoria VII – Biomateriais	Biomassa usada como matéria-prima na industria petroquímica ou na produção de papel. Área disponível entre os 416-678 Mha. Assume-se que esta categoria compete directamente com as culturas enegéticas.	(0) 83-116
Total	Cenário pessimista: bioenergia proveniente apenas de resíduos. Cenário optimista: culturas energéticas intensivas.	33-1130 EJ

### 2.4.3 Europa

Com a bioenergia a permanecer num patamar alto em termos de agenda política da União Europeia, e com a opinião *mainstream* a reconhecer o papel significativo que esta forma de energia pode ter no alcançar das metas delineadas na estratégia 20-20-20 para 2020 [74], temas como a disponibilidade e a avaliação do recurso nos diferentes estados membros têm suscitado cada vez mais interesse nos meios científicos. Não será, portanto, de estranhar que nos últimos anos tenham surgido diversos estudos [72,75,76] a procurar clarificar e cimentar posições sobre o assunto. Qual o potencial real da bioenergia na europa e, especificamente, em cada um dos diferentes estados membros, e que tipologias de biomassa estão actualmente disponíveis são algumas das questões ponderadas.

Ericsson e Nilsson [75] analisaram, em 2006, o potencial da bioenergia na Europa através de uma avaliação focada no recurso (ver Caixa 5), isto é, centrada na estimativa do potencial teórico da bioenergia, tendo em conta a competição entre os diferentes usos do recurso (lado da oferta), que incluiu três categorias de biomassa: biomassa florestal, agrícola e culturas energéticas. As avaliações foram realizadas num universo de 27 países europeus recorrendo a cinco cenários distintos modificando-se, de uns para outros, a moldura temporal (curto, médio e longo prazo) e a produtividade de colheita de resíduos (baixa e elevada). Os autores avaliaram a quantidade de resíduos de forma específica para cada uma das categorias de resíduo e, no caso da biomassa florestal, foram tidos em conta o material resultante de abates e desbastes em florestas exploráveis e os subprodutos da indústria florestal. No caso dos desbastes, Ericsson e Nilsson [75] consideraram dois cenários com diferentes taxas de extracção de resíduos, assumindo, no primeiro cenário, uma produção de 0,15 e 0,1 toneladas de resíduos por tonelada de madeira, consoante a árvore fosse da família das coníferas ou das caducifólias. No segundo cenário, a proporção de resíduos foi considerada o dobro. Relativamente aos subprodutos da indústria florestal foi assumido que 1/4 da madeira recolhida (casca, serradura, aparas e licor negro) estaria disponível para fins energéticos [75]. Para a biomassa agrícola foram incluídos no estudo resíduos (palha) de colheitas de cereais (trigo, cevada, centeio, aveia e milho), assumindo-se que apenas uma parte dos resíduos devia ser aproveitada por razões ambientais (essencialmente o empobrecimento da quantidade de nutrientes no solo). Tendo isto em conta, consideraram-se produções de 0,25 toneladas de palha por tonelada de cereal para o caso do milho e 0,22 toneladas por tonelada de cereal para as restantes colheitas. No que diz respeito às culturas energéticas, foram estimadas produções de 6 ton/ha por correlação com médias de produção de explorações de trigo, variando, depois, a percentagem da área cultivável até um máximo em que esta ultrapassa a área necessária para a produção de alimentos, considerada actualmente como sendo 0,24ha/capita. Numa perspectiva de longo prazo, e considerando a melhor das hipóteses, o estudo indica que a bioenergia pode contribuir de forma significativa para o total do aprovisionamento energético da UE, num máximo de 23,0 EJ/ano. Para além disso, a avaliação demonstrou que o potencial em bioenergia proveniente de resíduos agrícolas é, regra geral, superior ao potencial das florestas. A biomassa florestal possui um peso assinalável em países como a Finlândia, a Suécia, a Alemanha e a Eslovénia.

**Caixa 5** – Sumário de metodologias de avaliação do potencial de biomassa [67].

**1) Orientadas pela procura (*demand-driven*)**. A avaliação da oferta de biomassa é realizada pela análise da competitividade do recurso em relação a outras fontes de energia ou estimada através da quantidade de recurso necessária para cumprir metas ou compromissos externos (lado da procura)

**2) Centradas no recurso (*resource-focused*)**. A avaliação é do tipo *bottom-up* e centra-se na estimativa do potencial teórico da bioenergia, tendo em conta a competição entre os diferentes usos do recurso, podendo incluir-se, também, restrições ambientais (lado da oferta).

---

Mais tarde, em 2009, Panoutsou et al [76], realizaram uma revisão estruturada dos recursos biomássicos da UE, onde a principal preocupação era estimar potenciais técnicos para os diferentes estados membros e fornecer informação detalhada sobre as quantidades de biomassa disponíveis [76]. O estudo teve em conta um extenso conjunto de categorias, incluindo a biomassa proveniente dos sectores agrícola, florestal, industrial e resíduos. A Tabela 7 apresenta os resultados agregados da investigação. Estes resultados, porém, apresentam algumas limitações especialmente na forma como as estimativas dos potenciais foram obtidas. Os autores obtiveram os potenciais através de uma revisão de literatura específica [77] e, por essa razão, nada garante que a metodologia adoptada tenha sido válida e idêntica para todos os países.

**Tabela 7** - Resultados agregados da disponibilidade de biomassa na Europa (EU27) [76].

Categoria de biomassa	Quantidades disponíveis (Mton/ano)	Potencial energético (Mtep/ano)		
		2000	2010	2020
<b>Biomassa agrícola</b>				
Resíduos agrícolas sólidos	76,1	32,7	36,2	39,9
Estrume húmido	65,8	14,1	15,6	17,3
Estrume seco	10,6	2,20	2,50	2,70
<b>Biomassa florestal</b>				
Sub-produtos da floresta	40,7	17,5	19,3	21,3
Combustíveis de madeira transformada	57,2	24,6	27,2	30,0
<b>Biomassa industrial</b>				
Resíduos sólidos industriais	30,1	12,9	14,3	15,8
Licores negros	44,3	10,5	11,7	12,9
Lamas de depuração	9,9	2,10	2,40	2,60
<b>Biomassa proveniente de resíduos</b>				
Resíduos sólidos urbanos				
Gás de aterro	13,6	5,00	4,70	2,46
Inceneração		7,10	19,0	33,7
Madeira de demolição		5,80	6,50	7,13
<b>Total</b>		<b>134,9</b>	<b>159,2</b>	<b>185,9</b>
% Energia primária (2009)	-	7,9%	9,4%	10,9%

#### 2.4.4 Portugal

O sector energético desempenha, hoje em dia, uma função essencial e integradora na sociedade e na economia e Portugal não é, obviamente, excepção. Neste contexto, as fontes de energia renováveis, pelo seu carácter limpo e endógeno, assumem um natural destaque e a aposta no seu desenvolvimento é uma característica bem vinculada nas políticas da União Europeia. A legislação específica do sector energético tem sido, inclusivamente, usada de forma directa como uma ferramenta de promoção destas tecnologias, surgindo a bioenergia na linha da frente devido às enormes potencialidades que lhe são reconhecidas e às importantes sinergias que possui com o sector agro-florestal.

Na verdade, o evidenciar do apoio político para o sector das renováveis surgiu com o aparecimento do Livro Branco para as Energias Renováveis [78], redigido em 1997 com o objetivo geral de aumentar a contribuição de energias renováveis no consumo de energia primária da UE. Com este propósito, aprovaram-se duas diretivas: a Directiva

2001/77/CE [25] relativa à produção de eletricidade com origem renovável e a Directiva 2003/30/CE [79] relativa à produção de biocombustíveis, que definiram para 2010 metas específicas referentes à eletricidade produzida a partir de fontes renováveis (21%) e ao total da energia usada nos transportes com origem em biocombustíveis (5,75%). No entanto, o maior incentivo para o desenvolvimento da bioenergia surgiu em 2005 com a aprovação do Plano de Acção para a Biomassa [80] que reconheceu que esta fonte de energia possui inúmeras vantagens em relação a outras (convencionais ou renováveis), nomeadamente os custos relativamente baixos, a pouca dependência de mudanças temporais de curto prazo (não é intermitente), a promoção de estruturas económicas regionais e a disponibilização de uma outra fonte de rendimento para agricultores e promotores florestais [80]. Mais tarde, em 2008, a Comissão Europeia apresentou a Directiva 2008/0016/COD [74] onde propôs a fixação de uma meta vinculativa de 20% de energias renováveis no consumo energético dos estados membros até 2020 e uma meta vinculativa de 10% de energias renováveis na gasolina e no gasóleo para os transportes.

Estas indicações dos parceiros europeus foram, posteriormente, transpostas para a realidade portuguesa através da formulação de vários programas (PNAC – Programa Nacional para as Alterações Climáticas, PNAEE – Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética e PNAER – Plano Nacional de Acção para as Energias Renováveis), sendo a mais recente atualização das intenções portuguesas neste domínio a denominada ENE2020 – Estratégia Nacional para a Energia, apresentada no início de 2010 como resultado da necessidade de adequar os quadros regulamentares já existentes aos novos objetivos europeus. Assim, neste documento especifica-se que em 2020, 31% do consumo final de energia primária, 60% da eletricidade produzida e 10% do consumo de energia no sector dos transportes rodoviários devem ter origem em fontes de energia renovável. A contribuição do sector específico da biomassa para a prossecução destes objetivos consistiu na atribuição de 13 licenças de exploração para centrais termoeléctricas a biomassa, num total de 86,4 MW de potência instalada.

Neste contexto de clara expansão da bioenergia, também Portugal foi alvo de alguns trabalhos de investigação [47,81–84] relacionados com a avaliação efectiva do seu potencial. No primeiro trabalho de investigação revisto, Viana et al [81] procuraram avaliar a disponibilidade de biomassa florestal tendo em conta o conjunto de novas centrais termoeléctricas previstas, examinando, deste modo, a viabilidade da sua instalação. O estudo incluiu apenas resíduos provenientes de culturas florestais de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) e pinheiro bravo (*Pinus pinaster*) uma vez que os autores consideraram que estas duas espécies, estando largamente disseminadas pelo território nacional por razões comerciais, eram capazes de garantir um fornecimento regular de combustível para as novas centrais [81]. O cálculo das quantidades de resíduos por elas gerados realizou-se recorrendo a um conjunto de equações de biomassa específicas (ver secção 2.5), obtendo-se, desta maneira, uma estimativa do potencial teórico do recurso, isto é, uma estimativa da produção anual de resíduos florestais em cada região [81]. Os resultados do estudo indicaram que as regiões norte e centro de Portugal eram as de maior potencial, enquanto as regiões mais a sul, onde o pinheiro bravo e o eucalipto não eram tão abundantes, tinham um potencial mais modesto. Especificamente, e em termos médios, as estimativas apontaram para uma produção de resíduos de eucalipto de quase 580.000 toneladas secas por ano e uma produção de biomassa residual de pinheiro-bravo de mais de 517.000 toneladas secas por ano. Numa análise espacial da localização prevista para as novas centrais, Viana et al [81] concluíram ainda que a potência total atribuída era, no geral, excessiva, especialmente nas regiões do Alentejo e Algarve [81]. Esta hipótese de sobredimensionamento da potência atribuída é reforçada ainda mais pelo facto do estudo estimar um potencial teórico, sem restrições de acesso ao recurso.

Por outro lado, a inclusão de resíduos de apenas duas espécies florestais pode ter resultado numa sub-avaliação geral do potencial.

Fernandes e Costa [47], por sua vez, realizaram um estudo que teve como principal foco a estimativa do potencial de produção de biomassa de uma pequena região de Portugal (Marvão), no qual incluíram resíduos provenientes de culturas florestais e agrícolas. A quantidade anual de resíduos produzidos foi calculada recorrendo a factores de biomassa (ver secção 2.5) específicos para cada espécie, obtidos da literatura, tendo os autores realizado ainda uma estimativa do potencial energético da região (eficiência de conversão da biomassa em energia térmica de 70%) [47]. Os resultados, resumidos na Tabela 8, revelaram um potencial de cerca de 2600 ton/ano para os resíduos florestais e de praticamente 8000 ton/ano para os resíduos agrícolas. Estes dados indicam, portanto, que o potencial da bioenergia não se limita apenas aos resíduos provenientes das actividades de gestão e exploração da floresta uma vez que os resíduos agrícolas podem ter um peso bastante significativo. No entanto, esta conclusão é de certa forma limitada pelo pressuposto assumido pelos autores de que toda a biomassa agrícola se encontra disponível para produção de energia. De facto, é largamente reconhecido na literatura [49,73,85], que o uso destes resíduos está sujeito a restrições pelo seu uso massificado noutro tipo de aplicações (p. ex. mercados de lenha e forragens para animais). Ainda no campo das limitações, também neste estudo não foram consideradas restrições de acesso ao recurso, i.e., estimou-se um potencial teórico.

**Tabela 8** – Resultados, por espécie florestal e agrícola, do potencial de produção de biomassa e potencial energético da região de Marvão [81].

Espécie	Área de coberto (ha)	Biomassa produzida (ton/ano)	Potencial energético (GJ)
<b>Biomassa Florestal</b>			
Azinheira	572,0	274,6	2691
Carvalho	244,0	122,0	1281
Eucalipto	237,4	208,9	2194
Sobreiro	950,6	950,6	9316
Castanheiro	266,9	133,5	1401
Pinheiro Bravo	789,4	789,4	9393
Outras Coníferas	154,4	115,8	1216
Outras Resinosas	45,80	38,9	408,7
<b>Total Florestal</b>	3260	2634	27.899
<b>Biomassa Agrícola</b>			
Pomares	75,88	151,8	2125
Culturas de Cereais	2575	3964	55.495
Plantas Herbáceas	2620	817,2	11.440
Olival	1991	2986	41.804
Vinhas	7,770	54,42	761,9
<b>Total Agrícola</b>	7269	7973	78.138
<b>Total</b>	-	10.607	106.039

Ainda no que respeita a Portugal são de sublinhar os trabalhos de Rosa e Vieira [82], Vieira et al [83] e Netto [84]. Rosa e Vieira [82] avaliaram o potencial em biomassa de uma pequena região de Portugal, desta vez a ilha da Madeira, tendo incluído no estudo resíduos provenientes da actividade agrícola, florestal e indústria transformadora da madeira. Para o cálculo das quantidades de biomassa disponíveis, usaram uma metodologia baseada no uso de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) de modo a integrar vários níveis de informação espacial, precavendo a possibilidade de actualizações temporais instantâneas. Os resultados indicaram um potencial biomássico de 135,390 ton/ano. Seguindo a mesma linha de investigação Vieira et al [83] quantificaram, mais ou menos na mesma altura, o potencial de biomassa da região do Algarve. Os autores consideraram no estudo resíduos provenientes da exploração de povoamentos florestais, de culturas agrícolas e da recolha de matos em terrenos incultos e em áreas ardidas e, descontando as áreas pertencentes à Rede Natura 2000, concluíram que o potencial energético da região era de 106,951 tep/ano. Finalmente, em 2008, Netto [84] estimou a produção de biomassa de três concelhos do distrito de Santarém, incluindo no estudo resíduos florestais provenientes de povoamentos puros de eucalipto e pinheiro bravo. O autor construiu dois cenários, variando, de um para outro, a produtividade da recolha de resíduos (máxima ou mínima) e através do uso de modelos de silvicultura e equações de biomassa (ver secção 2.5) obteve uma estimativa da disponibilidade de biomassa das espécies consideradas. Os resultados indicaram que a área de estudo era capaz de produzir anualmente entre 30,601 e 35,585 toneladas secas por ano.

#### *2.4.5 Outros países*

Para além das investigações já mencionadas, encontram-se na literatura outros trabalhos que merecem referência. Num estudo de 2009, López-Rodríguez et al [48], tiveram como principal motivação quantificar e determinar de forma rigorosa o potencial dos resíduos florestais das espécies mais abundantes da região de Cáceres (Espanha). Para conseguir uma estimativa das quantidades de biomassa, os autores recorreram a dados do inventário florestal nacional e obtiveram informação detalhada ao nível de cada estrato, i.e, informação sobre um conjunto de parcelas agrupadas com base em parâmetros comuns, como o tipo de vegetação arbórea presente em determinada área, o estado de desenvolvimento e a área coberta pela projecção horizontal da referida vegetação [48]. Utilizando este conceito, e com recurso a uma metodologia específica cuja base consistiu num modelo logarítmico da relação entre o diâmetro da vegetação arbórea e a biomassa residual produzida, López-Rodríguez et al [48], estimaram factores de biomassa para as espécies dominantes em cada estrato. Posteriormente calcularam as quantidades anuais de biomassa disponíveis na região e a energia possível de ser produzida com a transformação destes resíduos. De notar que a extracção da biomassa apenas foi considerada técnica e economicamente viável em zonas de declives inferiores a 20%, localizadas a menos de 3km da via. Os resultados sugeriram que a produção de biomassa na região de Cáceres se encontra algo condicionada pelas dificuldades inerentes ao processo de recolha, estando disponíveis cerca de 463,000 toneladas de resíduos florestais anualmente. Assumindo que tudo era recolhido, o potencial biomássico da região foi estimado em 139.000 tep/ano.

Mais tarde, Viana e Costa [64] procuraram quantificar a biomassa florestal da província de Maputo (Moçambique), com o objectivo de estudar a viabilidade da produção de energia eléctrica a partir desta fonte de energia. Para isso, usaram cartografia temática nacional e informação acerca da produção/crescimento da floresta e concluíram, com o apoio de SIG, que o potencial de produção de resíduos florestais da região era cerca de 1,200,000 ton/ano, com um correspondente potencial energético de 17

EJ/ano. Em relação à instalação das centrais termoeléctricas a biomassa o estudo indicou as regiões de Magude e Moamba como as mais indicadas segundo uma série de critérios, nomeadamente a disponibilidade do recurso e a existência de florestas protegidas e infra-estruturas de transporte.

Finalmente, em 2010, Gomez et al [50] apresentaram uma metodologia para a avaliação do potencial técnico e económico de biomassa florestal e agrícola para produção de energia eléctrica. A metodologia, aplicada ao território espanhol, baseou-se numa hierarquia de potenciais e foi integrada em SIG com os resultados a serem geo-referenciados. Os autores começaram por estimar o total da energia contida na biomassa (potencial físico), introduzindo, depois, restrições relacionadas com a recolha e a disponibilidade do recurso (potencial geográfico) e com as características técnicas da tecnologia usada para a transformação do recurso em energia eléctrica (potencial técnico). Por fim, realizaram um estudo económico baseado na construção de curvas de custo para cada unidade de energia produzida (potencial económico). Os resultados indicaram que o potencial técnico da biomassa residual (florestal e agrícola) produzida em Espanha era de 118 PJ/ano. O potencial económico, por sua vez, foi estimado em 46.3 PJ/ano.

## 2.5 Modelos de estimativa de biomassa

### 2.5.1 Biomassa florestal

A quantificação da biomassa florestal pode ser efectuada através de métodos directos (onde é determinada de forma real) e métodos indirectos (apenas é obtida uma estimativa) [86]. Os métodos directos envolvem um processo de amostragem destrutiva, isto é, uma medição real da biomassa com o corte de todas as árvores de uma determinada parcela e a pesagem da biomassa resultante. De seguida, é feita uma extrapolação dos resultados obtidos para a área total de interesse. Os métodos indirectos, por sua vez, consistem no uso de um conjunto de técnicas que não requerem a destruição do material vegetal. Tipicamente, utilizam-se relações matemáticas como razões (factores de biomassa) ou regressões (equações de biomassa) que correlacionam dados provenientes de inventários florestais com as produções de biomassa; ou técnicas de detecção remota (imagens de satélite). De seguida, apresenta-se uma pequena revisão dos princípios relacionados com os modelos de estimativa de biomassa referidos [54,86–90].

#### *Métodos directos*

Os métodos directos de quantificação de biomassa incluem, geralmente, duas grandes classes: o método da árvore individual e o método da parcela [86]. O método da árvore individual caracteriza-se pela selecção de uma árvore média através da realização de um inventário florestal piloto, procedendo-se, terminada esta tarefa, ao corte e à determinação (pesagem) da biomassa de um número pré-definido de indivíduos que constituem a amostra [86]. O método da parcela, por outro lado, pressupõe a definição de uma área de amostragem pré-determinada, pressupondo o corte e a pesagem de toda a biomassa que nela está contida [86].

#### *Métodos indirectos*

A estimativa de biomassa por meios indirectos realiza-se, tipicamente, segundo dois métodos propostos na literatura [89]. O primeiro, referido neste documento como factores de biomassa, utiliza dados provenientes de inventários florestais ou estatísticas nacionais (como a área de um povoamento ou o volume comercial de uma espécie) e multiplica-os por um ou mais factores que convertem (expandem ou reduzem) os dados reportados para estimativas de biomassa produzida; o segundo, conhecido como equações de biomassa, visa aplicar uma equação específica capaz de prever a biomassa (total ou parcial) de uma árvore em função das suas dimensões, i.e, o diâmetro e a altura.

De acordo com Somogyi et al. [89] os factores de biomassa são utilizados para estimativas da biomassa acima do solo e convertem dados de biomassa comercial (madeira) em biomassa total da árvore. Por definição, estes factores são calculados através do rácio entre a biomassa total e a biomassa do tronco e, no caso mais simples, assumem a forma  $B = P \times BF$ , onde  $B$  corresponde à biomassa aérea (massa verde ou seca, em toneladas),  $P$  ao volume comercial da espécie em  $m^3$  e  $BF$  ao factor utilizado, que pode incluir uma componente de conversão e, se necessário, uma componente de expansão. Notar que, geralmente, este método surge descrito na literatura com o nome de factores de expansão de biomassa; no entanto, os factores de expansão são apenas um dos tipos de factores utilizados, pelo que neste trabalho se adopta a expressão factor de biomassa para referir qualquer factor usado para estimar a biomassa de uma espécie a partir de dados conhecidos.

Os factores de biomassa podem também estar associados a modelos de silvicultura específicos de cada espécie sendo calculados, grosso modo, através do rácio entre a biomassa produzida durante o tempo de vida do povoamento e a sua área de ocupação. A Tabela 9 e a Tabela 10 apresenta uma pequena revisão de factores encontrados na literatura, incluindo as diferentes espécies e países para os quais foram desenvolvidos.

**Tabela 9** – Sumário de factores de biomassa encontrados na literatura (biomassa florestal). Estes factores são utilizados para converter biomassa comercial em biomassa total (ton/m<sup>3</sup>) [47,50,54,82,83].

Espécie	Factor de Biomassa (BF)		País	Fonte
<i>Castanea sativa</i>	0,75	ton/m <sup>3</sup>	Espanha	[54]
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	0,81	ton/m <sup>3</sup>	Espanha	[54]
<i>Fagus sylvatica</i>	0,81	ton/m <sup>3</sup>	Espanha	[54]
<i>Juniperus spp</i>	0,80	ton/m <sup>3</sup>	Espanha	[54]
<i>Pinus halepensis</i>	0,74	ton/m <sup>3</sup>	Espanha	[54]
<i>Pinus nigra</i>	0,64	ton/m <sup>3</sup>	Espanha	[54]
<i>Pinus pinaster</i>	0,55	ton/m <sup>3</sup>	Espanha	[54]
<i>Pinus pinea</i>	0,73	ton/m <sup>3</sup>	Espanha	[54]
<i>Pinus sylvestris</i>	0,62	ton/m <sup>3</sup>	Espanha	[54]
<i>Populus spp.</i>	0,62	ton/m <sup>3</sup>	Espanha	[54]
<i>Quercus faginea</i>	1,11	ton/m <sup>3</sup>	Espanha	[54]
<i>Quercus ilex</i>	1,28	ton/m <sup>3</sup>	Espanha	[54]
<i>Quercus petraea, Q. robur</i>	0,84	ton/m <sup>3</sup>	Espanha	[54]
<i>Quercus pyrenaica</i>	1,11	ton/m <sup>3</sup>	Espanha	[54]
<i>Quercus suber</i>	1,28	ton/m <sup>3</sup>	Espanha	[54]
<i>Sorbus spp.</i>	0,80	ton/m <sup>3</sup>	Espanha	[54]

**Tabela 10** – Sumário de factores de biomassa encontrados na literatura (biomassa florestal). Estes factores são utilizados para converter a área ocupada por cada espécie em biomassa anual (ton/ha/ano) [47,50,54,82,83].

<i>Castanea Sativa</i>	0,50	ton/ha	Portugal	[47]
<i>Castanea Sativa</i>	1,30	ton/ha	Espanha	[50]
<i>Eucalyptus globulus</i>	0,88	ton/ha	Portugal	[82]
<i>Eucalyptus globulus</i>	0,88	ton/ha	Portugal	[83]
<i>Eucalyptus globulus</i>	0,88	ton/ha	Portugal	[47]
<i>Eucalyptus globulus</i>	1,50	ton/ha	Espanha	[50]
<i>Fagus sylvatica</i>	0,27	ton/ha	Espanha	[91]
<i>Fagus sylvatica</i>	0,72	ton/ha	Portugal	[82]
<i>Fagus sylvatica</i>	0,70	ton/ha	Espanha	[50]

<i>Fraxinus spp.</i>	0,90	ton/ha	Espanha	[50]
<i>Juniperus spp</i>	0,90	ton/ha	Espanha	[50]
<i>Pinus</i>	1,06	ton/ha	Portugal	[82]
<i>Pinus</i>	1,06	ton/ha	Portugal	[83]
<i>Pinus</i>	1,60	ton/ha	Espanha	[50]
<i>Pinus sylvestris</i>	0,45	ton/ha	Espanha	[91]
<i>Pinus nigra</i>	1,35	ton/ha	Espanha	[91]
<i>Pinus halapensis</i>	0,40	ton/ha	Espanha	[91]
<i>Populus nigra</i>	1,50	ton/ha	Espanha	[91]
<i>Populus nigra</i>	3,90	ton/ha	Espanha	[50]
<i>Pinus Pinaster</i>	1,00	ton/ha	Portugal	[47]
<i>Quercus</i>	1,00	ton/ha	Espanha	[50]
<i>Quercus suber</i>	1,26	ton/ha	Espanha	[91]
<i>Quercus suber</i>	1,35	ton/ha	Portugal	[82]
<i>Quercus suber</i>	1,35	ton/ha	Portugal	[83]
<i>Quercus ilex</i>	0,84	ton/ha	Espanha	[91]
<i>Quercus ilex</i>	0,48	ton/ha	Portugal	[83]
<i>Quercus ilex</i>	0,48	ton/ha	Portugal	[47]
<i>Quercus robur</i>	0,20	ton/ha	Espanha	[91]
<i>Quercus pyrenaica</i>	0,50	ton/ha	Portugal	[47]
Coníferas	0,75	ton/ha	Portugal	[47]
Matos	4,00	ton/ha	Portugal	[83]
Resinosas	0,85	ton/ha	Portugal	[47]

Ainda segundo Somogyi et al. [89], e por outro lado, as equações de biomassa são regressões que relacionam a biomassa de um conjunto de árvores amostradas com parâmetros de fácil obtenção no terreno. Entre eles, o diâmetro à altura do peito é, normalmente, o mais usado devido à facilidade e precisão com que pode ser medido e à relação que possui com o volume e a idade da árvore [54]. Tradicionalmente, o modelo matemático mais usado para estudos de biomassa é o de uma função exponencial na forma  $B = a \cdot D^b$ , onde  $B$  corresponde à biomassa acima do solo (massa verde ou seca, normalmente em kg),  $D$  ao diâmetro do tronco a 1,30 ou 1,37m de altura [54,87] (em cm) e  $a$  e  $b$  aos coeficientes da equação. Na maioria dos casos, espera-se que a variabilidade de  $B$  seja largamente explicada pela variabilidade de  $D$ , com os valores de  $a$  e  $b$  dependentes, por exemplo, da espécie e da idade do povoamento. Uma vasta compilação de equações de biomassa para as principais espécies europeias pode ser encontrada num trabalho de investigação de Zianis e Muukkonen [88]. A Tabela 11 apresenta um sumário das equações encontradas na literatura científica [88,92–95].

Importa referir que a experiência tem mostrado que tanto os factores como as equações de biomassa dependem de características locais e regionais como as variáveis climáticas e a topografia, uma vez que estas exercem uma forte influência na dinâmica de crescimento da floresta [85,89]. Tal limitação traduz-se, necessariamente, na

especificidade da sua aplicação, sendo necessário ter o máximo cuidado na selecção e utilização de factores e equações apresentados na literatura, uma vez que a maioria das publicações usa amostras de locais representativos apenas de uma pequena região; no entanto, é reconhecido que os modelos disponíveis na literatura podem ser usados como aproximação em locais onde estudos mais detalhados não existam. Idealmente, porém, devem ser usados (ou desenvolvidos) modelos para cada espécie e região [85,89].

Em alternativa a estes métodos mais tradicionais encontram-se ainda algumas investigações cujo foco principal está no uso de imagens de satélite baseadas em técnicas de detecção remota para estimar áreas de povoamentos, produções de biomassa ou taxas de crescimento, com a vantagem de acesso a áreas mais abrangentes a custos bastantes baixos. Uma revisão bastante completa da aplicação destas técnicas pode ser encontrada em trabalhos de Rosillo-Calle [69] e Wulder et al [90].

**Tabela 11** – Sumário e descrição de diversas equações de biomassa disponíveis na literatura. Estas equações permitem estimar a quantidade de biomassa acima do solo (em kg por árvore) através da relação entre essa biomassa e o diâmetro do tronco e/ou a altura [88,92–95].

Espécie	Equação de Biomassa	País	Fonte
<i>Castanea sativa</i>	$0,066 D^{2,647}$	Espanha	[92]
<i>Eucalyptus globulus</i>	$2,645 D^{2,194}$	Espanha	[93]
<i>Eucalyptus globulus</i>	$*8,54 - 1,537 D + 0,163 D^2$	Portugal	[94]
<i>Eucalyptus globulus</i>	$*7,615 + 0,102 D^2$	Portugal	[94]
<i>Eucalyptus globulus</i>	$*0,1785 D^{1,756}$	Portugal	[95]
<i>Fagus sylvatica</i>	$0,1326 D^{2,4323}$	Espanha	[92]
<i>Pinus halepensis</i>	$0,1247 D^{2,206}$	Espanha	[93]
<i>Pinus nigra</i>	$23,729 - 5,0998 D - 0,6073 D^2$	Espanha	[93]
<i>Pinus pinaster</i>	$36,698 + 6,3722 D - 0,4684 D^2$	Espanha	[93]
<i>Pinus pinaster</i>	$*0,656 D^{2,364} - h^{-0,977}$	Portugal	[94]
<i>Pinus pinaster</i>	$*0,463 D^{1,604}$	Portugal	[95]
<i>Pinus pinea</i>	$0,1129 D^{2,4241}$	Espanha	[93]
<i>Pinus sylvestris</i>	$0,0805 D^{2,4167}$	Espanha	[93]
<i>Populus spp.</i>	$0,0519 D^{2,545}$	Alemanha	[88]
<i>Quercus ilex</i>	$0,1006 D^{2,4727}$	Espanha	[93]
<i>Quercus pyrenaica</i>	$58,196 + 12,238 D - 0,7738 D^2$	Espanha	[93]
<i>Quercus suber</i>	$0,0343 D^{-2,6079}$	Espanha	[93]

\* Apenas biomassa da copa e ramagens

### 2.5.2 Biomassa agrícola

A biomassa residual associada às práticas agrícolas é, geralmente, estimada com base na área cultivada e na produção de cada cultura através de factores de biomassa derivados da literatura, dados estatísticos ou intervenções de campo a nível local [85]. Estes factores correspondem, por definição, ao rácio entre a produção de cada cultura e a quantidade de resíduos por ela gerados, sendo este método largamente utilizado para quantificar a disponibilidade de resíduos agrícolas para fins energéticos. Tal como para

a componente florestal, também os factores de biomassa associados à agricultura são significativamente influenciados pelas práticas usadas e pelas condições locais, pelo que a sua utilização deve ser restringida, sempre que possível, à região para onde foram desenvolvidos. A Tabela 12 apresenta um pequeno sumário de factores de biomassa encontrados na literatura. Além desta limitação, sabe-se também que o potencial da biomassa agrícola está limitado por uma série de obstáculos de carácter logístico e competitivo. De facto, alguns autores [85] chegam a afirmar que cerca de metade destes resíduos possuem já aplicações não relacionadas com o sector energético, o que associado à dificuldade de recolha a totalidade da produção (a maquinaria agrícola deixa sensivelmente 50% dos resíduos no local), faz com que apenas 25% dos resíduos produzidos pela agricultura estejam disponíveis para fins energéticos [50,85]. Na verdade, estes resíduos deixados no solo são até desejáveis por desempenharem um papel importante em termos ambientais, nomeadamente em relação à erosão e ao empobrecimento da quantidade de nutrientes dos solos.

**Tabela 12** – Sumário de factores de biomassa encontrados na literatura (biomassa agrícola). Estes BF são usados para converter a área ocupada por cada espécie em biomassa total anual [47,82,96–99].

Espécie	Factor de Biomassa		País	Fonte
Cereais	1,45	ton/ha	Portugal	[47]
Cereais	11,6	ton/ha	Portugal	[82]
Pomares	2,00	ton/ha	Portugal	[47]
Pomares	7,41	ton/ha	Grécia	[96]
Pomares	2,16	ton/ha	Itália	[97]
Pomares	2,80	ton/ha	Portugal	[98]
Pomares	3,05	ton/ha	Espanha	[99]
Pomares	3,91	ton/ha	Espanha	[50]
Olivais	1,50	ton/ha	Portugal	[47]
Olivais	3,22	ton/ha	Grécia	[96]
Olivais	1,70	ton/ha	Itália	[97]
Olivais	0,69	ton/ha	Portugal	[98]
Olivais	1,76	ton/ha	Espanha	[99]
Olivais	1,61	ton/ha	Espanha	[50]
Plantas Herbáceas	0,31	ton/ha	Portugal	[47]
Vinhas	7,00	ton/ha	Portugal	[47]
Vinhas	7,50	ton/ha	Portugal	[82]
Vinhas	4,42	ton/ha	Grécia	[96]
Vinhas	2,90	ton/ha	Itália	[97]
Vinhas	4,46	ton/ha	Portugal	[98]
Vinhas	2,99	ton/ha	Espanha	[99]
Vinhas	3,65	ton/ha	Espanha	[50]

### *2.5.3 Ferramentas relevantes na avaliação do potencial da bioenergia*

Desde a sua concepção original, voltada para a tradicional produção de cartografia, os SIG têm ganho cada vez mais aplicações. Historicamente, porém, este é um facto pouco reconhecido e apesar da construção de mapas ser uma das suas capacidades primárias, as potencialidades desta ferramenta são melhor descritas através da expressão “base de dados” [100]. De facto, os SIG podem ser definidos como uma base de dados especializada, uma vez que a informação neles contida, seja em formato numérico, de texto, ou imagem, está ligada a uma representação espacial da realidade baseada num conjunto de coordenadas do local a que se referem os dados [100]. Assim, a principal característica dos SIG é a sua capacidade de combinar informação espacial na forma de pontos, linhas, polígonos ou grelhas, com um conjunto de atributos armazenados numa tabela convencional. Esta possibilidade de manipulação e análise de dados, associando-lhes uma componente espacial, constitui mesmo uma das funções mais importantes das ferramentas SIG desde o ponto de vista da engenharia. Desta forma, qualquer variável passível de georreferenciação pode ser estudada e a disponibilidade de biomassa e a produção de uma qualquer espécie florestal ou agrícola não são, naturalmente, excepção.

Para Voivontas [96] a utilização de SIG no sector da bioenergia possui duas vantagens assinaláveis. Primeiro, os SIG possuem a capacidade de modelar as várias condicionantes que influenciam a produção e o acesso à biomassa (p. ex. a altitude e o declive) através de processos de álgebra cartográfica. Segundo, os resultados da análise podem ser visualizados utilizando mapas e técnicas mais evoluídas como animações ou paisagens virtuais. Em conjunto, estes factores têm transformado os SIG numa excelente ferramenta em estudos na área da bioenergia, com destaque para o seu uso generalizado em trabalhos de investigação ligados à quantificação do seu potencial, mas também nas mais variadas disciplinas, como as ciências do ambiente, a engenharia civil, a área do comércio/negócios e transportes. Na verdade, porém, a utilização desta ferramenta é ainda relativamente recente com a primeira referência na literatura científica a datar apenas de 1996 [101]. Nesse trabalho pioneiro, Easterly e Burnham [101] avaliaram a distribuição espacial da biomassa no estado do Tennessee e usaram as potencialidades dos SIG para definir a localização mais adequada para uma central termoeléctrica a biomassa. Actualmente, a dispersão geográfica do potencial de biomassa tem suscitado um interesse crescente na comunidade científica e, para além da selecção de locais para projectos de bioenergia [48,49,81,96,102], os SIG têm tido aplicação em trabalhos de avaliação da disponibilidade de biomassa [47,48,59,96] e de estimativa de custos de transporte de resíduos para centrais existentes ou em fase de projecto [50].

Uma das fontes de dados que alimentam os SIG são as cartas de ocupação/uso do solo. A informação sobre a ocupação do solo, ou seja, sobre as características dos elementos que compõem a superfície terrestre, constitui um tipo de informação fundamental no que se refere ao ambiente, ao sector florestal e, em consequência, ao sector da bioenergia [103]. A importância deste tipo de informação prolonga-se por várias vertentes (científica, gestão de recursos e definição de políticas) e tem tido uma relevância crescente à medida que o interesse da comunidade no ambiente e em fontes de energia como a biomassa tem aumentado. A principal fonte cartográfica de ocupação/uso do solo de Portugal Continental é a Carta de Ocupação do Solo de 2007 (COS'2007) [103]. A COS'2007 está em formato vectorial e divide o espaço em unidades de paisagem (polígonos) que partilham conceitos de uso e ocupação do solo. Esta cartografia, designada de temática, permite, desde logo, medir a extensão e distribuição das classes de ocupação do solo e identificar locais próprios para actividades específicas, servindo de base para a produção de informação mais complexa sobre outros temas, como por exemplo o abordado neste trabalho cuja metodologia é descrita de seguida.

## Parte II

### O potencial em biomassa

## Capítulo 3

### Material E Métodos

*Neste capítulo realiza-se uma descrição e justificação detalhada dos métodos e procedimentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Inclui-se no capítulo a caracterização da área em estudo e toda a metodologia de construção da base de dados SIG para a estimativa do potencial em biomassa.*

Como já referido, pretende-se com o presente trabalho obter um melhor conhecimento das quantidades de resíduos biomássicos de origem agro-florestal produzidos na região do Alto Alentejo. Deste modo, procura-se apresentar uma análise rigorosa no que concerne à quantificação e mapeamento do potencial biomássico das espécies mais representativas da região, numa perspetiva de valorização energética da sua biomassa por processos de conversão termoquímicos.

#### 3.1 Caracterização da área em estudo

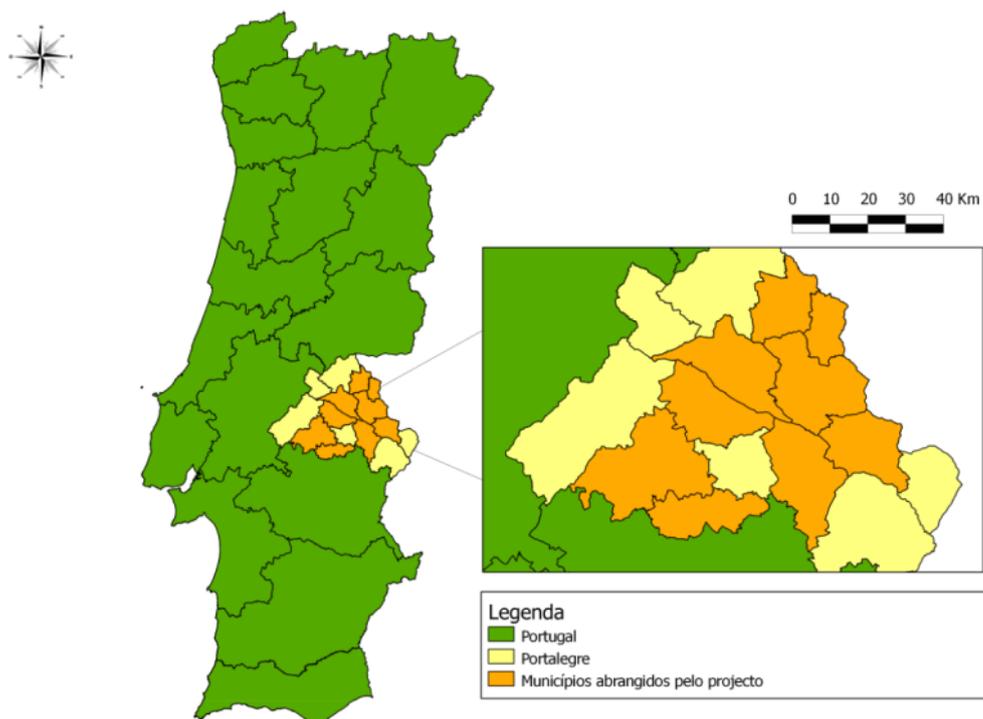
##### 3.1.1 O Alto Alentejo em revista

O Alto Alentejo é uma das 5 sub-regiões integradas na NUTS II Alentejo. Com uma superfície geográfica de aproximadamente 6084 km<sup>2</sup> [104], esta sub-região situa-se no norte da região Alentejo e inclui 15 concelhos (Alter do Chão, Arronches, Avis, Campo Maior, Castelo de Vide, Crato, Elvas, Fronteira, Gavião, Marvão, Monforte, Nisa, Ponte de Sôr, Portalegre e Sousel). Em 2001, a população residente na região cifrava-se em 127.018 habitantes com uma tendência nítida para decrescer, como se pode constatar pelos resultados do mais recente Censos, realizado em 2011, onde se regista uma acentuada evolução negativa da população residente durante o período 2001-2011. A população actual ronda os 118.448 habitantes [105].

O relevo do Alto Alentejo é razoavelmente montanhoso, com destaque para as serras de Nisa, Marvão e São Mamede. Esta última atinge uma altitude de 1.025 metros. O clima, por sua vez, apresenta grandes amplitudes térmicas, com excessivo calor no verão e bastante frio no inverno. A conjugação de um clima de características mediterrânicas com um clima montanhoso faz com que a vegetação seja muito diversificada e inclua espécies como o pinheiro-bravo (*Pinus pinaster*), o eucalipto (*Eucalyptus globulus*), o sobreiro (*Quercus suber*), a azinheira (*Quercus rotundifolia*), o carvalho, o pinheiro-manso (*Pinus Pinea*) e o castanheiro (*Castanea sativa*). Segundo o IFN5 [106], os cobertos florestal e agrícola da região atingem valores de 44% e 41%, respectivamente. No que concerne à actividade económica, a região apresenta a maior parte da população empregue no sector terciário (54%), pouca população no sector secundário e um quinto da população no sector primário. A taxa de atividade e a taxa de desemprego tendem a apresentar valores ligeiramente inferiores aos observados na totalidade da região do Alentejo.

A área geográfica correspondente ao trabalho inclui, por razões de disponibilidade de dados, nove dos quinze concelhos do Alto Alentejo, nomeadamente: Alter do Chão, Arronches, Avis, Castelo de Vide, Crato, Marvão, Monforte, Portalegre e Sousel, correspondendo a cerca de 14% do território da região Alentejo e 4% do território de Portugal Continental, conforme ilustrado na Figura 10. Daqui em diante, considera-se

o Alto Alentejo como a área correspondente aos nove concelhos que totalizam a área em estudo no presente trabalho.



**Figura 10** - Enquadramento geográfico do Alto Alentejo (distrito de Portalegre) e da área em estudo (concelhos de Alter do Chão, Arronches, Avis, Castelo de Vide, Crato, Marvão, Monforte, Portalegre e Sousel).

## 3.2 Metodologia

### 3.2.1 Sumário do procedimento utilizado

Para a avaliação do potencial biomássico dos resíduos agro-florestais do Alto Alentejo utilizou-se uma metodologia centrada no recurso, do tipo *bottom-up*, focada na estimativa do potencial teórico da produção de biomassa e a adição de uma série de restrições técnicas ao seu aproveitamento de modo obter um potencial técnico mais representativo da realidade encontrada na região. Geralmente, o potencial de uma fonte de resíduos de origem biomássica resulta de duas estimativas base: a quantidade de resíduos gerados num dado ciclo temporal (tipicamente 1 ano), numa dada desagregação geográfica; e o conteúdo energético de cada unidade de resíduos (tipicamente 1 ton). O modelo foi implementado com o suporte de uma aplicação SIG e usou informação georreferenciada para a totalidade do universo de estudo através da integração do conjunto de dados da Tabela 13. A Tabela 14 introduz os *inputs* requeridos para a avaliação. Especificamente, a avaliação realizada foi estruturada em quatro passos:

- 1) O primeiro passo para a estimativa da produção anual de biomassa residual (e, por conseguinte, a estimativa do potencial da biomassa para produção de energia) consistiu na avaliação dos dados de ocupação da COS2007.
- 2) O segundo passo consistiu em introduzir um conjunto de restrições de acesso ao recurso por não se considerar tecnicamente adequada a sua recolha em locais com pendentes bastante inclinadas, ou em áreas de difícil acesso, demasiado distantes de estradas ou caminhos transitáveis.

- 3) Em terceiro lugar, importaram-se os dados relativos às zonas utilizáveis (reclassificados tendo em conta apenas as famílias de resíduos principais) para uma tabela de atributos com conteúdo relativo às produtividades de cada família; estimou-se a disponibilidade de biomassa para as diferentes tipologias de biomassa consideradas (em ton/ano).
- 4) Por fim, calculou-se o potencial energético (MWh/ano) das diferentes famílias de biomassa com base no poder calorífico inferior de cada uma delas

**Tabela 13** – Dados usados na construção da base de dados SIG referente ao Alto Alentejo.

<b>Tipo de dados</b>	<b>Fonte</b>
Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP), versão 2012	[104]
Carta de Ocupação de Solos (COS2007), versão 2007	[107]
Modelo Digital do Terreno a 30M (ASTER DEM 30M), versão 2009	NASA
Cartografia Viária (10k)	CIMAA

**Tabela 14** – Requisitos em matéria de dados para a estimativa do potencial em biomassa.

<b>Fontes de biomassa</b>	<b>Atributos</b>
Resíduos Florestais	Espécie florestal
	Área florestal
	Produtividade de resíduos
Resíduos Agrícolas	Espécie cultivada
	Área de cultivo
	Produtividade de resíduos

Nas subsecções seguintes descreve-se detalhadamente toda a metodologia utilizada na determinação do potencial energético associado à biomassa residual do Alto Alentejo.

### *3.2.2 Coberto florestal e agrícola da área em estudo*

Para estimar a biomassa residual produzida na região foi necessário identificar e classificar cada uma das suas zonas de coberto florestal e agrícola. Este procedimento utilizou como base a informação contida na COS2007 e incluiu a classificação de cada unidade de paisagem da carta (polígono) em função do potencial em biomassa com o objectivo de eliminar zonas de origem não biomássica - como rios e povoações -, e de diferenciar os potenciais em agrícola e florestal. Em termos de implementação no SIG, esta tarefa significou a atribuição do valor “0” a polígonos de origem não biomássica e o valor “1” a polígonos cuja existência de espécies florestais ou agrícolas tenha sido verificada. A distribuição espacial de todas as zonas classificadas como tendo origem biomássica foi efectuada considerando os limites administrativos de cada concelho e de cada freguesia.

O passo seguinte contemplou a determinação da área ocupada por cada espécie florestal e agrícola através da análise da nomenclatura da COS2007. A COS2007 inclui um sistema de classificação hierárquico que descreve diversas ocupações/ usos do solo e inclui: territórios artificializados; áreas agrícolas e agro-florestais; florestas e meios naturais e semi-naturais; zonas húmidas; corpos de água. Estas ocupações/ usos do solo

correspondem ao primeiro nível de uma nomenclatura que representa a ocupação/uso do solo em cinco níveis de detalhe temático. Deste modo, a COS2007 descreve a distribuição espacial de um sem número de espécies agro-florestais, das quais três podem estar presentes num determinado polígono. Apesar de bastante completa no que respeita à identificação de áreas com potencial biomássico (i.e, áreas ocupadas por vegetação) a nomenclatura da COS2007 não permite uma leitura directa das áreas ocupadas por cada tipologia, uma vez que existem polígonos com mais do que uma tipologia presente e o próprio nível de detalhe temático sugere diferenças em termos de coberto vegetal. De maneira a ultrapassar esta limitação, procedeu-se a uma estimativa do total da área efectivamente ocupada por biomassa agro-florestal, definindo-a como o valor resultante do cruzamento da área de cada polígono com o grau de coberto da vegetação e a taxa de ocupação de cada espécie identificada, segundo a expressão:

$$A_{nt}^{ef} = \sum_e \sum_n \sum_t A_n^T \eta^C \eta_e^O \quad (1)$$

onde  $A_n^T$  corresponde à área total de cada polígono  $n$ , no território  $t$  (freguesia ou concelho), em ha;  $\eta^C$  à percentagem de terreno coberto pela projecção horizontal da vegetação;  $\eta_e^O$  à percentagem de terreno ocupada por cada espécie  $e$ ; e  $A_{nt}^{ef}$  à área efectiva de cada polígono  $n$ , no território  $t$  (freguesia ou concelho), em ha. A Tabela 15 e a Tabela 16 resumem os parâmetros  $\eta^C$  e  $\eta_e^O$  utilizados na equação (1), quer para espécies florestais, como também para culturas agrícolas.

**Tabela 15** – Sumário dos parâmetros utilizados na definição das áreas efectivas de cada espécie florestal presente na COS'2007 (classificação nível 4).

Fontes de biomassa	$\eta^C$	% Cultura principal	% Cultura secundária	% Cultura terciária
SAF com culturas temporárias de sequeiro	55	50 25	50 25	- 50
SAF com culturas temporárias de regadio	55	50 25	50 25	- 50
SAF com pastagens	55	50 25	50 25	- 50
SAF com culturas permanentes	55	50 25	50 25	- 50
Florestas puras de folhosas	65	100	-	-
Florestas de misturas de folhosas	65	62,5	37,5	-
Florestas puras de resinosas	65	100	-	-
Florestas de misturas de resinosas	65	62,5	37,5	-
Florestas mistas de folhosas com resinosas	65	75	-	-
Florestas mistas de resinosas com folhosas	65	75	-	-
Vegetação herbácea natural	5	100	-	-
Matos densos	5	100	-	-
Matos pouco densos	5	100	-	-

Vegetação esclerófita densa	5	100	-	-
Vegetação esclerófita pouco densa	5	100	-	-
Florestas abertas puras de folhosas	20	100	-	-
Florestas abertas de misturas de folhosas	20	75	-	-
Florestas abertas puras de resinosas	20	100	-	-
Florestas abertas de misturas de resinosas	20	62,5	37,5	-
Florestas abertas mistas de folhosas com resinosas	20	75	-	-
Florestas abertas mistas de resinosas com folhosas	20	75	-	-
Outras formações lenhosas	5	100	-	-
Cortes rasos e novas plantações	5	100	-	-
Viveiros florestais	55	100	-	-

**Tabela 16** – Sumário dos pressupostos utilizados na definição das áreas efectivas de cada espécie agrícola presente na COS'2007 (classificação nível 4).

Fontes de biomassa	$\eta^c$	% Cultura principal	% Cultura secundária	% Cultura terciária
Culturas temporárias de sequeiro	5	100	-	-
Estufas e Viveiros	0	-	-	-
Culturas temporárias de regadio	5	100	-	-
Arrozais	0	-	-	-
Vinhas	10	100	-	-
Vinhas com pomar	10	50	50	-
Vinhas com olival	10	50	50	-
Pomares	30	100	-	-
Pomares com vinha	30	50	50	-
Pomares com olival	30	50	50	-
Olivais	10	100	-	-
Olivais com vinha	10	50	50	-
Olivais com pomar	10	50	50	-
Pastagens permanentes	5	100	-	-
Culturas temporárias de sequeiro associadas a culturas permanentes	5	50	50	-

Culturas temporárias de regadio associadas a culturas permanentes	5	50	50	-
Pastagens associadas a culturas permanentes	5	50	50	-
Sistemas culturais e parcelares complexos	5	100	-	-
Agricultura com espaços naturais e semi-naturais	5	100	-	-

A aplicação da equação (1) permitiu estimar as áreas efectivas de coberto, florestal e agrícola respectivamente, das seguintes famílias:

- Azinheira; Castanheiro; EF Desconhecida; Espécies Invasoras; Eucalipto; Folhosas; Matos Densos; Matos Pouco Densos; Misturas De Folhosas; Misturas De Resinosas; Outras Espécies; Outras Folhosas; Outras Formações Lenhosas; Outras Misturas; Outras Resinosas; Outros Carvalhos; Pinheiro Bravo; Pinheiro Manso; Resinosas; Sobreiro; Vegetação Esclerófita Densa; Vegetação Esclerófita Pouco Densa; Vegetação Herbácea Natural;

- CA Desconhecida; Culturas Permanentes; Culturas Temporárias De Regadio; Culturas Temporárias De Sequeiro; Olival; Outros Pomares; Pastagens; Pastagens Permanentes; Pomar; Pomares De Amendoeira; Pomares De Castanheiro; Pomares De Citrinos; Pomares De Frutos Frescos; Vegetação Arbustiva E/Ou Herbácea; Vinhas;

### 3.3.3 Restrições ao potencial biomássico da área em estudo

A metodologia utilizada na estimativa das quantidades de biomassa produzidas no Alto Alentejo teve em conta um conjunto de restrições técnicas ao acesso e utilização dos resíduos, à semelhança do apresentado em trabalhos similares, como os de Gómez et al [49] e López-Rodríguez et al [48]. Uma dessas restrições disse respeito ao facto da recolha da biomassa não ser considerada possível em locais com pendentes demasiado inclinadas, ou em áreas de difícil acesso, demasiado distantes de estradas ou caminhos transitáveis. Deste modo, no presente trabalho a extração da biomassa residual foi limitada a locais com declives inferiores a 20% já que, para além de um conjunto de dificuldades técnicas e económicas (possibilidade de mecanização e custo da recolha), encostas mais inclinadas envolvem, frequentemente, problemas ambientais ligados à erosão e perda de solos.

Relativamente à implementação deste procedimento na área referente ao Alto Alentejo, os locais com declives inferiores a 20% foram determinados do seguinte modo: toda a área de estudo foi classificada de acordo com a cartografia que descreve a altimetria do terreno, atribuindo-se o valor “1” a zonas com pendentes iguais ou inferiores a 20% e o valor “2” a terrenos mais inclinados; os polígonos que cumpriam os critérios foram seleccionados e, a partir deles, gerado um novo *layer* com todas as zonas consideradas utilizáveis, i.e, com declives iguais ou inferiores a 20% (Figura 11).

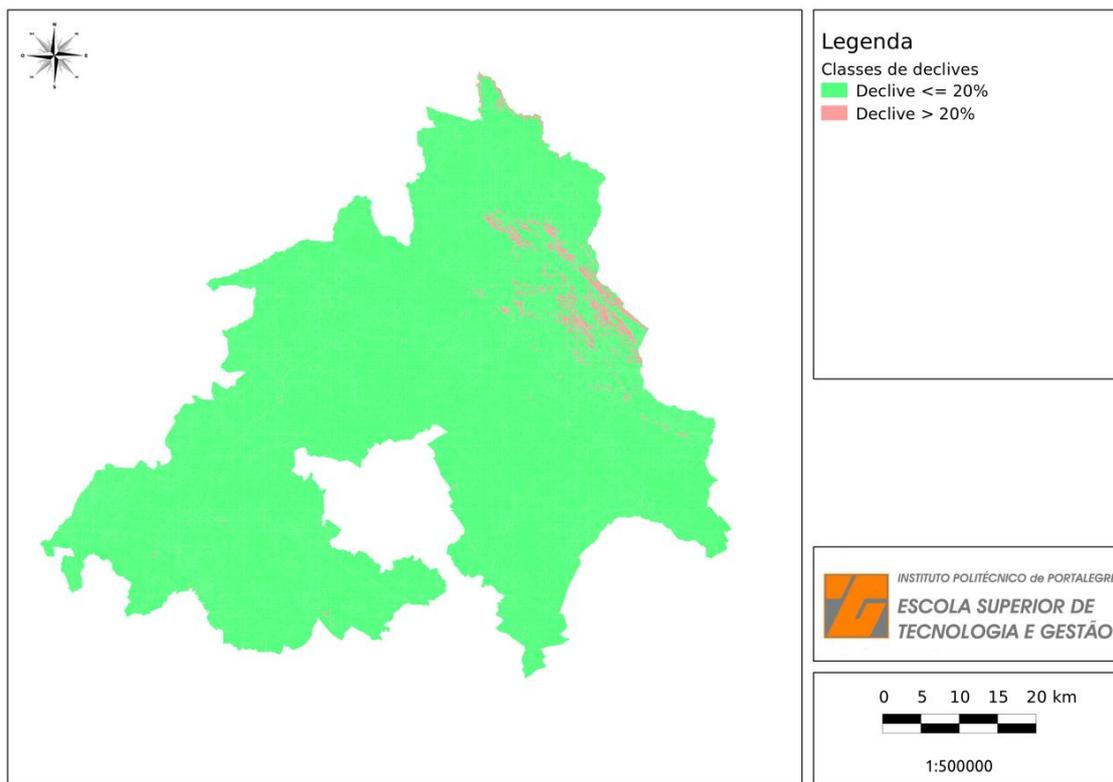


Figura 11 - Classificação da área em estudo de acordo com os declives.

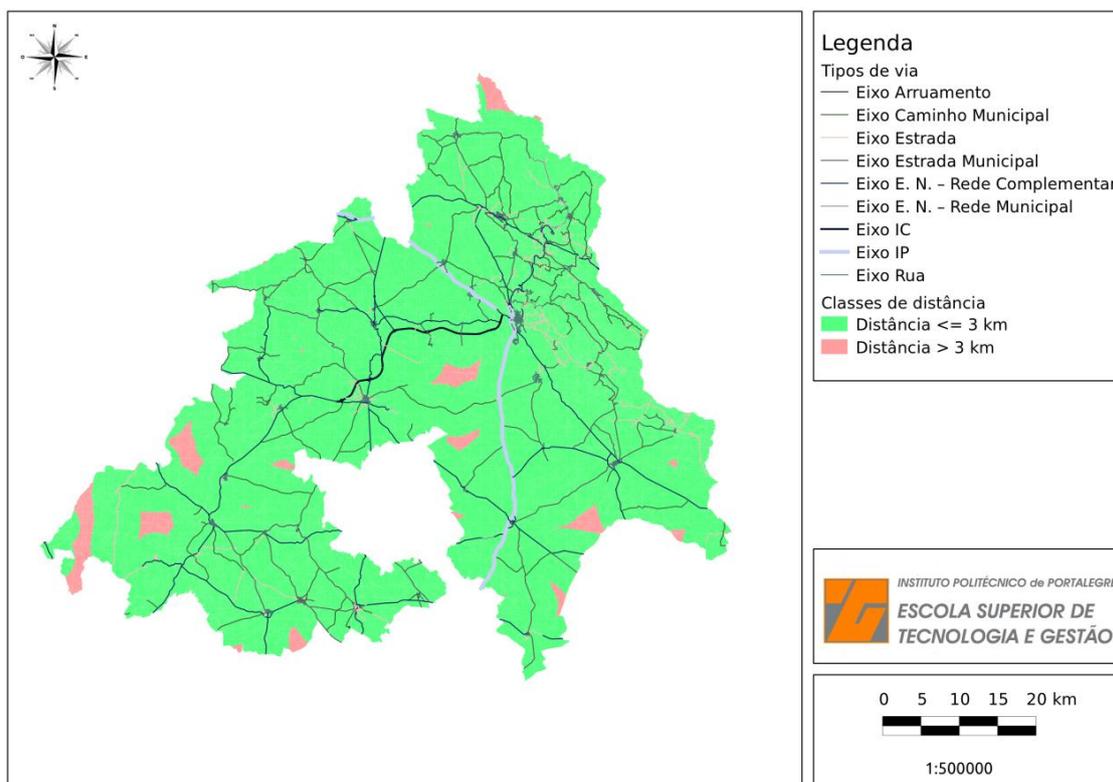


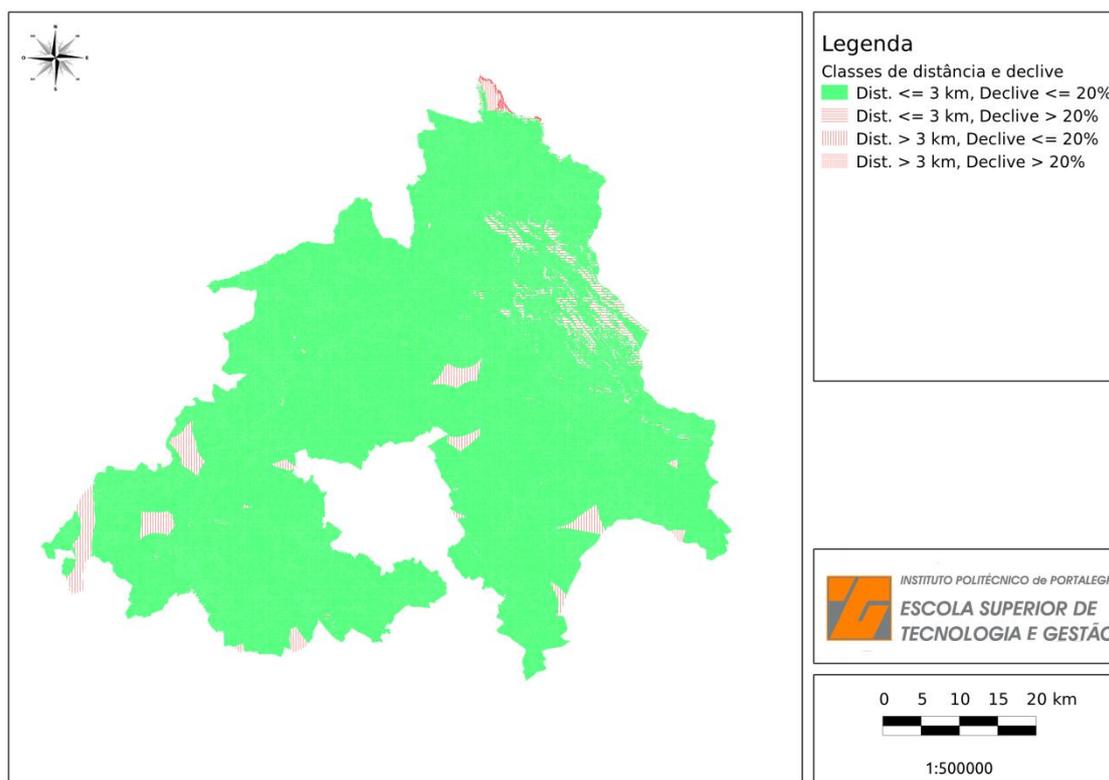
Figura 12 - Classificação da área em estudo de acordo com o critério de distância à via.

A segunda restrição técnica considerada correspondeu à dificuldade de acesso à biomassa de acordo com a proximidade a estradas ou caminhos transitáveis. Assim, a representação da disponibilidade de biomassa segundo este critério foi obtida da seguinte forma: usando as potencialidades do SIG, e tendo a cartografia relativa à rede viária como referência, a distância à estrada mais próxima foi determinada para todos os pontos do mapa; partindo do mapa de distâncias obtido, o valor “2” foi atribuído a distâncias superiores a 3 km e o valor “1” a distâncias iguais ou inferiores ao valor de referência, tal como ilustrado na Figura 12.

O *layer* correspondente à área adequada para recolha de biomassa foi, posteriormente, “cortado” através da intersecção dos *layers* correspondentes às áreas efetivamente utilizáveis de acordo com os critérios de classificação considerados (declives e distâncias à via inferiores a 20% e 3 km, respetivamente). O resultado final da classificação efectuada encontra-se representado graficamente na Figura 13 e indica que a esmagadora maioria da área de estudo pode ser considerada, de acordo com os critérios estabelecidos, como adequada para recolha de biomassa. Na Tabela 17 pode ainda verificar-se que apenas 5% dos locais caracterizados possuem biomassa não utilizável.

**Tabela 17** – Classificação integrada de acordo com os critérios de distância e declive.

<b>Critério</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>%</b>
Inferior a 3km, Inferior 20%	307874	94,8%
Inferior a 3km, Superior a 20%	6036	1,86%
Superior a 3km, Inferior a 20%	10566	3,25%
Superior a 3km, Superior a 20%	239	0,07%
<b>Total</b>	<b>324716</b>	<b>100%</b>



**Figura 13** - Classificação integrada de acordo com os critérios de distância e declive.

### 3.2.4 Disponibilidade de biomassa

Após a quantificação geral das áreas agro-florestais existentes, através da análise geográfica dos limites administrativos e da ocupação do solo, incluindo um conjunto de limitações técnicas já descritas, procedeu-se ao cálculo da disponibilidade de biomassa florestal da região. A disponibilidade de biomassa foi definida como a quantidade anual de biomassa residual (ton secas/ano) proveniente da actividade florestal, passível de ser explorada para fins energéticos. A estimativa incluiu apenas, e de acordo com a estratégia política nacional [81], a disponibilidade de resíduos provenientes de fontes primárias - isto é, resíduos sem aplicação em mercados mais tradicionais, paralelos ao mercado energético, como a indústria da madeira. As quantidades anuais de biomassa agro-florestal foram, então, calculadas através da seguinte expressão:

$$\pi_{et}^B = \sum_e \sum_n \sum_t A_{nt}^{ef} \eta_e^P \eta_e^R \quad (2)$$

em que a soma se estende a cada espécie  $e$ , na área discreta (polígono)  $n$ , no território  $t$  (freguesia ou concelho), correspondendo  $A_n^{ef}$  à área efectiva de cada polígono  $n$ , no território  $t$  (em ha);  $\eta_e^P$  à produtividade de resíduos da espécie  $e$  (em ton secas/ha/ano);  $\eta_e^R$  à fracção de resíduos da espécie  $e$  que podem ser efectivamente usados para produzir energia; e  $\pi_{et}^B$  à biomassa da espécie  $e$ , disponível no território  $t$  (em ton secas/ano).

A equação (2) foi aplicada a cada espécie florestal e a cada cultura agrícola identificada, tendo estas sido reclassificadas num total de dez e cinco famílias (identificadas na Tabela 18 e Tabela 19), respectivamente. As estimativas para a produtividade de resíduos, por sua vez, foram conseguidas através da análise de um conjunto de referências encontradas na literatura [47,82,83], definindo-se o parâmetro  $\eta_e^P$  de forma específica para cada família de biomassa. Na Tabela 18 e na Tabela 19, resumem-se as produtividades usadas.

**Tabela 18** - Sumário da produtividade de resíduos (em ton secas/ha/ano) para cada uma das famílias de biomassa florestal consideradas [47,82,83].

Família de biomassa	Produtividade de resíduos ( $\eta_e^P$ )
Azinheira	Poda de uma árvore a cada 20 anos e desbaste de 0,20 árvores/ha a cada ano, com a produção respectiva de 5 ton secas/ha e 0,22 ton secas/ha/ano; produtividade total de 0,48 ton secas/ha/ano;
Sobreiro	Poda moderada de 70 árvores/ha a cada 9 anos e o desbaste de uma árvore/ha a cada ano com a produção respectiva de 2,50 ton secas /ha e 0,85 ton secas /ha/ano; produtividade total de 1,00 ton secas/ha/ano;
Castanheiro	Produtividade de 0,50 ton secas/ha/ano. Estimativa baseada em dados da literatura.
Carvalho	Produtividade de 0,50 ton secas/ha/ano. Estimativa baseada em dados da literatura.
Eucalipto	Seleção de varas após a primeira revolução com produção de 14ton secas/ha; produtividade total de 0,88ton secas /ha/ano

Outras Folhosas	Produtividade de 0,75 ton secas/ha/ano. Estimativa baseada em dados da literatura.
Outras Resinosas	Produtividade de 0,85 ton secas/ha/ano. Estimativa baseada em dados da literatura.
Pinheiro Bravo	Poda e desbaste aos 10 e 15 anos com a produção de 12 ton secas/ha e 5,2 ton secas/ha; desramação natural no período seguinte com a produção de 20ton/ha; produtividade total de 1,0 ton/ha/ano
Pinheiro Manso	Produtividade de 0,85 ton secas/ha/ano. Estimativa baseada em dados da literatura.
Matos	Produtividade de 4,00 ton secas/ha/ano. Estimativa baseada em dados da literatura.

**Tabela 19** - Sumário da produtividade de resíduos (em ton/ha/ano) para cada uma das famílias de biomassa agrícola consideradas [47,82,83].

<b>Família de biomassa</b>	<b>Produtividade de resíduos (<math>\eta_e^P</math>)</b>
Culturas de Sequeiro	Produtividade de 1,45 ton secas/ha/ano. Estimativa baseada em dados da literatura.
Olival	Produtividade de 1,50 ton secas/ha/ano. Estimativa baseada em dados da literatura.
Plantas Herbáceas	Produtividade de 0,31 ton secas/ha/ano. Estimativa baseada em dados da literatura.
Pomares	Produtividade de 2,00 ton secas/ha/ano. Estimativa baseada em dados da literatura.
Vinhas	Produtividade de 7,00 ton secas/ha/ano. Estimativa baseada em dados da literatura.

De notar que todas as produtividades ligadas a espécies florestais incluem apenas resíduos provenientes das actividades de gestão e exploração da floresta, pelo que se considerou que toda a biomassa disponível pudesse ser usada para produção de energia; desta forma, para estes resíduos o parâmetro  $\eta_n^R$  usado foi igual a “1”. Para a componente agrícola, o mesmo parâmetro foi de “0,25” [50] para resíduos provenientes de culturas de sequeiro e plantas herbáceas, considerando-se que as restantes quantidades permaneceriam no solo e seriam usadas como fertilizante ou como forragens para alimentação animal; e de “0,60” [50] para árvores de fruto, olival e vinhas, com o remanescente a ser aplicado, por exemplo, nos mercados locais de lenha.

### 3.2.5 Potencial energético

Para a avaliação do potencial energético dos resíduos agro-florestais produzidos no Alto Alentejo usou-se uma metodologia que consistiu na estimativa da quantidade máxima de energia passível de ser extraída das diferentes famílias de biomassa

consideradas. Tal potencial resultou do conhecimento de duas estimativas base: a quantidade de biomassa gerada durante o ciclo temporal de um ano; e o conteúdo energético de cada família de resíduos, representado pelo PCI de cada uma delas. Assim, o potencial energético foi calculado a partir da seguinte equação:

$$\pi_{et}^E = \sum_e \sum_t 0,278 \cdot \pi_{et}^B \eta_e^Q \eta^T \quad (3)$$

em que a soma se estende a cada espécie  $e$ , no território  $t$  (freguesia ou concelho), correspondendo  $\pi_{et}^B$  à biomassa da espécie  $e$ , disponível no território  $t$  (em ton secas/ano). ;  $\eta_e^Q$  ao poder calorífico inferior da espécie  $e$  (em GJ/ton);  $\eta^T$  ao rendimento de conversão do recurso em energia eléctrica, cujo valor utilizado correspondeu a “0,25” [50]; “0,278” ao factor de conversão das unidades de energia (GJ em MWh); e  $\pi_{et}^E$  ao potencial energético da espécie  $e$ , disponível no território  $t$  (em MWh/ano).

O parâmetro  $\eta_e^Q$ , representativo do PCI de cada família de biomassa residual, resultou, à semelhança do apresentado para as produtividades, da análise de dados referenciados na literatura [47,82,83]. A Tabela 20 apresenta um sumário dos valores de PCI usados.

**Tabela 20** - Sumário do PCI (em GJ/ano) de cada uma das famílias de biomassa consideradas [47].

Família de biomassa	$\eta_e^Q$ (GJ/ton)	Fonte
Azinhreira	14	[47]
Sobreiro	14	[47]
Castanheiro	15	[47]
Carvalho	15	[47]
Eucalipto	15	[47]
Outras Folhosas	15	[47]
Outras Resinosas	15	[47]
Pinheiro Bravo	17	[47]
Pinheiro Manso	15	[47]
Matos	14	[47]
Culturas de Sequeiro	14	[47]
Olival	14	[47]
Plantas Herbáceas	14	[47]
Pomares	14	[47]
Vinhas	14	[47]

Na secção seguinte apresentam-se os resultados do processamento dos dados que resultaram da aplicação da metodologia utilizada.

## Capítulo 4

### Resultados E Discussão

Neste capítulo apresenta-se de forma objectiva os resultados da aplicação da metodologia descrita no capítulo anterior. Os resultados serão apresentados numa sequência lógica que inclui três componentes: (1) área efectiva de produção em ha, (2) disponibilidade de biomassa em ton secas/ano e (3) potencial energético em MWh/ano.

#### 4.1 Resultados

##### 4.1.1 Área efectiva

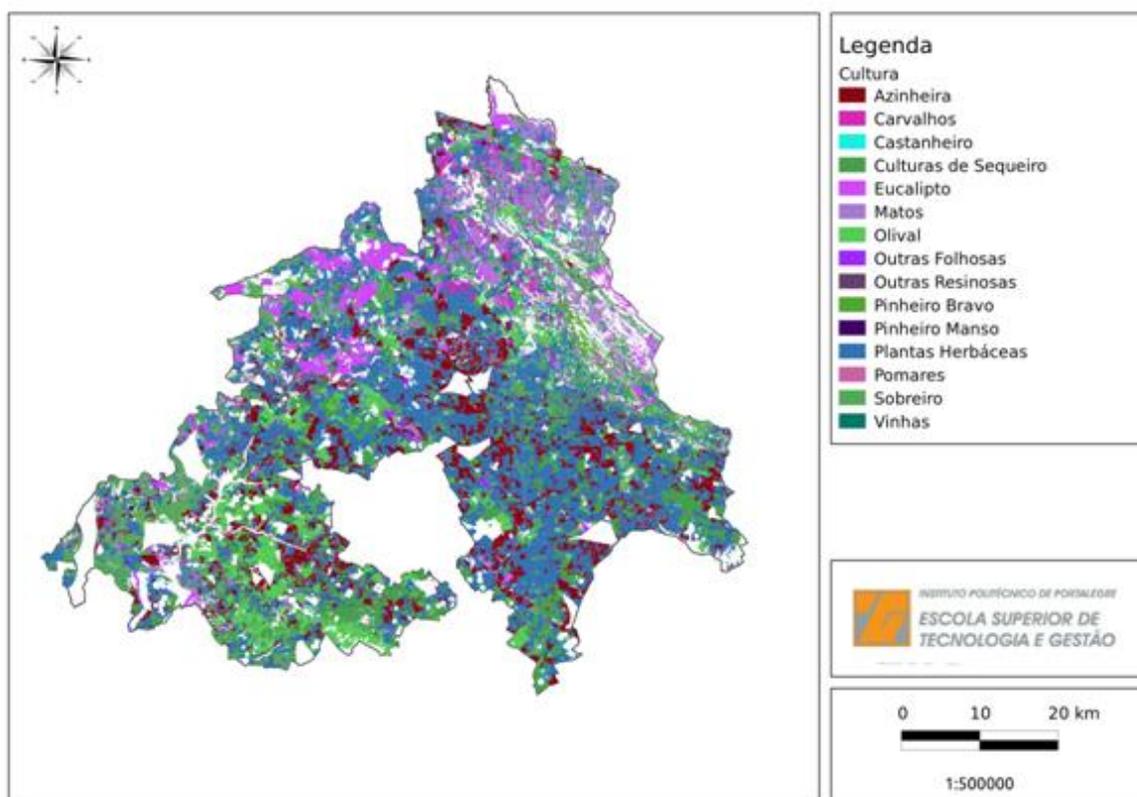
O primeiro resultado da aplicação da metodologia descrita no capítulo anterior relaciona-se com a quantificação da área efectiva de produção e recolha de biomassa residual. No território do Alto Alentejo, identificam-se, desta forma, mais de 73000 ha de terreno com potencial de produção de biomassa, i.e., cerca de 23% da superfície total da região de acordo com os critérios apresentados no capítulo anterior. Na Tabela 21 e na Tabela 22 apresenta-se um sumário dos valores obtidos para as áreas efectivas de produção, segundo a origem e a distribuição geográfica dos resíduos. A distribuição da superfície agro-florestal por entre as famílias de biomassa consideradas é: 27% corresponde a plantas herbáceas, 26% são azinheiras, 22% sobreiros e 10% eucaliptos, com a restante percentagem de terreno a ser ocupada pelas restantes tipologias. Por outras palavras, cerca de 85% da superfície identificada como adequada para recolha de biomassa está ocupada por 5 das 15 famílias consideradas. Ainda em termos de área efectiva, são também notadas diferenças ao nível das duas componentes de resíduos estudadas - florestal e agrícola -, representando a superfície florestal 68% do total e a superfície agrícola 32%. Na Figura 15 apresenta-se um mapa da distribuição geográfica das famílias de biomassa consideradas.

**Tabela 21** – Resultados, por família de biomassa e concelho, da área efectiva de produção de biomassa residual de origem florestal (em ha).

Família de Biomassa	Área efectiva (ha)	%	Concelho	Área efectiva (ha)	%
<b>Biomassa Florestal</b>			<b>Biomassa Florestal</b>		
Azinheira	18883	37,9	Alter do Chão	5063,0	10,2
Sobreiro	15813	31,7	Arronches	3676,0	7,38
Castanheiro	303,00	0,61	Avis	10821	21,7
Carvalho	1855,0	3,72	Castelo de vide	3655,0	7,33
Eucalipto	7324,0	14,7	Crato	8458,0	17,0
Outras Folhosas	2381,0	4,78	Marvão	2528,0	5,07
Outras Resinosas	189,00	0,38	Monforte	5121,0	10,3
Pinheiro Bravo	2007,0	4,03	Portalegre	7542,0	15,1
Pinheiro Manso	206,00	0,41	Sousel	2974,0	5,97
Matos	877,00	1,76			
<b>Total</b>	49837				

**Tabela 22** – Resultados, por família de biomassa e concelho, da área efectiva de produção de biomassa residual de origem agrícola (em ha).

Família de Biomassa	Área efectiva (ha)	%	Concelho	Área efectiva (ha)	%
<b>Biomassa Agrícola</b>			<b>Biomassa Agrícola</b>		
Culturas de Sequeiro	1804,0	7,71	Alter do Chão	3107,0	13,3
Olival	1385,0	5,92	Arronches	3171,0	13,6
Plantas Herbáceas	19950	85,3	Avis	4323,0	18,5
Pomares	166,00	0,71	Castelo de vide	921,00	3,94
Vinhas	79,000	0,34	Crato	2763,0	11,8
			Marvão	353,00	1,51
			Monforte	3690,0	15,8
			Portalegre	2708,0	11,6
			Sousel	2347,0	10,0
<b>Total</b>	<b>23384</b>				



**Figura 14** – Distribuição geográfica das famílias de biomassa consideradas no projecto.

#### 4.1.2 Disponibilidade de biomassa

As estimativas da disponibilidade de biomassa foram obtidas através da agregação da biomassa residual gerada em cada uma das unidades de paisagem da cartografia, tendo em conta a sua origem e a sua distribuição por concelho, tal como apresentado na Tabela 23 e na Tabela 24. O resultado integrado desta produção, onde se incluem todos os resíduos agro-florestais considerados utilizáveis, assumindo-se a não

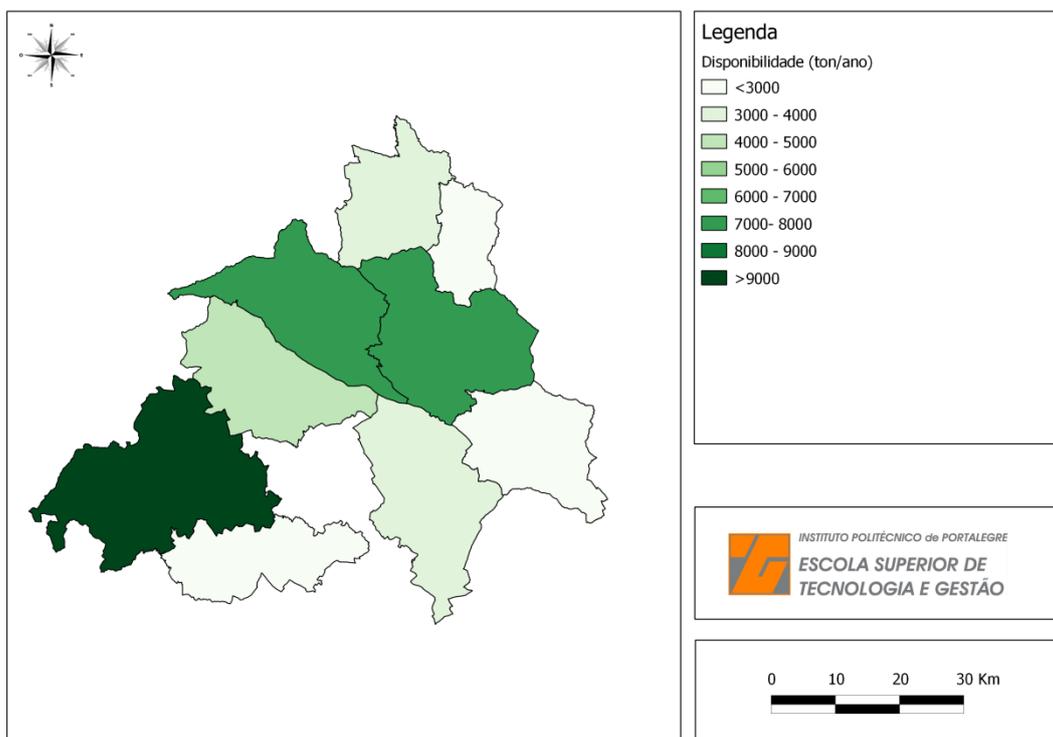
existência de perdas durante o processo de recolha, é de cerca de 44.000 ton secas/ano. Especificamente, 36% desta produção corresponde a resíduos de sobreiro, 21% de azinheira, 15% de eucalipto, 8% procedem de matos e 5% de pinheiro bravo, com a restante percentagem de biomassa residual a resultar das restantes tipologias. Na Figura 15 apresenta-se uma representação gráfica da distribuição da disponibilidade de biomassa pelos concelhos incluídos no trabalho. Pela observação da figura, os concelhos de Avis, Portalegre, Crato e Alter do Chão são os que possuem maior biomassa disponível, acumulando 22, 17, 16 e 9% do total de produção, respectivamente. Também em termos de disponibilidade de biomassa o potencial florestal supera o agrícola (91 e 9% respectivamente).

**Tabela 23** – Resultados, por família de biomassa e concelho, da disponibilidade de biomassa residual de origem florestal (em ton secas/ano).

Família de Biomassa	Disponibilidade de biomassa (ton secas/ano)	%	Concelho	Disponibilidade de biomassa (ton secas/ano)	%
<b>Biomassa Florestal</b>			<b>Biomassa Florestal</b>		
Azinheira	9064,0	22,6	Alter do Chão	3692,0	9,22
Sobreiro	15813	39,5	Arronches	2386,0	5,96
Castanheiro	151,00	0,38	Avis	8940,0	22,3
Carvalho	928,00	2,32	Castelo de vide	3630,0	9,07
Eucalipto	6445,0	16,1	Crato	6794,0	17,0
Outras Folhosas	1785,0	4,46	Marvão	2648,0	6,62
Outras Resinosas	161,00	0,40	Monforte	2950,0	7,37
Pinheiro Bravo	2007,0	5,01	Portalegre	6799,0	17,0
Pinheiro Manso	175,00	0,44	Sousel	2196,0	5,49
Matos	3507,0	8,76			
<b>Total</b>			40035		

**Tabela 24** – Resultados, por família de biomassa e concelho, da disponibilidade de biomassa residual de origem agrícola (em ton secas/ano).

Família de Biomassa	Disponibilidade de biomassa (ton secas/ano)	%	Concelho	Disponibilidade de biomassa (ton secas/ano)	%
<b>Biomassa Agrícola</b>			<b>Biomassa Agrícola</b>		
Culturas de Sequeiro	654,00	16,4	Alter do Chão	476,00	12,0
Olival	1247,0	31,3	Arronches	416,00	10,5
Plantas Herbáceas	1546,0	38,9	Avis	797,00	20,0
Pomares	199,00	4,99	Castelo de vide	160,00	4,02
Vinhas	333,00	8,37	Crato	332,00	8,36
			Marvão	180,00	4,53
			Monforte	450,00	11,3
			Portalegre	554,00	13,9
			Sousel	613,00	15,4
<b>Total</b>			3978,0		



**Figura 15** – Distribuição, por concelho, do potencial em biomassa (produção em toneladas/ano) do Alto Alentejo.

#### 4.1.3 Potencial energético

O potencial energético do Alto Alentejo, partindo do princípio que toda a biomassa disponível é convertida em energia eléctrica, ronda os 43700 MWh/ano, valor que corresponde a cerca de 18% do consumo de electricidade registado na região no ano de 2010. As estimativas obtidas para este potencial, tendo em conta a sua origem e distribuição por cada concelho, encontram-se resumidas na Tabela 25 e Tabela 26. A distribuição do potencial pelas famílias de biomassa é: 35% dos resíduos produzidos são de sobreiro, 20% de azinheira, 15% de eucalipto, 8% procedem de matos e 5% de pinheiro bravo, com a restante percentagem de biomassa residual procedente das restantes tipologias.

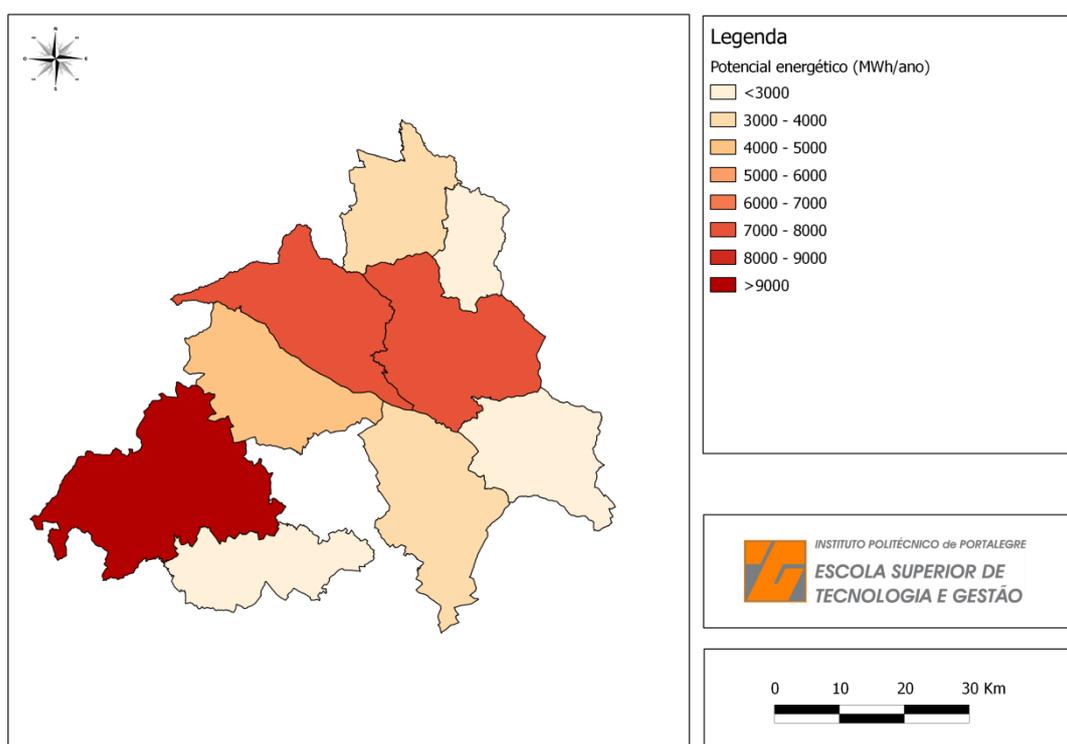
**Tabela 25** – Resultados, por família de biomassa e concelho, do potencial energético em biomassa residual de origem florestal (em MWh/ano).

Família de Biomassa	Potencial energético (MWh/ano)	%	Concelho	Potencial energético (MWh/ano)	%
<b>Biomassa Florestal</b>			<b>Biomassa Florestal</b>		
Azinheira	8812,0	22,1	Alter do Chão	3664,0	9,19
Sobreiro	15373	38,5	Arronches	2329,0	5,84
Castanheiro	158,00	0,40	Avis	8782,0	22,0
Carvalho	966,00	2,42	Castelo de vide	3615,0	9,06
Eucalipto	6713,0	16,8	Crato	6845,0	17,2
Outras Folhosas	1736,0	4,35	Marvão	2667,0	6,69
Outras Resinosas	167,00	0,42	Monforte	2871,0	7,20
Pinheiro Bravo	2370,0	5,94	Portalegre	6976,0	17,5
Pinheiro Manso	182,00	0,46	Sousel	2138,0	5,36
Matos	3409,0	8,55			
<b>Total</b>			<b>39887</b>		

**Tabela 26** – Resultados, por família de biomassa e concelho, do potencial energético em biomassa residual de origem agrícola (em MWh/ano).

Família de Biomassa	Potencial energético (MWh/ano)	%	Concelho	Potencial energético (MWh/ano)	%
<b>Biomassa Agrícola</b>			<b>Biomassa Agrícola</b>		
Culturas de Sequeiro	636,00	16,4	Alter do Chão	463,00	12,0
Olival	1212,0	31,3	Arronches	404,00	10,5
Plantas Herbáceas	1503,0	38,9	Avis	775,00	20,0
Pomares	193,00	4,99	Castelo de vide	156,00	4,02
Vinhas	324,00	8,37	Crato	323,00	8,36
			Marvão	175,00	4,53
			Monforte	437,00	11,3
			Portalegre	539,00	13,9
			Sousel	596,00	15,4
<b>Total</b>				<b>3868,0</b>	

Avis com 22%, Portalegre com 17%, Crato com 16%, Alter do Chão com 9% e Castelo de Vide também com 9%. O restante potencial distribui-se pelos demais concelhos, sendo que Avis, concelho de maior potencial energético, possui um potencial 3 vezes superior a Arronches, concelho de menor potencial energético. De forma similar à produção, criaram-se oito classes de cor dentro da base de dados SIG para obter uma representação da distribuição do potencial de produção de energia pelos nove concelhos que fizeram parte do trabalho. A Figura 16 ilustra isso mesmo e, em termos gerais, verifica-se que não existe uma diferença apreciável entre os concelhos de maior produção de resíduos e os concelhos onde o potencial energético é maior. Também em termos de energia o potencial cumulativo da biomassa proveniente da floresta é o mais significativo, sendo cerca de 10 vezes superior ao potencial agrícola.

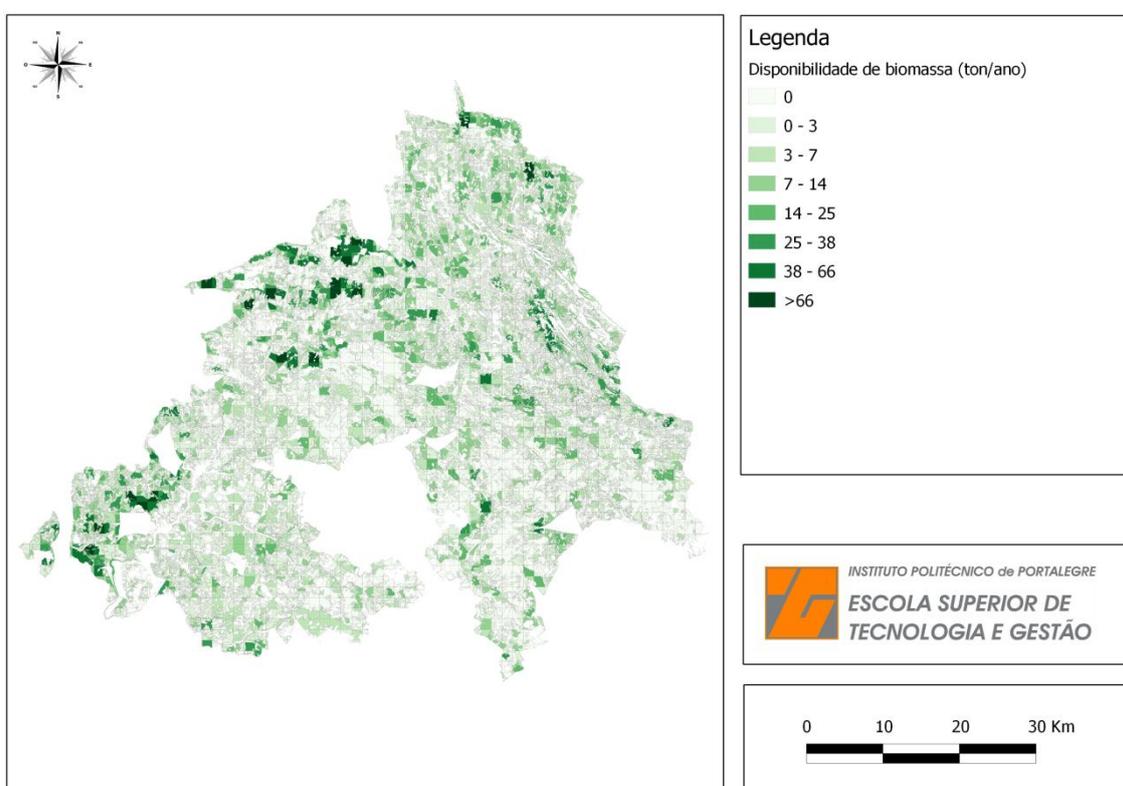


**Figura 16** – Distribuição, por concelho, do potencial em biomassa (energia em MWh/ano) do Alto Alentejo.

## 4.2 Discussão

### 4.2.1 Distribuição espacial do potencial em biomassa

Os recursos biomássicos do Alto Alentejo apresentam uma distribuição espacial bastante significativa (Figura 17). As maiores quantidades de biomassa residual agro-florestal localizam-se na parte mais a oeste do território (concelhos de Alter do Chão, Crato e Avis), como consequência da elevada concentração de silvicultura de curta-rotação, principalmente *Eucalyptus globulus*, e outras culturas florestais como *Quercus suber*. Mais a este, já perto da fronteira com Espanha, outras zonas de alta densidade de biomassa são observadas devido aos elevados cobertos de *Pinus pinaster* (nordeste do concelho de Portalegre já em plena Serra de São Mamede) e *Quercus suber* (norte dos concelhos de Castelo de Vide e Marvão). Utilizando como critério a distribuição espacial do recurso, estas seriam zonas propícias para a localização de instalações produtoras de energia.



**Figura 17** – Distribuição espacial do potencial em biomassa (produção em ton/ano) no Alto Alentejo.

### 4.2.2 Central de biomassa de Portalegre

Dentro do objectivo nacional em aumentar em 100 MW a capacidade instalada de produção de energia eléctrica a partir de recursos biomássicos, o distrito de Portalegre esteve posicionado como candidato a receber uma central de biomassa que, a ser implementada, precisará para de matéria-prima produzida na região. A solução aprovada inclui uma unidade de produção centralizada com potência nominal de 10MVA (9MWe) e a sua localização estava prevista para um lote da zona industrial do município de Portalegre (Figura 18). Tendo em conta estas características, os resultados obtidos sugerem que 45% das necessidades de matéria-prima da central poderiam ser

satisfeitas com biomassa local, assumindo-se um consumo de biomassa de 8,7ton/h para uma disponibilidade anual de 7800h e uma taxa de recolha de 70%; para além disso, se por razões relacionadas com os custos de transporte do recurso se tiver em conta que neste tipo de projectos é comum considerar-se um raio de abastecimento de 30km [48], a oferta de biomassa será ainda mais reduzida e, por consequência, o contributo real para a produção da central termoeléctrica ainda menor (da ordem dos 29%). Não havendo na zona outras fontes de produção de biomassa como acontece noutras regiões do país (por exemplo, locais onde a indústria de laboração de resíduos fibrosos de eucalipto para produção de pasta de papel possui alguma tradição), assume-se que a grande fatia do consumo de biomassa da central prevista para Portalegre seja directamente resultante da exploração florestal, sugerindo um sobredimensionamento da potência atribuída.

Em termos de acessibilidade ao recurso, parece mais razoável a opção por uma unidade de produção de menor potência, garantindo a existência de biomassa a nível local capaz de satisfazer as suas necessidades; noutro sentido, os efeitos da economia de escala numa central de dimensão mais reduzida poderiam prejudicar gravemente a viabilidade do projecto. Com a localização aprovada como ponto de partida, os resultados indicam uma disponibilidade de biomassa de 27957 ton secas/ano num raio de 30km, cerca de 63% do total estimado e quantidade suficiente para o abastecimento de uma central de 2 ou 3MWe. O potencial energético da área de influência da unidade de produção representaria, assim, entre 10 e 15% do consumo de electricidade do município de Portalegre para valores de 2010.

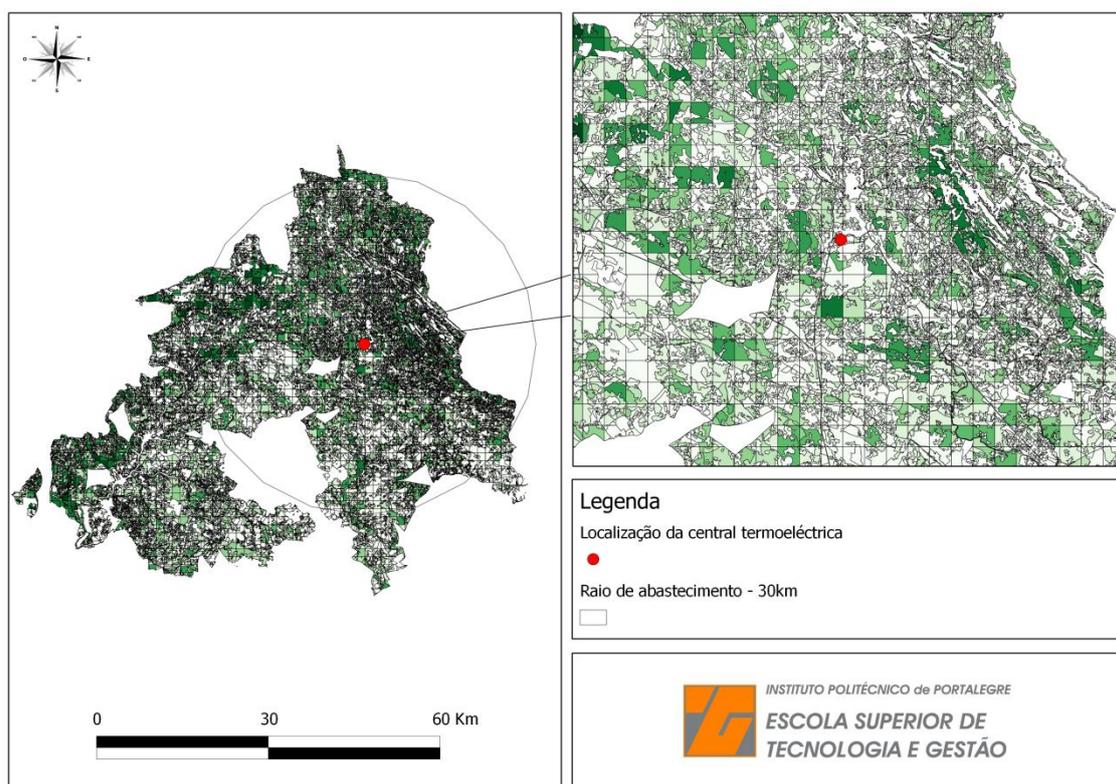


Figura 18 – Localização e área de influência da central termoeléctrica a biomassa de Portalegre.

#### 4.2.3 Soluções alternativas

Ainda no capítulo das centrais dedicadas, a gaseificação de biomassa constitui uma opção alternativa de grande versatilidade e potencial. A gaseificação integrada de

biomassa seguida de queima em motor a gás para produção de calor e electricidade é uma das tecnologias de gaseificação mais bem estabelecidas e em fase de comercialização há várias décadas. Aplicações como a gaseificação integrada através de ciclo combinado ou a co-produção de gás natural sintético e calor constituem outras soluções interessantes, mas cujos custos de investimento e eficiência são ainda incertos devido à fase de desenvolvimento em que se encontram. A sua disponibilidade em termos comerciais constitui também um constrangimento relevante [108].

De resto, aplicações que envolvam a implementação de centrais dedicadas de pequena ou média dimensão possuem, independentemente do processo termoquímico utilizado, limitações potenciais ao nível dos efeitos adversos da economia de escala na rentabilidade dos projectos [49,50]; se a real medida desses efeitos é suficiente para inviabilizar investimentos futuros na região tendo em conta as quantidades de resíduos disponíveis é uma questão possível de ser averiguada em estudos futuros. Neste sentido, vale a pena constatar que a oportunidade de aproveitamento do recurso não se limita à promoção de centrais dedicadas; o uso generalizado de pequenas unidades descentralizadas de produção de calor através do uso de biomassa ou produtos derivados (estilha ou *pellets*) em edifícios dos sectores doméstico e hoteleiro constitui, também, uma opção interessante e até desejável. Numa região onde o aquecimento continua a depender bastante do uso de combustíveis fósseis, a oportunidade para a introdução definitiva no mercado de uma alternativa mais favorável, tanto em termos económicos como ambientais, parece realmente existir.

Tendo tudo isto em conta, considera-se que a opção de aproveitamento mais promissora para a região é, provavelmente, a combustão ou gaseificação de resíduos em instalações descentralizadas de pequena dimensão (eventualmente média) em aplicações domésticas ou industriais.

#### *4.2.4 Principais espécies exploráveis*

Em termos de principais espécies exploráveis, o Alto Alentejo caracteriza-se pela existência de extensas áreas de sistemas florestais baseados em *Quercus ilex*, *Quercus suber* e *Eucalyptus globulus*, representando estas três espécies mais de 70% da biomassa residual disponível no território; em termos agrícolas a biomassa de maior potencial é a procedente das plantas herbáceas e olival. Tendo isto em conta, parece razoável inferir que toda esta importância devia ter algum impacto ao nível das autoridades governamentais, tanto regionais como nacionais, no sentido de desenvolver e otimizar os processos relacionados com a gestão e exploração destas espécies (principalmente *Q. ilex* e *Q. suber*), combatendo realidades que conduzem ao subaproveitamento dos recursos como o abandono rural, a acumulação de combustível ou a própria negligência e desinteresse dos proprietários. É que, de facto, é de toda a utilidade fazê-lo uma vez que a promoção do uso da biomassa para fins energéticos possui um provável impacto positivo no desenvolvimento socio-económico regional (emprego, infraestruturas) e na protecção das zonas mais rurais (redução do risco de incêndios).

## Parte III

### Conclusões

## Capítulo 5

### Conclusão

*Neste capítulo sumarizam-se os resultados do trabalho e ressalta-se a importância dos principais contributos por ele conseguidos, oferecendo-se algum destaque às principais implicações estratégicas inerentes à sua realização. São ainda discutidas algumas limitações encontradas e sugeridas propostas de estudos futuros.*

#### 5.1 Conclusões gerais

##### *5.1.1 Sumário do trabalho e resultados obtidos*

A necessidade de mudança em direcção a um paradigma socio-económico mais “verde” tem forçado políticos e decisores estratégicos a prestar atenção a fontes energéticas alternativas como a bioenergia. Fornecer serviços energéticos de qualidade dando prioridade a fontes endógenas constitui uma preocupação crescente; porém, o desconhecimento do potencial efectivo dos recursos institui-se, quase sempre, como um dos principais constrangimentos ao seu aproveitamento.

O presente trabalho apresentou uma quantificação do potencial energético em biomassa do Alto Alentejo, através de uma metodologia centrada no recurso, do tipo *bottom-up*, focada na estimativa do potencial técnico de produção de biomassa com base em informação cartográfica e estatística. Os resultados foram integrados em SIG e a informação obtida georreferenciada.

As principais conclusões do trabalho tendo em conta as hipóteses de investigação delineadas na sua fase inicial são:

H1) A actividade agro-florestal produz um conjunto de resíduos passíveis de serem utilizados para produção de energia eléctrica que constituem um importante recurso de cerca de 43700 MWh/ano, valor equivalente ao consumo de energia eléctrica dos municípios de Alter do Chão, Crato e Sousel no ano de 2010;

H2) O potencial de produção de resíduos é importante e significativo, mas não tão vasto como o carácter rural da região indica em primeira análise. Esta inconsistência com a hipótese de investigação traçada pode ser de alguma forma explicada por algumas opções metodológicas assumidas, nomeadamente a relacionada com o cálculo das áreas agro-florestais e com as restrições de acesso à biomassa, mas também pelas limitações em termos de informação cartográfica disponível. Especificamente, a disponibilidade de resíduos agrícolas e florestais é de 4.000 ton secas/ano e de 40.000 ton secas/ano, respetivamente, com o total anual a corresponder a cerca de 44.000 ton secas/ano;

H3) Declives acentuados podem desempenhar um papel relevante em termos de biomassa disponível, reduzindo de alguma forma a área efectiva de produção em zonas mais montanhosas dos concelhos de Portalegre, Marvão e Castelo de Vide. Em termos globais, e devido ao relevo marcadamente plano da maioria do universo de estudo, apenas cerca de 2% (~6.200 ha) das áreas disponíveis foram excluídas por apresentarem encostas com declives superiores a 20%; a proximidade das áreas de recolha a estradas ou caminhos transitáveis possui, também, bastante relevância uma vez que a capacidade territorial no que diz respeito à implantação de projetos de bioenergia é influenciada

fortemente pelos custos de transporte e recolha da matéria-prima. Estima-se que 3% (~10.500 ha) dos locais estejam demasiado longe da via para que a sua biomassa possa ser aproveitada;

H4) O SIG foi utilizado com sucesso e revelou-se uma potente ferramenta de suporte na avaliação do potencial associado à biomassa, combinando eficientemente tanto os dados cartográficos como os dados estatísticos utilizados, facilitado ainda a visualização dos resultados; a utilidade da ferramenta não constitui, no entanto, surpresa dado o volume de informação e o conjunto de variáveis típicos de projectos com uma forte componente geoespacial;

Os resultados obtidos são ainda congruentes com as afirmações de Costa e Fernandes [47] de que existe “um enorme potencial de produção de resíduos na região de Marvão, adequados para utilização energética”. De acordo com o obtido, é possível alargar a afirmação a todo o território, mesmo ficando os resultados alcançados aquém dos apresentados pelos referidos autores devido aos pressupostos de ambas as metodologias no que diz respeito à acessibilidade ao recurso. Especificamente pode acrescentar-se que as fontes de resíduos agrícolas mais importantes no Alto Alentejo são as plantas herbáceas e o olival, com disponibilidades na ordem das 1.500 e 1.200 ton secas/ano; em relação aos resíduos florestais destacam-se espécies como *Q. suber*, *Q. ilex* e *E. globulus*, estimando-se que cerca de 15.800, 9.000 e 6.400 ton secas/ano de biomassa proveniente destas espécies estejam disponíveis para fins energéticos.

#### 5.1.2 Limitações técnicas e principais contributos

As limitações do trabalho a nível de resultados foram, essencialmente, de dois tipos: (1) qualidade da informação cartográfica de base e (2) pressupostos e opções de modelação. No que respeita à qualidade dos dados, a utilização da cartografia temática mais recente não impediu a introdução de um desvio em relação à realidade provocado por vários anos de exploração e alteração da paisagem agro-florestal. Por outro lado, apenas foi possível obter dados de nove dos quinze municípios que compõem o Alto Alentejo pelo que as estimativas obtidas estão, naturalmente, subestimadas quando se entende a região sob o ponto de vista dos limites administrativos oficiais. O recurso a informação actual do coberto agro-florestal dos quinze municípios que integram a região permitiria, logicamente, aumentar a representatividade dos resultados. Em relação aos pressupostos do modelo, a situação mais complexa relacionou-se com a atribuição de factores de produtividade para cada família de resíduos. A informação foi recolhida da literatura e houve o cuidado de garantir a proximidade geográfica entre as referências usadas e o presente trabalho de forma a minimizar a variabilidade induzida pelas das condições específicas de cada local. Mesmo assim, o ideal teria sido a recolha de dados localmente de modo a desenvolver um conjunto de equações alométricas específicas da região. Também no cálculo das áreas ocupadas por cada espécie agro-florestal foram feitas algumas suposições relacionadas com a sua distribuição que podem não ter paralelo na realidade. A reclassificação das diferentes espécies em quinze famílias de biomassa principais significou, igualmente, a desconsideração de quase 2300ha com potencial de produção de resíduos (ou 3% da área efectiva total).

Em termos de contributos principais para o sector e para a região espera-se que os resultados do trabalho tenham algum eco ao nível da organização da cadeia logística associada à exploração da biomassa, numa perspetiva de desenvolvimento e optimização dos processos de gestão relacionados com a fileira agro-florestal. Por outras palavras, a contribuição estratégica do trabalho abrange uma potencial consolidação dos sistemas

de gestão da cadeia de valor dos resíduos biomássicos, com impactos ao nível da transparência no acesso aos mercados, da coordenação espaço-temporal de meios técnicos e humanos e da escala em que é feita a exploração do recurso. Todo este planeamento integrado tem como resultado desejável um forte “empurrão” ao sector específico da biomassa, com impactos significativos em termos de competitividade, moderação de custos e sustentabilidade. Especificamente crê-se que o trabalho pode ser enquadrado como base de estudo para a potenciação e implementação na região de projectos de bioenergia de pequena ou média dimensão, promovendo, também, a criação de novas empresas de prestação de serviços na área. A fragmentação das áreas pertencentes a cada proprietário florestal significa um constrangimento pela dificuldade em conseguir economias de escala; porém, a existência de cartografia relativa à distribuição espacial da biomassa significa, pelo menos, a possibilidade de articulação das operações na cadeia a montante da conversão energética (recolha, transformação e transporte) de forma a controlar custos e garantir a viabilidade económica de eventuais investimentos no sector. Por fim, e como consequência desta dinamização potencial do sector, o contributo seria ainda assinalável ao nível da gestão e redução do risco estrutural de incêndio, incluindo a possível construção de cartas de risco, uma vez que existe uma elevada correlação entre a área ardida e a acumulação de carga combustível (biomassa) nos espaços rurais.

## 5.2 Propostas de estudos futuros

Considera-se que a existência de informação geo-referenciada acerca da distribuição espacial da biomassa residual do Alto Alentejo deixa entreaberto um conjunto de possibilidades em termos de estudos futuros. No sentido de efectivamente realizar uma análise mais aprofundada acerca da viabilidade da instalação de uma central termoeléctrica na região seria necessário efectuar um levantamento dos custos de implementação, essencialmente através do contacto com empresas do sector no sentido de levantar informações sobre os custos de recolha e transporte da matéria-prima. A análise primária realizada neste trabalho foi, obviamente, bastante simplificada ao não ter em conta qualquer vertente económica. Adicionalmente, crê-se existir algum interesse em estudar a viabilidade da implementação de centrais dedicadas de produção de calor e/ou electricidade baseadas em tecnologias que não a combustão. Considera-se ainda relevante a utilização dos resultados do trabalho como base de estudo para a selecção das localizações mais apropriadas para a instalação de indústrias ou unidades de produção de energia tendo em conta a alocação dos resíduos, e até na construção de cartas de acessibilidade e risco ligadas à prevenção de incêndios florestais.

## Referências Bibliográficas

- [1] P. McKendry, “Energy production from biomass (Part 1): Overview of biomass,,” *Bioresource technology*, vol. 83, no. 1, pp. 37–46, May 2002.
- [2] P. McKendry, “Energy production from biomass (Part 2): Conversion technologies,” *Bioresource technology*, vol. 83, no. 1, pp. 47–54, May 2002.
- [3] M. Balat, “Gasification of Biomass to Produce Gaseous Products,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 31, no. 6, pp. 516–526, Jan. 2009.
- [4] CCDR Alentejo, “Programa Operacional Regional do Alentejo 2007-2013,” 2007.
- [5] C. de Ministros, “Estratégia Nacional para a Energia com o horizonte de 2020 (ENE2020),” vol. 2020, no. Ene 2020. Diário da República, 1.<sup>a</sup> série — N.º 73 — 15 de Abril de 2010, 2010.
- [6] V. Smil, *Energy Transitions - History, Requirements, Prospects*, vol. 129. 1982, p. 2865.
- [7] V. Smil, “World History and Energy,” vol. 6, pp. 549–561, 2004.
- [8] T. Abbasi, M. Premalatha, and S. a. Abbasi, “The return to renewables: Will it help in global warming control?,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 891–894, Jan. 2011.
- [9] S. Shafiee and E. Topal, “When will fossil fuel reserves be diminished?,” *Energy Policy*, vol. 37, no. 1, pp. 181–189, Jan. 2009.
- [10] EIA, “International Energy Outlook 2011,” US Department of Energy, 2011.
- [11] S. Yoda, *Trilemma: three major problems threatening world survival*. Central Research Institute of Electric Power Industry, 1995, p. 248.
- [12] N. Khan and N. Mariun, “Fossil fuels, new energy sources and the great energy crisis,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007.
- [13] IEA, “World Energy Outlook 2010,” *Outlook*, vol. 23, no. November, p. 329, 2010.
- [14] J. Fourier, “On the Temperatures of the Terrestrial Sphere and Interplanetary Space,” *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institute de France*, vol. 7, pp. 570–604, 1827.
- [15] F. D. Santos, “A Física das Alterações Climáticas,” *Gazeta da Física*, pp. 48–57, 2007.
- [16] J. Tyndall, “On the absorption and radiation of heat by gases and vapours, and on the physical connexion of radiation, absorption, and conduction,” *Philosophical Magazine Series 4*, vol. Mag. 22, pp. 167–194, 1861.
- [17] J. Tyndall, “On radiation through the earth’s atmosphere,” *Philosophical Magazine Series 4*, vol. Mag. 25, pp. 200–206, 1863.

- [18] E. Bard, "Greenhouse effect and ice ages: historical perspective," *Comptes Rendus Geosciences*, vol. 336, no. 7–8, pp. 603–638, Jun. 2004.
- [19] L. Treut et al., "Historical Overview of Climate Change Science," *IPCC*, 2007.
- [20] G. N. Plass, "The Carbon Dioxide Theory of Climate Change," *Lexus*, vol. 8, no. 2, pp. 140–154, 1956.
- [21] IPCC, "Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report," 2007.
- [22] EEA, "The European Environment State and Outlook 2010 - Understanding Climate Change," 2010.
- [23] A. D. Sagar and S. Kartha, "Bioenergy and Sustainable Development?," *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 32, no. 1, pp. 131–167, Nov. 2007.
- [24] M. M. Hoogwijk, *On the global and regional potential of renewable energy sources*, no. november 1974. Universiteit Utrecht, Faculteit Scheikunde, 2004.
- [25] European Parliament Council, "Directive 2001/77/EC on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market." Official Journal of the European Union, 2001.
- [26] L. Zhang, C. (Charles) Xu, and P. Champagne, "Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 5, pp. 969–982, May 2010.
- [27] S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, and C. G. Vassileva, "An overview of the chemical composition of biomass," *Fuel*, vol. 89, no. 5, pp. 913–933, May 2010.
- [28] I. Stupak et al., "Sustainable utilisation of forest biomass for energy - Possibilities and problems: Policy, legislation, certification, and recommendations and guidelines in the Nordic, Baltic, and other European countries," *Biomass and Bioenergy*, vol. 31, no. 10, pp. 666–684, Oct. 2007.
- [29] D. . Hall and J. . Scrase, "Will biomass be the environmentally friendly fuel of the future?," *Biomass and Bioenergy*, vol. 15, no. 4–5, pp. 357–367, Oct. 1998.
- [30] M. F. Demirbas, M. Balat, and H. Balat, "Potential contribution of biomass to the sustainable energy development," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 7, pp. 1746–1760, Jul. 2009.
- [31] S. Ferreira, N. A. Moreira, and E. Monteiro, "Bioenergy overview for Portugal," *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no. 11, pp. 1567–1576, Nov. 2009.
- [32] A. Khan, W. Dejong, P. Jansens, and H. Spliethoff, "Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies," *Fuel Processing Technology*, vol. 90, no. 1, pp. 21–50, Jan. 2009.
- [33] P. Basu, *Biomass gasification and pyrolysis practical design and theory*. Academic Press, Elsevier, 2010, p. 376.
- [34] M. Erol, H. Haykiri-Acma, and S. Küçükbayrak, "Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 170–173, Jan. 2010.

- [35] C. Telmo, J. Lousada, and N. Moreira, "Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood.," *Bioresource technology*, vol. 101, no. 11, pp. 3808–15, Jun. 2010.
- [36] R. Samuelsson, J. Burvall, and R. Jirjis, "Comparison of different methods for the determination of moisture content in biomass," *Biomass and Bioenergy*, vol. 30, no. 11, pp. 929–934, Nov. 2006.
- [37] S. H. Quaak, Peter, Knoef H, *Energy from biomass, a review of combustion and gasification technologies*. World bank technical paper no. 422. The International Bank for Reconstruction and Development, Washington (DC), 1999.
- [38] S. Van Loo and J. Koppejan, *The handbook of biomass combustion and co-firing*, no. February. Earthscan, 2008, pp. 8–11.
- [39] A. Faaij, "Bio-energy in Europe: changing technology choices," *Energy Policy*, vol. 34, no. 3, pp. 322–342, Feb. 2006.
- [40] J. Rezaiyan and N. Cheremisinoff, *Gasification technologies: a primer for engineers and scientists*, vol. 28, no. 3. Taylor & Francis., 2005, pp. 223–252.
- [41] T. Damartzis and A. Zabaniotou, "Thermochemical conversion of biomass to second generation biofuels through integrated process design—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 366–378, Aug. 2010.
- [42] P. McKendry, "Energy production from biomass (Part 3): Gasification technologies.," *Bioresource technology*, vol. 83, no. 1, pp. 55–63, May 2002.
- [43] R. Warnecke, "Gasification of biomass : comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier," *Biomass and Bioenergy*, vol. 18, 2000.
- [44] IEA (International Energy Agency), "IEA Bioenergy Annual Report," Nov. 2006.
- [45] A. Bridgwater, "Fast pyrolysis processes for biomass," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 4, no. 1, pp. 1–73, Mar. 2000.
- [46] M. F. Demirbas and M. Balat, "Biomass pyrolysis for liquid fuels and chemicals: A review," *nopr.niscair.res.in*, vol. 66, no. October, pp. 797–804, 2007.
- [47] U. Fernandes and M. Costa, "Potential of biomass residues for energy production and utilization in a region of Portugal," *Biomass and Bioenergy*, vol. 34, no. 5, pp. 661–666, May 2010.
- [48] F. López-Rodríguez, C. P. Atanet, F. C. Blázquez, and a. R. Celma, "Spatial assessment of the bioenergy potential of forest residues in the western province of Spain, Caceres," *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no. 10, pp. 1358–1366, Oct. 2009.
- [49] A. Gómez, J. Zubizarreta, M. Rodrigues, C. Dopazo, and N. Fueyo, "An estimation of the energy potential of agro-industrial residues in Spain," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54, no. 11, pp. 972–984, Sep. 2010.
- [50] A. Gómez, M. Rodrigues, C. Montañés, C. Dopazo, and N. Fueyo, "The potential for electricity generation from crop and forestry residues in Spain," *Biomass and Bioenergy*, vol. 34, no. 5, pp. 703–719, May 2010.

- [51] G. Fischer, S. Prieler, and H. Vanvelthuizen, "Biomass potentials of miscanthus, willow and poplar: results and policy implications for Eastern Europe, Northern and Central Asia," *Biomass and Bioenergy*, vol. 28, no. 2, pp. 119–132, Feb. 2005.
- [52] J. Singh, B. Panesar, and S. Sharma, "Energy potential through agricultural biomass using geographical information system—A case study of Punjab," *Biomass and Bioenergy*, vol. 32, pp. 301 – 307, Nov. 2007.
- [53] P. Fung, "The potential for bioenergy production from Australian forests, its contribution to national greenhouse targets and recent developments in conversion processes," *Biomass and Bioenergy*, vol. 22, no. 4, pp. 223–236, Apr. 2002.
- [54] M. V. Gil, D. Blanco, M. T. Carballo, and L. F. Calvo, "Carbon stock estimates for forests in the Castilla y León region, Spain. A GIS based method for evaluating spatial distribution of residual biomass for bio-energy," *Biomass and Bioenergy*, vol. 5, Sep. 2010.
- [55] T. Ranta, "Logging residues from regeneration fellings for biofuel production? a GIS-based availability analysis in Finland," *Biomass and Bioenergy*, vol. 28, no. 2, pp. 171–182, Feb. 2005.
- [56] X. Zhou, F. Wang, H. Hu, L. Yang, P. Guo, and B. Xiao, "Assessment of sustainable biomass resource for energy use in China," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2011.
- [57] R. Andersen, W. Towers, and P. Smith, "Assessing the potential for biomass energy to contribute to Scotland's renewable energy needs," *Biomass and Bioenergy*, vol. 29, no. 2, pp. 73–82, Aug. 2005.
- [58] M. Balat, "Use of biomass sources for energy in Turkey and a view to biomass potential," *Biomass and Bioenergy*, vol. 29, no. 1, pp. 32–41, Jul. 2005.
- [59] M. Beccali, P. Columba, V. Dalberti, and V. Franzitta, "Assessment of bioenergy potential in Sicily: A GIS-based support methodology," *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no. 1, pp. 79–87, Jan. 2009.
- [60] I. Bernetti, "A methodology to analyse the potential development of biomass-energy sector: an application in Tuscany," *Forest Policy and Economics*, vol. 6, no. 3–4, pp. 415–432, Jun. 2004.
- [61] S. Das and T. Jash, "District-level biomass resource assessment: A case study of an Indian State West Bengal," *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no. 1, pp. 137–143, Jan. 2009.
- [62] I. Lewandowski, J. Weger, A. Vanhooijdonk, K. Havlickova, J. Vandam, and A. Faaij, "The potential biomass for energy production in the Czech Republic," *Biomass and Bioenergy*, vol. 30, no. 5, pp. 405–421, May 2006.
- [63] B. Steubing, R. Zah, P. Waeger, and C. Ludwig, "Bioenergy in Switzerland: Assessing the domestic sustainable biomass potential," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 8, pp. 2256–2265, Oct. 2010.
- [64] H. Vasco and M. Costa, "Quantification and use of forest biomass residues in Maputo province, Mozambique," *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no. 9, pp. 1221–1228, Sep. 2009.

- [65] E. Smeets, A. Faaij, I. Lewandowski, and W. Turkenburg, "A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 33, no. 1, pp. 56–106, Feb. 2007.
- [66] Committee on Climate Change, "Technical Paper 2 - Global and UK bioenergy supply scenarios," p. 50, 2011.
- [67] G. Berndes, M. Hoogwijk, and R. van de Broek, "The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies," *Biomass and Bioenergy*, vol. 25, no. 1, pp. 1–28, Jul. 2003.
- [68] G. Fischer, "Global bioenergy potentials through 2050," *Biomass and Bioenergy*, vol. 20, no. 3, pp. 151–159, Mar. 2001.
- [69] F. Rosillo-Calle, *The Biomass Assessment Handbook*, vol. 129. Earthscan Publications Ltd. (December 2006), 2007, p. 276.
- [70] R. Offermann, T. Seidenberger, D. Thrän, M. Kaltschmitt, S. Zinoviev, and S. Miertus, "Assessment of global bioenergy potentials," *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, pp. 103–115, Jul. 2010.
- [71] E. M. W. Smeets and A. P. C. Faaij, "Bioenergy potentials from forestry in 2050," *Climatic Change*, vol. 81, no. 3–4, pp. 353–390, Nov. 2006.
- [72] J. S. Gregg and S. J. Smith, "Global and regional potential for bioenergy from agricultural and forestry residue biomass," *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 15, no. 3, pp. 241–262, Feb. 2010.
- [73] M. Hoogwijk, A. Faaij, R. van den Broeck, G. Berndes, D. Gielen, and W. Turkenburg, "Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy," *Biomass and Bioenergy*, vol. 25, pp. 119 – 133, Feb. 2003.
- [74] European Parliament Council, "Directive 2008/0016 (COD) on the promotion of the use of energy from renewable sources," vol. 129. p. 61, 2008.
- [75] K. Ericsson and L. Nilsson, "Assessment of the potential biomass supply in Europe using a resource-focused approach," *Biomass and Bioenergy*, vol. 30, no. 1, pp. 1–15, Jan. 2006.
- [76] C. Panoutsou, J. Eleftheriadis, and A. Nikolaou, "Biomass supply in EU27 from 2010 to 2030," *Energy Policy*, vol. 37, no. 12, pp. 5675–5686, Dec. 2009.
- [77] R. Siemons, M. Vis, D. Berg, I. McChesney, M. Whiteley, and N. Nikolaou, "Bioenergy's role in the EU energy market. A view of developments until 2020," *Report for the European Commission*, 2004.
- [78] European Parliament Council, "Energy for the future: Renewable sources of energy. White Paper for a Community Strategy and Action Plan." Official Journal of the European Union, 1997.
- [79] European Parliament Council, "Directive 2003/30/EC on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport," vol. Official J. Official Journal of the European Union, 2003.
- [80] European Parliament Council, "Biomass Action Plan." 2005.

- [81] H. Viana, W. B. Cohen, D. Lopes, and J. Aranha, "Assessment of forest biomass for use as energy. GIS-based analysis of geographical availability and locations of wood-fired power plants in Portugal," *Applied Energy*, vol. 87, no. 8, pp. 2551–2560, Aug. 2010.
- [82] F. Rosa and A. Vieira, "Avaliação do potencial energético da biomassa na região autónoma da Madeira. Relatório Final," Lisboa, Portugal, 2005.
- [83] A. Vieira, C. Franco, F. Marques, F. Rosa, and M. Monsanto, "Avaliação do potencial de biomassa da região do Algarve. Relatório Final," Lisboa, Portugal, 2006.
- [84] C. A. Netto, "Potencial da biomassa florestal residual para fins energéticos de três concelhos do distrito de Santarém," Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa, 2008.
- [85] A. Angelis-Dimakis et al., "Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 2, pp. 1182–1200, Oct. 2010.
- [86] P. Silveira, H. S. Koehler, C. R. Sanquetta, and J. E. Arce, "O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais," *Forestry*, vol. d, no. 2004, pp. 185–206, 2007.
- [87] D. Zianis, "On simplifying allometric analyses of forest biomass," *Forest Ecology and Management*, vol. 187, no. 2–3, pp. 311–332, Jan. 2004.
- [88] D. Zianis and P. Muukkonen, "Biomass and stem volume equations for tree species in Europe," *Silva Fennica*, 2005.
- [89] Z. Somogyi, E. Cienciala, R. Mäkipää, P. Muukkonen, a. Lehtonen, and P. Weiss, "Indirect methods of large-scale forest biomass estimation," *European Journal of Forest Research*, vol. 126, no. 2, pp. 197–207, May 2006.
- [90] M. Wulder, J. White, R. Fournier, J. Luther, and S. Magnussen, "Spatially Explicit Large Area Biomass Estimation: Three Approaches Using Forest Inventory and Remotely Sensed Imagery in a GIS," *Sensors*, vol. 8, no. 1, pp. 529–560, Jan. 2008.
- [91] E. L. Domínguez J, Sánchez D., Lasry P., Ciria M.P., "Biomasa potencial para la producción de energía en Navarra," vol. 2, no. 1, 2010.
- [92] I. Santa Regina, "Organic matter distribution and nutrient fluxes within a sweet chestnut ( *Castanea sativa* Mill) stand of the Sierra de Gata, Spain," *Annals of Forest Science*, vol. 57, no. 7, pp. 691–700, Oct. 2000.
- [93] G. M. González, "Cuantificación de la Biomasa Forestal, Aérea y Radical de Distintas Especies Arbóreas."
- [94] D. L. I., Inc.(1985) Arthur, "Resíduos florestais para produção de energia em Portugal," *Ed. Tecninvest, SARL*, 1985.
- [95] D. Lopes, "Estimating net primary production in 'Eucalyptus globulus' and 'Pinus pinaster' ecosystems in Portugal," England: Kingston University, 2005.
- [96] D. Voivontas, "Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method," *Biomass and Bioenergy*, vol. 20, no. 2, pp. 101–112, Feb. 2001.

- [97] C. D. Blasi, V. Tanzi, and M. Lanzetta, "A study on the production of agricultural residues in Italy," *Biomass Bioenergy*, vol. 12, no. 5, pp. 321–331, 1997.
- [98] L. T. A. Dias, J, "Evaluation of biomass residuals in Portugal mainland," *Area*, 1990.
- [99] D. García-Galindo, F. Sebastián, and F. J. Royo, "Current Spanish biomass co-firing potential in coal power stations," in *5th Dubrovnik conference on sustainable development of energy water and environment systems*.
- [100] I. N. Gregory and R. G. Healey, "Historical GIS: Structuring, mapping and analysing geographies of the past.," *Progress in Human Geography*, vol. 31, no. 5, pp. 638–653, 2007.
- [101] J. L. Easterly and M. Burnham, "Overview of biomass and waste fuel resources for power production," *Biomass and Bioenergy*, vol. 10, no. 2–3, pp. 79–92, 1996.
- [102] L. Panichelli and E. Gnansounou, "GIS-based approach for defining bioenergy facilities location: A case study in Northern Spain based on marginal delivery costs and resources competition between facilities," *Biomass and Bioenergy*, vol. 32, no. 4, pp. 289–300, Apr. 2008.
- [103] M. Caetano, M. Pereira, H. Carrão, A. Araújo, and A. Nunes, "Cartografia temática de ocupação / uso do solo do Instituto Geográfico Português," vol. 1990, no. 1, 2005.
- [104] Instituto Geográfico Português, "Carta Administrativa Oficial de Portugal," 2012. [Online]. Available: [http://www.igeo.pt/produtos/cadastr/cadastre/caop/caop\\_vigor.htm](http://www.igeo.pt/produtos/cadastr/cadastre/caop/caop_vigor.htm).
- [105] Instituto Nacional De Estatística, "Censos 2011 - Resultados Provisórios," *Censos 2011*, 2011. [Online]. Available: [censos.ine.pt](http://censos.ine.pt).
- [106] Autoridade Florestal Nacional, "IFN5 - 5º Inventário Florestal Nacional," 2010. [Online]. Available: <http://www.afn.min-agricultura.pt/portal/ifn>.
- [107] I. G. Português, "Instituto geográfico português," no. July 1995, pp. 2011–2011, 2011.
- [108] K. Difs, E. Wetterlund, L. Trygg, and M. Söderström, "Biomass gasification opportunities in a district heating system," *Biomass and Bioenergy*, vol. 34, no. 5, pp. 637–651, May 2010.
- [109] M. Soliño, A. Prada, and M. X. Vázquez, "Green electricity externalities: Forest biomass in an Atlantic European Region," *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no. 3, pp. 407–414, Mar. 2009.
- [110] A. Kumar, D. D. Jones, and M. a. Hanna, "Thermochemical Biomass Gasification: A Review of the Current Status of the Technology," *Energies*, vol. 2, no. 3, pp. 556–581, Jul. 2009.
- [111] M. Balat, M. Balat, E. Kırtay, and H. Balat, "Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 2: Gasification systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 12, Elsevier Ltd, pp. 3158–3168, Dec-2009.