



Avaliação da biomassa de plantas bioenergéticas

Jorge Miguel Correia Farias dos Santos

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente – Tecnologias Ambientais

Orientadora: Doutora Helena Margarida Nunes Pereira
Co-orientador: Doutor Jorge Manuel Barros d'Almeida Gominho
Co-orientador: Engenheiro Carlos Manuel Lopes Franco

Juri:

Presidente: Doutora Elizabeth da Costa Neves Fernandes d'Almeida Duarte, Professora Catedrática do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa
Vogais: Doutora Helena Margarida Nunes Pereira, Professora Catedrática do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa
Doutor Jorge Manuel Barros d'Almeida Gominho, Técnico Superior Principal do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa
Engenheiro Carlos Manuel Lopes Franco, Investigador Auxiliar do Laboratório Nacional de Energia e Geologia, na qualidade de especialista

Lisboa, 2009

Agradecimentos

Agradeço aos meus orientadores, a Professora Doutora Helena Pereira, o Doutor Jorge Gominho e o Engenheiro Carlos Franco, pela imediata disponibilidade demonstrada em orientar esta dissertação de Mestrado e pelo caloroso auxílio concedido na execução da mesma.

À Ana Lourenço pela ajuda concedida em inúmeras ocasiões; a todos os funcionários do ISA que de algum modo me ajudaram durante a realização do trabalho de campo, assim como a todo o pessoal do LNEG que me recebeu e auxiliou com uma estima singular.

À Anabela pela simpatia, amizade e companhia que sempre me concedeu.

Aos colegas tornados amigos, em particular ao Sérgio, Nélia, Zé “Nelo”, Ana Teresa, Raquel, Pacheco, Alexandre, Evaristo, Joana Lemos, Pucarinho, Selma e, à Marisa, um destaque particular, por todos os momentos memoráveis.

Aos meus amigos de sempre, Carlos das Neves, Ricardo Manique, Filipe Rosa, Filipe Custódio e Marta Silva pela longa amizade que nos une.

Um especial agradecimento a todos os que cooperaram no trabalho de campo, prestando precioso auxílio durante as medições, ou que colaboraram na resolução de problemas com que me fui deparando.

Aos meus pais e irmã, pela compreensão, apoio e carinho que sempre dispensaram.

Resumo

Neste trabalho avaliou-se o potencial produtivo de biomassa de doze culturas bioenergéticas: 7 culturas florestais dos géneros *Eucalyptus*, *Salix*, *Populus*, *Alnus*, *Fraxinus*, 3 herbáceas de crescimento rápido (*Pennisetum purpureum*, *Arundo donax*, *Miscanthus x giganteus*) e 2 plantas oleaginosas (*Linum usitatissimum* e *Jatropha curcas*). Foram efectuadas medições biométricas da altura e do diâmetro para avaliação do crescimento e estimadas as produtividades biomássicas e o teor de humidade de cada cultura.

A espécie florestal que revelou maior potencial foi o eucalipto com 2 t/ha de biomassa produzida em 10 meses e uma taxa de crescimento em altura de 32,3 cm/mês. Seguiram-se os dois clones de choupo, Unal e Beaupré, com taxas de crescimento em altura de 15,5 cm/mês e 12,1 cm/mês, respectivamente. Os resultados obtidos com as restantes espécies florestais foram bastante inferiores.

Nas plantas herbáceas, registaram-se maiores potenciais produtivos no capim-elefante (*Pennisetum purpureum*) e na cana-do-reino (*Arundo donax*) do que no *Miscanthus x giganteus*. O linho apresentou resultados promissores tendo em vista o seu aproveitamento energético, enquanto a outra planta oleaginosa estudada, a *Jatropha curcas*, não resistiu à ocorrência de geada.

Palavras-chave: Culturas Bioenergéticas, Arbóreas, Herbáceas, Oleaginosas, Biomassa, Produtividade

Abstract

This study assessed the potential of biomass production of twelve energy crops: 7 tree plants of the genus *Eucalyptus*, *Salix*, *Populus*, *Alnus*, *Fraxinus*, perennial grasses *Pennisetum purpureum*, *Arundo donax*, *Miscanthus x giganteus* and the oil producing plants *Linum usitatissimum* and *Jatropha curcas*. Biometric measurements of height and diameter were executed to assess the growth of each crop and to estimate biomass production and moisture content.

Eucalyptus was the species that presented the greatest yield potential, with 2 t/ha of biomass produced in 10 months, and a height growth rate of 32.3 cm/month followed by the two poplar clones (Unal and Beaupré) who presented height growth rates of 15.5 cm/month and 12.1 cm/month, respectively, while the results obtained with the other tree species were much lower.

The perennial grasses giant reed (*Arundo donax*) and the elephant grass (*Pennisetum purpureum*) revealed a high yield potential while the estimated for *Miscanthus x giganteus* was low. Flax presented promising results in an energy use outlook while the other oleaginous crop, *Jatropha curcas*, could not resist the occurrence of frost.

Keywords: Energy Crops, Arboreal, Herbaceous, Oleaginous, Biomass, Productivity

Extended abstract

In order to restrain the growing of greenhouse gas emissions throughout the world due to the combustion of oil derived fuels and to ease the dependence on external energy sources that apart from being expensive most commonly are from politically instable regions the European Union advises his State-Members to turn their attentions to biomass as energy source.

Indeed biomass can be used to produce biofuels or heat and electricity with the advantage of not increasing the greenhouse effect due to the fact that the CO₂ sent to the atmosphere during the process is considered neutral due to previously CO₂ fixation during photosynthesis. The plants differ for each energy producing process: for producing biofuels the appropriate ones are those with seeds that present high oil content and for heat and electricity the proper ones are the tree crops and herbaceous plants that can be combusted in power plants.

The present study assessed the potential of biomass production of twelve energy crops like tree crops and herbaceous plants. The seven tree crops studied can be grown as short rotation crops and range in a variety of genus such as *Eucalyptus*, *Salix*, *Populus*, *Alnus* and *Fraxinus*. The herbaceous studied can be separated in two groups of perennial grasses and oil producing crops. The perennial grasses crops were composed of giant reed (*Arundo donax*), elephant grass (*Pennisetum purpureum*) and *Miscanthus x giganteus* while the oil producing crops were composed of flax (*Linum usitatissimum*) and *Jatropha curcas*.

The trials took place at the experimental field *BioEnergisa* located at *Instituto Superior de Agronomia* and started in October of 2008 only a week after the inauguration and for these reason the crops studied were still in an early stage of development. The only exceptions were the *Miscanthus x giganteus* that was already present at the field since 2003 and the flax that was only cultivated in November of 2008. For a 10 month period biometric measurements of height and diameter were executed to assess the growth of the tree crops and *Jatropha curcas* and to estimate biomass production and moisture content. Each plot had 42 plants except the one with *Jatropha curcas* that had only 16 plants and the minimum height required for the measurements was 120 cm. By the time the trials began there were still below this height some willow trees (14 *Salix atrocinerea* and 2 *Salix salviifolia*), ash trees (33) and the whole set of alder trees (42) and *Jatropha curcas* plants (16). The frequency of the measurements was adapted to the pace of the plants growth and also to the climatic conditions.

Eucalyptus was the crop that presented the greatest yield, with 2 t/ha of biomass produced in 10 months, and a height growth rate of 32.3 cm/month followed by the two poplar clones, Unal and Beaupré, who presented height growth rates of 15.5 cm/month and 12.1 cm/month, respectively, while the results obtained with the other tree crops were much lower. By decreasing order the height growth rates were 5.2 cm/month for the *Salix atrocinerea*, 3.3 cm/month for the *Fraxinus angustifolia*, 0.4 cm/month for the *Salix salviifolia* and the *Alnus glutinosa* had never reached the minimum height for the measurement (120 cm).

The perennial grasses were harvested at November of 2008 (*Miscanthus x giganteus*) and at March of 2009 (giant reed and elephant grass). The dry matter yields obtained were 9.5 t/ha for the

Miscanthus x giganteus and the elephant grass and 6.0 t/ha for the giant reed what was smaller than expected especially in the case of *Miscanthus x giganteus*. Nevertheless the moisture content estimated was very high for all perennial grasses: 463.3% for the elephant grass, 131.7% for the giant reed and 83.4% for the *Miscanthus x giganteus*.

The oleaginous crops had different outcomes: the whole *Jatropha curcas* plants could not resist a frost occurrence in early January of 2009 while the flax endured until the harvest in July of 2009. When of the cultivation (November) of the flax two varieties were selected for fibre and seed production. The dry matter yields obtained and the moisture content estimated were similar to each variety of flax with yields of 2.2 t/ha and 2.7 t/ha and contents of 21% and 17% for the fibre and seed variety, respectively.

In conclusion, some tree crops proved to have higher potential of biomass production for both agricultural or energy uses due to their high yields potential. In the current study the highest yields belonged to the Eucalyptus and the poplar clones, Unal and Beaupré, in this order. As for the rest of the tree crops, the yields obtained were not promising for any commercial interest of their biomass.

Regarding the perennial grasses, despite the similar yields obtained, the potential of biomass production was not the equivalent. The reason for this was that for the giant reed and the elephant grass it was their first year harvest while for the *Miscanthus x giganteus* the harvest corresponded to a fifth year harvest. Thus, the yield presented by the *Miscanthus x giganteus* was not the expected. As for the giant reed and the elephant grass their potential of biomass production is different from what their yields could indicate, particularly if the intent is for an energy use. The reason for this conclusion is the much higher moisture content presented by the elephant grass that is not suitable for storing and processing.

Concerning the oleaginous crops, the results presented by the flax were promising in an energy use outlook. In fact the seed variety presented potential for biodiesel production due to the highest yield and lesser moisture content presented. As for the potential of the *Jatropha curcas*, this crop is well documented as promising one due to the yield potential and adaptability to soil and climate that presents. However, due to poor tolerance to the occurrence of severe or enduring frosts none of the plants survived the winter which may be a restrictive factor in mediterranean climates.

Índice

Resumo	II
Abstract.....	III
Extended abstract.....	IV
Índice	VI
Índice de figuras	VIII
Índice de tabelas	X
1. Introdução	1
1.1. Biomassa.....	2
1.1.1. Sector Florestal.....	4
1.1.2. Ecossistemas ribeirinhos	5
1.1.3. Sector Agrícola	6
1.1.3.1. Plantas herbáceas.....	8
1.1.3.2. Plantas oleaginosas	9
1.2. Sector dos transportes	10
1.2.1. Biocombustíveis.....	11
1.3. Tecnologias de conversão de biomassa.....	13
1.4. Gasificação	15
1.4.1. Tipos de gasificadores.....	16
1.4.2. Tipos de biomassa gasificada	17
1.4.3. Aplicações do gás de gasificação	18
1.5. BioEnergisa – Campo Pedagógico de Plantas Bioenergéticas.....	20
1.5.1. Plantas florestais de crescimento rápido.....	21
1.5.1.1. <i>Eucalyptus globulus</i> L.	21
1.5.1.2. <i>Populus</i> spp.....	21
1.5.1.3. <i>Salix</i> spp.....	22
1.5.1.4. <i>Alnus glutinosa</i> L.	22
1.5.1.5. <i>Fraxinus angustifolia</i> Vahl	23
1.5.2. Plantas herbáceas de produtividade elevada.....	23
1.5.2.1. <i>Miscanthus</i> spp.	23
1.5.2.2. <i>Pennisetum purpureum</i> Shumach.....	24
1.5.2.3. <i>Arundo donax</i> L.	24
1.5.3. Plantas oleaginosas.....	25
1.5.3.1. <i>Jatropha curcas</i> L.....	25
1.5.3.2. <i>Linum usitatissimum</i> L.	26
2. Materiais e Métodos	28
2.1. Local de realização da experiência.....	28
2.1.1. Caracterização edáfica	28

2.1.2. Caracterização climática.....	29
2.2. Culturas estudadas	30
2.3. Cronologia do trabalho prático	31
2.4. Procedimentos	31
2.5. Humidade	34
2.6. Biomassa de eucalipto por componentes	34
2.7. Estágio no Laboratório Nacional de Energia e Geologia	35
2.7.1. Descrição da instalação.....	35
2.7.2. Procedimento dos ensaios	37
3. Resultados.....	38
3.1. Plantas florestais de crescimento rápido	38
<i>Salix</i> spp.	38
Freixo.....	39
Amieiro	39
<i>Populus trichocarpa x Populus deltoides</i>	40
Eucalipto.....	41
3.2. Plantas herbáceas de elevada produtividade	43
Capim-elefante e cana-do-reino.....	43
<i>Miscanthus x giganteus</i>	44
3.3. Plantas oleaginosas	46
Linho	46
<i>Jatropha curcas</i>	48
3.4. Efeito das condições operatórias de gasificação.....	49
Temperatura	50
Razão de Equivalência.....	50
Razão vapor/biomassa.....	51
4. Discussão	52
4.1. Plantas florestais de crescimento rápido	52
4.2. Plantas herbáceas de elevada produtividade	56
4.3. Plantas oleaginosas	59
4.4. Variações da composição do gás e outros parâmetros de gasificação	61
5. Conclusões.....	63
6. Trabalhos futuros.....	64
7. Referências Bibliográficas	65

Índice de figuras

Figura 1. Distribuição geográfica de eucalipto em Portugal Continental.	5
Figura 2. Distribuição das emissões de GEE (CH ₄ , N ₂ O, CO ₂) por sectores de actividade, em 2007 (%)	7
Figura 3. Emissões agrícolas de CH ₄ e N ₂ O (kt equivalentes de CO ₂).	7
Figura 4. Produção de biodiesel, por país (UE15), em 2007 (kt).....	11
Figura 5. Culturas energéticas classificadas de acordo com o tipo de matéria que podem fornecer e diferentes processos de conversão.....	14
Figura 6. Processos físicos e reacções químicas num gasificador.....	16
Figura 7. Aplicações do gás de gasificação.....	19
Figura 8. Planta adulta de purgueira (<i>Jatropha curcas</i>). A – hábito, B – folha, C – fruto.	26
Figura 9. Vista aérea do local dos ensaios e da estação meteorológica.....	28
Figura 10. Diagrama ombrotérmico de Gausсен. Médias do período entre Agosto de 2008 e Agosto de 2009.....	30
Figura 11. Cronograma das principais actividades desenvolvidas ao longo deste trabalho.	31
Figura 12. Localização das plantas estudadas no BIOENERGISA: 1 - Salgueiro-negro; 2 - Eucalipto; 3 - Choupo (clone Unal); 4 - Freixo; 5 - Choupo (clone Beaupré); 6 - Salgueiro-branco; 7 - Purgueira; 8 - Amieiro; 9 - Capim-elefante; 10 - Cana-do-reino; 14 - Linho (sementes); 15 - Linho (caules).	32
Figura 13. Vara extensível e suta utilizadas para medir as alturas e diâmetros das plantas.	33
Figura 14. Esquema do ensaio de <i>Miscanthus x giganteus</i> e pormenor das repetições marcadas dentro de cada modalidade.	33
Figura 15. Instalação experimental de gasificação em leito fluidizado.1 – gasificador de leito fluidizado; 2 – sistema de alimentação de combustível; 3 – unidade de arrefecimento e limpeza do gás; 4 – unidade de medição e análise do gás; 5 – sistema de produção de vapor.	36
Figura 16. Evolução da altura e do diâmetro das árvores das espécies salgueiro-negro (<i>Salix atrocinerea</i>) e salgueiro-branco (<i>Salix salviifolia</i> ssp <i>australis</i>) entre Outubro de 2008 e Julho de 2009 (médias mensais ± desvio padrão).	38
Figura 17. Evolução da altura e do diâmetro das árvores da espécie <i>Fraxinus angustifolia</i> entre Outubro de 2008 e Julho de 2009 (médias mensais ± desvio padrão).	39
Figura 18. Evolução do diâmetro das árvores da espécie <i>Alnus glutinosa</i> entre Outubro de 2008 e Julho de 2009 (médias mensais ± desvio padrão).	40
Figura 19. Evolução da altura e do diâmetro das árvores da espécie <i>Populus trichocarpa</i> x <i>Populus deltoides</i> (clones Unal e Beaupré) entre Outubro de 2008 e Julho de 2009 (médias mensais ± desvio padrão).	40
Figura 20. Evolução da altura e do diâmetro das árvores da espécie <i>Eucalyptus globulus</i> entre Outubro de 2008 e Julho de 2009 (médias mensais ± desvio padrão).	41
Figura 21. Evolução da biomassa total de <i>Eucalyptus globulus</i> entre Outubro de 2008 e Julho de 2009 (médias mensais ± desvio padrão).	42

Figura 22. Evolução da biomassa de <i>Eucalyptus globulus</i> por componentes, entre Outubro de 2008 e Julho de 2009 (médias mensais \pm desvio padrão).....	42
Figura 23. Composição (caules, folhas e racimos) dos fardos de <i>Miscanthus x giganteus</i> colhidos no dia 4 de Novembro de 2008.	44
Figura 24. Comprimentos total, útil e dos racimos das plantas representativas de cada fardo de <i>Miscanthus x giganteus</i> colhido no dia 4 de Novembro de 2008.....	46
Figura 25. Número de folhas das plantas representativas de <i>Miscanthus x giganteus</i> em cada fardo colhido no dia 4 de Novembro de 2008.....	46
Figura 26. Composição (cápsulas e caules) das plantas de linho das duas variedades estudadas (%).	47
Figura 27. Evolução do diâmetro das plantas de <i>Jatropha curcas</i> entre Outubro de 2008 e Janeiro de 2009 (médias mensais \pm desvio padrão).	49
Figura 28. Evolução da temperatura mínima na relva ao longo do mês de Janeiro de 2009.	49
Figura 29. Efeito da variação da temperatura na composição do gás produzido (esquerda) e nos parâmetros de gasificação (direita).	50
Figura 30. Efeito da variação da Razão de Equivalência composição do gás produzido (esquerda) e nos parâmetros de gasificação (direita).	51
Figura 31. Efeito da variação da razão vapor/biomassa na composição do gás produzido (esquerda) e nos parâmetros de gasificação (direita).	51
Figura 32. Evolução do crescimento dos choupos entre 11-Jul-08 (A) e 7-Mai-09 (B).	52
Figura 33. Evolução do crescimento dos eucaliptos entre 11-Jul-08 (A), 27-Fev-09 (B) e 7-Mai-09 (C).	54
Figura 34. <i>Miscanthus</i> em 18-Set-08 (A) antes de entrar em senescência e depois, imediatamente antes do corte de 4-Nov-08 (B).	56
Figura 35. Cana-do-reino antes do corte, em 18-Set-08 (A) e 21-Jan-09 (B) e depois do corte, em 14-Jul-09 (C).	58
Figura 36. Capim-elefante antes do corte, em 11-Jul-08 (A) e 27-Fev-09 (B) e depois do corte, em 14-Jul-09 (C).	59
Figura 37. Plantas de <i>Jatropha</i> em 22-Out-08 (A) antes e em 21-Fev-09 (B), depois da ocorrência de geada.....	61

Índice de tabelas

Tabela 1. Comparação das emissões poluentes entre as várias fontes energéticas.....	2
Tabela 2. Preço médio ponderado de madeira (com casca) pago aos produtores privados entre 2000 e 2005.....	6
Tabela 3. Potencial produtivo de algumas culturas energéticas como combustível sólido	9
Tabela 4. Produtividades e formas principais de aproveitamento energético de diversas culturas	10
Tabela 5. Comparação dos preços, balanços energéticos ⁽¹⁾ e emissões de GEE (produção e utilização) entre biocombustíveis e combustíveis derivados do petróleo	12
Tabela 6. Produtividades médias das plantas oleaginosas mais comuns.....	13
Tabela 7. Caracterização físico-química dos solos onde se insere a área em estudo.....	29
Tabela 8. Equações para determinação da biomassa de eucalipto por componentes (kg), desenvolvidas por Cortiçada <i>et al.</i> (2005).....	35
Tabela 9. Teores de humidade em base seca (%) e produtividades (t/ha) de capim-elefante e cana-do-reino.....	43
Tabela 10. Teores de humidade (%) de cada fardo de <i>Miscanthus x giganteus</i> , determinados a 100°C (base seca).....	45
Tabela 11. Produtividades de <i>Miscanthus x giganteus</i> (t/ha)	45
Tabela 12. Produtividade de <i>Linum usitatissimum</i> (t/ha)	47
Tabela 13. Teores de humidade em base seca (%) de <i>Linum usitatissimum</i>	48
Tabela 14. Peso de 100 sementes de linho (g).....	48
Tabela 15. Taxa de crescimento, em altura e diâmetro, das culturas florestais.....	55

1. Introdução

O crescente consumo energético da União Europeia (UE) bem como o aumento dos preços do petróleo, levou ao debate da necessidade de reduzir a dependência energética. A instabilidade na maioria dos países exportadores de combustíveis fósseis, que prejudica a continuidade do fornecimento e aumenta os preços, associa-se à necessidade de reduzir as emissões poluentes dadas as cada vez mais comprovadas alterações climáticas. Consciente da necessidade de promover e preservar a melhoria do ambiente, a UE esforça-se por promover as energias renováveis e incentivar a eficiência energética.

A revisão das políticas energéticas da UE originou publicações com o intuito de orientar os Estados-Membros numa solução integrada no sentido de garantir um aumento da utilização de energias renováveis cumprindo as metas ambientais e de competitividade propostas. Entre o conjunto de medidas já adoptadas, a UE definiu como metas, para os seus Estados-Membros, até 2020 (i) a redução das emissões de gases causadores do efeito de estufa (GEE) em 20% face aos níveis de 1990, (ii) o aumento em 20% do uso de fontes de energia renováveis, (iii) a adopção de medidas com vista à obtenção de uma poupança energética de 20% em relação aos níveis de consumo actuais (Santo, 2009).

Em Portugal este é um problema que deve ser resolvido com urgência, pois a dependência de importação de energia cifra-se nos 85% (Tomás, 2009), além de que o défice anual do país é, aproximadamente, 10% do PIB, sendo o sector energético um dos principais responsáveis por esta situação, uma vez que contribui 55 a 60% para este desequilíbrio. Em 2008 o saldo líquido das importações energéticas aproximou-se dos 8000 milhões de euros, acentuando a tendência da última década e, ultrapassando mesmo, pela primeira vez, o valor das importações de bens alimentares (Santo, 2009). Apesar da maior parte das importações se deverem aos combustíveis fósseis, também 20% da electricidade foi importada em 2008, acentuando não só o problema do endividamento externo, como também da dependência energética (Santo, 2009).

A explicação para esta tendência, como explica Tomás (2009), é a falta de recursos como o carvão, o petróleo e o gás natural em Portugal e as opções energéticas e económicas realizadas no passado. De entre as várias estratégias para solucionar estes problemas nacionais e concretizar os objectivos impostos pela UE, uma das principais é sem dúvida a produção de biomassa pois, segundo a Comissão Europeia no seu Plano de Acção Biomassa (PAB, 2005), esta representa actualmente cerca de 50% das energias renováveis utilizadas na UE.

É evidente que esta não será a única solução, nem para Portugal nem para os restantes Estados-Membros, mas em articulação com a exploração das restantes energias renováveis pode ser uma forma de caminhar no sentido da resolução dos problemas. Esta evidência é ainda mais forte em Portugal pois o nosso país possui um enorme potencial quer em recursos florestais, quer em possibilidade de exploração de energia solar, eólica e hídrica, que pode traduzir-se em energia disponível em abundância, barata e segura.

Neste sentido, Tomás (2009) refere que este conjunto de fontes de energia renovável assegura, na actualidade, a “componente de independência” energética do país, enquanto Amaral (2009)

destaca, entre outras possibilidades futuras, as centrais de co-geração (produção de electricidade e vapor) a biomassa necessárias para aumentar a eficiência energética e preços mais competitivos. Nunes (2009) acrescenta ainda que a meta estabelecida pela UE que prevê uma contribuição de 20% de energias renováveis em 2020 só será possível de alcançar, em Portugal, recorrendo à biomassa e aos biocombustíveis, uma vez que estes não sofrem o problema de intermitência das outras fontes de energia renovável.

A utilização da biomassa para produção energética pode, e deve, estimular novas oportunidades de mercado para os sectores florestal e agrícola. Moura (2005) explica que, devido à maior parte da área florestal nacional se encontrar nas regiões norte e centro do país, a utilização energética dos resíduos florestais torna-se crucial para o desenvolvimento dessas regiões, onde a regra é a falta de postos de trabalho e a consequente desertificação humana.

1.1. Biomassa

O termo biomassa, como vem definido na Directiva 2003/30/CE, de 8 de Maio, aplica-se a toda a fracção biodegradável de produtos e resíduos da agricultura, da floresta e das indústrias conexas, bem como a fracção biodegradável dos resíduos industriais e urbanos. De uma forma mais simplificada pode dizer-se que é o material biológico susceptível de aproveitamento energético.

Uma característica intrínseca da biomassa é a diversidade de produtos biocombustíveis (combustíveis sólidos, líquidos e gasosos) que podem produzir energia térmica e/ou electricidade. Outras vantagens da biomassa prendem-se com a sua abundância e os benefícios ambientais, energéticos e sociais resultantes da sua utilização, desde a redução das emissões de GEE (Tabela 1), a redução da dependência energética, prevenção de incêndios florestais e melhoria da produtividade florestal, assim como a criação de empregos.

Fonte energética	Emissões de CO₂ (kg CO₂/MWh)
Nuclear	15
Hidroelectricidade	5 – 20
Vento	10 – 30
Biomassa	30
Solar	100
Gás Natural	400 – 440
Petróleo	500
Carvão	750 – 800

Fonte: Amaral (2009)

Alguns inconvenientes da utilização da biomassa são a emissão de algumas substâncias nocivas para o ambiente aquando da sua combustão ou a exploração florestal descuidada que pode dar origem à erosão dos solos, emissões de GEE durante a produção e transporte, redução da biodiversidade, aumento dos preços dos alimentos, etc.

A biomassa, desde que explorada com base em boas práticas agrícolas e ambientais, não é considerada responsável pelo aumento de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera pois todo o CO₂ que é libertado nos processos de transformação corresponde ao que foi absorvido pela biomassa durante a fotossíntese (Moura, 2005).

Pode afirmar-se que é enorme o potencial compreendido pela biomassa e, no entanto, à data da elaboração do PAB (2005), a biomassa utilizada pela UE era apenas a suficiente para cobrir 4% das suas necessidades energéticas.

A Directiva 2003/30/CE, de 8 de Maio, previa uma quota global de 12% para as energias renováveis, uma quota de 21% no sector da electricidade e uma quota de 5,75% para os biocombustíveis até 2010 (PAB, 2005). De facto, os três sectores onde, segundo a UE, a futura utilização da biomassa será fundamental são os transportes, electricidade e aquecimento. O primeiro tem nos biocombustíveis líquidos a única alternativa ao petróleo a curto prazo e numa escala significativa, enquanto os dois últimos podem utilizar qualquer tipo de biomassa, empregando diferentes tecnologias. As matérias-primas utilizadas, por cada sector, serão inevitavelmente diferentes, sendo a produção de biocombustíveis realizada com recurso a culturas bioenergéticas e a produção de electricidade e o aquecimento assente na queima de madeira e de resíduos.

Em 2003, entre as novas medidas aprovadas na reforma da Política Agrícola Comum (PAC), algumas expressavam o empenho da UE em promover um abastecimento de biomassa adequado ao mercado. As alterações prendem-se, sobretudo, com o rendimento dos agricultores, passando este a não depender das culturas produzidas, o que possibilita a procura de culturas energéticas livremente conforme o mercado o permita. Por outro lado, a reforma introduziu igualmente um auxílio especial para culturas energéticas. Outra medida importante foi a que permitiu que os agricultores pudessem utilizar os terrenos em pousio obrigatório para cultivo de produtos não alimentares, onde se incluem as culturas energéticas. Esta e outras medidas presentes na reforma de 2003 possibilitam que os agricultores cultivem mais culturas energéticas, incluindo espécies florestais de crescimento rápido, conduzidas em regime de talhadia e com rotações curtas e outras culturas perenes (PAB, 2005; Brás *et al.*, 2006; Marques, 2008).

Num estudo sobre a utilização de biomassa lenhosa em Portugal, Dias (2002) aponta que a quantidade total de resíduos de biomassa produzidos no país se eleva a 5630 mil toneladas secas por ano e que, desse conjunto, 2628 mil toneladas secas por ano se encontram disponíveis para produção de energia térmica por combustão. Em termos sectoriais, a produção de resíduos provenientes de operações florestais é de 1173 mil toneladas secas por ano, em que apenas os resíduos de azinheiras e sobreiros são usados expressivamente para fins energéticos, enquanto o sector agrícola é responsável pela produção de resíduos, provenientes das culturas temporárias, na ordem das 1324 mil toneladas secas por ano, onde apenas se aproveitam os resíduos cerealíferos, e provenientes das culturas permanentes, de cerca de 677 mil toneladas secas por ano resultantes das

operações de poda das principais culturas, como o olival, a vinha e as árvores de fruto, onde a utilização dos resíduos quase não tem expressão (Dias, 2002).

1.1.1. Sector Florestal

No que diz respeito às florestas calcula-se que, em 2005, cerca de 35% da madeira que cresce na UE não foi utilizada, razão pela qual uma das acções-chave do Plano de Acção para as Florestas, (PAF, 2006), da autoria da Comissão Europeia, seja a promoção da utilização florestal para produção de energia através do desenvolvimento de mercados para *pellets* (madeira processada e densificada para energia).

De facto, o sector do aquecimento, apesar de ser o que utiliza maior quantidade de biomassa, é também aquele onde o ritmo de crescimento dessa utilização é mais lento (PAB, 2005). Ainda assim, em Portugal, calcula-se que as lenhas representem cerca de 36% do consumo de energia final para aquecimento das zonas residenciais e produção de águas quentes. Esta elevada utilização levou a que fosse desenvolvida tecnologia dedicada à produção de combustível adequado a todo o tipo de instalações de aquecimento, como são o caso dos grânulos de combustível compostos por aparas de madeira e serradura denominados por *pellets* (Isolani, 2008).

Filipe (2009) refere que também o mercado português de abastecimento das centrais de biomassa com material florestal tarda em consolidar-se, com os produtores a afirmarem que os preços actuais não cobrem os custos das operações de recolha e transporte, prevendo-se que apenas em 2010, quando as novas centrais estiverem concluídas, o aumento da procura force a subida dos preços. Estas, em conjunto com as centrais instaladas em unidades industriais do sector da pasta de papel, podem aumentar a produção de electricidade de forma expressiva, dos 148 GWh em 2008 para uns potenciais 1600 GWh/ano a partir de 2015 (Costa, 2009).

De acordo com o Inventário Florestal Nacional (IFN) para os anos 2005/2006 (DGRF, 2007b), a floresta portuguesa ocupa cerca de 3,4 milhões de hectares, o equivalente a um terço do território nacional, representando um ligeiro aumento em relação ao anterior IFN (1995/1998). As principais espécies plantadas são o pinheiro-bravo com 710 mil hectares, o eucalipto com 646 mil hectares, o sobreiro com 736 mil hectares e a azinheira com 388 mil hectares.

Em termos de volume, as principais espécies que abastecem a indústria nacional, a madeira em pé foi estimada em 67 milhões de m³ de madeira de pinheiro-bravo e 41,3 milhões de m³ de madeira de eucalipto. Em ambos os casos a proveniência da madeira corresponde, sobretudo, a povoamentos puros (DGRF, 2007b).

O mercado português dos produtos florestais é principalmente exportador, evidenciando uma tendência positiva ao longo dos últimos anos. Segundo informação dispensada pela DGRF (2007a), a exportação dos produtos florestais, no ano de 2005, representou 1,99% do PIB nacional, correspondendo a 9,58% exportações nacionais. A mesma fonte acrescenta que em 2005 o aumento das exportações foram generalizadas na Europa, com a madeira para energia a competir com o abastecimento dos mercados tradicionais como o de pasta para papel.

A expansão do comércio internacional da bioenergia é uma oportunidade para os produtores florestais nacionais aumentarem os seus rendimentos, tanto mais que não é previsível que o preço do petróleo volte a descer, visto a tendência ser o seu aumento conforme as reservas mundiais se vão esgotando. Como exemplo de possibilidade de mercado futuro, a DGRF (2007a) aponta a China como um dos principais compradores mundiais para fazer face às suas metas bioenergéticas, uma vez que não possui uma grande área florestal.

No contexto da utilização da madeira para a produção de energia, a espécie que mais interesse suscita, entre as principais presentes na floresta portuguesa, é o eucalipto devido ao seu elevado crescimento biomássico. A sua distribuição pelo território nacional (Figura 1) é mais evidente ao longo da faixa litoral ocidental, onde o clima é mais húmido, com clara predominância na região centro, com 258 mil hectares (DGRF, 2007b).

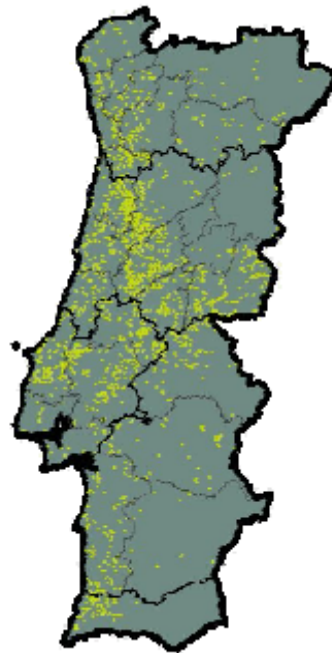


Figura 1. Distribuição geográfica de eucalipto em Portugal Continental.

Fonte: Inventário Florestal Nacional 2005/2006 (DGRF, 2007b)

Contudo, outras espécies florestais podem ser utilizadas para a produção de energia, quer eléctrica quer térmica, através do aproveitamento dos seus subprodutos adquiridos por via de podas, desramas, operações de limpeza e abate de árvores.

1.1.2. Ecossistemas ribeirinhos

Os ecossistemas ribeirinhos, devido à constante disponibilidade de água no solo e nutrientes transportados para o sistema, oferecem condições que beneficiam o estabelecimento de vegetação estruturalmente complexa e de elevada produtividade de biomassa mesmo durante o Verão, caracterizado em Portugal por ser quente e seco (Fabião & Fabião, 2007).

São exemplos típicos destes ecossistemas as comunidades arbóreas, geralmente dominadas por espécies de árvores caducifólias, como os amieiros (*Alnus glutinosa*), os freixos (*Fraxinus* spp.), os choupos (*Populus* spp.), os salgueiros (*Salix* spp.), os ulmeiros (*Ulmus* spp.) ou formações mistas destas espécies (Fabião & Fabião, 2007).

Além do valor ambiental, bem expresso através da Directiva Habitats que protege estas formações ribeirinhas, também está associada uma componente económica, como se pode verificar na Tabela 2, que compara os preços médios ponderados do metro cúbico de madeira (com casca), pagos aos produtores privados entre 2000 e 2005, entre duas das espécies mais comercializadas no nosso país, o eucalipto e o pinheiro-bravo e duas espécies típicas dos ecossistemas ribeirinhos, para evidenciar o rendimento que os produtores podem garantir ao explorarem as áreas adjacentes a esses habitats, sem que estes sejam comprometidos (Fabião & Fabião, 2007).

Espécie	Preço médio ponderado (Euros/m³ com casca)
Pinheiro-bravo	35,6
Eucalipto	22,8
Choupo	45,9
Bétula	27,3

Fonte: Fabião & Fabião (2007)

Por serem árvores de rotação curta e, devido à sua produtividade elevada, as principais espécies dominantes destes ecossistemas podem revelar-se matérias-primas interessantes no mercado da madeira para energia, tornando-se importantes fontes de rendimento para os produtores florestais que tenham possibilidades de vender a sua madeira.

1.1.3. Sector Agrícola

A área de solo usada para agricultura, em Portugal, é apenas ligeiramente inferior à dedicada ao uso florestal, ocupando cerca de 3 milhões de hectares, segundo o IFN (DGRF, 2007b). Apesar desta área corresponder a um ligeiro aumento face aos da área avaliada no anterior IFN, nas últimas décadas tem-se assistido a uma diminuição significativa da área agrícola devido, sobretudo, ao crescimento das zonas urbanas.

Entre 1990 e 2000, segundo o INE (2009), dos 118 691 hectares de área agrícola convertida em usos não agrícolas, 42 441 hectares (36%) foram convertidos em territórios artificializados, dos quais 77% corresponderam a tecido urbano e espaços verdes urbanos. Destes cerca de 42 mil hectares de área agrícola convertida, 78% correspondiam a áreas agrícolas heterogéneas, 14% a culturas anuais, 7% a culturas permanentes e 1% a pastagens.

O sector agrícola, tal como os outros sectores de actividade, é responsável pela produção e libertação de GEE para atmosfera, sendo mesmo a principal fonte de emissões de metano (CH₄) e óxido nítrico (N₂O), cuja contribuição para o efeito de estufa é superior ao mediático dióxido de carbono (CO₂) 21 e 310 vezes, respectivamente (INE, 2009).

Em Portugal, o estudo da distribuição das emissões de GEE por sectores de actividade, em 2007 (Figura 2), pelo INE (2009), demonstra que o principal sector poluente é o da energia, que inclui os transportes, com 71%, que corresponde a 57 582 kt equivalentes de CO₂, enquanto o sector agrícola é responsável por apenas 9% do total das emissões, o que representa cerca de 7632 kt equivalentes de CO₂. Os restantes 20% repartem-se, equitativamente, pelos sectores resíduos e outros produtos, como os solventes, e os processos industriais.

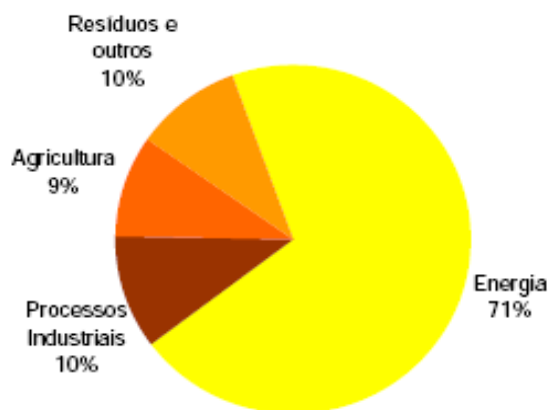


Figura 2. Distribuição das emissões de GEE (CH₄, N₂O, CO₂) por sectores de actividade, em 2007 (%).

Fonte: INE (2009)

Confirmando a boa prestação ambiental da agricultura portuguesa no que se refere às emissões de GEE, a análise dos resultados apurados nos últimos anos relativamente às emissões de metano e de óxido nítrico (Figura 3), mostra que as emissões tendencialmente têm vindo a diminuir, observando-se uma redução, em 2007, de 9,4% relativamente a 2006, e de 13,2% face a 2000 (INE, 2009).

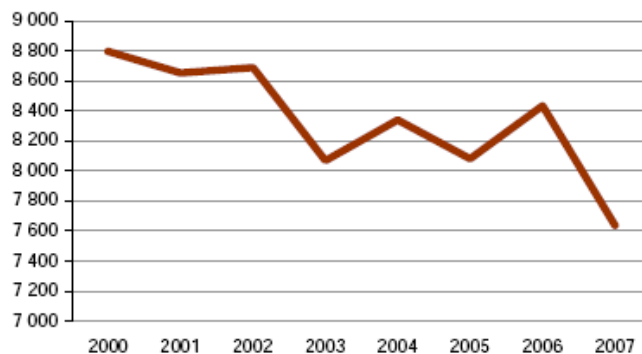


Figura 3. Emissões agrícolas de CH₄ e N₂O (kt equivalentes de CO₂).

Fonte: INE (2009)

As emissões do metano e óxido nitroso resultam de diferentes actividades agrícolas, com a produção pecuária a ser intimamente responsável pelo primeiro e os fertilizantes e resíduos animais e das culturas pelo segundo. Para o período entre 2000 e 2007, e segundo o INE (2009), as emissões de metano aumentaram 2,4%, saldando-se em 4561 kt equivalentes de CO₂ em 2007, o que representou, em média, 50% das emissões totais do sector, e as de óxido nitroso diminuíram 29%, com 3072 kt equivalentes de CO₂ em 2007, devido à forte redução do solo agrícola e da melhoria das práticas relacionadas com o estrume.

Esta diminuição das emissões de GEE com origem agrícola deverá estar relacionada com as reformas da PAC, que tem vindo a incentivar a alteração de práticas de gestão agrícola, como a redução do uso de fertilizantes azotados ou a extensificação das explorações agrícolas.

Os resultados apresentados perspectivam um futuro animador no que diz respeito à diminuição das emissões provenientes do sector agrícola. Contudo, as emissões totais de GEE em Portugal conservam-se 38% acima do valor de 1990, afastando-se perto de 11% da meta estabelecida no Protocolo de Quioto, para o período 2008-2012 (INE, 2009). Neste contexto e, no que ao sector da agricultura diz respeito, as plantas energéticas devem aumentar o seu peso relativo na contribuição para as energias renováveis nacionais, no sentido de reduzir a dependência energética e cumprir as metas ambientais acordadas. Nesse sentido, há ajudas previstas na Directiva 2003/30/CE, de 8 de Maio, para os produtores que declarem uma superfície mínima de 0,3 hectares semeada com culturas cujo destino principal seja a produção de energia eléctrica e térmica ou de produtos considerados combustíveis (Brás *et al.*, 2006). De acordo com o INE (2009), em 2007, o valor pago por unidade de área cultivada foi de cerca de 40€, tendo o montante total pago por beneficiário registado ascendido ao valor médio de 588€.

Existe uma enorme diversidade de plantas com potencial energético, mas as mais apropriadas são as plantas anuais e perenes de constituição lenhosa ou herbácea (Staiss & Pereira, 2002). As plantas energéticas são agrupadas em categorias conforme a utilização final da sua biomassa, sendo as mais usadas em Portugal, no sector agrícola, as herbáceas de produtividade elevada e as oleaginosas.

1.1.3.1. Plantas herbáceas

As plantas herbáceas energéticas de crescimento rápido podem ser queimadas directamente para produzir calor e energia eléctrica. As espécies mais usadas são o *Miscanthus* spp. e o *Arundo donax* pois, além da elevada produtividade, são pouco exigentes em condições edafoclimáticas.

Staiss & Pereira (2002) indicam que, em regiões com boas condições hídricas e radiação solar e temperaturas altas, podem verificar-se produtividades de 32 t matéria seca/ha/ano de *Miscanthus* e até 40 t matéria seca/ha/ano de *Arundo donax*. Brás *et al.* (2006) acrescenta que a demonstrada elevada produtividade do *Miscanthus* anuncia um aumento da área dedicada à sua produção, sobretudo nas terras de pousio. Por outro lado, apesar das potencialidades do *Arundo donax*, quer produtivas quer de utilizações finais, é necessária prudência na sua adopção uma vez que esta espécie revela comportamentos invasores em diversas circunstâncias, como é citado na literatura.

A Tabela 3 coloca em evidência o potencial produtivo destas herbáceas, comparando-as com outras culturas energéticas, nomeadamente espécies florestais de rotação curta e oleaginosas, apresentando os seus rendimentos em litros equivalentes de petróleo.

Tabela 3. Potencial produtivo de algumas culturas energéticas como combustível sólido

Produtividade Matéria Seca (t/ha)		Equivalentes Petróleo (L/ha)
30	<i>Miscanthus</i> <i>Arundo donax</i>	12 000
20	<i>Populus spp.</i> , <i>Salix spp.</i> , <i>Eucalyptus spp.</i>	8000
10	<i>Linum usitatissimum</i> (planta inteira)	4000

Fonte: El Bassam (1996)

Os cereais energéticos também poderiam ser considerados, embora, por serem produtos alimentares devam ser excluídos do grupo de matérias-primas para a produção de energia. Ainda assim, os resíduos como as palhas dos cereais podem constituir um suplemento de rendimento para os agricultores, pois podem ser queimados como biomassa sólida.

1.1.3.2. Plantas oleaginosas

As plantas oleaginosas são utilizadas para a produção de biodiesel, através da extração do óleo das suas sementes, com o intuito de substituir o gasóleo consumido no sector dos transportes.

A cultura mais tradicional em Portugal é o girassol. Staiss & Pereira (2002) indicam que novas variedades de girassol conseguem atingir produções de 2,5 a 4,0 t sementes/ha com um teor em óleo de 40 a 50%. No entanto, culturas como a colza, o cardo ou a *Jatropha* têm sido experimentadas com vista a substituir a cultura do girassol, sobretudo nos solos com menor retenção de água.

A colza, que apresenta uma elevada produção de grão que origina um óleo de excelente qualidade, é a oleaginosa mais cultivada na UE, sendo a Alemanha o principal produtor. Nas condições ambientais portuguesas, esta cultura pode ser semeada em Outubro e colhida em Maio, o que oferece vantagens relativamente à cultura do girassol em condições de sequeiro, uma vez que esta apenas em Junho inicia a crítica fase de floração (Lourenço & Januário, 2008).

Já o cardo é uma planta perene com fase de crescimento activa no Outono e Primavera e que pode, em regime de sequeiro, produzir anualmente 20 t matéria seca/ha e aproximadamente 2 a 3 t sementes/ha, com um teor em óleo de 25% (Staiss & Pereira, 2002). Para além disso o cardo pode ser cultivado com a dupla aptidão de, para além do óleo das sementes poder também fornecer biomassa sólida como matéria-prima para a produção de energia (Brás *et al.*, 2006; Lourenço &

Januário, 2008), alcançando rendimentos interessantes quando comparada com as plantas celulósicas (Tabela 4).

Das oleaginosas menos estudadas, a *Jatropha* é a que tem gerado mais expectativas devido ao sucesso obtido em países como a Índia ou China. No entanto, os produtores nacionais têm sentido dificuldade em manter as plantas viáveis durante o Inverno, sobretudo devido às geadas, o que tem provocado algum desânimo.

Tabela 4. Produtividades e formas principais de aproveitamento energético de diversas culturas

Planta energética	Formas principais de utilização		Rendimentos: óleo/biomassa seca (t/ha)
	Tipo de combustível	Preparação	
Oleaginosas			
Girassol	Líquido	Biodiesel	0,5 – 1,7
Colza	Líquido	Biodiesel	1,0 – 1,4
Cardo	Líquido/Sólido	Biodiesel/fardos/estilhas	0,5 – 0,8 (biodiesel) 15 – 25 (biomassa sólida)
Celulósicas			
Choupo e Salgueiro	Sólido	Estilhas de madeira	10 – 20
Eucalipto	Sólido	Estilhas de madeira	20 – 30
<i>Miscanthus</i>	Sólido	Estilhas/fardos/ <i>pellets</i>	20 – 30
<i>Arundo donax</i>	Sólido	Estilhas/fardos/ <i>pellets</i>	15 – 35

Fonte: Staiss & Pereira (2002)

1.2. Sector dos transportes

No sector dos transportes, a UE definiu como metas uma quota de 2% de biocombustíveis em 2005, que não foi alcançada, e de 5,75% para 2010, através da Directiva n.º 2003/30/CE, de 8 de Maio. Uma nova directiva, ainda em debate, previa uma quota de 10% para 2020 para todos os Estados-Membros, contudo, em Portugal, este desafio é ainda mais ambicioso, uma vez que o governo propôs a antecipação da incorporação da quota de 10% de biocombustíveis no sector dos transportes para 2010, através da Resolução do Conselho de Ministros n.º 21/2008, como medida estratégica do Programa Nacional para as Alterações Climáticas (Rosa, 2008).

Tal como em muitos Estados-Membros, Portugal recorreu ao mecanismo das isenções fiscais sobre os biocombustíveis, através da Portaria n.º 3-A/2007, de 2 de Janeiro, como veículo legal para promover a utilização de biocombustíveis.

O sector dos transportes é um dos que mais contribui para as emissões de GEE (Viegas, 2009), e a actual crise petrolífera veio acentuar ainda mais a necessidade de redução do uso do petróleo nos transportes e da implementação dos biocombustíveis no parque automóvel actual (Amaral, 2009).

Entre as medidas que podem contribuir para atingir os objectivos propostos pela UE citam-se as associadas à diminuição da intensidade energética e de CO₂ dos transportes, através de inovações tecnológicas relacionadas com motores e combustíveis energeticamente mais eficientes. (Viegas, 2009).

Os vectores de energia de tracção de veículos que mais expectativas estão a criar são a electricidade utilizada em motores eléctricos e os biocombustíveis de segunda geração, que assentam em resíduos lenhosos e outros tipos de biomassa, que ocupam solos pobres e que não competem com a produção alimentar (Viegas, 2009).

1.2.1. Biocombustíveis

O sector do transporte rodoviário europeu e português está preferencialmente orientado para os veículos movidos a gasóleo, razão pela qual o biodiesel tem sido, entre os biocombustíveis comercialmente disponíveis, o que mais sucesso tem conhecido, superiorizando-se claramente em relação ao bioetanol (Bourne, 2007; Rosa, 2008). Um dos países europeus que mais contribui para o sucesso do biodiesel é a Alemanha, que é o maior produtor dos países da UE15, contribuindo com 53,3% da produção total de biodiesel, de acordo com o INE (2009), que acrescenta ainda que Portugal ocupa o 5º lugar do ranking, tendo as suas 5426 toneladas produzidas em 2007 representado cerca de 3,2% (Figura 4). De salientar que a produção de biodiesel estudada abrangeu todas as fontes além das matérias-primas fornecidas pelo sector agrícola de cada Estado-Membro.

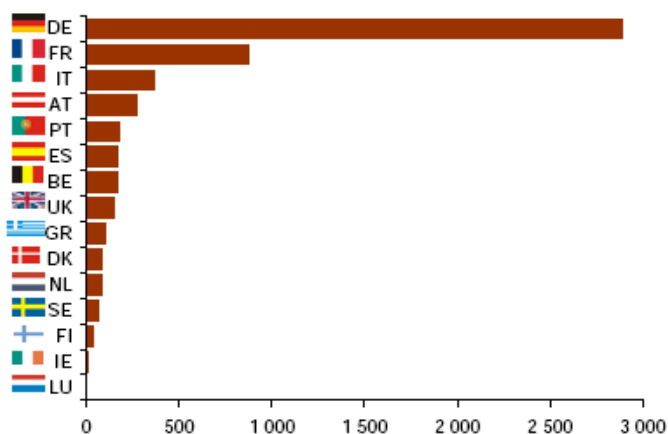


Figura 4. Produção de biodiesel, por país (UE15), em 2007 (kt).

Fonte: INE (2009)

No entanto, apesar da posição de topo no ranking da UE15, a agricultura portuguesa contribui apenas residualmente para a produção de biodiesel a partir de culturas energéticas, existindo ainda uma grande margem de oportunidade para alargar a produção de matérias-primas de biodiesel até se atingir a meta nacional da incorporação dos biocombustíveis. Bourne (2007) recorda que a produção de biodiesel em Portugal, em apenas duas fábricas em funcionamento, em 2006, foi de 100 milhões de litros a partir de matéria-prima importada, mas com a entrada em funcionamento de novas

unidades industriais a capacidade de produção aumentou largamente. Isso mesmo confirma o INE (2009), referindo que em 2007 ocorreu um aumento de produção de biodiesel de 131% face a 2006, com cerca de 162 mil tep produzidas.

De acordo com Marques (2008) se todos os combustíveis derivados do petróleo, disponíveis no mercado nacional, incorporarem a quota máxima prevista de biocombustíveis na sua composição, serão necessários mais 194 milhões de litros de bioetanol e 385 milhões litros de biodiesel até 2010. Marques (2008) acrescenta ainda que há já algum tempo que os mercados apresentam evidências de que a produção de biocombustíveis, sobretudo biodiesel, pode já ser economicamente viável ou estar muito próximo de o ser (Tabela 5).

Um grande número de plantas pode ser utilizada para produzir biocombustíveis, desde que sejam cumpridas boas práticas agrícolas e ambientais durante o seu cultivo e que não entrem em competição com os produtos alimentares.

Tabela 5. Comparação dos preços, balanços energéticos⁽¹⁾ e emissões de GEE (produção e utilização) entre biocombustíveis e combustíveis derivados do petróleo

Cultura		Combustível		Notas
		Bioetanol	Gasolina	
Cana-de-açúcar (Brasil)	Preço (€/L)	0,55 (0,74)	0,94	€0,74 (para obter energia equivalente a 1 L de gasolina); €0,94 de gasolina (25% etanol)
	Balanço energia	8		
	GEE (kg/L)	1,08	2,44	
Resíduos florestais e agrícolas; vegetação de crescimento rápido	Preço (€/L)			Em fase de estudo nos EUA, Canadá, Suécia, Dinamarca e Espanha
	Balanço energia	2-36		
	GEE (kg/L)	0,23	2,44	
Cultura		Biodiesel	Gasóleo	Notas
Colza (Alemanha)	Preço (€/L)	1,04 (1,21)	1,20	€1,21 (para obter energia equivalente a 1 L de gasóleo)
	Balanço energia	2,5		
	GEE (kg/L)	0,91	2,80	
Oleaginosas: soja, girassol e palma (Portugal)	Incentivo (€/1.000L)	280		€280/1.000 L de isenção sobre ISP (quota varia em função da matéria-prima nacional incorporada)
	Balanço energia	2,5		
	GEE (kg/L)	0,91	2,80	

Fonte: Bourne (2007)

⁽¹⁾ Balanço energético corresponde à razão entre a energia do combustível fóssil utilizada (input) e o rendimento de energia do biocombustível (output).

No que diz respeito ao biodiesel, apesar de inicialmente ter sido extensamente produzido à base de óleo de colza, outras culturas foram também adoptadas como matérias-primas, como a soja, girassol e palma (Rosa, 2008), embora umas apresentem maior produtividade que outras (Tabela 6). No entanto, outras plantas oleaginosas, menos exigentes em solos, humidade e clima, revelaram-se melhores soluções para o aproveitamento de solos mais pobres, como são o caso da purgueira

(*Jatropha curcas*) e do rícino. Além disso, apresentam melhores índices de produtividade (Tabela 6) que as culturas de primeira geração usadas para a produção de biodiesel (Marques, 2008).

Tabela 6. Produtividades médias das plantas oleaginosas mais comuns

Cultura	Rendimento em óleo ¹ (L/ha)	Produção ² (t/ha/ano)
1ª geração	Milho	172
	Soja	446
	Girassol	1000
	Colza	1190
	Palma	5950
2ª geração	Rícino	–
	<i>Jatropha</i>	1892

Fonte: ¹ Rosa (2008); ² Marques (2008)

Em relação ao bioetanol, as matérias-primas mais empregadas são o milho nos Estados Unidos da América, a cana-de-açúcar no Brasil e a beterraba em França. No entanto, este pode ser produzido sem rivalizar com a produção de alimentos, recorrendo aos subprodutos de espécies florestais e agrícolas que são, de maneira geral, rejeitados como resíduos (Bourne, 2007; Marques, 2008). Outra cultura indicada por Marques (2008) é o tupinambo (*Helianthus tuberosus*), uma herbácea que se propaga por tubérculos e que cresce nos mesmos solos e climas que o milho, podendo também sobreviver em solos pobres e com escassez de água.

Bourne (2007) afirma que existem diversos entendidos em biocombustíveis que prevêm o reaparecimento do cultivo das ervas perenes apesar de, actualmente, os custos de produção deste etanol celulósico serem mais elevados que o da gasolina, e do teor energético extraído ser francamente inferior ao do petróleo.

1.3. Tecnologias de conversão de biomassa

A biomassa pode ser transformada, através de vários processos de conversão, em biocombustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, que, por sua vez, podem produzir calor, electricidade e combustíveis para os meios de transporte, isto é, de acordo com o tipo de biomassa e o uso energético que se desejar assim corresponderá um processo de conversão, que poderá ser bioquímico, químico, físico ou termoquímico. Na Figura 5 resumem-se os vários processos de conversão de biomassa existentes e classifica-se as culturas energéticas conforme a utilização final da sua biomassa.

Os processos bioquímicos são empregues nas plantas produtoras de açúcares que são transformadas em bioetanol através de fermentação por acção de leveduras ou enzimas. Já os processos químicos são aplicados ao óleo extraído das sementes das plantas oleaginosas através de

uma reacção de transesterificação que origina o biodiesel. Os processos físicos destinam-se a processar a biomassa sólida para a produção de energia, através de métodos de densificação (secagem), redução granulométrica e prensagem mecânica que originam como produtos os *pellets* e *briquettes*, estilhas e óleo vegetal, respectivamente.

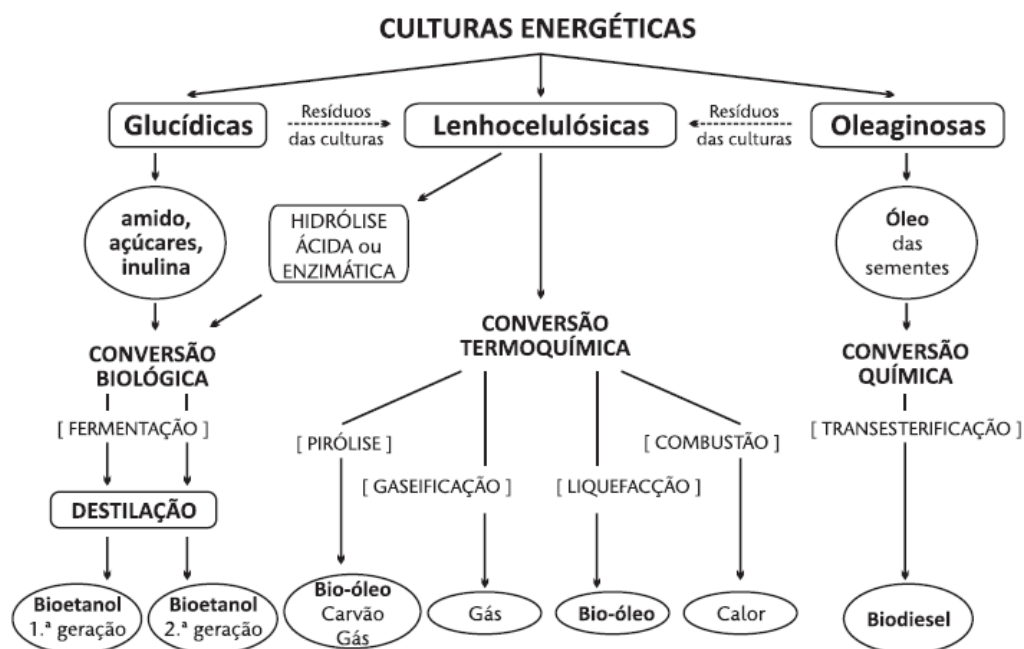


Figura 5. Culturas energéticas classificadas de acordo com o tipo de matéria que podem fornecer e diferentes processos de conversão.

Fonte: Lourenço & Januário (2008)

Os processos termoquímicos utilizam uma fonte de calor para transformarem biomassa, mais concretamente resíduos dos sectores agrícola e florestal e das indústrias de transformação agroalimentar e da madeira, em combustíveis que podem mais tarde ser aproveitados energeticamente. Os vários processos termoquímicos existentes, e que diferem, principalmente, na quantidade de oxigénio presente durante a conversão, são a pirólise, liquefacção, combustão e gasificação.

Franco (2000) explica que o processo denominado por pirólise consiste no aquecimento da biomassa, na ausência de oxigénio (O_2), resultando como produtos finais deste processo, além de um gás combustível, carvão e óleo vegetal. Há a possibilidade de escolher entre diversos tipos de pirólise conforme as proporções de produtos finais desejadas. Para produções relativamente idênticas dos produtos sólido, líquido e gasoso deve-se adoptar a pirólise lenta, que se efectua à temperatura de $450^\circ C$, aproximadamente, com taxa de aquecimento lenta e longos períodos de tempo de residência do gás. Por outro lado, se o objectivo é a elevada produção de gás, então deve-se optar pela pirólise rápida, que se verifica com temperaturas superiores a $800^\circ C$ e com taxas de aquecimento muito elevadas e tempos de residência curtos. Em alternativa, se o resultado desejado for uma elevada produção de líquido, então deve-se escolher o processo de pirólise “flash” que se efectua a

temperaturas de cerca de 500°C, com taxa de aquecimento muito altas e tempos de residência do gás muito curtos (inferior a 1 s).

O processo de liquefacção, de acordo com Franco (2000), pode ocorrer numa única etapa ou em diversas operações, nesse caso chamada liquefacção indirecta. A liquefacção directa é utilizada para converter materiais combustíveis directamente em produtos líquidos que podem ser usados como combustíveis ou como matérias-primas na indústria. Consiste na reacção da biomassa triturada com o monóxido de carbono (CO) em meio líquido e na presença de um catalisador alcalino, sujeita a temperaturas entre os 380°C a 450°C e a pressão geralmente superior a 10 MPa. No caso da liquefacção indirecta, o objectivo é a produção de líquidos, como o metanol ou hidrocarbonetos, obtidos a partir de um gás de síntese. Assim, a biomassa tem de ser convertida primeiro num gás de síntese, por meio de uma gasificação. Este gás de síntese é constituído por monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrogénio (H₂) e metano (CH₄).

O processo de combustão directa resume-se a uma reacção química, exotérmica, que envolve o combustível, neste caso a biomassa, e o comburente ou oxidante, que pode ser o ar ou o oxigénio puro (O₂), fornecido em excesso em relação à estequiometria da reacção. É o modo mais clássico de produção de energia, particularmente usando a madeira como matéria-prima. Actualmente as instalações que recorrem a combustão são muito sofisticadas tecnicamente e eficientes, ultrapassando a desvantagem dos combustíveis sólidos terem baixa densidade energética e serem de difícil transporte, usando biomassa à qual foram aplicados processos físicos de conversão.

1.4. Gasificação

A gasificação é a tecnologia de conversão chave em todos os futuros processos de produção de energia, combustíveis e/ou produtos derivados da biomassa, pois os gases obtidos no processo são produtos intermédios de elevada eficiência energética ou de síntese de materiais químicos ou combustíveis. A motivação do uso desta tecnologia nasce do facto da biomassa ser a única fonte renovável de carbono e de ser considerada neutra na emissão de CO₂ (Boerrigter & Rauch, 2006).

A definição de gasificação diz que é um processo, no qual a biomassa ou outro combustível sólido, sob a acção do calor na presença de quantidades controladas de agentes oxidantes, é degradado por reacções térmicas obtendo-se como produto final principal um combustível gasoso, composto por hidrogénio, monóxido e dióxido de carbono, vapor de água, metano e outros hidrocarbonetos mais pesados.

A principal finalidade da gasificação é aumentar a razão H/C das matérias-primas carbonosas, com vista ao aproveitamento energético. Para tal, Franco (2000) adianta que uma possibilidade será, durante o processo, adicionar hidrogénio proveniente da decomposição do vapor de água, enquanto o oxigénio resultante se combina com carbono para formar CO₂.

Ao alimentar combustível a um gasificador ocorrem vários processos e reacções químicas (Figura 6) que poderão ocorrer sequencialmente ou com uma considerável sobreposição, dependendo do tipo de gasificador. Quatro processos podem ser assinalados, designadamente,

combustão, redução, pirólise e secagem. As temperaturas a que ocorrem as reacções em cada um destes processos são distintas, favorecendo-as cinética e termodinamicamente.

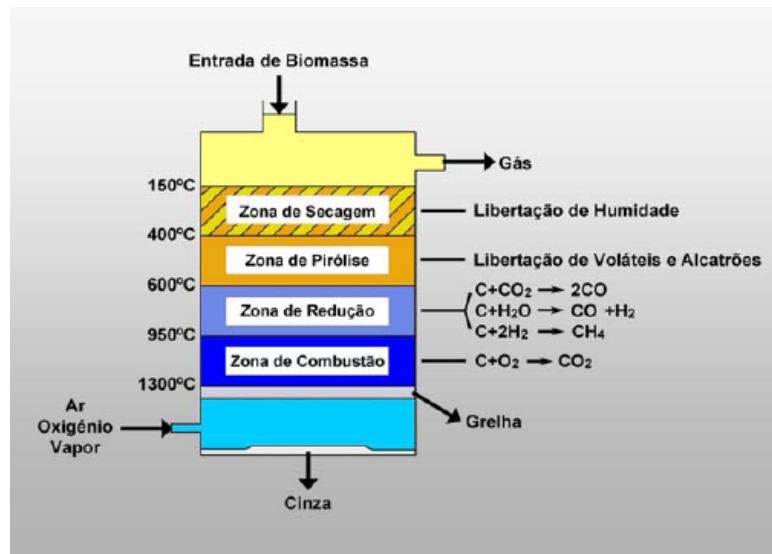


Figura 6. Processos físicos e reacções químicas num gasificador.

Fonte: Franco (2000)

As características do gás produzido dependem das condições de operação do gasificador, nomeadamente da escolha da utilização de ar, oxigénio ou vapor de água. No primeiro caso o gás produzido apresenta um baixo poder calorífico, geralmente apenas 10% a 15% do gás natural. A razão para este facto prende-se com o efeito diluidor do azoto que, por ser um gás inerte, não concorre nas reacções químicas, podendo atingir percentagens superiores a 50% na mistura final. Por outro lado, se em vez de ar se utilizar oxigénio, o poder calorífico será muito elevado, mas também o processo será mais dispendioso e complexo. Porém, existe ainda a possibilidade de usar vapor de água, o que diminui a preponderância das reacções de oxidação relativamente às de redução, visto a quantidade de oxigénio presente ser bastante reduzida. Estas circunstâncias levam a que a quantidade de hidrogénio presente no gás produzido aumente consideravelmente, passando a ser a espécie gasosa mais representativa (Franco, 2000).

1.4.1. Tipos de gasificadores

Os gasificadores são geralmente classificados segundo a forma como os sólidos se movimentam no seu interior, em três categorias distintas: gasificadores de leito fixo, leito em suspensão e leito fluidizado.

Os gasificadores de leito fixo, por sua vez, dividem-se em três variantes que resultam da forma como o gás é conduzido para fora do conjunto, designadamente, contracorrente, co-corrente e correntes cruzadas. O primeiro conjunto, os gasificadores de contracorrente, são assim designados porque o gás e o sólido circulam pelo gasificador em sentidos contrários. O combustível sólido é introduzido pelo topo do reator e desce lentamente conforme vai sendo consumido, enquanto o

agente de gasificação é introduzido por uma grelha na parte inferior. No segundo exemplo, os gasificadores de co-corrente, quer o combustível sólido quer o agente de gasificação são introduzidos no topo e o percurso é efectuado no sentido descendente. Os gasificadores de correntes cruzadas, são semelhantes ao conjunto co-corrente, contudo o agente de gasificação é introduzido por um dos lados do gasificador, perto do fundo, e os gases são retirados do lado oposto. As unidades de gasificadores de leito fixo utilizam, normalmente, como agente de gasificação o ar. A sua concepção não é complicada, todavia, apresentam como desvantagens o baixo poder calorífico e o elevado conteúdo em alcatrão do gás.

Os gasificadores de leito em suspensão necessitam de um combustível pulverizado para que as partículas sejam gasificadas numa corrente suspensa no interior do reactor. O agente de gasificação é uma mistura, geralmente, de vapor de água e oxigénio que arrasta o combustível pulverizado. A alimentação é efectuada por meio de injectores. Os tempos de residência são tão curtos que exigem temperaturas bastante elevadas para que a gasificação seja completa, não existindo zonas diferenciadas de reacção ao longo destes gasificadores. Estas características tornam a operação do processo complexa, sem ganhos na redução do conteúdo de partículas e alcatrões relativamente aos sistemas de leito fluidizado.

Os gasificadores de leito fluidizado conduzem um gás através de um leito de partículas inertes, no qual se faz a alimentação do combustível sólido, a partir do fundo do reactor. A velocidade do gás tem de ser capaz de manter o leito em suspensão, adquirindo características de um fluido. Neste sistema não existem zonas de reacção diferenciadas, ocorrendo simultaneamente em todo o leito do gasificador. Os compostos mais pesados do gás, em contacto com o material quente do leito, sofrem “cracking” o que reduz o teor em alcatrões à saída do gasificador. Ramage (2003) acrescenta que devido à temperatura de operação ser inferior a 1000°C, portanto abaixo da temperatura de fusão das cinzas presentes no combustível, é possível evitar formação de escórias de cinza, além de que estas ficam na forma de partículas relativamente grandes, de fácil remoção, em consequência do combustível não ser pulverizado. Estas características estendem o campo de aplicação da gasificação ao possibilitarem o uso de combustíveis que de outro modo seriam difíceis de gasificar.

As principais vantagens deste processo são a temperatura uniforme da zona de gasificação em comparação com os sistemas de leito fixo, a facilidade com que superfícies de permuta de calor são introduzidas no leito e dos sólidos serem introduzidos ou retirados do sistema. Por outro lado, o maior inconveniente é a débil capacidade de resposta do sistema a variações de carga. Ao ser imediatamente gasificado, o combustível não é armazenado no interior do reactor, ficando a produção de gás dependente do caudal de alimentação do combustível.

1.4.2. Tipos de biomassa gasificada

A biomassa, além de ser um recurso renovável acessível a todos os países, apresenta a grande vantagem de não acrescentar dióxido de carbono à atmosfera quando é convertida em energia.

A gasificação da mistura de resíduos florestais e carvão a 850°C origina um gás com 33 a 44% de H₂, dependendo da quantidade de resíduos usada, e aproximadamente 25% de CO₂, 23% de CO

e entre 7 a 11% de CH₄ (Pinto *et al.*, 2006). Ainda de acordo com estes autores, o aumento do teor de resíduos florestais até 60% leva a um aumento de 15% do poder calorífico e de 45% do rendimento do gás, o que resulta numa ampliação da conversão energética do processo.

Potencialmente todos os tipos de biomassa podem ser gasificados mas, em Portugal, são utilizados como combustível sobretudo os resíduos das matérias-primas usadas nas unidades industriais que operam com gasificadores integrados nos seus sistemas de produção. Por exemplo, na indústria da pasta para papel, os gasificadores de leito fluidizado são comuns para a produção de vapor consumindo a biomassa tipicamente associada a essa indústria, como a casca e outros resíduos florestais, mas outros tipos de indústria usam diferentes resíduos, como serradura ou resíduos agro-industriais.

Isto deve-se ao fraco peso que a biomassa tem tido, em Portugal, na produção de energia, quer eléctrica quer calorífica, fora do contexto industrial. No entanto, as centrais termoeléctricas de biomassa florestal em funcionamento, construção ou projecto no nosso país vão originar um verdadeiro mercado de biomassa. Assim, a matéria-prima usada tanto pode ser biomassa proveniente de explorações florestais dedicadas, quer ao abastecimento exclusivo desse mercado quer a outros mercados, como resíduos do sector agro-industrial.

No que diz respeito aos problemas associados à utilização da biomassa na produção tradicional de electricidade, Franco (2000) afirma que a gasificação da biomassa permite ultrapassar a maior dessas restrições. Quando queimada directamente, a biomassa produz gases de combustão corrosivos que limitam a pressão a cerca de 6 MPa e a temperatura a 475°C, no caso de utilização de geradores de vapor. Nessas circunstâncias, o rendimento energético da conversão da biomassa em electricidade será cerca de 10% inferior do que quando a biomassa for gasificada e o gás gerado purificado. Todavia, a purificação é uma técnica complexa e dispendiosa.

1.4.3. Aplicações do gás de gasificação

Os gases produzidos por gasificação têm diversas aplicações industriais (Figura 7), quer na produção de electricidade quer de calor. Nesse sentido, na selecção do processo de gasificação, as características do gás produzido devem corresponder à utilização pretendida.

Além das aplicações industriais, outras opções têm sido estudadas, nomeadamente a produção de gás natural sintético (SNG), essencialmente constituído por metano, para ser utilizado como alternativa ao gás natural nos sistemas de distribuição já existentes. No entanto, a produção de SNG a partir de biomassa é, actualmente, demasiado dispendiosa para ter interesse comercial (Franco, 2000).

Também a produção de combustíveis líquidos, como o metanol ou hidrocarbonetos, a partir do gás de gasificação tem sido considerada, usando como matérias-primas o gás natural e o carvão, respectivamente. O metanol pode ser utilizado na indústria química e mais tarde pode ser convertido em gasolina. Já os hidrocarbonetos líquidos são produzidos através de um processo de síntese conhecido como Fischer-Tropsch, e destinam-se à produção de combustíveis para automóveis. Este processo é sobretudo usado comercialmente na África do Sul. (Franco, 2000; Boerrigter & Rauch,

2006). Contudo, apesar de tecnicamente viável, os custos de produção elevados, além do baixo rendimento do processo, são proibitivos. Ramage (2003) explica que por cada 8 t de carvão utilizadas no processo de síntese Fischer-Tropsch apenas é produzida cerca de 1 t (1280 L) de gasolina.

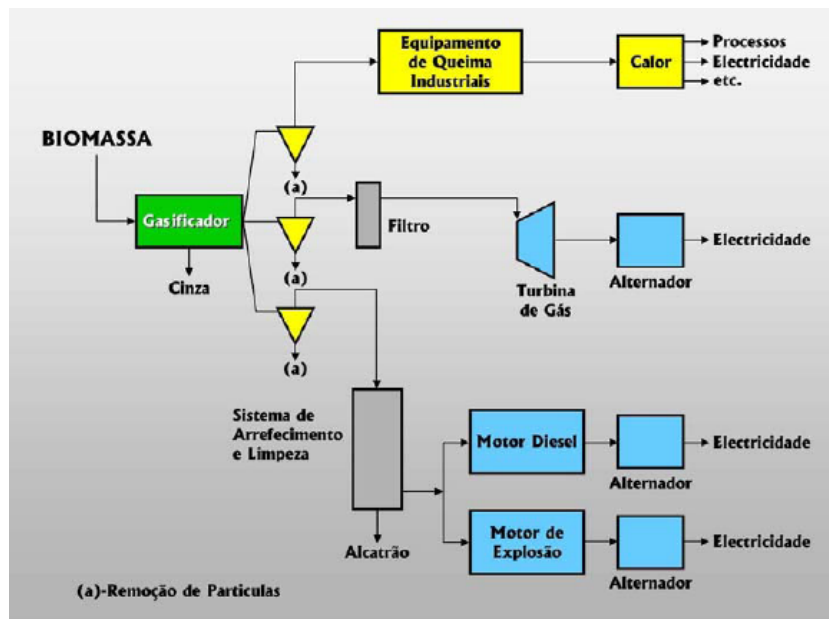


Figura 7. Aplicações do gás de gasificação.

Fonte: Franco (2000)

Segundo Franco (2000), diversos sistemas podem utilizar o gás de gasificação da biomassa para a produção de energia eléctrica, entre eles, as pilhas de combustível, motores de combustão interna, turbinas de gás e sistemas de ciclo combinado integrando gasificador (IGCC).

As pilhas de combustível convertem directamente a energia química compreendida no combustível em electricidade, sem que haja uma conversão prévia em energia calorífica, o que aumenta, teoricamente, os rendimentos de conversão.

Os motores de combustão interna podem usar o gás de gasificação, mas este tem de ser relativamente limpo, com teores baixos de alcatrões e partículas. Refira-se também que a eficiência energética em motores de combustão interna alimentados com este gás é inferior ao atingido com as centrais eléctricas com combustíveis fósseis.

Acerca das turbinas de gás, Ramage (2003) refere que um dos requisitos necessários é o combustível ser limpo. Essa é a razão pela qual a maioria das turbinas das centrais térmicas funciona a gás natural. Apesar disso, o gás de gasificação da biomassa também pode ser usado, não obstante o menor poder calorífico.

Nos sistemas IGCC o equipamento central é o gasificador que se encontra associado a um ciclo combinado que incorpora uma turbina a gás e outra a vapor. Comparativamente aos sistemas tradicionais apresenta menores taxas de emissões de partículas, CO₂, SO₂ e NO_x, contudo, o gás produzido necessita ainda de purificação. Também a eficiência energética é superior, sobretudo quando a instalação funciona como sistema de co-geração (Franco, 2000; Boerrigter & Rauch, 2006).

A produção de hidrogénio baseada na gasificação da biomassa, na perspectiva do alargamento da influência de produção energética à base de fontes de energia renováveis, pode ser uma mais-valia para o futuro.

O hidrogénio não é um recurso energético como o gás natural, o petróleo, o vento ou o sol, mas sim um vector energético que necessita ser produzido, tal como a electricidade, a partir de fontes de energia primária, sejam elas convencionais ou renováveis. Depois de produzido, é ainda necessário transportá-lo e convertê-lo em energia utilizável. As possibilidades de conversão são a combustão directa em motores de combustão e turbinas ou através de processos electroquímicos em pilhas de combustível (Leão, 2009).

Uma vantagem inerente à utilização do hidrogénio como vector energético é a de este poder ser armazenado. Leão (2009) descreve este facto como sendo bastante relevante, sobretudo no aspecto do alargamento do papel das energias renováveis no sector energético, uma vez que permite ultrapassar o problema dos padrões não coincidentes de produção e consumo.

Porém, todas as etapas descritas ainda se encontram em fase de investigação e desenvolvimento tecnológico, e estarão sempre dependentes de um sólido envolvimento político.

1.5. BioEnergisa – Campo Pedagógico de Plantas Bioenergéticas

O Instituto Superior de Agronomia tem sido, desde a sua origem, líder nacional do ensino e estudo científico das áreas agrícola e florestal. Uma das mais recentes iniciativas nestas áreas que empreendeu foi a criação de um campo experimental, direccionado para estudantes, professores, empresas e público em geral, com o intuito de investigar, sensibilizar e divulgar acerca de plantas que podem ser utilizadas para fins energéticos. Baptizado de BioEnergisa – Campo Pedagógico de Plantas Bioenergéticas, foi inaugurado no dia 1 de Outubro de 2008, e desde então tem sido uma base de estudo importante sobre a utilização de biomassa para produção de energia.

A colecção de plantas bioenergéticas instaladas no BIOENERGISA assenta em quatro grupos particulares: espécies florestais de crescimento rápido, plantas herbáceas de produtividade elevada, plantas oleaginosas e plantas produtoras de açúcares. As espécies representantes de cada grupo são substituídas periodicamente após a concretização dos objectivos traçados para as mesmas, entre estes a simulação/estudo da viabilidade da instalação das culturas a uma escala piloto, a análise das produtividades, a análise da viabilidade das plantas para fins energéticos, etc. (Silva, 2008).

Não sendo praticável, neste trabalho, o estudo de todas as espécies presentes no BIOENERGISA optou-se por analisar as espécies florestais e algumas espécies de plantas oleaginosas e herbáceas, com o objectivo de avaliar as suas produtividades biomássicas. Para tal, foram acompanhadas as espécies de plantas escolhidas de cada grupo, ao longo do tempo, e registados os seus crescimentos e vitalidades.

1.5.1. Plantas florestais de crescimento rápido

1.5.1.1. *Eucalyptus globulus* L.

O eucalipto é uma árvore aromática da família das Mirtáceas, de porte elevado e crescimento rápido que pode alcançar os 55 m de altura. Originário da Tasmânia, em Portugal é cultivado por todo o território em diversos tipos de solo até aos 1000 m de altitude (Bingre *et al.*, 2007). Foi introduzido em Portugal, no século XIX, para facilitar a drenagem de pântanos e para o abastecimento de lenha. Contudo, a importância industrial no fabrico de pasta de papel revelou-se elevada, convertendo-o numa das árvores mais cultivadas no país (Bingre *et al.*, 2007).

Parte do sucesso prende-se com as condições edafo-climáticas da Península Ibérica que parecem favorecer esta espécie exótica. Bingre *et al.* (2007) afirmam que esta região corresponde a dois terços da sua área de distribuição mundial, e El Bassam (1996) acrescenta que as melhores condições climáticas da Europa se verificam na zona noroeste da Península Ibérica. Contudo, a capacidade da espécie *Eucalyptus globulus* para se estabelecer com muita eficácia nos habitats de clima mediterrâneo substituindo a vegetação nativa, confere-lhe carácter de invasora (Silva, 2008), apesar de não estar listada como tal no Decreto-Lei n.º 565/99, de 21 de Dezembro. No entanto, alguns autores entendem que o seu cultivo pode evitar a desflorestação nativa (Pereira, 2007).

Em Portugal, o seu uso mais corrente é como matéria-prima para a produção de pasta de papel (El Bassam, 1996), sendo os resíduos gerados no processo utilizados para produzir energia (El Bassam, 1996). No entanto, a elevada produtividade anual pode ser determinante para o sector energético, que poderá aproveitar os eucaliptos como matéria-prima. Silva (2008) refere produções de biomassa de 7,5 t matéria seca/ha/ano, mas outros autores, como El Bassam (1996) dizem que em determinadas condições hídricas e de fertilização, e em ciclos de rotação de três anos, esta pode variar entre 11 a 14 t matéria seca/ha/ano.

1.5.1.2. *Populus* spp.

Os choupos são plantas do género *Populus*, da família das Salicáceas que se distribuem por todo o país. Na literatura, as diversas espécies presentes em território nacional, são consideradas arqueófitos de introdução muito antiga, apesar de existirem populações indígenas na Península Ibérica (Bingre *et al.*, 2007). Têm alcançado sucesso no Centro e Sul da Europa, onde se têm realizado muitos estudos a diversos clones com o objectivo de determinar o potencial de exploração em rotações curtas (El Bassam, 1996).

São árvores caducifólias que podem atingir os 30 m de altura e que habitam em solos húmidos e nas margens de cursos de água, onde formam galerias ribeirinhas de elevado interesse ambiental, como destaca a Directiva Habitats (Bingre *et al.*, 2007). El Bassam (1996) diz que resistem bem a diversos graus de encharcamento do solo, contudo não são muito tolerantes a solos mal drenados. Em condições hídricas deficientes apresentam mecanismos de defesa como a queda das folhas

inferiores com consequências negativas na produtividade, apesar do restabelecimento do crescimento que se verifica após a restituição das condições hidrológicas favoráveis.

Além de plantas ornamentais, muito apreciadas nas cidades, são-lhes reconhecidas diversas aplicações como usos medicinais e o aproveitamento da sua madeira para celulose, mas também para o fabrico de fósforos devido às características da sua madeira: leve, macia e de pouca durabilidade. De realçar ainda a hegemonia que os choupos híbridos têm vindo a conquistar relativamente às restantes espécies (CML, 2005; Bingre *et al.*, 2007). No presente trabalho foram estudados os clones Unal e Beaupré do híbrido *Populus trichocarpa x Populus deltoides*.

1.5.1.3. *Salix* spp.

Os salgueiros são plantas que integram o género *Salix*, pertencentes à família das Salicáceas. Este género tem sido estudado devido ao seu potencial para ser explorado em rotações curtas, sendo muito bem sucedido nos países do Norte da Europa (El Bassam, 1996).

Diversos clones resultantes do cruzamento entre espécies de salgueiros são utilizados para diversos usos como a produção de biocombustíveis e pasta para papel. Têm também utilidade como biofiltros para tratamento de lamas e águas provenientes de estações de tratamento e despoluição de unidades industriais desactivadas (Brás *et al.*, 2006).

A disponibilidade de água é um factor limitante, tendo sido estimado que os salgueiros, explorados em rotações curtas, requerem aproximadamente 500 dm³ água/kg matéria seca produzida. Quando se verificam condições de stress hídrico, a maioria dos clones estudados deixam cair algumas folhas inferiores como resposta às condições de seca. Apesar de o normal crescimento ser restabelecido com a reposição das condições hídricas ideais, a produtividade é afectada (El Bassam, 1996).

As espécies de salgueiros estudadas neste trabalho foram o *Salix atrocinerea* (salgueiro-negro) e o *Salix salviifolia* ssp. *australis* (salgueiro-branco). O *Salix atrocinerea* Brot. (salgueiro-negro) é uma árvore ou arbusto, da família das Salicáceas, que pode crescer até aos 15 m de altura. Oriundo da Europa ocidental, do noroeste de África e da Córsega, habita em Portugal as margens de rios e locais húmidos e alagados, até aos 1800 m de altitude (Bingre *et al.*, 2007). O *Salix salviifolia* ssp. *Australis* (salgueiro-branco) é um arbusto, da família das Salicáceas, que pode alcançar os 6 m de altura. Originária da Península Ibérica, em Portugal continental, é o sul do país que alberga esta subespécie, preferencialmente junto às margens dos rios, sobretudo de cursos de águas torrenciais permanentes com margens instáveis ou de cursos de água temporários (Bingre *et al.*, 2007). Fabião & Fabião (2007) enunciam as galerias desta subespécie como pertencendo aos ecossistemas ribeirinhos portugueses protegidos pela Directiva Habitats, o que ilustra o seu valor ambiental.

1.5.1.4. *Alnus glutinosa* L.

O amieiro é uma árvore grande caducifólia, que pode crescer até aos 30 m de altura, da família das Betuláceas. É oriundo da Europa, Ásia e noroeste de África, e em Portugal, pode ser encontrado

em quase todo o território junto a margens de rios e ribeiras, várzeas e locais inundados e húmidos (Bingre *et al.*, 2007). Além de dominarem estes ecossistemas no noroeste do país, os amieais de *Alnus glutinosa* são referidos na Directiva Habitats como uma das formações ribeirinhas que ocorrem em Portugal com interesse comunitário (Fabião & Fabião, 2007).

1.5.1.5. *Fraxinus angustifolia* Vahl

O freixo é uma árvore caducifólia que pode crescer até aos 20 m de altura, embora habitualmente de menor tamanho, pertencente à família das Oleáceas. Esta árvore, originária do Centro-Este Europeu, em Portugal habita as margens dos cursos de água e forma bosques por todo o país, como afirmam Bingre *et al.* (2007). Fabião & Fabião (2007) menciona o interesse comunitário dos freixiais de *Fraxinus angustifolia* existentes em Portugal, através da Directiva Habitats.

É comum encontrar esta árvore em parques e jardins como ornamental, além da sua folhagem ser também utilizada como alimento para o gado, apresentando-se como principal alternativa ao declínio dos ulmeiros (Bingre *et al.*, 2007). A sua madeira, dura e pesada, também tem utilidade industrial, sendo bastante usada no fabrico de cabos de diversos utensílios e mobiliário (CML, 2005; Bingre *et al.*, 2007).

1.5.2. Plantas herbáceas de produtividade elevada

1.5.2.1. *Miscanthus* spp.

Os *Miscanthus* spp. são ervas perenes, da família das Gramíneas e provenientes da Ásia (Basch *et al.*, 2002). As plantas do género *Miscanthus* utilizam o mecanismo fotossintético C4 e possuem caules maciços com cerca de 10 mm de diâmetro, podendo crescer, aproximadamente, 2 m no primeiro ano e até 4 m nos anos seguintes, atingindo a maturidade, geralmente, por volta dos 3 ou 4 anos (El Bassam, 1996).

Basch *et al.* (2002) referem que, nos países nórdicos, após três anos decorridos desde o estabelecimento desta cultura, quando esta atinge as maiores produções, os rendimentos anuais aproximam-se das 25 t matéria seca/ha. Todavia, nos países do Sul da Europa onde a exposição a radiação solar é maior, e desde que tenham boas condições hídricas, a produtividade será potencialmente superior devido ao mecanismo fotossintético C4, que é mais eficiente com temperaturas mais elevadas e maiores intensidades luminosas.

El Bassam (1996) diz que parece adaptar-se bem a vários tipos de clima, incluindo o Mediterrânico, pois resiste bem a geadas fracas, apesar dos rebentos e folhas não sobreviverem a temperaturas inferiores a -5°C. Não é exigente em solos mas para grandes produções necessita de boas condições hídricas, estimando-se que precise de 600 mm de precipitação para produzir 20 t matéria seca.

A primeira geada do ano marca o fim da época de crescimento e o início da senescência dos *Miscanthus*, quando os nutrientes migram para os rizomas e a planta começa a dessecar. A colheita

deve realizar-se em Fevereiro/Março quando a cultura apresenta o teor máximo de matéria seca, aproximadamente 80%, e os nutrientes estão armazenados nos rizomas (El Bassam, 1996). Diversos estudos têm sido efectuados no sentido de aprofundar conhecimentos sobre a adaptabilidade e sobrevivência das espécies e génotipos de *Miscanthus* e suas produções com vista à sua utilização energética (Basch *et al.*, 2002). A variedade estudada neste trabalho foi *Miscanthus x giganteus*.

1.5.2.2. *Pennisetum purpureum* Shumach.

O capim-elefante é uma planta perene da família das Gramíneas que pode alcançar os 8 m de altura, com caules sólidos com diâmetros até 2,5 cm, originária das regiões subtropicais de África (Torrealba, 1990).

Adapta-se bem às regiões temperadas, contudo, é sensível a variações do fotoperíodo e de temperatura o que provoca a diminuição do crescimento no Outono/Inverno (Torrealba, 1990) e possui o mecanismo fotossintético C4 (Coombs *et al.* 1973). Resiste bem a condições de seca, mas desenvolve-se pouco em condições de encharcamento, chegando mesmo a não resistir a estas. Possui, no entanto, elevada tolerância à salinidade dos solos (Torrealba, 1990).

Segundo (Torrealba, 1990), as técnicas de cultivo influenciam a necessidade de fertilização, sobretudo em produção intensiva e contínua. Apesar disso, rebenta rapidamente depois do corte, não necessitando, geralmente, de nenhuma atenção relativamente às infestantes pois as suas folhas provocam ensombramento, o que impede o crescimento de outras plantas.

O capim-elefante apresenta uma elevada produtividade que merece um olhar mais cuidado por parte dos agricultores. O seu potencial pode ser aproveitado como um rendimento complementar uma vez que é relativamente fácil de manejar, sem necessidade de recorrer a maquinaria especializada, podendo ser cultivado nas zonas marginais das outras culturas, protegendo ainda os solos da erosão. Os seus caules podem ser aproveitados energeticamente como biomassa sólida alargando as possibilidades de utilização do capim-elefante, cuja cultura também pode ser explorada como forragem (Torrealba, 1990).

1.5.2.3. *Arundo donax* L.

A cana-do-reino é uma erva vivaz e perene de grande porte da família das Gramíneas, com origem controversa, mas que se julga ser proveniente da Europa oriental e da Ásia temperada e tropical, que se distribui por todo o país, excepto em regiões de elevada altitude. Acredita-se que tenha sido introduzida em Portugal devido à utilidade dos seus caules na agricultura, nomeadamente na construção de sebes (Marchante & Marchante, 2005).

Os seus caules são longos e ocos, podendo medir entre 2 a 6 m de altura e 1 a 3,5 cm de diâmetro (Marchante & Marchante, 2005). Pode formar canaviais extremos de ribeiras torrenciais, sobretudo a sul do Tejo, devido às condições hídricas preferenciais para arbustos e árvores de menor porte (Fabião & Fabião, 2007). Apesar de apresentar melhores crescimentos em solos húmidos, pode

ser encontrada em quase todo o tipo de solos nas zonas limites dos campos e junto a trilhos (El Bassam, 1996).

Após o corte, geralmente no período Outono/Inverno, o desenvolvimento inicia-se na Primavera seguinte a partir dos rizomas, com taxas de crescimento elevadas que podem atingir os 7 cm/dia nos meses de Junho e Julho, podendo continuar a crescer até Agosto se os solos forem férteis (El Bassam, 1996). A colheita, em plantações para energia ou produção de celulose, deve ser realizada todos os anos no Outono para evitar perdas de matéria seca no Inverno. Não são necessários grandes cuidados depois de estabelecida, o que reduz os custos associados à sua exploração ao período da colheita, com exceção de alguma irrigação e fertilização que possam ser necessárias em alguns climas ou solos (El Bassam, 1996).

Está listada como exótica mas não é considerada invasora, apesar de revelar comportamento invasor em ecossistemas ribeirinhos, comprometendo a existência de espécies florestais como os salgueiros, os amieiros ou os choupos devido à substituição da vegetação nativa através do aumento da frequência dos fogos (Marchante & Marchante, 2007), o que merece especial cautela na escolha do local da instalação.

El Bassam (1996) refere que o *Arundo donax* é usado tradicionalmente como barreira para o vento para proteger outras culturas, enquanto os seus caules são utilizados para construir sebes e servem como estacas para apoio de outras culturas. Porém, a sua elevada produtividade de biomassa com valores entre 20 a 25 t matéria seca/ha, e o seu poder calorífico estimado em cerca de 3.600 kcal/kg permitem avaliar a sua energia potencial em cerca de 11 tep/ha/ano.

1.5.3. Plantas oleaginosas

1.5.3.1. *Jatropha curcas* L.

A purgueira é uma espécie arbustiva e perene que pertence à família das Euforbiáceas (Figura 8), provavelmente originária da América Central pois não é encontrada noutros locais como vegetação espontânea. Devido à aptidão de adaptação climática assume-se que terá sido disseminada com sucesso para África e Ásia na época dos descobrimentos (Correia, 2005; Luís, 2009).

Apresenta um crescimento rápido podendo alcançar entre 3 a 5 m de altura, não sendo exigente em solos, apesar de se desenvolver melhor em solos profundos e bem estruturados, onde possa desenvolver apropriadamente o sistema radicular. Após a plantação demora cerca de dez meses até iniciar a produção apesar da plenitude apenas ser atingida ao terceiro ou quarto ano, mantendo-se depois produtiva não menos de 40 anos (Luís, 2009).

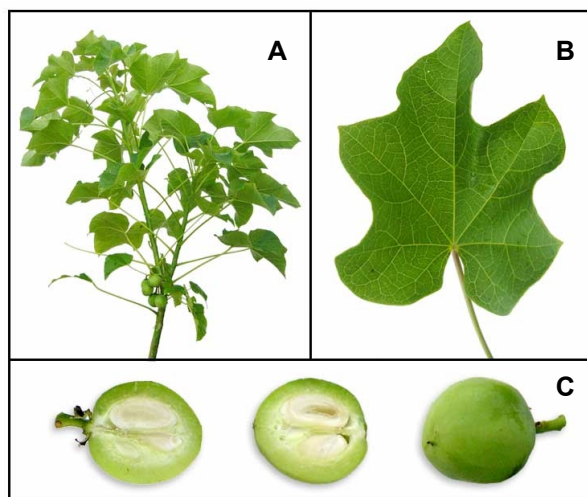


Figura 8. Planta adulta de purgueira (*Jatropha curcas*). A – hábito, B – folha, C – fruto.

Fonte: <http://www.agricultureinformation.com/mag/?p=2209> acessado em 15-Set-2009

Tem grande sucesso como sebe viva para delimitação de propriedades pois não é consumida pelos animais devido à toxicidade das suas sementes, além de ser usada na estabilização dos solos, no combate à erosão e desertificação (Correia, 2005; Luís, 2009). Trata-se de uma planta xerófila com forte tolerância à seca, podendo sobreviver recorrendo a mecanismos que lhe possibilitam a redução das perdas de água, como o armazenamento de água nos caules e perda das folhas ao mesmo tempo que cessa o crescimento (Luís, 2009).

Marques (2008) diz que se trata de uma planta que é facilmente cultivada a partir de podas ou sementes, e que origina uma colheita anual de 6 a 8 toneladas de bagas com 37% de conteúdo em óleo, aproximadamente, o que torna as suas sementes adequadas para a utilização energética através da produção de biodiesel. Além da extração de óleo, pode-se empregar o bagaço das suas bagas, devido ao conteúdo em açúcares, para a produção de bioetanol. Correia (2005) acrescenta que o rendimento da purgueira pode atingir as 3 t/ha, e Luís (2009) que a produção de óleo é estimada em cerca de 2 t/ha.

Apesar das enormes potencialidades enunciadas, Luís (2009) adverte que existem ainda importantes lacunas no conhecimento da purgueira, nomeadamente alguns aspectos agronómicos desconhecidos.

1.5.3.2. *Linum usitatissimum* L.

O linho é uma planta anual, da família das Lináceas, que pode crescer entre 90 cm a 120 cm, e cuja origem se desconhece, embora se assuma que seja oriunda do Médio Oriente. O *Linum usitatissimum* terá sido domesticado a partir do *Linum bienne* Miller, e será uma das mais antigas culturas exploradas pelo Homem, e das mais utilizadas pela humanidade ao longo dos tempos, devido à principal característica que a distingue: as suas longas fibras. Ainda assim, no nosso país, esta cultura tem vindo a perder importância sobretudo devido à concorrência da cultura de algodão

nos mercados têxteis, à exigência de solos e condições climáticas ideais, e à dificuldade de processamento (Cabral, 2003).

Apesar das perspectivas de futuro não serem muito animadoras, o aproveitamento energético das suas sementes ricas em óleo pode dar um novo impulso a esta cultura. Na verdade, as suas sementes contêm aproximadamente 38% óleo que, uma vez extraído, pode ser utilizado para produzir biocombustíveis. Contudo, as variedades para extração de óleo diferem das empregadas para produção de fibra proveniente dos seus caules, pois têm uma maior quantidade de ramos e uma estatura mais baixa. Outra diferença é o período de tempo que o linho para óleo é deixado na terra, para que as sementes se desenvolvam o mais possível, aumentando o potencial de produção de óleo (Cabral, 2003).

Em conclusão, diversos factores podem ser importantes na reabilitação do linho, funcionando como alternativas aos usos tradicionais desta cultura, como são a capacidade de produzir óleo, a possibilidade da utilização das suas fibras para pasta para papel, e não menos importante, os ciclos curtos que apresenta.

2. Materiais e Métodos

2.1. Local de realização da experiência

Os ensaios decorreram no BioEnergisa – Campo Pedagógico de Plantas Bioenergéticas do Instituto Superior de Agronomia em Lisboa (Figura 9). Nas imediações do BIOENERGISA, no Horto da Secção de Agricultura, encontra-se um campo experimental dedicado a ensaios com a planta *Miscanthus x giganteus*, integrada também neste trabalho.

Nas proximidades do campo experimental encontra-se a estação meteorológica da Tapada da Ajuda, geograficamente localizada à latitude de 38° 42' N e longitude de 9° 11' W, a uma altitude de 60 metros, onde se recolheram os dados meteorológicos com os quais se efectuou a caracterização climática do local dos ensaios.

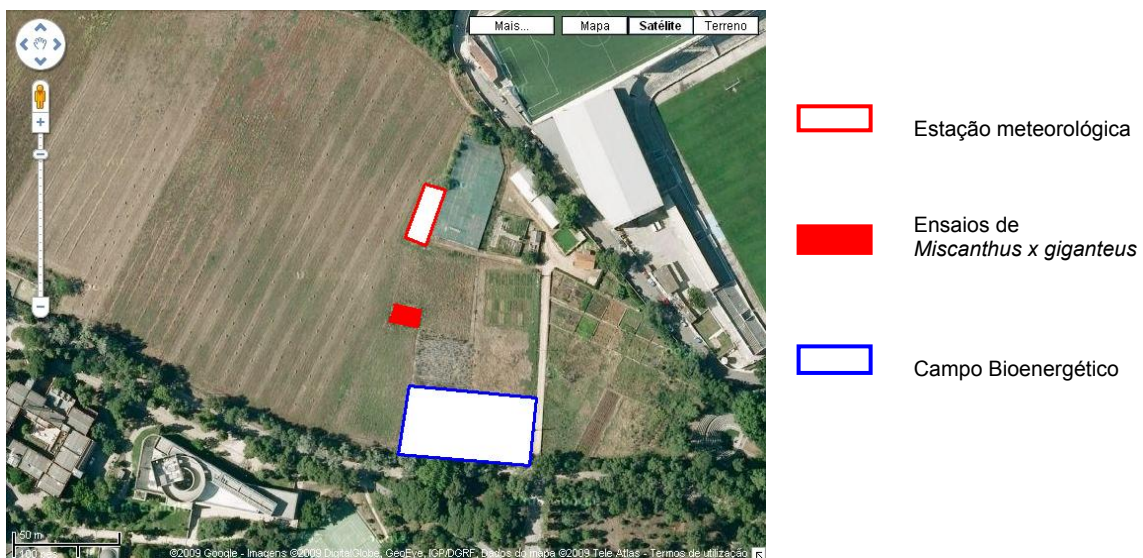


Figura 9. Vista aérea do local dos ensaios e da estação meteorológica.

Fonte: <http://maps.google.pt> acedido em 18-Ago-2009

2.1.1. Caracterização edáfica

Os solos da Tapada da Ajuda, onde se insere o local dos ensaios, foram caracterizados por Cardoso (1965) como sendo Barros Castanho-Avermelhados Não Calcários de basaltos ou doleritos ou outras rochas eruptivas básicas (Cb).

De acordo com a classificação de solos da FAO/UNESCO (1988), e tendo em consideração a correspondência entre unidades-solo SROA-CNROA e FAO/UNESCO, os solos onde se insere a área em estudo são Vertissolos (Simões, 2006).

A análise do solo (Tabela 7) do local dos ensaios revela que este apresenta uma textura franco-argilosa, com percentagem média de matéria orgânica e pH neutro. Quanto aos macronutrientes, apresenta um alto teor de potássio e teores muito altos de fósforo e magnésio.

Tabela 7. Caracterização físico-química dos solos onde se insere a área em estudo

Determinações Físico-Químicas		
Textura de campo	Franco-argilosa	
Matéria orgânica (Ströhlein)	2,88	%
pH em água.....	7,26	
pH em solução normal de cloreto de potássio....	6,14	
Potássio assimilável em K ₂ O (Egner-Rhiem)	170	mg.kg ⁻¹
Fósforo assimilável em P ₂ O ₅ (Egner-Rhiem)	440	mg.kg ⁻¹
N-mineral	14,7	mg.kg ⁻¹
N-NO ₃	3,42	mg.kg ⁻¹
N-NH ₄	11,28	mg.kg ⁻¹
<u>Bases de Troca (Acetato de amónio 1N, pH 7)</u>		
Cálcio (Ca ²⁺)	38,75	cmol(+)kg ⁻¹
Magnésio (Mg ²⁺).....	7,83	cmol(+)kg ⁻¹
Potássio (K ⁺)	0,41	cmol(+)kg ⁻¹
Sódio (Na ⁺)	0,4	cmol(+)kg ⁻¹
<u>Outras determinações</u>		
Níquel	171,7	mg.kg ⁻¹
Cádmio	1,73	mg.kg ⁻¹
Crómio	142,96	mg.kg ⁻¹
Chumbo	32,6	mg.kg ⁻¹
Ferro (Lakanen e Ervio).....	106,95	mg.kg ⁻¹
Cobre (Lakanen e Ervio)	8,4	mg.kg ⁻¹
Zinco (Lakanen e Ervio)	6,15	mg.kg ⁻¹
Manganês (Lakanen e Ervio)	440,3	mg.kg ⁻¹
Mg assimilável (acetato de amónio)	940	

APRECIACÃO

Matéria orgânica	Médio
Reacção.....	Neutra
Nível de Potássio	Alto
Nível de Fósforo	Muito alto
Fe (Lakanen e Ervio)	Muito alto
Cobre (Lakanen e Ervio)	Alto
Zinco (Lakanen e Ervio)	Alto
Manganês (Lakanen e Ervio)	Muito alto
Magnésio	Muito Alto

Fonte: Silva (2008)

2.1.2. Caracterização climática

De acordo com Medina (1973) o clima da Tapada da Ajuda é, segundo a classificação de Thornthwaite, sub-húmido chuvoso, mesotérmico, com grande deficiência de água no Verão e pequena concentração da eficiência térmica estival (C₂B'₂S₂a'). De acordo com o Instituto de

Meteorologia (2008), segundo a classificação de Köppen, é um clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e quente (Csa).

Os dados meteorológicos recolhidos (Figura 10) mostram que no período dos dez meses em que decorreu o trabalho experimental, entre Outubro de 2008 e Julho de 2009, ocorreu um período seco em Março, em que a precipitação atingiu o valor mensal mínimo de 10,7 mm, e o início de outro em Junho que se prolongou em Julho, mês em que não ocorreu precipitação. No mês de Janeiro registaram-se os extremos de precipitação máxima e temperatura mínima com 183,9 mm e 10,8°C, respectivamente. Os meses de Junho e Julho registaram as temperaturas máximas com 21,7°C e 21,9°C, respectivamente.

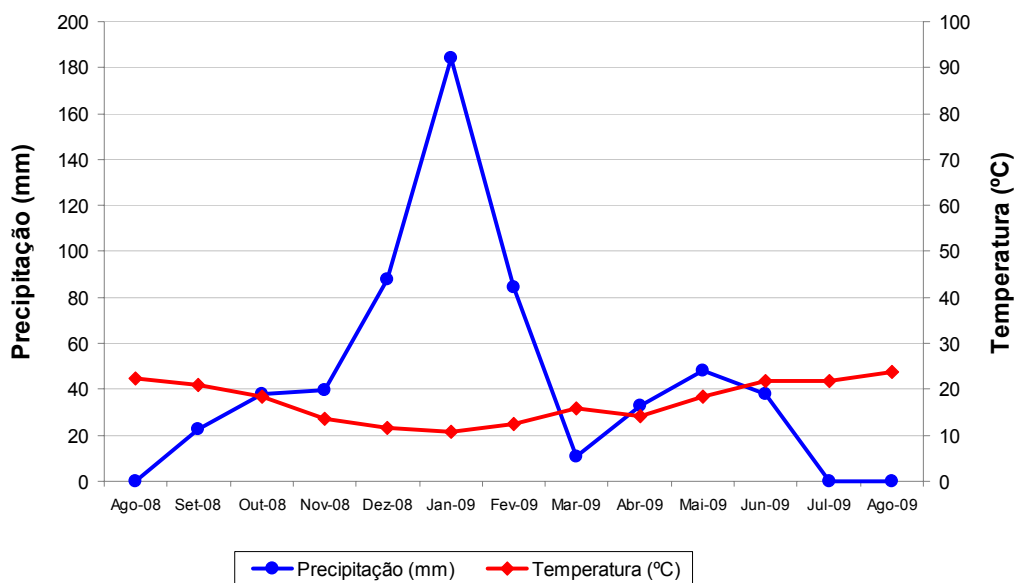


Figura 10. Diagrama ombrotérmico de Gausson. Médias do período entre Agosto de 2008 e Agosto de 2009.

2.2. Culturas estudadas

Neste trabalho estudaram-se doze culturas pertencentes a três grupos de plantas específicos, nomeadamente, florestais de crescimento rápido, herbáceas de produtividade elevada e oleaginosas.

No grupo das plantas florestais de crescimento rápido estudaram-se sete culturas: eucalipto, freixo, amieiro, e duas de choupo e salgueiro. As três culturas herbáceas de produtividade elevada examinadas foram o *Miscanthus x giganteus*, o capim-elefante e a cana-do-reino. As duas restantes culturas analisadas pertenciam ao grupo das plantas oleaginosas e foram a *Jatropha curcas* e o linho.

Com excepção das plantas de *Miscanthus x giganteus*, que já estavam instaladas desde Maio de 2003, e do linho, que foi instalado em Novembro de 2009, todas as outras culturas foram instaladas no período entre Maio e Outubro de 2008, antes de se iniciar o trabalho prático.

2.3. Cronologia do trabalho prático

A parte experimental do trabalho desenvolveu-se durante um período de 10 meses, entre Outubro de 2008 e Agosto de 2009 (Figura 11).

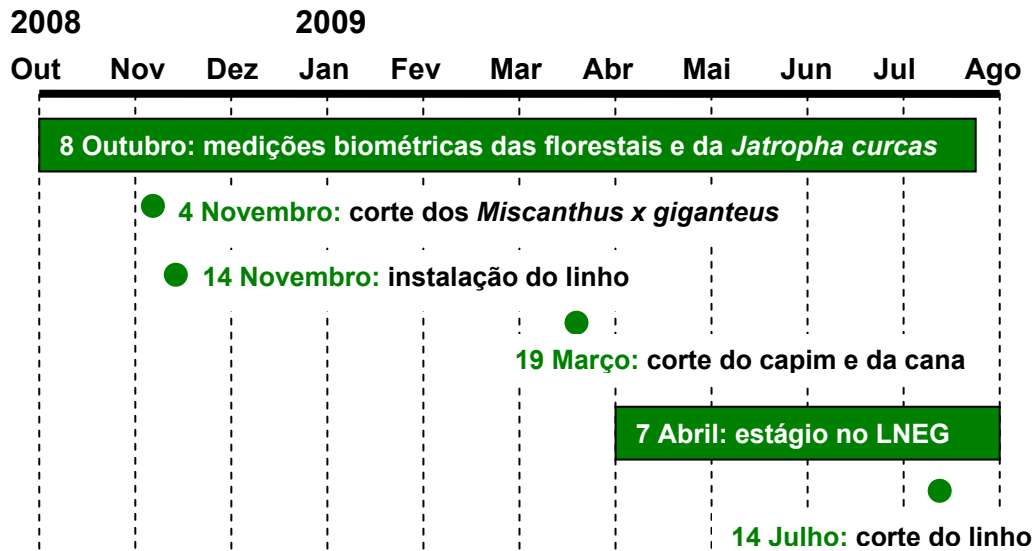


Figura 11. Cronograma das principais actividades desenvolvidas ao longo deste trabalho.

As medições iniciaram-se no dia 8 de Outubro, uma semana após a inauguração do BIOENERGISA. Paralelamente às medições biométricas (diâmetro e alturas) das culturas florestais de crescimento rápido e da *Jatropha curcas*, que se realizaram até Julho, efectuaram-se outras experiências com diferentes culturas.

No dia 4 de Novembro realizou-se o corte da planta *Miscanthus x giganteus*, seguida das determinações laboratoriais. No dia 14 de Novembro procedeu-se à instalação de uma nova cultura oleaginosa, o linho. O corte e as determinações laboratoriais desta cultura efectuaram-se a 14 de Julho, após sete meses de crescimento.

O corte das culturas de capim-elefante e da cana realizou-se no dia 19 de Março, assim como as respectivas determinações laboratoriais.

No dia 7 de Abril iniciou-se um estágio de quatro meses no Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), cuja principal actividade desenvolvida foi o acompanhamento de ensaios de gasificação em leito fluidizado.

2.4. Procedimentos

No BIOENERGISA (Figura 12) foi acompanhado o crescimento de sete culturas florestais de crescimento rápido – salgueiro-negro, salgueiro-branco, eucalipto, choupo (clones Unal e Beaupré), freixo e amieiro – e da *Jatropha*, medindo-se as alturas e diâmetros da base e à altura do peito (1,30 m), com recurso a uma vara extensível de seis metros de comprimento e de uma suta

(Figura 13), respectivamente. Sempre que se verificaram alturas inferiores a 1,20 m, estas não foram consideradas pois essa era a altura mínima da vara. À data do início das medições, encontravam-se nesta situação a totalidade das árvores de amieiro, 33 de freixo, 14 de salgueiro-negro e 2 de salgueiro-branco.

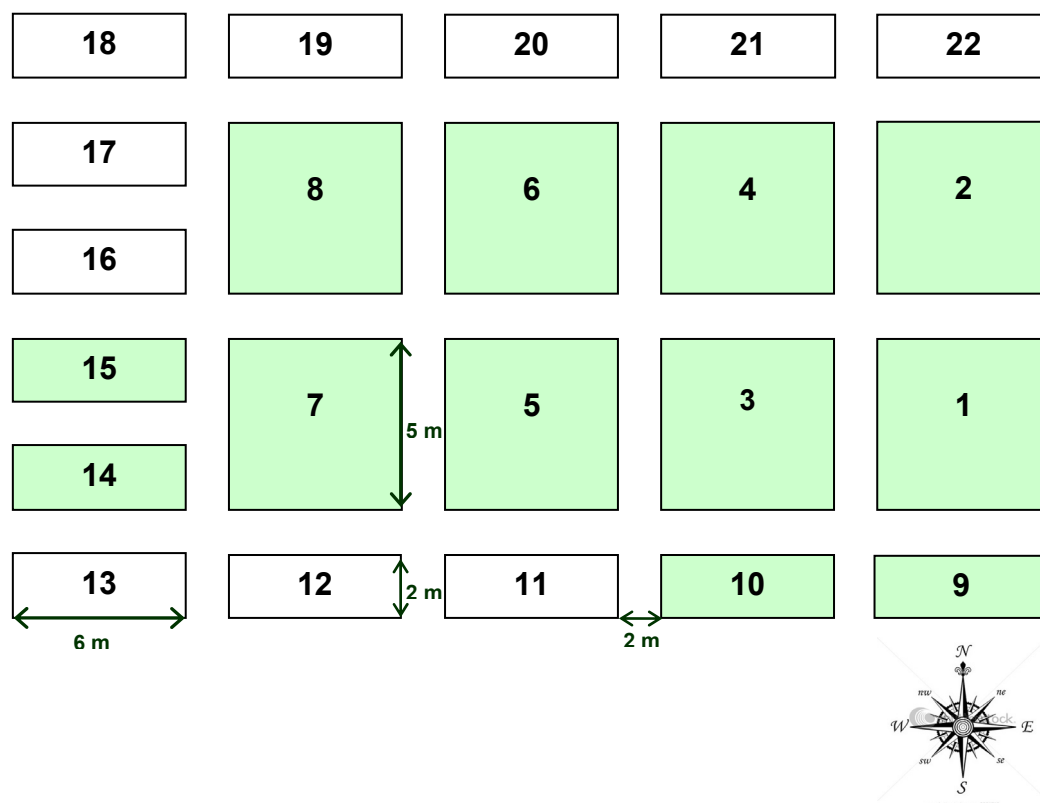


Figura 12. Localização das plantas estudadas no BIOENERGISA: 1 - Salgueiro-negro; 2 - Eucalipto; 3 - Choupo (clone Unal); 4 - Freixo; 5 - Choupo (clone Beaupré); 6 - Salgueiro-branco; 7 - Purgueira; 8 - Amieiro; 9 - Capim-elefante; 10 - Cana-do-reino; 14 - Linho (sementes); 15 - Linho (caules).

Na medição das árvores com altura superior a 6 metros foi utilizada uma vara extensível de 13 m. Estas culturas foram instaladas nos talhões numerados de 1 a 8, em seis linhas com sete plantas em cada uma, segundo um compasso de 1x1 m, perfazendo um total de 42 plantas em cada talhão, com exceção do talhão 7 onde se encontravam apenas 16 plantas da espécie *Jatropha curcas* segundo um compasso de 1,5x1,5 m.

A frequência das medições, que começou por ser semanal, alterou-se durante o período Outono/Inverno para três semanas devido à falta de crescimento evidenciado nas medições anteriores e finalmente em Maio, passou a ser quinzenal, pela comprovação de que esta frequência seria suficiente para acompanhar o crescimento das culturas. No entanto, devido às condições climatéricas nem sempre foi possível cumprir a calendarização prevista.

O procedimento adoptado para o corte da planta *Miscanthus x giganteus* e posteriores determinações foi o seguido por Simões (2006) e Vasconcellos (2008), que realizaram ensaios com

várias modalidades de corte em anos anteriores. Esta cultura é a mais antiga das estudadas neste trabalho, tendo sido instalada no dia 14 de Maio de 2003. Neste trabalho, em que se pretendia determinar a produtividade de biomassa dos *Miscanthus*, escolheram-se cinco locais aleatoriamente dentro das modalidades designadas por estes autores: quatro pertenciam à modalidade “1 corte” (1C9R, 1C7R, 1C4R, 1C3R) e um à modalidade “2 cortes” (2C7R), como se pode ver na Figura 14.



Figura 13. Vara extensível e suta utilizadas para medir as alturas e diâmetros das plantas.

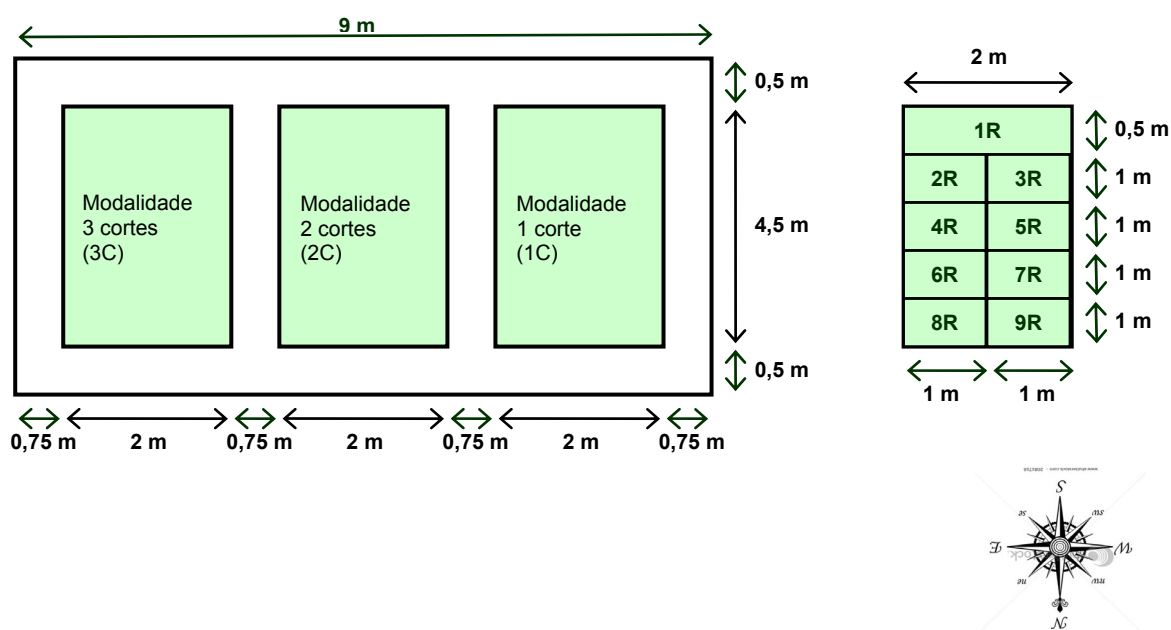


Figura 14. Esquema do ensaio de *Miscanthus x giganteus* e pormenor das repetições marcadas dentro de cada modalidade.

Fonte: Simões (2006) e Vasconcelos (2008)

Nas instalações de apoio do campo de ensaios da Secção de Agricultura pesaram-se os cinco fardos recolhidos e escolheram-se três plantas representativas de cada um, procedendo-se à

medição do comprimento total de cada planta e respectivo racimo, assim como a determinação do número de folhas presentes, distinguindo quais as verdes e as senescentes. Depois desta operação, as plantas foram separadas nos seus componentes: caules, folhas e racimos. Em seguida, as amostras foram levadas para o Laboratório de Tecnologia dos Produtos Florestais (LTPF) para a determinação da humidade e do seu peso seco.

As culturas de capim-elefante e cana-do-reino instaladas no BIOENERGISA em 5 valas, separadas por 50 cm, nos talhões 9 e 10, respectivamente (Figura 12), foram pesadas prontamente após ter sido realizado o corte. Seguidamente, escolheram-se algumas plantas representativas de ambas as culturas e, já no LTPF, as amostras foram pesadas, determinando-se assim os seus pesos húmidos e colocadas numa estufa a 100°C até peso constante para determinação da humidade.

A cultura do linho foi instalada em 5 valas, espaçadas por 50 cm, nos talhões 14 e 15 (Figura 12) do BIOENERGISA. No primeiro instalou-se uma variedade para produção de sementes e no segundo para produção de fibra (caules). Após o corte, constituíram-se dois fardos com cada uma das variedades de linho que foram pesados nas instalações do Departamento de Engenharia Florestal. Seguidamente reuniram-se amostras de caules e cápsulas de sementes de 100 plantas de cada fardo que foram levados à estufa a 100°C até peso constante, de modo a determinar o peso seco das amostras. Adicionalmente recolheram-se também 200 sementes de cada variedade de linho para que fosse determinado o peso médio de 100 sementes.

2.5. Humidade

A humidade, em base seca, foi determinada de acordo com o método descrito por Carvalho (1996). Por definição, o teor de água de uma amostra é o quociente, expresso em percentagem, da massa de água que se evapora do material por secagem a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até valor constante, pela massa da amostra depois de completamente seca, ou seja:

$$H (\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100, \text{ em que}$$

m_1 = massa da amostra húmida, expressa em gramas;

m_2 = massa da amostra anidra, expressa em gramas.

Relativamente às plantas de *Miscanthus*, os teores de humidade correspondentes à planta inteira foram obtidos através de uma média ponderada com os teores de cada componente, tendo em conta a proporção de cada componente na constituição da planta.

2.6. Biomassa de eucalipto por componentes

A biomassa de lenho, casca, folhas e ramos de eucalipto foi determinada com as equações desenvolvidas por Cortiçada *et al.* (2005). Na Tabela 8 apresentam-se as equações da biomassa de cada componente, em que h é a altura total da árvore em metros. A biomassa total (w_t), expressa em

kg (base seca), foi calculada através do somatório dos resultados obtidos na determinação da biomassa dos vários componentes das árvores de eucalipto, isto é, $w_t = (w_w + w_b + w_l + w_{br})$.

Tabela 8. Equações para determinação da biomassa de eucalipto por componentes (kg), desenvolvidas por Cortiçada et al. (2005)

Componente	Equação
Lenho	$w_w = 0,0341h^{2,0330}, h (m)$
Casca	$w_b = 0,0125h^{1,8590}, h (m)$
Folhas	$w_l = 0,1323h^{1,6206}, h (m)$
Ramos	$w_{br} = 0,0316h^{2,5169}, h (m)$
Total	$w_t = (w_w + w_b + w_l + w_{br})$

Fonte: Cortiçada et al. (2005)

2.7. Estágio no Laboratório Nacional de Energia e Geologia

O estágio no LNEG, iniciado no dia 7 de Abril de 2009 e com a duração de quatro meses, foi realizado com o objectivo principal de promover uma experiência não académica de actividades vocacionadas para processos e tecnologias industriais de conversão de biomassa em energia.

Nesse sentido, além da consulta de diversa bibliografia disponibilizada no LNEG, as principais actividades efectuadas foram o acompanhamento da preparação e realização de ensaios de gasificação em leito fluidizado e participação nas determinações laboratoriais de alguns compostos presentes no gás produzido.

Todavia, por força da confidencialidade exigida aos projectos desenvolvidos pelo LNEG, os dados dos ensaios não poderão ser divulgados neste trabalho. Assim, em alternativa abordar-se-á o modo como as condições operatórias de gasificação, nomeadamente a temperatura, a razão de equivalência (RE) e a razão vapor/biomassa, influenciam a quantidade e a composição final de gás produzido, assim como a conversão de energia (CE) e o poder calorífico superior (PCS).

2.7.1. Descrição da instalação

A instalação de gasificação (Figura 15) era constituída pelas seguintes unidades: sistema de alimentação de combustível, gasificador de leito fluidizado, sistema de produção de vapor, unidade de arrefecimento e limpeza do gás e unidade de medição e análise do gás combustível produzido.

O sistema de alimentação de combustível era constituído por um silo e um alimentador de parafuso sem-fim, podendo a velocidade de alimentação de biomassa ser regulada. No silo, o combustível era revolvido continuamente por um misturador, com o objectivo de evitar a sua pirólise no tubo de alimentação. Para prevenir o entupimento deste tubo, caso a pirólise não fosse evitada,

um permutador de calor fornecia água que, por sua vez, arrefecia o tubo de alimentação. Dentro deste, foi ainda colocado um caudal de azoto com a finalidade de evitar o refluxo de gás.

O sistema de produção de vapor consiste num gerador e numa bomba que lhe fornece a água através de um caudal que pode ser controlado. O vapor de água ou o ar, ou uma mistura de ambos, servia, em simultâneo, como agente de gasificação e de fluidização.

A unidade de arrefecimento e limpeza do gás produzido é constituído por um ciclone, que se encontra na parte superior do gasificador, e por um conjunto em vidro. Deste fazem parte um condensador, um colector de líquidos e dois filtros de lã de vidro. A primeira limpeza é efectuada pelo ciclone que retém as partículas arrastadas pelo gás, enquanto os alcatrões e líquidos condensáveis são depois recolhidos no conjunto em vidro. Para que a condensação se realize convenientemente, é fornecida água fria ao condensador em contra-corrente com o gás de gasificação.



Figura 15. Instalação experimental de gasificação em leito fluidizado. 1 – gasificador de leito fluidizado; 2 – sistema de alimentação de combustível; 3 – unidade de arrefecimento e limpeza do gás; 4 – unidade de medição e análise do gás; 5 – sistema de produção de vapor.

O volume de gás produzido foi medido num contador, disposto logo após os filtros de lã de vidro, enquanto a análise de monóxido e dióxido de carbono presentes no gás se efectuou num analisador próprio. No entanto, para uma determinação mais completa da composição do gás, este é recolhido num saco de amostragem, sendo posteriormente analisado num cromatógrafo. Porém, antes do gás de gasificação ser inserido nesta unidade é filtrado em filtros de papel para o limpar de alcatrões e partículas mais finas que tenham passado pelo sistema de limpeza.

A unidade principal desta instalação é o gasificador de leito fluidizado. Este consistia num reactor, que operava à pressão atmosférica, e que se encontrava dentro de um forno, alimentado a

electricidade, que servia de fonte de calor para as reacções de gasificação. Em diversos pontos do reactor era possível medir a temperatura e pressão.

2.7.2. Procedimento dos ensaios

Os ensaios realizaram-se diariamente, excepto quando as condições da instalação não o permitiram, com a duração aproximada de 45 minutos.

Antes da realização dos ensaios propriamente ditos, o reactor era aquecido até à temperatura desejada, ao mesmo tempo que se introduzia no reactor um caudal de ar para uniformizar as temperaturas e fluidizar o leito, que era constituído por 1 kg de areia.

Uma quantidade determinada de combustível era então introduzida no silo que, neste caso, foram várias misturas de biomassa e plástico (polietileno). Estes, para serem utilizados como combustível, tiveram de ser previamente preparados para a granulometria desejada.

O período de aquecimento demorava cerca de 1 hora em que eram efectuadas diversas calibrações e verificações, além de se pesar e preparar o condensador, frasco colector e filtros de lã de vidro. Ao atingir a temperatura de 500°C ligava-se o gerador de vapor e a respectiva bomba de alimentação.

Quando a temperatura do leito se encontrava estabilizada dava-se início à alimentação do combustível e, conseqüentemente, ao ensaio. Durante a realização do ensaio, e com intervalos de tempo pré-determinados, eram lidos os valores dos diversos analisadores e contadores. A recolha de amostra de gás era efectuada algum tempo após o início do ensaio, quando as concentrações de CO e CO₂ estabilizavam.

No final, e já depois da alimentação do combustível ter sido parada, eram novamente lidos os valores anteriormente referidos. Também eram pesados os filtros de lã de vidro e recolhidos o líquido condensado, o resíduo contido no ciclone, o combustível que restava no silo e o resíduo carbonoso formado no leito, e levados para determinações laboratoriais.

3. Resultados

As medições biométricas efectuadas às espécies florestais e à purgueira (*Jatropha curcas*) serviram para avaliar o crescimento das plantas em relação às alturas e diâmetros. No eucalipto foram ainda estimadas, por recurso a equações biométricas, a sua biomassa total e a sua partição por componentes. Nas plantas herbáceas de elevado crescimento biomássico (*Miscanthus x giganteus*, capim-elefante e cana-do-reino) e no linho (de semente e de fibra) foram determinadas as humidades na altura da colheita e estimadas as suas produtividades por hectare.

3.1. Plantas florestais de crescimento rápido

Salix spp.

Os salgueiros-negros não evidenciaram crescimento significativo até Fevereiro de 2009 devido a estarem em período vegetativo (Figura 16), altura em que começaram a crescer em altura e aumentar o diâmetro de uma forma relativamente constante até ao fim das medições, em Julho de 2009. Nessa data, a altura e diâmetros cruzados médios foram de 221 cm e 1,8 cm, respectivamente, correspondendo a um crescimento médio de 5,2 cm/mês em altura e 0,08 cm/mês em diâmetro.

Os salgueiros-brancos cresceram apenas 0,04 cm/mês em altura e 0,02 cm/mês em diâmetro, alcançando 204 cm e 1,1 cm de altura e diâmetro, respectivamente (Figura 16). Durante o período das medições observou-se que o conjunto dos salgueiros-brancos apresentou um aspecto ressequido, o que permitiu que se quebrassem os topos de duas plantas nos dias 6 e 20 de Maio de 2009. Registou-se ainda uma mortalidade de 6 plantas desta espécie ao longo do período das medições.

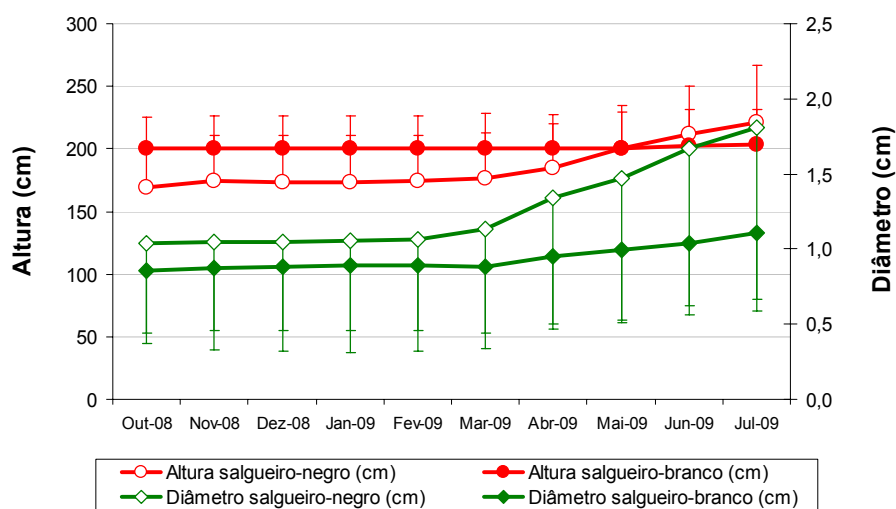


Figura 16. Evolução da altura e do diâmetro das árvores das espécies salgueiro-negro (*Salix atrovirens*) e salgueiro-branco (*Salix salviifolia* ssp *australis*) entre Outubro de 2008 e Julho de 2009 (médias mensais \pm desvio padrão).

Freixo

Ao longo do período das medições algumas árvores de freixo foram ultrapassando a altura mínima necessária para que fosse registada a altura, embora no fim deste período 12 árvores ainda não tivessem atingido a altura necessária. Com o início da Primavera (em Março) as árvores começaram a crescer e, em Julho, atingiram uma altura média de 172 cm, o que representou um crescimento de 3,3 cm/mês desde o início das medições (Figura 17). Já os diâmetros registaram um ligeiro aumento em Novembro de 2009, verificando-se depois uma quase total ausência de crescimento até Abril, para depois aumentarem de forma significativa até Julho. O crescimento registado foi 0,07 cm/mês em diâmetro atingindo um valor médio máximo de 2 cm (Figura 17).

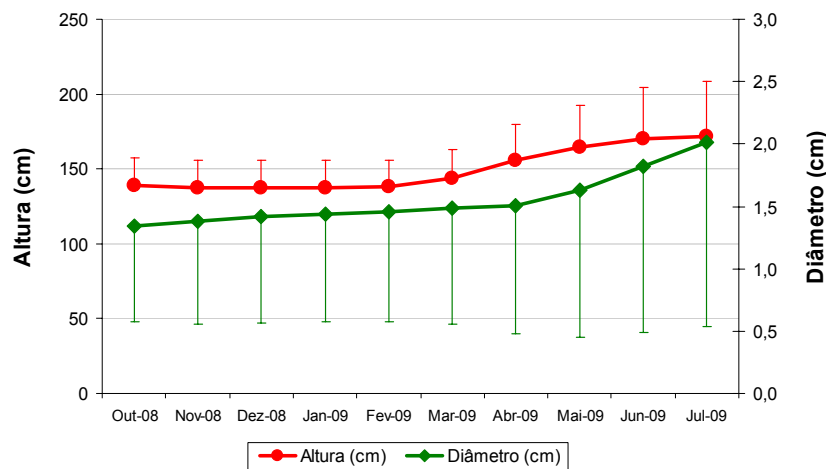


Figura 17. Evolução da altura e do diâmetro das árvores da espécie *Fraxinus angustifolia* entre Outubro de 2008 e Julho de 2009 (médias mensais \pm desvio padrão).

Amieiro

Ao longo dos 10 meses em que se efectuaram medições, entre Outubro de 2008 e Julho de 2009, as alturas de todos os amieiros, com excepção de uma única árvore que ultrapassou essa altura no mês de Julho, mantiveram-se abaixo dos 120 cm, o que impossibilitou o registo das mesmas, sendo apenas possível analisar a evolução dos seus diâmetros (Figura 18). Após um pequeno aumento inicial, os diâmetros mantiveram-se inalteráveis até Março de 2009 devido ao período vegetativo, altura em que o crescimento se tornou mais evidente. Em Julho, último mês das medições, registou-se um aumento expressivo comparativamente a Junho. No final, o registo médio dos diâmetros máximos foi 1,2 cm, o que significou um crescimento de 0,4 cm desde o início das medições. A mortalidade nesta espécie foi 26%, a mais elevada das espécies florestais, e ocorreu sobretudo no período Primavera/Verão.

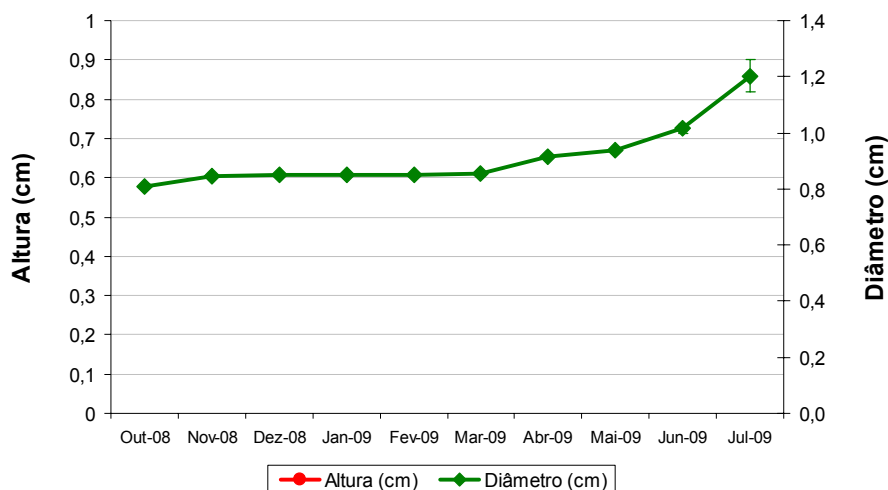


Figura 18. Evolução do diâmetro das árvores da espécie *Alnus glutinosa* entre Outubro de 2008 e Julho de 2009 (médias mensais \pm desvio padrão).

Populus trichocarpa x Populus deltoides

O crescimento das alturas e diâmetros dos clones Unal e Beaupré (Figura 19) instalados no campo BIOENERGISA mantiveram-se estagnados até Março de 2009 por se encontrarem em período vegetativo. Com o início da Primavera os dois parâmetros em análise passaram a registar um aumento constante, sobretudo no caso dos diâmetros, até Julho de 2009. Os registos médios finais para o clone Unal foram de 428 cm de altura e 3,8 cm de diâmetro, o que constituiu um crescimento de 15,5 cm/mês e 0,17 cm/mês, respectivamente.

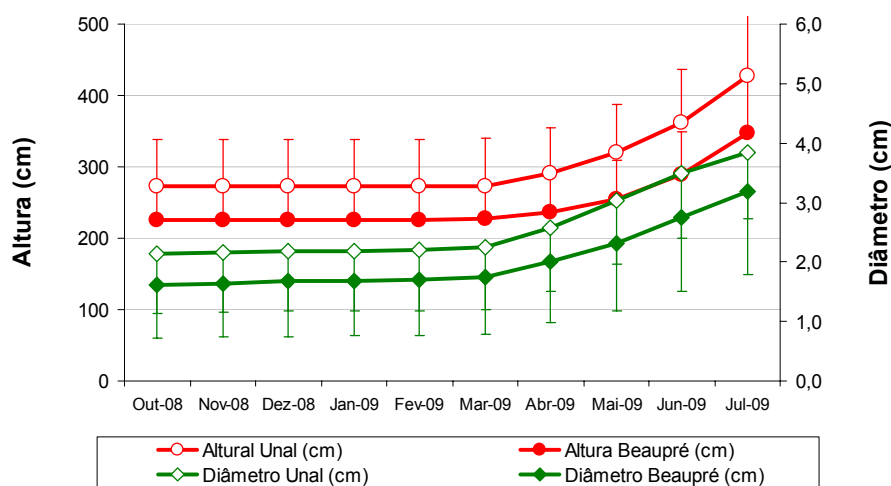


Figura 19. Evolução da altura e do diâmetro das árvores da espécie *Populus trichocarpa x Populus deltoides* (clones Unal e Beaupré) entre Outubro de 2008 e Julho de 2009 (médias mensais \pm desvio padrão).

Já no caso do clone Beaupré, o tamanho médio atingido foi 346 cm de altura e 3,2 cm de diâmetro, observando-se um crescimento de 12,1 cm/mês em altura e 0,16 cm/mês em diâmetro (Figura 19).

Apesar da evolução de crescimento semelhante ao longo dos 10 meses de medições, as árvores do clone Beaupré foram invariavelmente inferiores, em média, relativamente às do clone Unal, quer em altura quer em diâmetros.

Eucalipto

O crescimento dos eucaliptos (Figura 20) foi relativamente constante ao longo do período das medições, verificando-se apenas um ligeiro abrandamento no aumento das alturas médias entre Dezembro de 2008 e Fevereiro de 2009. A altura média máxima registada foi de 559 cm, correspondendo a um crescimento de 32,3 cm/mês, enquanto os diâmetros médios cresceram 2,6 cm/mês, atingindo os 4,8 cm.

A biomassa total do eucalipto aumentou ao longo do período em que decorreu o trabalho experimental, verificando-se, no entanto, uma aceleração a partir de Março de 2009 (Figura 21). Ao fim de 10 meses a biomassa média total produzida pelos eucaliptos foi 2 t/ha, aproximadamente, valor que equivale a seis vezes a quantidade produzida em Outubro de 2008, o mês em que se iniciaram as medições.

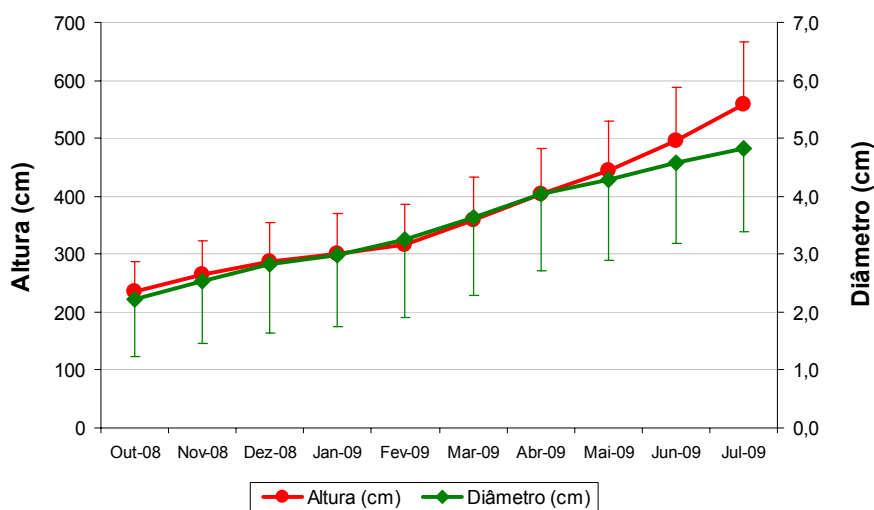


Figura 20. Evolução da altura e do diâmetro das árvores da espécie *Eucalyptus globulus* entre Outubro de 2008 e Julho de 2009 (médias mensais \pm desvio padrão).

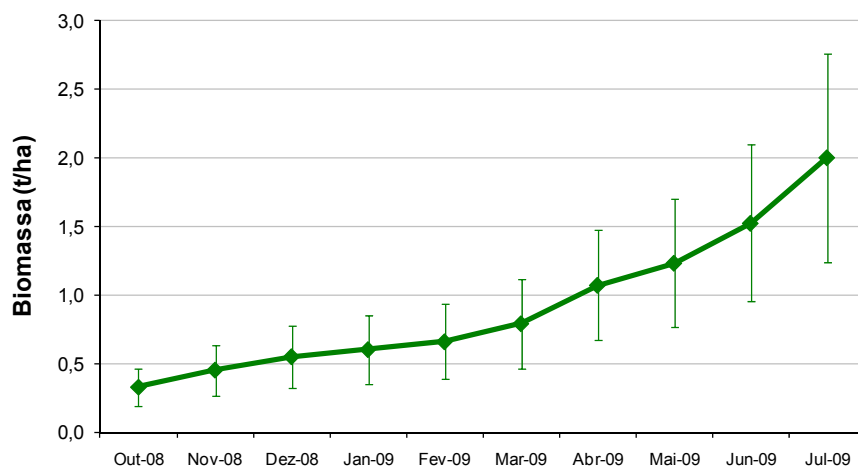


Figura 21. Evolução da biomassa total de *Eucalyptus globulus* entre Outubro de 2008 e Julho de 2009 (médias mensais \pm desvio padrão).

A evolução da biomassa, estimada com o recurso às equações biométricas dos eucaliptos (Figura 22), variou acentuadamente entre componentes. (lenho, casca, folhas e ramos). A acumulação menos acentuada de biomassa ocorreu na fracção da casca (BC), que apenas aumentou 8,3 kg/ha/mês, atingindo 0,1 t/ha de biomassa. A produção mensal de biomassa do lenho (BL) aumentou rapidamente a partir do período da Primavera/Verão (Figura 22), atingindo 0,4 t/ha em Julho de 2009, correspondente a um crescimento de 32,7 kg/ha/mês.

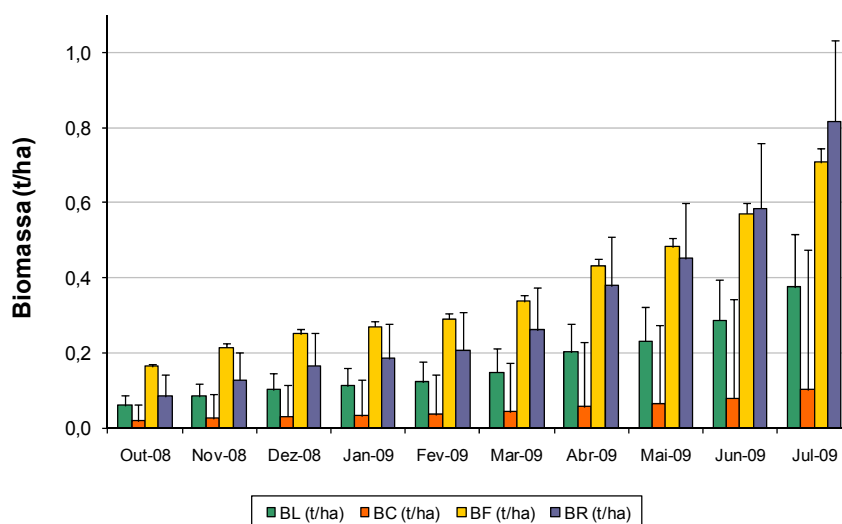


Figura 22. Evolução da biomassa de *Eucalyptus globulus* por componentes, entre Outubro de 2008 e Julho de 2009 (médias mensais \pm desvio padrão).

A evolução da biomassa das folhas (BF) mostrou aumentos progressivamente menores desde Outubro de 2008 até ao início da Primavera (Março), altura em que o aumento da biomassa se tornou

mais acentuado. Este padrão de crescimento manteve-se até ao último mês das medições, determinando-se nessa altura, uma produção de 0,7 t/ha de biomassa, o que equivaleu a um aumento de 56,0 kg/ha/mês. Quanto aos ramos (BR), foram o componente com o aumento mais pronunciado de biomassa (Figura 22). Tal como se verificou com a BL e a BF, os acréscimos mensais desta foram decrescendo até Março de 2008, para depois, no período Primavera/Verão aumentarem mais expressivamente, culminando com um acréscimo evidente em Julho de 2009. Nesta data, a estimativa de biomassa produzida foi de 0,8 t/ha, o que correspondeu a um crescimento de 76,7 kg/ha/mês.

3.2. Plantas herbáceas de elevada produtividade

Os resultados com as plantas herbáceas foram obtidos depois dos cortes dos *Miscanthus* no dia 4 de Novembro de 2008 e do capim-elefante e da cana-do-reino no dia 19 de Março de 2009. O capim-elefante e os *Miscanthus* revelaram um potencial produtivo de matéria seca idêntico, com 9,5 t/ha e a cana-do-reino com apenas 6,0 t/ha. Em relação aos teores de humidade na altura do corte (base seca), o capim-elefante e a cana-do-reino revelaram teores superiores ao *Miscanthus*. Os resultados obtidos foram 463,3% para o capim-elefante, 131,7% para a cana-do-reino e 83,4% (média) para o *Miscanthus*.

Capim-elefante e cana-do-reino

Na Tabela 9 encontram-se os teores de humidade, em base seca, e o rendimento em biomassa, após o corte e seca em estufa a 100°C, do capim-elefante e da cana-do-reino, determinados laboratorialmente.

Os teores de humidade obtidos na altura da colheita mostram que a quantidade de água presente na biomassa das duas espécies era muito elevada (superior à quantidade de matéria seca). A cana-do-reino apresentou, na altura do corte, uma humidade de 131,7%, enquanto o capim-elefante, registou um teor de humidade de 463,3%.

Tabela 9. Teores de humidade em base seca (%) e produtividades (t/ha) de capim-elefante e cana-do-reino

Cultura	Humidade (base seca)	Produtividade estimada (t/ha)	
		(humidade a corte)	(base seca)
Capim-elefante	463,3	43,8	9,5
Cana-do-reino	131,7	7,9	6,0

As produtividades de biomassa estimadas foram de 7,9 t/ha (base na humidade na altura do corte) e de 6,0 t matéria seca/ha para a cana-do-reino, e de 43,8 t/ha (base na humidade na altura do corte) e 9,5 t matéria seca/ha para o capim-elefante.

Miscanthus x giganteus

A percentagem de caules de *Miscanthus* variou entre 87% (fardo 1C3R) e 89% (fardos 2C7R, 1C7R e 1C4R), enquanto a das folhas variou entre 9% (fardos 1C7R e 1C4R) e 11% (1C3R). A percentagem de racimos existentes nos fardos foi insignificante, variando entre 1% e 2% (Figura 23).

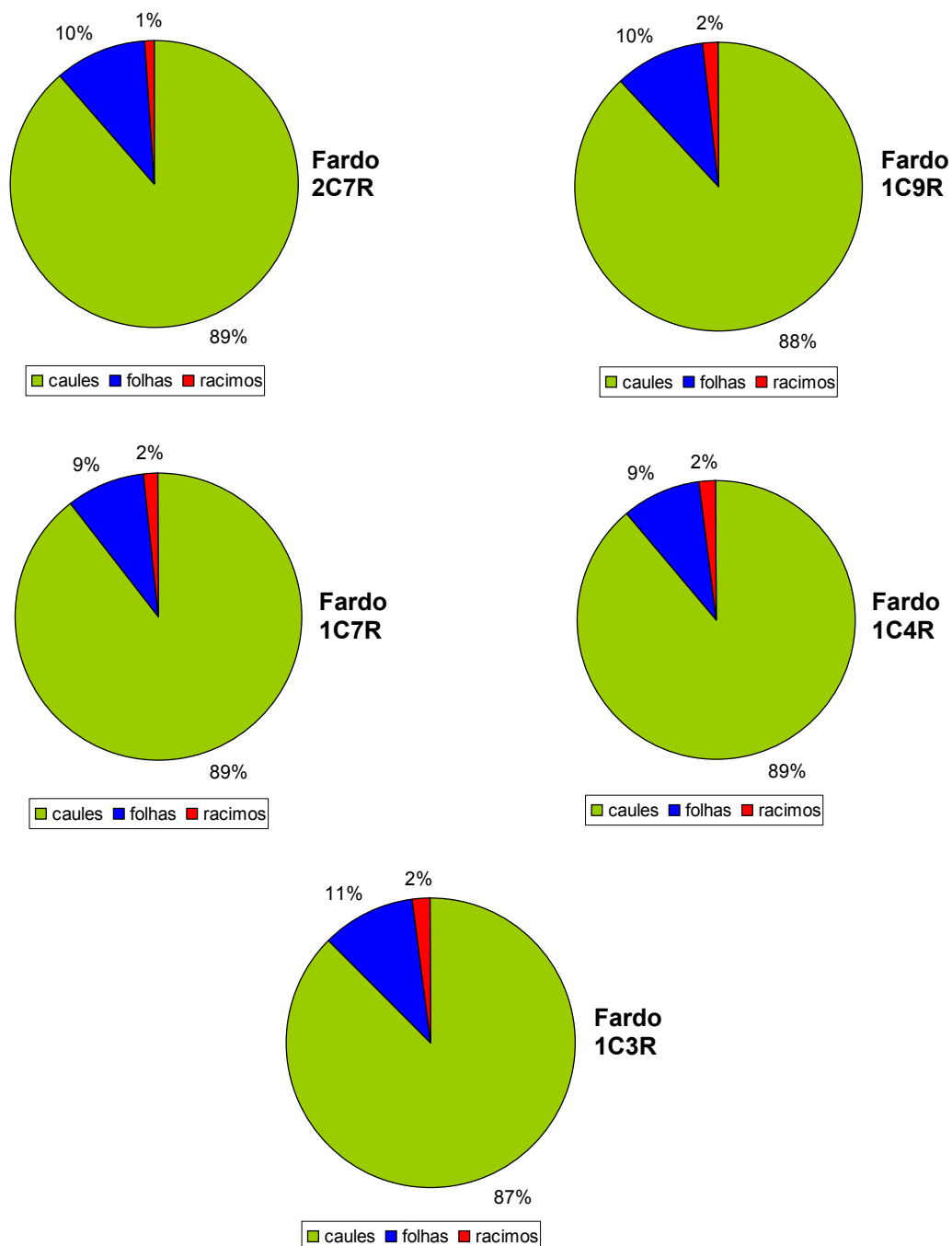


Figura 23. Composição (caules, folhas e racimos) dos fardos de *Miscanthus x giganteus* colhidos no dia 4 de Novembro de 2008.

Os teores de humidade foram mais elevados nos caules, enquanto as folhas foram o componente mais seco (Tabela 10). A única exceção foi o fardo 2C7R, onde os teores de humidade das folhas e dos racimos se revelaram praticamente idênticos.

As produtividades estimadas, num exercício teórico análogo ao realizado nos anos anteriores para os *Miscanthus*, foram bastante divergentes entre fardos (Tabela 11), variando entre 28,5 t/ha (fardo 1C9R) e 90,8 t/ha (fardo 1C7R) após o corte e, após a biomassa ter sido seca a 100°C até peso constante, 6,7 t/ha (fardo 1C9R) e 10,4 t/ha (fardo 1C7R). Com base no conjunto dos fardos, as produtividades médias estimadas foram 61,4 t/ha após o corte e 9,5 t matéria seca/ha.

Tabela 10. Teores de humidade (%) de cada fardo de *Miscanthus x giganteus*, determinados a 100°C (base seca)

	2C7R	1C9R	1C7R	1C4R	1C3R	Média ± desvio padrão
Caules	93,8	83,4	95,4	92,1	89,7	90,9 ± 4,7
Folhas	19,9	25,6	30,6	28,3	21,9	25,3 ± 4,4
Racimos	19,5	30,1	33,3	29,7	32,3	29,0 ± 5,5
Planta	85,3	76,6	88,5	85,1	81,5	83,4 ± 4,5

Em relação aos comprimentos das plantas representativas de cada fardo (Figura 24) o maior comprimento foi registado na planta 2 do fardo 2C7R com 356 cm de comprimento total e 325 cm de comprimento útil (sem racimo). O menor comprimento foi registado na planta 1 do fardo 1C3R com 256 cm de comprimento total e 235 cm de comprimento útil (sem racimo). A média dos comprimentos foi 313 cm e 286 cm de altura total e útil, respectivamente.

Tabela 11. Produtividades de *Miscanthus x giganteus* (t/ha)

Fardo	Produtividade (humidade a corte)	Produtividade (base seca)
2C7R	67,6	9,9
1C9R	28,5	6,7
1C7R	90,8	10,4
1C4R	51,3	7,7
1C3R	68,9	12,7
Produtividade média ± desvio padrão	61,4 ± 23,1	9,5 ± 2,4

Relativamente ao número de folhas presentes em cada planta representativa, as plantas 2 do fardo 1C3R, 1 do fardo 1C9R e 1 do fardo 2C7R continham mais folhas, com 14 cada uma (Figura 25). As plantas 1 dos fardos 1C4R e 1C7R, foram as que apresentaram menos folhas com 5 cada. A média de folhas em cada planta foi 10 ± 3 desvio padrão. Todas as folhas recolhidas das plantas representativas dos cinco fardos estavam senescentes.

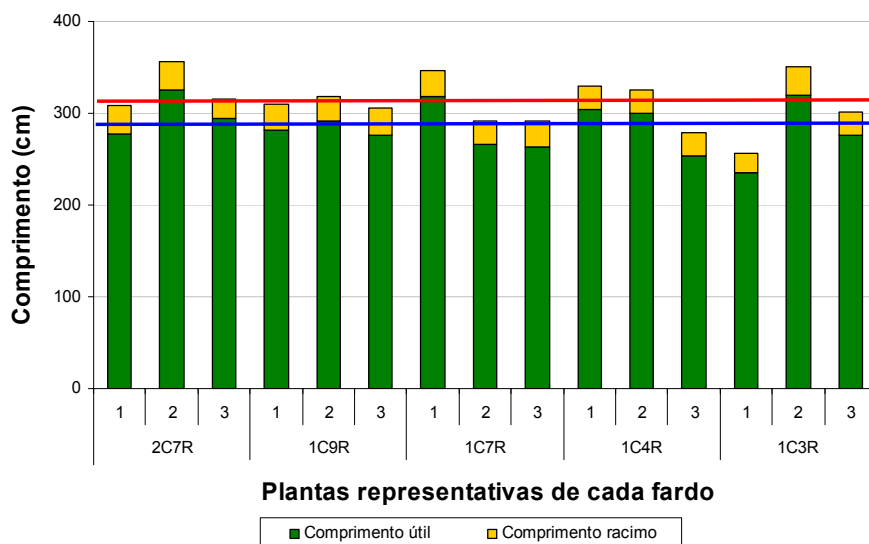


Figura 24. Comprimentos total, útil e dos racimos das plantas representativas de cada fardo de *Miscanthus x giganteus* colhido no dia 4 de Novembro de 2008.

Linha vermelha: média dos comprimentos totais. Linha azul: média dos comprimentos úteis

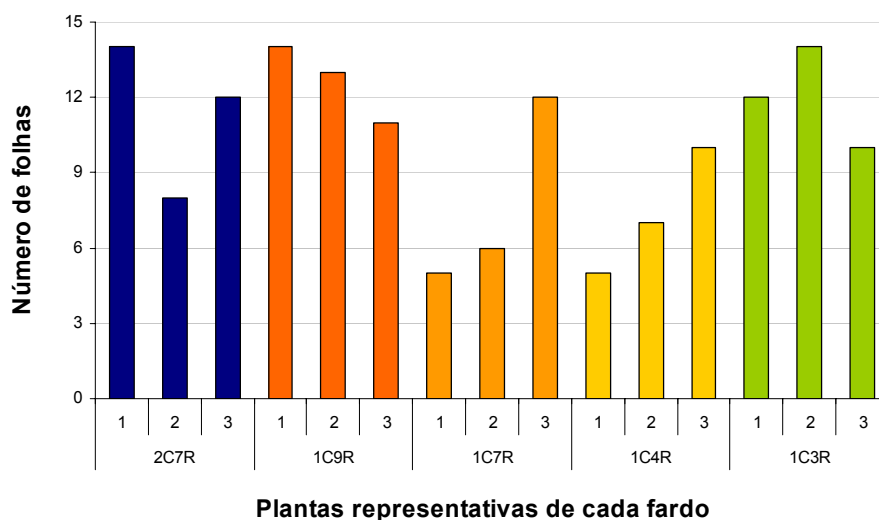


Figura 25. Número de folhas das plantas representativas de *Miscanthus x giganteus* em cada fardo colhido no dia 4 de Novembro de 2008.

3.3. Plantas oleaginosas

Linho

As duas variedades de linho, para produção de fibra e de sementes, foram instaladas no dia 14 de Novembro de 2008 e colhidas no dia 14 de Julho de 2009. As plantas da variedade para produção de fibra apresentaram na sua composição 54% de caules e 46% de cápsulas, enquanto a composição exibida pelas plantas da variedade para produção de sementes foi 47% caules e 53%

cápsulas (Figura 26), ou seja, a variedade para produção de fibra mostrou ser constituída principalmente por caules e a variedade para produção de sementes por cápsulas.

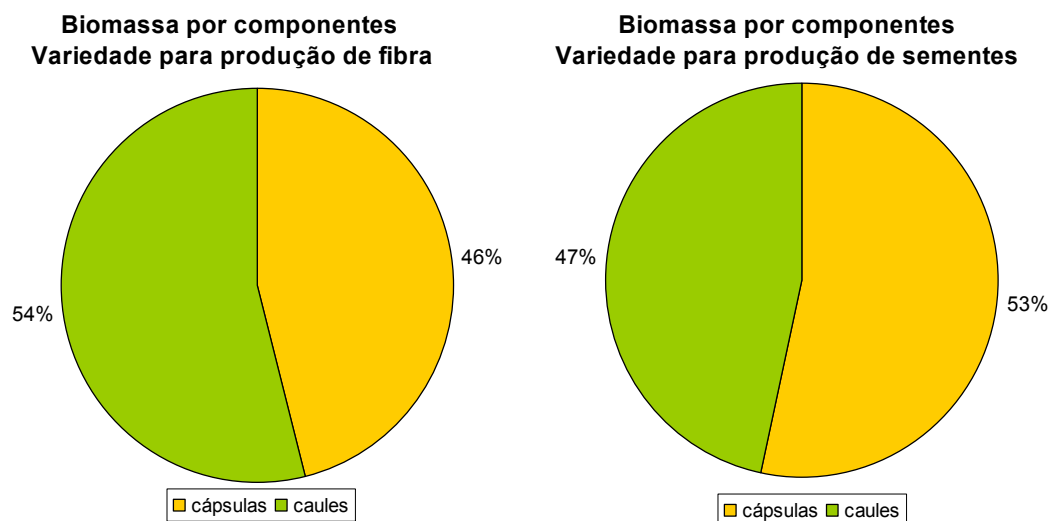


Figura 26. Composição (cápsulas e caules) das plantas de linho das duas variedades estudadas (%).

Os valores estimados para a produção de biomassa das duas variedades de linho podem ser comparados na Tabela 12. No caso da produtividade após a colheita, determinada com base na humidade na altura do corte, os valores obtidos foram 2,8 t/ha e 3,2 t/ha para as variedades de produção de fibra e de sementes, respectivamente. Por outro lado, as produções de biomassa determinadas em base seca foram 2,2 t matéria seca/ha e 2,7 t matéria seca/ha para as variedades de produção de fibra e de sementes, respectivamente.

Tabela 12. Produtividade de *Linum usitatissimum* (t/ha)

Variedades	Produtividade (humidade a corte)	Produtividade (base seca)
Produção de fibra	2,8	2,2
Produção de sementes	3,2	2,7

Os teores de humidade das duas variedades de linho foram calculados para a planta inteira e para os seus componentes, caules e cápsulas (Tabela 13). Em ambas as variedades de linho os caules apresentaram teores de humidade superior às cápsulas, ainda que a diferença seja mais evidente no caso da variedade para produção de fibra. Considerando a planta inteira, o teor de humidade do linho colhido da variedade para produção de fibra mostrou ser superior que o apresentado pelo da variedade para produção de sementes. Os valores obtidos foram 21,0% para o primeiro e 16,9% para o segundo (Tabela 13).

Tabela 13. Teores de humidade em base seca (%) de *Linum usitatissimum*

Componente	Produção de fibra	Produção de sementes
Cápsulas	12,7	13,0
Caules	27,9	21,2
Plantas	21,0	16,9

O peso médio de 100 sementes de cada variedade de linho mostrou que as sementes da variedade de linho para produção de sementes são quase duas vezes mais pesadas do que as da variedade para produção de fibra (Tabela 14). Os pesos médios obtidos foram, respectivamente, 1,06 g e 0,57 g.

Tabela 14. Peso de 100 sementes de linho (g)

	Plantas para produção de fibra	Plantas para produção de sementes
Amostra A	0,54	1,05
Amostra B	0,60	1,06
Peso médio	0,57	1,06

Jatropha curcas

As medições da *Jatropha* resumiram-se aos diâmetros (Figura 27) pois nenhuma das 16 plantas atingiu os 1,20 metros necessários de altura mínima. A média dos diâmetros aumentou 0,03 cm/mês, após o que se registou apenas um pequeno acréscimo até ao fim do ano, atingindo um diâmetro médio máximo de 3,7 cm. A última medição efectuada ocorreu no dia 7 de Janeiro de 2009, pois na data prevista da medição seguinte, dia 11 de Fevereiro de 2009, todas as plantas estavam mortas apresentando sinais de queimaduras pelo frio.

O período imediatamente após a última medição, no dia 7 de Janeiro de 2009, coincidiu com condições climáticas favoráveis à formação de geada no local do ensaio, como se pode confirmar pela Figura 28, que mostra a evolução da temperatura mínima na relva durante o mês de Janeiro. A temperatura ao nível do solo revelou-se, entre os dias 8 e 12 de Janeiro de 2009, consideravelmente negativa, com um mínimo absoluto de -10°C no dia 9. Depois deste período, por duas vezes, a temperatura mínima na relva voltou a apresentar-se negativa com os valores de -2,9°C e -2,5°C nos dias 14 e 17, respectivamente.

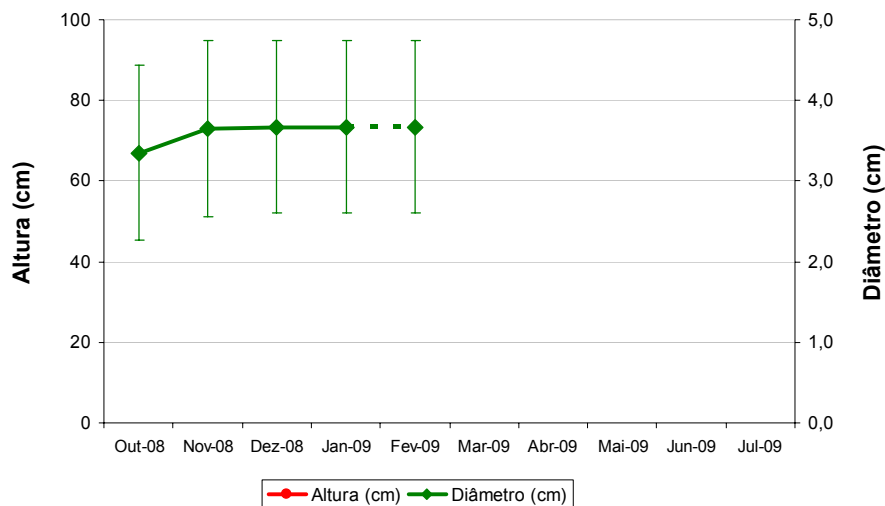


Figura 27. Evolução do diâmetro das plantas de *Jatropha curcas* entre Outubro de 2008 e Janeiro de 2009 (médias mensais \pm desvio padrão).

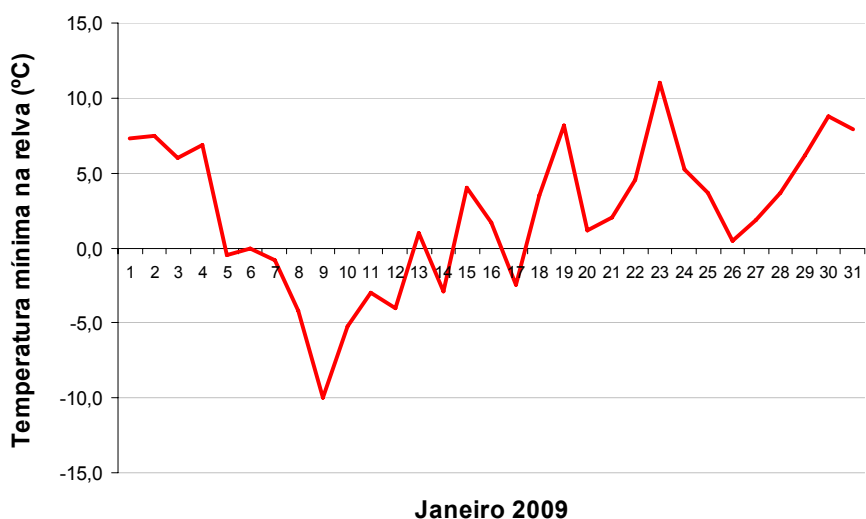


Figura 28. Evolução da temperatura mínima na relva ao longo do mês de Janeiro de 2009.

3.4. Efeito das condições operatórias de gasificação

Devido à impossibilidade de recolha de dados durante o estágio, por força da confidencialidade exigida aos projectos desenvolvidos pelo LNEG, não serão apresentados resultados relativos aos ensaios realizados. Em alternativa são expostas as tendências da variação das condições operatórias de gasificação sobre a composição e produção do gás, o poder calorífico superior e a conversão de energia.

Temperatura

A observação da composição do gás produzido com o aumento da temperatura evidencia um aumento substancial de H_2 , enquanto as outras espécies presentes no gás (CO , CO_2 , CH_4 e diversos hidrocarbonetos) diminuem a sua concentração (Figura 29). Verifica-se, no entanto, que a concentração de CO atinge um mínimo aproximadamente aos $850^\circ C$ e depois aumenta ligeiramente até aos $900^\circ C$.

Em relação aos principais parâmetros de gasificação, com o aumento da temperatura, a quantidade de gás produzido aumentou enquanto o poder calorífico superior diminuiu (Figura 29). No entanto, verifica-se o aumento da conversão de energia.

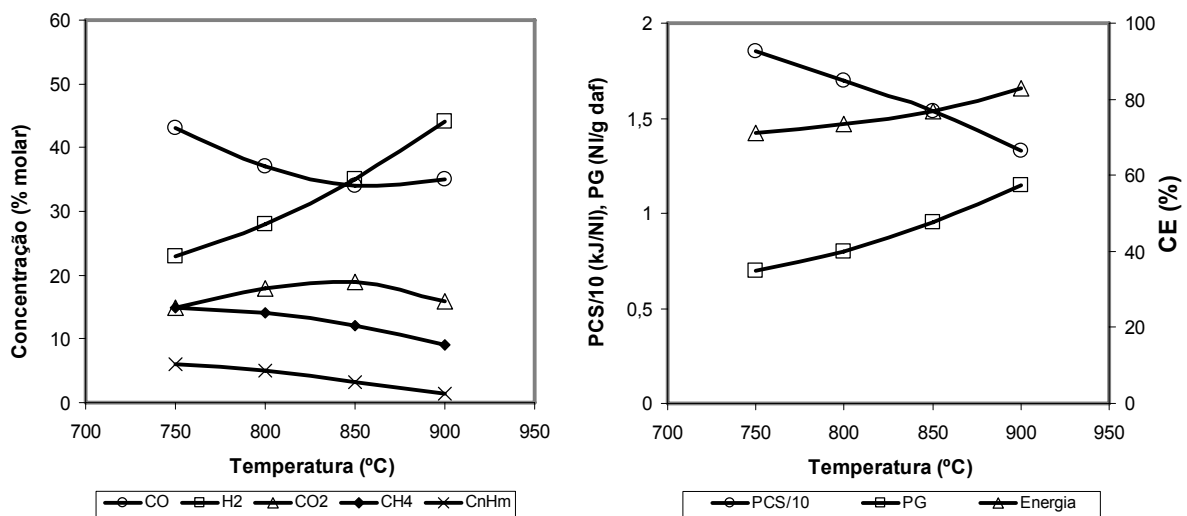


Figura 29. Efeito da variação da temperatura na composição do gás produzido (esquerda) e nos parâmetros de gasificação (direita).

Razão de Equivalência

O aumento da Razão de Equivalência (RE) resulta numa diminuição da quantidade de H_2 produzida e um aumento da quantidade de CO_2 . Em relação ao CO e aos hidrocarbonetos, a RE não conduziu a alterações destas espécies na composição do gás produzido (Figura 30).

No que diz respeito aos principais parâmetros de gasificação (Figura 30), o aumento da RE conduz a uma maior quantidade de gás produzido, contudo, o seu poder calorífico superior será muito menor, verificando-se também uma diminuição da conversão de energia com o aumento da RE.

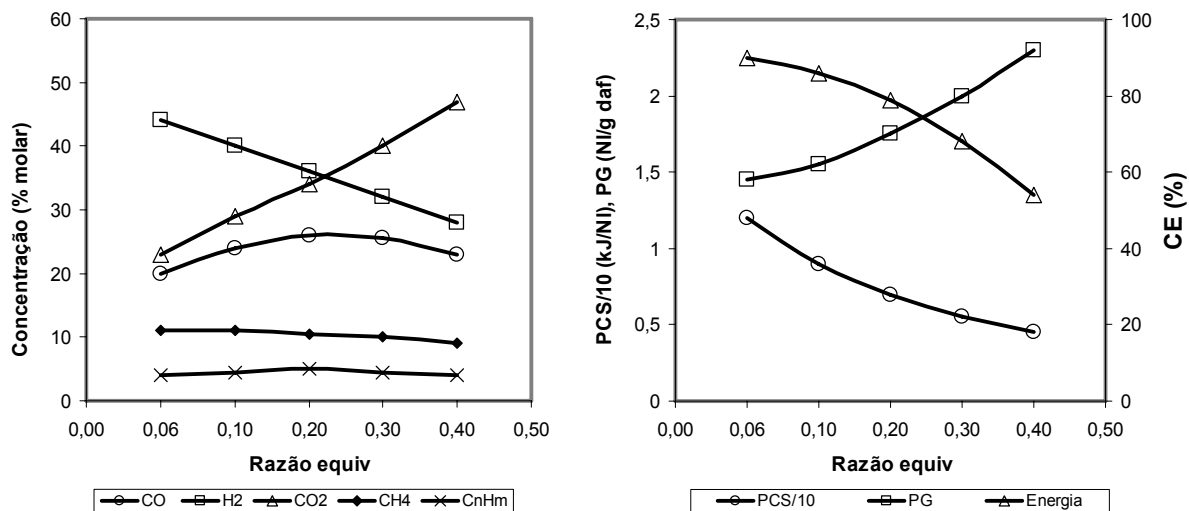


Figura 30. Efeito da variação da Razão de Equivalência composição do gás produzido (esquerda) e nos parâmetros de gasificação (direita).

Razão vapor/biomassa

O aumento do caudal de vapor e, conseqüentemente, da razão vapor/biomassa, resulta no aumento das quantidades de H₂ e CO₂, enquanto a quantidade de CO diminui. Em relação ao CH₄ e aos hidrocarbonetos, não se verificam alterações com o aumento do caudal de vapor (Figura 31).

Os parâmetros de gasificação são influenciados pela razão vapor/biomassa (Figura 31). Um aumento do caudal de vapor conduz a um pequeno aumento do poder calorífico superior do gás produzido. No entanto, os principais parâmetros de gasificação aumentam apenas ligeiramente até valores de razão vapor/biomassa de cerca de 0,6, não se verificando alterações significativas além deste valor.

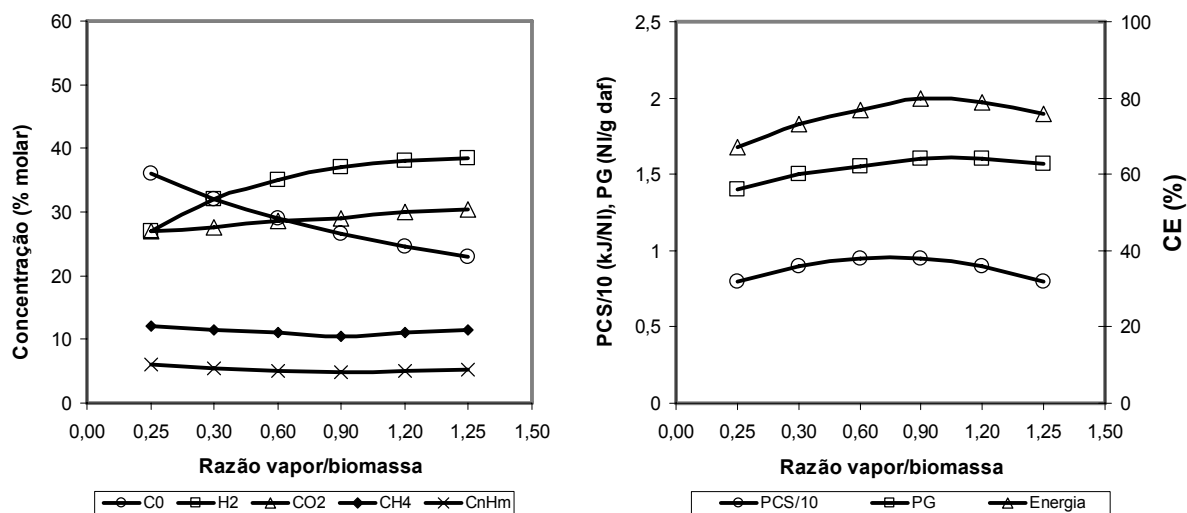


Figura 31. Efeito da variação da razão vapor/biomassa na composição do gás produzido (esquerda) e nos parâmetros de gasificação (direita).

4. Discussão

Devido à pequena densidade populacional dos talhões estudados, as plantas instaladas nos seus limites não foram excluídas dos resultados, como é habitual fazer-se para anular o efeito da bordadura. No entanto, este facto promoveu uma maior variabilidade dos resultados, principalmente nas espécies florestais, devido ao menor desenvolvimento das plantas da bordadura. Os resultados obtidos para a espécie *Miscanthus x giganteus*, quando comparados com os resultados apresentados por Simões (2006) e Vasconcellos (2008), alcançados em ensaios de anos anteriores, reportam-se apenas à modalidade conduzida em “um único corte”.

4.1. Plantas florestais de crescimento rápido

A entrada no período vegetativo das árvores caducifólias pouco tempo depois do início das medições é responsável pela falta de crescimento demonstrado nos meses antecedentes ao início da Primavera. Também o facto de os aspersores de rega se encontrarem no corredor central, entre os talhões, estimulou um maior desenvolvimento das árvores mais próximas, que assim barraram o acesso à água das árvores mais afastadas, prejudicando-as no seu crescimento.

Apesar do bom desenvolvimento observado nos choupos (*Populus spp.*), o clone Unal revelou um crescimento em altura e diâmetro superior ao clone Beaupré. Os dois clones foram instalados em talhões adjacentes pelo que as condições climáticas, nomeadamente a exposição solar e ao vento, foram semelhantes. No que diz respeito à rega, as condições em que esta foi efectuada também não divergiu entre os respectivos talhões, pelo que as desigualdades de crescimento resultaram de diferenças intrínsecas entre os dois clones.

Pelas razões enunciadas, os dois clones estudados neste trabalho demonstram um elevado potencial produtivo (Figura 32), devido ao rápido crescimento demonstrado, o que permite equacionar a exploração comercial destas espécies, seja como matéria-prima para os mercados tradicionais de produtos florestais, seja como combustível para a produção de energia. Singh (1998) aponta como valores confirmados por diversos autores de produções anuais de *P. deltoides* entre 6 a 22 t/ha/ano sob diversas condições ambientais.



Figura 32. Evolução do crescimento dos choupos entre 11-Jul-08 (A) e 7-Mai-09 (B).

As duas espécies de salgueiro (*Salix* spp.) estudadas revelaram diferentes evoluções de crescimento, quer em altura quer em diâmetro. Enquanto os salgueiros-negros iniciaram o seu desenvolvimento após a Primavera, os salgueiros-brancos demonstraram apenas um crescimento residual em diâmetro. Durante as medições, a generalidade das árvores de salgueiro-branco evidenciaram uma aparência ressequida, que resultou mesmo na morte de seis árvores. A explicação pode passar pela excessiva exposição ao vento norte, uma vez que não existia nenhuma barreira de protecção contra o vento. Em relação a questões climáticas nada mais há a destacar, pelo que outras explicações serão a fraca adaptabilidade ao solo da Tapada da Ajuda, ou a necessidade de melhores condições hídricas ou de fertilização.

Assim, enquanto os salgueiros-negros perspectivam ter potencial como espécie com interesse comercial, devido ao rápido crescimento evidenciado, os salgueiros-brancos, sem mais estudos complementares, são uma espécie a excluir da exploração comercial. No entanto, Abegbidi *et al.* (2001) obtiveram produções anuais de biomassa com clones de salgueiro entre 15 a 22 t/ha à custa de uma boa fertilização e irrigação. Acrescentam ainda que, devido às elevadas necessidades em nutrientes, a exploração desta cultura tem potencial para ser usada com sucesso como sorvedouro de nutrientes perdidos por escoamento nas explorações agrícolas. Por outro lado, Tahvanainen & Rytkönen (1999) alcançaram produções anuais de biomassa de cerca de 10 t/ha no Sul da Finlândia com clones de *S. viminalis*. No entanto, referem que os clones desta espécie de salgueiro são vulneráveis às primeiras geadas de Outono, o que torna a sua plantação possível apenas em certos locais.

Os resultados obtidos com as árvores do freixo mostram que o seu crescimento já era reduzido, antes da queda das folhas no período Outono/Inverno, com muitas árvores a chegarem a essa época do ano com altura inferior a 120 cm. Após o início da Primavera o crescimento em altura foi tímido, provavelmente devido a um certo efeito de diluição das baixas estaturas das árvores, enquanto os diâmetros revelaram um crescimento mais vigoroso. Nesta espécie, talvez devido ao menor grau de desenvolvimento apresentado, relativamente à maioria das outras espécies florestais, foi mais evidente o efeito da barreira física das árvores mais próximas dos aspersores de rega.

Pelo que foi descrito, talvez seja prematuro dizer que esta espécie não apresenta potencial produtivo adequado à exploração comercial da sua biomassa, todavia ficou comprovado que o crescimento desta espécie é mais lento que o observado nas outras espécies. Porém, alguns estudos agronómicos complementares são aconselhados, para determinar se a fertilização foi um factor limitante no desenvolvimento dos freixos.

Das espécies florestais estudadas, os amieiros foram os que revelaram menor grau de desenvolvimento, tendo sido apenas possível acompanhar a evolução dos diâmetros. Durante o período das medições a altura de todas as árvores foi inferior a 120 cm, contudo, após o início da Primavera as árvores mais próximas dos aspersores de rega mostraram um crescimento bastante rápido, aproximando-se da altura mínima de 120 cm no fim de Julho. Ainda assim, registou-se uma elevada mortalidade das árvores mais afastadas dos aspersores de rega, com 11 amieiros a não sobreviverem. De facto, a localização do seu talhão, o mais distante das espécies estudadas

relativamente aos aspersores, pode ser a justificação para o menor crescimento desta espécie na fase inicial do seu desenvolvimento e para a elevada mortalidade registada.

De qualquer modo, o rápido crescimento observado, após o início da Primavera, das árvores que sobreviveram faz antever um elevado potencial de produção de biomassa. Num estudo efectuado em solos agrícolas abandonados, Prégent & Camiré (1985) obtiveram produções anuais de biomassa até 4 t/ha.

No que diz respeito à evolução do crescimento em altura dos eucaliptos, a observação dos resultados demonstra que foi bastante rápido e contínuo (Figura 33), registando-se apenas um ligeiro abrandamento da altura média entre os meses de Dezembro de 2008 e Fevereiro de 2009. Os dados meteorológicos recolhidos confirmam que foi nesse período que se registaram as temperaturas mais baixas de toda a temporada de medições. Em relação ao aumento do diâmetro médio, observou-se que foi mais regular que o da altura, até ao mês Abril, quando esta atingiu os 4 m. A partir daí o desenvolvimento do diâmetro médio não foi tão significativo como anteriormente. Estas observações confirmam as afirmações de Soares *et al.* (2007) de que as espécies de eucaliptos combinam produções de biomassa elevadas e precocidade, desenvolvendo-se durante todo o ano, ao contrário de outras espécies florestais, apesar de apresentarem limitações de crescimento no Inverno.



Figura 33. Evolução do crescimento dos eucaliptos entre 11-Jul-08 (A), 27-Fev-09 (B) e 7-Mai-09 (C).

Relativamente às determinações das biomassas dos componentes das árvores de eucalipto efectuadas, as equações desenvolvidas por Cortiçada *et al.* (2005), utilizadas neste trabalho, são indicadas para árvores com altura inferior a 2 metros. Para alturas superiores devem usar-se as desenvolvidas por António *et al.* (2007), no entanto, as equações apresentadas por Cortiçada *et al.*

(2005) revelaram-se mais correctas na determinação das biomassas de eucalipto com altura superior a 2 metros. Uma hipótese que pode ser avançada para explicar esta aparente incoerência é o facto das equações para determinação das biomassas dos componentes de eucalipto terem sido desenvolvidas para aplicação a povoamentos comerciais. Contudo, no presente trabalho foram aplicadas a um talhão com apenas 42 árvores. Esta circunstância pode justificar o melhor ajuste das equações desenvolvidas por Cortiçada *et al.* (2005) aos eucaliptos estudados.

Os resultados das determinações das biomassas dos componentes de eucalipto mostram que todas aumentaram durante o período de 10 meses considerado, embora a da casca tenha sido menos evidente que as restantes. Por outras palavras, a biomassa total de eucalipto aumentou sempre, verificando-se um crescimento mais enérgico após a Primavera. Ordenando por ordem crescente de biomassa produzida em 10 meses tem-se a casca com 0,1 t/ha, o lenho com 0,4 t/ha, as folhas com 0,7 t/ha e os ramos com 0,8 t/ha. A produtividade da biomassa aérea do eucalipto pode variar, aos 10 anos de idade, entre 10 a 18 t/ha/ano (Soares *et al.*, 2007). El Bassam (1996) refere valores de poder calorífico para os componentes de eucalipto de 18,94 MJ/kg lenho, de 16,46 MJ/kg casca, de 17,48 MJ/kg ramos e 18,03 MJ/kg folhas. Com base nestes valores, estimou-se o potencial energético dos eucaliptos estudados em $35,8 \times 10^3$ MJ/kg para o período de 10 meses de medições.

Refira-se ainda que a produtividade do eucalipto é elevada nas regiões de clima mediterrânico com Inverno suave, desde que a pluviosidade média se situe acima dos 700 mm, como no litoral português a norte do Tejo (Pereira, 2007). Em Portugal, foram registadas produtividades de 17,6 t/ha/ano na região Norte Litoral, 9,5 t/ha/ano na região Centro Litoral e 6,1 t/ha/ano na região do Vale do Tejo, devendo-se as diferenças de produtividade com a quantidade de pluviosidade anual. De modo geral, por cada 100 mm adicionais de pluviosidade anual a produtividade aumenta cerca de 0,9 t/ha/ano (Soares *et al.*, 2007). Também El Bassam (1996) refere que sob condições hídricas e de fertilização favoráveis a produção anual pode ser de cerca de 11 a 14 t matéria seca/ha.

Comparando as taxas de crescimento observadas durante os 10 meses das medições (Tabela 15), quer em altura quer em diâmetro, o eucalipto foi a espécie florestal que atingiu os valores mais elevados, seguindo-se os dois clones de choupo, Unal e Beaupré. Estas três plantas foram as que mais se destacaram, evidenciando um potencial produtivo susceptível de despertar o interesse comercial por parte dos produtores florestais. Os registos do desenvolvimento do salgueiro-negro e do freixo foram bastante inferiores em relação às espécies anteriores, enquanto o amieiro e o salgueiro-branco revelaram crescimentos sem expressão.

Cultura	Altura (cm/mês)	Diâmetro (cm/mês)
Eucalipto	32,3	0,26
Clone Unal	15,5	0,17
Clone Beaupré	12,1	0,16
Salgueiro-negro	5,2	0,08
Salgueiro-branco	0,4	0,02
Freixo	3,3	0,07
Amieiro	–	0,04

4.2. Plantas herbáceas de elevada produtividade

As plantas de *Miscanthus* estão instaladas na Tapada da Ajuda desde 2003 (Simões, 2006), correspondendo o corte efectuado em Novembro de 2008 no âmbito deste trabalho ao 5º ano de ensaios. Lewandowski *et al.* (2000) dizem que a estabilização da produção do *Miscanthus* ocorre entre o 3º e 5º ano após a instalação, o que aponta para que a estabilização já tenha sido atingida nos *Miscanthus* estudados. No entanto, a produção média de biomassa obtida, expressa em matéria seca, foi apenas 9,5 t/ha, sendo este resultado significativamente inferior aos referidos na literatura. Uma primeira explicação pode ter que ver com a forma como a determinação da produtividade se efectuou, neste trabalho calculada a 100°C, ao passo que quando o que se pretende estudar é o potencial para usos tipicamente agronómicos, determina-se entre 60 a 65°C.

Lewandowski *et al.* (2000) indicam como valor médio para o Sul de Portugal, e de maneira geral para todo o Sul da Europa, produções de 30 t matéria seca/ha, mas apenas com irrigação. Basch *et al.* (2002) alcançaram, na mesma altura do ano, produtividades crescentes até ao 3º ano de ensaios, quando obtiveram uma produção de 37,4 t matéria seca/ha. Já Mantineo *et al.* (2009) afirmam que a produtividade dos *M. x giganteus* pode atingir as 37 t matéria seca/ha em Outubro, período em que se verifica a máxima acumulação de matéria seca (Figura 34). Nos anos que antecederam este trabalho, Simões (2006) estimou a produtividade dos *Miscanthus* colhidos a 30 de Outubro em 42,3 t matéria seca/ha enquanto Vasconcellos (2008), na mesma data, registou uma diminuição de produção para apenas 34,2 t matéria seca/ha.

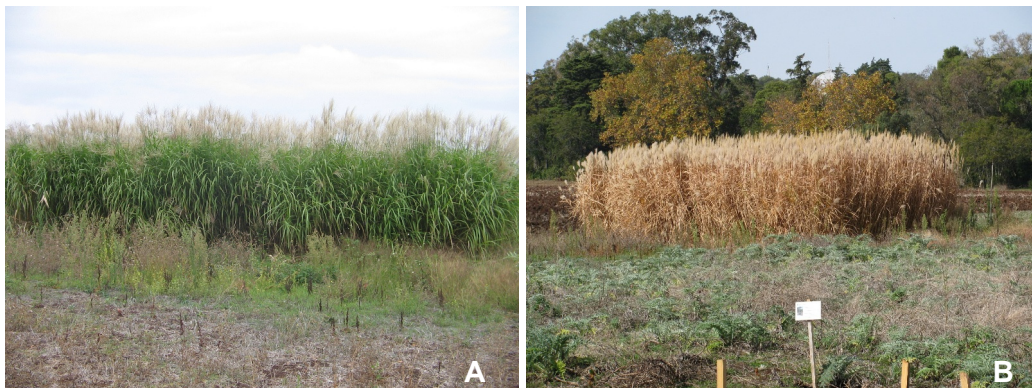


Figura 34. *Miscanthus* em 18-Set-08 (A) antes de entrar em senescência e depois, imediatamente antes do corte de 4-Nov-08 (B).

A baixa produção de biomassa obtida pode ser explicada pelo regime de sequeiro a que os *Miscanthus* foram sujeitos desde o corte anual de 2008, uma vez que anteriormente se encontravam em regime de regadio.

Relativamente aos teores de humidade, estes foram determinados em base húmida por Simões (2006) e Vasconcellos (2008) ao contrário do presente trabalho, em que foram estimados em base seca. Deste modo, apenas depois de convertidos para base seca podem ser comparados com o teor estimado neste trabalho. Assim, a conversão dos teores de humidade determinados por Simões

(2006) e Vasconcellos (2008) indica valores de 78,6% e 92,3%, respectivamente, o que confirma os 83,4% de humidade média estimados no presente trabalho.

Convém, no entanto, realçar que o teor de humidade obtido é demasiado elevado para o conveniente armazenamento e transporte dos *Miscanthus*, além de que, para conversão energética, a quantidade de água presente no material terá de ser forçosamente reduzida, pelo que será conveniente efectuar a colheita mais tarde para que as plantas percam a água sem ser necessário consumir energia na secagem. Caso não seja possível a secagem completa no campo, Lewandowski *et al.* (2000) aconselham a que se proceda a uma secagem adicional assim que se realizar a colheita se a humidade for superior a 25%.

Nos ensaios anteriores de Simões (2006) e Vasconcellos (2008), a composição das plantas obtida foi idêntica, registando-se que a fracção mais representativa era a correspondente ao caule com 79%, seguida das folhas com 18% e dos racimos com 3%. No presente trabalho, a composição média variou ligeiramente face às verificadas nos anos antecedentes, com 88% de caules, 10% de folhas e 2% de racimos. A explicação para esta diferença reside no facto de todas as folhas recolhidas este ano serem senescentes e de, provavelmente, algumas terem entretanto caído. A razão da senescência mais acentuada este ano pode ser uma consequência face ao corte mais tardio e ao regime de sequeiro imposto.

Em relação às alturas registadas nos anos anteriores, Simões (2006) indicou como altura média das plantas 324 cm e Vasconcellos (2008) registou 347 cm. A média obtida para este ano foi de 313 cm de altura, o que não suscita surpresa uma vez que as plantas não receberam a quantidade de água necessária ao seu normal desenvolvimento devido ao regime de sequeiro estabelecido.

No que diz respeito ao capim-elefante e à cana-do-reino, os teores de humidade obtidos na altura da colheita exibem elevada quantidade de água presente na biomassa das duas espécies, com 463% e 132%, respectivamente. Este facto é particularmente significativo no caso do capim-elefante todavia, em ambas as espécies a quantidade de água é superior à de matéria seca, facto que poderá originar problemas de armazenamento e processamento do material se a utilização pretendida for para fins energéticos.

A produção de biomassa estimada revelou-se mais expressiva por parte do capim-elefante com 9,5 t matéria seca/ha do que a da cana-do-reino, que apresentou uma produção de 6,0 t matéria seca/ha. Estes resultados não são impressionantes, se tivermos em conta a produtividade da cana-do-reino apontada por El Bassam (1996) que refere produções de 20 a 25 t matéria seca/ha, Mantineo *et al.* (2009) que menciona produções, por vezes, superiores a 40 t matéria seca/ha após o 2º ano ou Angelini *et al.* (2009) que indica produções de 38 t matéria seca/ha entre o 2º e o 12º ano.

Porém, os resultados obtidos reportam-se ao 1º ano de colheita e Angelini *et al.* (2009) afirmam que as produções de cana-do-reino são muito pobres nesse período, aumentando muito a produção no 2º ano, o que vem confirmar os resultados deste trabalho pois o crescimento observado após o corte foi muito rápido, como se pode verificar na Figura 35. Ainda assim, a produtividade obtida para a cana-do-reino foi pouco expressiva mesmo para primeira colheita o que pode ser explicado pelo ensombramento observado durante algumas horas do dia, quer para a cana-do-reino quer para o

capim-elefante. A razão para este acontecimento está relacionada com a localização dos talhões destas espécies junto a uma barreira de árvores bastante altas.

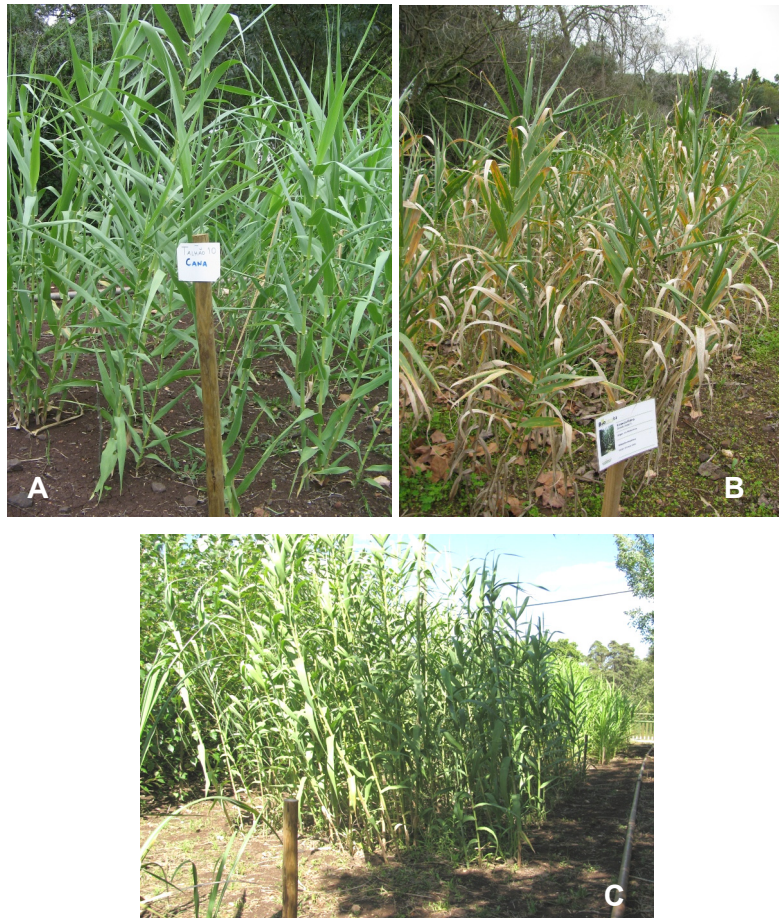


Figura 35. Cana-do-reino antes do corte, em 18-Set-08 (A) e 21-Jan-09 (B) e depois do corte, em 14-Jul-09 (C).

Apesar da produtividade superior (Figura 36), o teor de humidade exibido pelo capim-elefante coloca-o em desvantagem em relação à cana-do-reino, devido à necessidade imperiosa de secagem do material após a colheita, mesmo que o corte seja efectuado mais tarde para que perca água ainda no campo. Por outro lado, convém lembrar que a cana-do-reino é apontada como uma espécie exótica com comportamento invasor (Marchante & Marchante, 2007), pelo que a sua plantação implica cuidados especiais para evitar provocar danos aos ecossistemas adjacentes.

Em resumo, apesar de a cana-do-reino ter apresentado menor produtividade que as outras duas, o seu potencial é maior. De facto, o *Miscanthus* teve uma produtividade apenas ligeiramente superior à da cana-do-reino apesar de se encontrar no 5º ano de produção, enquanto a cana-do-reino e o capim-elefante se encontravam no 1º, comprovando os resultados obtidos por Mantineo *et al.* (2009) de maiores produtividades máximas da cana-do-reino do que de *Miscanthus* e de Lewandowski *et al.* (2000) de as grandes produções de *Miscanthus* exigirem irrigação.



Figura 36. Capim-elefante antes do corte, em 11-Jul-08 (A) e 27-Fev-09 (B) e depois do corte, em 14-Jul-09 (C).

4.3. Plantas oleaginosas

A distribuição da biomassa do linho pelos seus componentes demonstrou, como seria expectável, que o componente mais representativo de cada variedade estudada é o correspondente à utilização pretendida, com 54% de biomassa presente nos caules no caso da variedade para produção de fibra e 53% de biomassa estimada para a variedade para produção de sementes presente nas cápsulas de sementes.

O peso médio de 100 sementes de linho obtido para cada variedade permite concluir que, se a utilização pretendida for para fins energéticos, a variedade mais promissora é aquela para produção de sementes, pois, além das cápsulas corresponderem a uma maior percentagem de biomassa face aos caules, também as sementes são mais pesadas (aproximadamente o dobro do peso) assegurando, pelos menos teoricamente, maiores rendimentos em óleo.

Relativamente aos teores de humidade, calculados em base seca, os valores são admissíveis para um armazenamento e transporte sem perdas de material. Os resultados demonstram que a variedade para produção de fibra apresenta um teor superior em relação à variedade para produção de sementes, o que não é surpreendente se verificarmos que a água se encontra sobretudo nos caules, correspondendo à primeira variedade o maior peso biomássico em termos de caules.

No que diz respeito às produtividades estimadas, verificou-se que a produção de biomassa da variedade para produção de sementes superou em 0,5 t a variedade para produção de fibra, com

2,7 t matéria seca/ha. Se tivermos em conta as determinações correspondentes à proporção de cada componente no total biomássico das plantas de linho então, no caso da variedade para produção de caules, a produtividade deste componente foi de 1,2 t matéria seca/ha e, para a variedade para produção de sementes, a produção de biomassa relativa às cápsulas foi 1,4 t matéria seca/ha. Martínez-Perez *et al.* (2007) dizem que o linho apresenta produções médias que variam entre 4 a 12 t matéria seca/ha em climas temperados.

Cabral (2003) indica que as produções de linho variam conforme o clima e a fertilização, sendo as produções na UE, de modo geral, até cerca de 2 t/ha no caso da fibra e entre 6 a 9 t/ha para a palha. Kaul *et al.* (1996) citando diversos autores dizem que o linho atinge produções de sementes entre 1 a 3 t/ha, aproximadamente.

Tendo presente que, em Portugal, o linho é uma cultura em declínio devido à forte competição na indústria têxtil por outras culturas produtoras de fibra, como a do algodão (Cabral, 2003), então, a diversificação do seu uso pode ser um importante contributo para a sua revitalização. Nesse sentido a extracção de óleo para produção de biodiesel surge como utilização, e fonte de rendimento, alternativos desta cultura que já teve uma elevada importância social no nosso país.

Diversos estudos têm referido que a *Jatropha* é facilmente adaptável a diversas condições edafoclimáticas mas que, apesar de resistir a geadas fracas, não tolera geadas fortes (Andrade *et al.*, 2008; Kumar & Sharma, 2008; Maes *et al.*, 2009). Entre os dias 8 e 12 de Janeiro de 2009, a temperatura mínima junto à superfície do solo atingiu valores considerados letais para plantas jovens de *Jatropha* pois, de acordo com o estudo efectuado por Andrade *et al.* (2008), o limiar de resistência à geada pelas plantas jovens de *Jatropha* situa-se entre os -3°C e -4°C. Quando expostas a temperaturas de -3°C as plantas jovens de *Jatropha* conseguem recuperar totalmente dos efeitos da geada, todavia se a temperatura for de -4°C a taxa de mortalidade é de 60%. A partir de temperaturas de exposição inferiores aos -5°C a taxa de sobrevivência é nula. Os dados meteorológicos recolhidos mostram que nos dias 9 e 10 de Janeiro as temperaturas registadas foram -10°C e -5,2°C, respectivamente. Para reforçar a hipótese de que as 16 plantas de *Jatropha* instaladas no BIOENERGISA (Figura 37) morreram devido às temperaturas letais verificadas, refira-se que, também nos dias 8 e 12 de Janeiro, a temperatura esteve abaixo do limiar tolerável, registando -4°C. Estes resultados confirmam a percepção de Lourenço & Januário (2008) que referem que a susceptibilidade às geadas apresentada pela *Jatropha* impossibilita a sua persistência nas condições de clima mediterrânico que se verificam em Portugal Continental. No entanto, talvez seja precipitado afirmar que a exploração da *Jatropha* em Portugal Continental não é praticável. São necessários mais estudos genéticos para melhorar esta cultura do ponto de vista à resistência às geadas fortes ou, em alternativa, que se realizem ensaios com mecanismos de protecção às geadas mais fortes ou prolongadas.



Figura 37. Plantas de *Jatropha* em 22-Out-08 (A) antes e em 21-Fev-09 (B), depois da ocorrência de geada.

4.4. Variações da composição do gás e outros parâmetros de gasificação

A gama de temperaturas de gasificação em leito fluidizado encontra-se, geralmente, entre os 750°C e os 900°C. As razões apontadas por Franco (2000) para estes limites prendem-se com a elevada produção de alcatrões que se verifica para temperaturas inferiores a 750°C e a dificuldade de manutenção do processo, sobretudo com vapor, para temperaturas superiores a 900°C.

De acordo com Franco (1989), a razão de equivalência (RE), no caso da gasificação, poderá variar entre 0,2 e 0,4 e pode ser definida como o quociente entre a razão oxidante/combustível e a razão estequiométrica, em peso, ou seja:

$$RE = \frac{\text{oxidante} / \text{combustível}}{(\text{oxidante} / \text{combustível})_{\text{estequeométrico}}} \quad (\text{em peso})$$

A razão vapor/biomassa varia, usualmente, entre 0,4 e 0,9 pois para valores inferiores a 0,4 o caudal de biomassa é muito elevado face às dimensões do reactor enquanto para valores superiores a 0,9 o caudal de biomassa será muito reduzido, o que provoca problemas de controlo (Franco, 2000).

A variação das condições operatórias, sobretudo a temperatura, a RE e a razão vapor/biomassa, influencia directamente a composição do gás produzido, assim como outros parâmetros de gasificação, nomeadamente a produção do gás, o poder calorífico superior (PCS) e a conversão de energia (CE), que pode ser definida como a relação que se estabelece entre a energia contida no gás produzido e a quantidade de energia presente na biomassa (Franco *et al.*, 1998).

O aumento da temperatura conduz a alterações na composição final do gás produzido, nomeadamente, produzindo um gás mais rico em H₂. Este facto pode ser explicado pela ocorrência da reacção “water-gas shift”, $CO + H_2O = CO_2 + H_2$. Verifica-se também que, a partir da temperatura

de 850°C, a razão CO/CO₂ aumenta devido à termodinâmica do processo de gasificação favorecer a reacção de Boudouard: $C + CO_2 = 2 CO$. A quantidade de hidrocarbonetos decresce em toda a gama de temperatura, o que ocorre como consequência das reacções de pirólise (Franco *et al.*, 1998).

No que diz respeito aos principais parâmetros de gasificação, verifica-se que a CE aumenta com a elevação da temperatura. Este facto pode ser explicado, de acordo com Franco *et al.* (1998), pela quantidade de gás produzido ter aumentado o suficiente para compensar o seu menor PCS, uma vez que a CE é calculada com base nestes parâmetros.

Assim, segundo Franco (2000), o aumento da temperatura de gasificação conduz a um aumento acentuado da produção de gás de gasificação, rico em H₂, origina uma maior CE e a diminuição do PCS.

A variação da RE influencia a composição final do gás produzido. Deste modo, o aumento da RE provoca uma diminuição da quantidade de H₂ presente no gás produzido e a um aumento da quantidade de CO₂, enquanto as quantidades de CO e hidrocarbonetos não se alteram. Segundo Franco *et al.* (2007), estes aumentos obtidos, como consequência do aumento de RE, são normais e esperados devido às reacções parciais de combustão que ocorrem. Por outro lado, no que diz respeito à produção de gás, PCS e CE, estes parâmetros são muito dependentes da RE, sobretudo se o agente de gasificação for o ar. Neste caso, o aumento do caudal de ar e, conseqüente aumento da RE, produzem uma quantidade mais elevada de gás com um PCS muito baixo, em consequência do efeito de diluição do azoto (N₂) presente no ar.

A influência do aumento da razão vapor/biomassa sobre a composição final do gás produzido traduz-se por um aumento da quantidade de H₂ e CO₂ e uma diminuição de CO. Este facto explica-se, segundo Franco *et al.* (2007), pelas reacções do carbono com vapor e as reacções de gás de água ocorrerem mais efectivamente quando se aumenta o caudal de vapor e, conseqüentemente, a razão vapor/biomassa.

A razão vapor/biomassa não é muito influente em relação aos principais parâmetros de gasificação, verificando-se apenas ligeiros aumentos da produção de gás, do PCS e da CE para valores de razão vapor/biomassa até cerca de 0,6 (Franco *et al.*, 2007).

5. Conclusões

A cultura florestal que revelou maior potencial para a produção de biomassa foi o eucalipto, seguido pelos clones Unal e Beaupré de *Populus* spp.. O salgueiro-negro e o freixo revelaram um potencial reduzido de produção de biomassa. Quanto ao salgueiro-branco e ao amieiro não se vislumbra interesse comercial nestas culturas.

As herbáceas que revelaram maior produtividade potencial foram o capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) e a cana-do-reino (*Arundo donax* L.). Embora o capim-elefante tenha apresentado uma produção de biomassa superior, o seu elevado teor de humidade face à cana-do-reino retira-lhe alguma vantagem no que diz respeito ao armazenamento e processamento, sobretudo para fins energéticos. Por outro lado, o *Miscanthus x giganteus* devido às condições de stress hídrico em que se encontrava, não confirmou o potencial que lhe é atribuído noutros estudos.

Das plantas oleaginosas estudadas, o linho apresentou resultados promissores que apontam para a possibilidade de revitalização comercial desta espécie, para produção de biodiesel através da extracção do óleo das suas sementes. No que diz respeito à *Jatropha curcas*, esta apresenta, na literatura, elevado potencial quer de produtividade quer de adaptabilidade edafo-climática. Contudo, devido à fraca tolerância a geadas fortes ou prolongadas, nenhuma planta sobreviveu pelo que convém que se realizem estudos com mecanismos para proteger as plantas das acções climáticas mais severas, nomeadamente através de coberturas, ou que se melhore esta cultura do ponto de vista genético.

A gasificação com vapor em leito fluidizado, demonstra ser um processo promissor de conversão energética de biomassa, alimentando expectativas de produção de gás com um bom poder calorífico. Tem particular interesse, para o futuro do sector da energia, a possibilidade de produção de um gás de gasificação rico em hidrogénio, susceptível de ser utilizado como vector energético.

6. Trabalhos futuros

Os futuros trabalhos que abordem a questão do potencial produtivo de biomassa de plantas bioenergéticas, e que tenham por base de trabalho as culturas presentes no BIOENERGISA, poderão determinar, para todas as espécies florestais, as biomassas, totais e por componentes, para que seja possível fazer uma comparação mais rigorosa entre elas.

No que diz respeito às plantas herbáceas seria conveniente alterar a sua localizações para locais onde protejam do vento norte as outras culturas e, no caso do capim-elefante e da cana-do-reino, onde beneficiem de uma exposição solar mais eficiente para que se possa determinar se as suas produções podem ser superiores nessas condições.

Em relação às plantas oleaginosas, seria conveniente, no caso da *Jatropha*, efectuar um estudo exaustivo para determinar a sua capacidade de resistência à geada e no caso do linho, determinar a produção e o teor em óleo das suas sementes.

7. Referências Bibliográficas

- Adegbidi, H. G., Volk, T. A., White, E. H., Abrahamson, L. P., Briggs, R. D. & Bickelhaupt, D. H. 2001. Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State. *Biomass and Bioenergy*. **20**: 399-411.
- Amaral, L. M. 2009. A situação energética e o caso português. *Ingenium*. **112**: 18-20.
- Andrade, G. A., Caramori, P. H., Souza, F. S., Marur, C. J. & Ribeiro, A. M. A. 2008. Temperatura mínima letal para plantas jovens de pinhao-manso. *Bragantia*. **67** (3): 799-803.
- Angelini, L. G., Ceccarini, L., Nasso, N. N. & Bonari, E. 2009. Comparison of *Arundo donax* L. and *Miscanthus x giganteus* in a long-term field experiment in Central Italy: Analysis of productive characteristics and energy balance. *Biomass and Bioenergy*. **33**: 635-643.
- António, N., Tomé, M., Tomé, J., Soares, P. & Fontes, L. 2007. Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. *Canadian Journal of Forest Research*. **37** (5): 895-906.
- Basch, G., Teixeira, F. J. B. & Tayebi, K. 2002. Avaliação de 15 genótipos de *Miscanthus* para a produção de biomassa no Sul de Portugal. 1 – Potencial produtivo e parâmetros de produção. *Revista de Ciências Agrárias*. **25** (1-2): 178-186.
- Bingre, P., Aguiar, C., Espírito-Santo, D., Arsénio P. & Monteiro-Henriques, T. [Coords. Cient.] 2007. *Guia de Campo – As árvores e os arbustos de Portugal continental*. 462 pp. in vol. IX de Sande Silva, J. [Coord. Ed.] 2007. *Colecção Árvores e Florestas de Portugal*. Jornal Público/ Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento/ Liga para a Protecção da Natureza. Lisboa. 9 vols.
- Boerrigter, H. & Rauch, R. 2006. *Review of applications of gases from biomass gasification*. ECN Biomass, Coal & Environmental Research. Petten, The Netherlands. 33 pp. <http://www.ecn.nl/units/bkm> (acedido a 28-Oct-09).
- Bourne, Jr., J. K. 2007. Sonhos verdes. *National Geographic – Portugal*. **80**: 8-31.
- Brás, A. M., Miranda, F., Hipólito, L. & Dias, L. S. 2006. Biomassa e produção de energia. *O Minho, a Terra e o Homem – DRAEDM*. **51**: 23-30.
- Cabral, B. S. C. 2003. *Linum usitatissimum* L. – Uma matéria-prima para a produção de pasta para papel. Relatório do Trabalho de Fim de Curso. Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa. 67 pp.
- Cardoso, J. V. J. C. 1965. *Os solos de Portugal. Sua classificação, caracterização e génese, 1. A Sul do rio Tejo*. Direcção Geral dos Serviços Agrícolas. Lisboa. 311 pp.
- Carvalho, A. 1996. *Madeiras Portuguesas – Estrutura anatómica, Propriedades, Utilizações*. Vol.1. Instituto Florestal. Lisboa. 340 pp.
- CML 2005. *Guia ilustrado de vinte e cinco árvores de Lisboa*. Ed. Câmara Municipal de Lisboa. 32 pp.
- Coombs, J., Baldry, C. W. & Bucke, C. 1973. The C-4 pathway in *Pennisetum purpureum*. 1. The allosteric nature of PEP carboxylase. *Planta (Berl.)*. **110**: 95-107.
- Correia, M. J. S. 2005. *Conservação e caracterização morfológica de Jatropha curcas L. Santiago – Cabo Verde*. Relatório de Fim de Curso. Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa. 66 pp.

- Cortiçada, A., Faias, S. P., Tomé, M. & Tomé, J. 2005. O efeito da rega e fertilização na alometria das árvores in Silva, R., & Páscoa, F. [Eds.], *Actas das comunicações apresentadas ao 5.º Congresso Florestal Nacional – A Floresta e as Gentes, Viseu, 16-19 Maio*. Sociedade Portuguesa de Ciências Florestais – CDROM.
- Costa, A. S. 2009. Energias Renováveis – Estado da Arte em Portugal. *Ingenium*. **112**: 21-23.
- DGRF. 2007a. *Análise da evolução do comércio externo de produtos florestais*. Boletim de informação. Ed. Direcção-Geral dos Recursos Florestais. Lisboa. 21 pp.
- DGRF. 2007b. *Inventário Florestal Nacional 2005/2006*. Ed. Direcção-Geral dos Recursos Florestais. Lisboa.
- Dias, J. J. M. 2002. *Utilização da biomassa: avaliação dos resíduos e utilização de pellets em caldeiras domésticas*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. 102 pp.
- El Bassam, N.. 1996. *Renewable energy. Potencial energy crops for Europe and the Mediterranean Region*. REU Technical Series (FAO), 46, 200 pp.
- Fabião, A. & Fabião, A. 2007. Os ecossistemas ribeirinhos, pp. 91-108 in *Do castanheiro ao teixo – As outras espécies florestais*. 217 pp. in vol. V de Sande Silva, J. [Coord. Ed.] 2007. *Colecção Árvores e Florestas de Portugal*. Jornal Público/ Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento/ Liga para a Protecção da Natureza. Lisboa. 9 vols.
- Filipe, J. 2009. Proprietários sem meios para a gestão da floresta. *Água & Ambiente*, **127**: 4-6.
- Franco, C. 2000. *Gasificação de biomassa com vapor em leito fluidizado*. Dissertação para prestação de provas de acesso à categoria de investigador auxiliar. INETI. Lisboa. 244 pp.
- Franco, C. L. 1989. *Gaseificação pirólítica de resíduos de madeira*. Projecto “Gaseificação de Resíduos de Madeira. INETI. Lisboa. 126 pp.
- Franco, C., Gulyurtlu, I., Abelha, P., Monsanto, M., Dias, M., Lopes, H. & André, R. 2007. Resultados da gasificação e combustão do cardo em leito fluidizado. *Apresentações do Seminário “Culturas energéticas, biomassa e biocombustíveis”, Universidade de Évora, 6-7 Dezembro*. [CD-ROM] / ECAS.
- Franco, C., Gulyurtlu, I., Azevedo, P. & Cabrita, I. 1998. Fluidised bed gasification of eucalyptus grown under different fertilisation conditions. *Biomass for Energy and Industry: Proceedings of the 10th European Conference and Technology Exhibition*. 1769-1772 pp.
- INE. 2009. *Indicadores Agro-Ambientais 1989-2007*. Ed. Instituto Nacional de Estatística. Lisboa. 175 pp.
- Instituto de Meteorologia. 2008. *Clima de Portugal Continental*. www.meteo.pt (acedido a 18-Set-09).
- Isolani, P. 2008. *Eficiência energética nos edifícios residenciais – Manual do Consumidor*. DECO. Lisboa. 48 pp.
- Kaul, H-P., Aufhammer, W. & Wägner, W. 1996. Dry matter and nitrogen accumulation and residues of oil and protein crops. *European Journal of Agronomy*. **5**: 137-147.
- Kumar, A. & Sharma, S. 2008. An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): A review. *Industrial Crops and Products*. **28**: 1-10.

- Leão, T. P. 2009. Prospectiva e reflexões sobre uma economia baseada no hidrogénio. *Ingenium*. **112**: 28-29.
- Lewandowski, I., Clifton-Brown, J. C., Scurlock, J. M. O. & Huisman, W. 2000. Miscanthus: European experience with a novel energy crop. *Biomass and Bioenergy*. **19**: 209-227.
- Lourenço, M. E. V. & Januário, M. I. N. 2008. Culturas energéticas e Desenvolvimento Rural in Carvalho, M. L. S. & Santos, M. O. G. [Coords.], *Actas das comunicações apresentadas ao 1º Encontro Luso-Angolano – Economia, Sociologia e Desenvolvimento Rural, 16-18 Outubro*. Universidade de Évora. <http://www.ela.uevora.pt/destaque.htm> (acedido a 22-Out-09).
- Luís, R. B. 2009. *Respostas de Jatropha curcas L. ao défice hídrico. Caracterização bioquímica e ecofisiológica*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa. 61 pp.
- Maes, W. H., Trabucco, A., Achten, W. M. J. & Muys, B. 2009. Climatic growing conditions of *Jatropha curcas* L. Short communication. *Biomass and Bioenergy*. **33**: 1481-1485.
- Mantineo, M., D'Agosta, G. M., Copani, V., Patanè, C. & Cosentino, S. L. 2009. Biomass yield and energy balance of three perennial crops for energy use in the semi-arid Mediterranean environment. *Field Crops Research*. **114**: 204-213.
- Marchante, E. & Marchante, H. 2005. *Cana – ficha n.º 26* in Marchante, H., Marchante, E. & Freitas, H. 2005. *Plantas Invasoras em Portugal – fichas para identificação e controlo*. Ed. dos autores. Coimbra.
- Marchante, E. & Marchante, H. 2007. As exóticas invasoras, pp. 179-195 in *Do castanheiro ao teixo – As outras espécies florestais*. 217 pp. in vol. V de Sande Silva, J. [Coord. Ed.] 2007. *Colecção Árvores e Florestas de Portugal*. Jornal Público/ Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento/ Liga para a Protecção da Natureza. Lisboa. 9 vols.
- Marques, M. 2008. Uma contribuição para a política de biocombustíveis. *ENG.os*. **0**: 22-27.
- Martínez-Perez, N., Cherryman, S. J., Premier, G. C., Dinsdale, R. M., Hawkes, D. L. Hawkes, F. R., Kyazze, G. & Guwy, A. J. 2007. The potencial of hydrogen-enriched biogas production from crops: Scenarios in the UK. *Biomass and Bioenergy*. **31**: 95-104.
- Medina, J. M. B. 1973. *Os solos da Tapada da Ajuda sob utilização agrícola*. Relatório do Trabalho de Fim de Curso. Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa. 110 pp.
- Moura, C. 2005. Uma fonte de energia renovável. *Floresta e Ambiente*. **69**: 34.
- Nunes, P. S. 2009. Panorama actual da Energia Nuclear. *Ingenium*. **112**: 24-26.
- PAB. 2005. *Comunicação da Comissão: Plano de acção Biomassa*. Ed. Comissão das Comunidades Europeias. Bruxelas. 48 pp.
- PAF. 2006. *Comunicação da Comissão ao Conselho e ao Parlamento Europeu sobre um plano de acção da União Europeia para as florestas*. Ed. Comissão das Comunidades Europeias. Bruxelas. 15 pp.
- Pereira, J. S. 2007. Uma espécie altamente produtiva, pp. 167-183 in *Pinhais e Eucaliptais – A floresta cultivada*. 283 pp. in vol. IV de Sande Silva, J. [Coord. Ed.] 2007. *Colecção Árvores e Florestas de Portugal*. Jornal Público/ Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento/ Liga para a Protecção da Natureza. Lisboa. 9 vols.

- Pinto, F., Lopes, M. H., André, R., Gulyurtlu, I. & Cabrita, I. 2006. Gasificação – tecnologia mais limpa para produção de energia a partir de resíduos. *Indústria e Ambiente*. **41**: 36-41.
- Prégent, G. & Camiré, C. 1985. Biomass production by alders on four abandoned agricultural soils in Québec. *Plant and Soil*. **87**: 185-193.
- Ramage, J. 2003. *Guia da Energia*. MONITOR – Projectos e Edições, Lda. Lisboa. 352 pp.
- Rosa, F. 2008. Microalgas para Biodiesel – O Desafio do Presente para um Futuro Sustentável. *Ingenium*. **105**: 42-43.
- Santo, F. 2009. Energia – Uma necessidade e um grave problema. *Ingenium*. **112**: 5.
- Silva, S. A. 2008. *Instalação de um Campo Pedagógico para sensibilização sobre Culturas Bioenergéticas – Projecto BioEnergISA*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa. 61 pp.
- Simões, M. P. 2006. *Avaliação do potencial produtivo da planta Miscanthus x giganteus*. Relatório do Trabalho de Fim de Curso. Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa. 72 pp.
- Singh, B. 1998. Biomass production and nutrient dynamics in three clones of *Populus deltoides* planted on Indogangetic plains. *Plant and Soil*. **203**: 15-26.
- Soares, P., Tomé, M. & Pereira, J. S. 2007. A produtividade do eucaliptal, pp. 27-59 in Alves. A. M., Pereira, J. S. & Silva, J. M. N. [Eds.] 2007. *O Eucaliptal em Portugal – Impactes Ambientais e Investigação Científica*. ISAPress. Lisboa. 398 pp.
- Staiss, C. & Pereira, H. 2002. O cultivo de plantas energéticas: novas alternativas de produção na agricultura portuguesa. *Vida Rural*. **50** (1680): 24-28 pp.
- Tahvanainen, L. & Rytönen, V-M. 1999. Biomass production of *Salix viminalis* in southern Finland and the effect of soil properties and climate conditions on its production and survival. *Biomass and Bioenergy*. **16**: 103-117.
- Tomás, N. M. 2009. Energia – Dependência dita evolução económica do país. *Ingenium*. **112**: 16-17.
- Torrealba, B. M. 1990. El “Pasto Elefante” (*Pennisetum purpureum* Schum). *Agricultura. Revista Agropecuaria*. **59** (625): 518-521.
- Vasconcellos, J. P. 2008. *Avaliação do potencial produtivo da planta Miscanthus x giganteus*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa. 77 pp.
- Viegas, J. M. 2009. Para uma melhor eficiência energética nos Transportes. *Ingenium*. **112**: 30-31.