

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

Grupo de Disciplinas de Ecologia da Hidrosfera

**BALANÇO ENERGÉTICO DA UTILIZAÇÃO DE
MISCANTHUS NA PRODUÇÃO DE ENERGIA, EM
PORTUGAL**

Paulo Alexandre Carmona Cipriano

Dissertação apresentada na Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa para obtenção do grau de
Mestre em Energia e Bioenergia

Orientadora: Professora Doutora Ana Luísa Almaça da Cruz Fernando

Monte de Caparica

2010

“Balanço energético da utilização de *Miscanthus* na produção de energia, em Portugal”

© Paulo Cipriano, FCT/UNL, UNL.

A Faculdade de Ciencias e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que directa ou indirectamente contribuíram para a realização deste trabalho. Nomeadamente:

À minha orientadora, Professora Doutora **Ana Luísa Almaça da Cruz Fernando**, pelo seu tremendo esforço pessoal, a sua dedicação única, a sua sapiência sentido critico e responsabilidade profissional com que me apoiou incondicionalmente na orientação da presente Dissertação.

À Professora **Benilde Simões Mendes**, e ao Professor **Nuno Lapa**, coordenadores do Mestrado de Energia e Bioenergia, pelas palavras de apoio e ânimo transmitidos que foram de vital importância para a elaboração e finalização do presente documento.

A todos os colaboradores do Grupo de Disciplinas da Ecologia da Hidrosfera, por todo o apoio dispensado durante o mestrado;

Aos meus familiares e amigos, pelo apoio e motivação que me deram ao longo de todo o trabalho, nos bons e nos maus momentos.

Resumo

Na perspectiva de um desenvolvimento sustentável e tendo em conta a Reforma da Política Agrícola Comum, pretende-se com este trabalho, avaliar o balanço energético da produção e utilização de *Miscanthus* na produção de energia, tendo em conta as condições do sul de Portugal.

Na produção de energia, considerou-se a combustão da biomassa, por ser o processo que já está implementado a nível industrial e comercial. Consideraram-se, no entanto, quatro cenários diferentes para a sua combustão: a) numa Central Térmica de Biomassa com 10 MW de potência instalada; b) numa Central Térmica de Biomassa de pequena dimensão, com 0,1MW de potência instalada; c) sistema doméstico de combustão de pellets de *Miscanthus*, em que as pellets são produzidas numa unidade transformadora situada na fronteira da exploração agrícola; d) sistema idêntico ao anterior, mas em que as pellets são produzidas no campo de *Miscanthus*, na colheita da biomassa.

Em todos os Cenários pode verificar-se que as eficiências energéticas são superiores à unidade (Cenário 1: 14,1; Cenário 2: 12,9; Cenário 3: 9,4; Cenário 4: 8,8) e que o balanço energético é positivo. Portanto, considerando o aspecto energético, pode ser uma possibilidade, em Portugal, a utilização dos *Miscanthus* para energia. Em termos de eficiência energética, ou seja a razão entre a quantidade de energia produzida por energia consumida, então o cenário mais vantajoso é o Cenário 1 – utilização da biomassa numa Central Térmica com 10 MW de potência instalada. Em análise, pode verificar-se que a conversão, a rega, e no caso da utilização de pellets, o transporte, são os factores que mais contribuem para o consumo energético.

No estudo, foi feita uma análise de sensibilidade, em que se pretende avaliar a influência de determinados factores, no balanço energético. São estudados factores relacionados com a produção agrícola da cultura, assim como factores relacionados com o seu processamento e utilização. Após uma análise dos vários cenários estudados, verifica-se, na análise de sensibilidade efectuada, que a rega e a data da colheita foram os factores que mais afectaram a eficiência energética do sistema. Não regar a partir do 3º ano traduz-se num aumento significativo da eficiência e a colheita em Janeiro traduz-se por uma diminuição significativa da eficiência do sistema.

Palavras-chave: *Miscanthus*, balanço energético

Abstract

In the perspective of a sustainable development, and taking into account the reform of the Common Agriculture Policy (CAP), the aim of this study is to evaluate the energy balance of the production and use of *Miscanthus* for energy purposes, in the pedoclimatic conditions of South Portugal.

Combustion of the biomass was the process considered, having in mind that it is the process that is largely implemented, industrially and commercially. Four different scenarios were considered; a) Biomass Power Plant (10MW); b) Biomass Power Plant (0,1MW); c) domestic system for the pellets combustion. Pellets are being produced in a unit at the frontier of the farm; d) domestic system for the pellets combustion. Pellets are being produced in the field at the same time of the harvest.

In all scenarios, energy efficiencies determined were higher than unit (Scenario 1: 14,1; Scenario 2: 12,9; Scenario 3: 9,4; Scenario 4: 8,8) and the energy balances presented positive values. So, producing and using *Miscanthus* in Portugal for energy purposes, is a possibility. Scenario 1 – Combustion of *Miscanthus* in a Biomass Power Plant (10MW), is the most advantageous. Conversion, irrigation, and, in the case of pellets use in domestic systems, transportation, were the factors that most contributed for the energy consumption.

In the study, a sensibility analysis was made, to determinate the influence of the *Miscanthus* production management in the farm and the influence of processing and uses factors. Irrigation and harvest date were the factors that mostly affected the energy efficiency of the system. No irrigation after the 3rd year of the crop increases significantly the energy efficiency. To harvest in January, means a significative reduction of the energy efficiency of the system.

Key-words: *Miscanthus*, energy balance

Índice de Matérias

Agradecimentos	iii
Resumo.....	iv
Abstract	v
Índice de Matérias.....	vii
Índice de Figuras.....	vii
Índice de Quadros	viii
1 Enquadramento	1
2 Caracterização da planta <i>Miscanthus x giganteus</i>	3
2.1 Aplicações da planta <i>Miscanthus x giganteus</i> para fins energéticos	9
3 Tecnologias de conversão de biomassa herbácea em energia.....	11
3.1 Combustão de biomassa herbácea	14
3.1.1 Sistemas de combustão de biomassa lenhosa	17
4 Metodologia	21
5 Resultados e sua Discussão	29
5.1 Balanço energético da utilização de <i>Miscanthus</i> na produção de energia, por combustão, em Portugal.....	29
5.2 Análise de Sensibilidade	31
5.2.1 Variável: N - Fertilizante.....	31
5.2.2 Variável: Rega	32
5.2.2 Variável: Produtividade.....	33
5.2.3 Variável: Data da colheita	34
5.2.4 Variável: Distância.....	35
5.2.5 Variável: Rendimento	36
6 Conclusões.....	38
7 Referências Bibliográficas.....	41

Índice de Figuras

Figura 2.1 - <i>Miscanthus x giganteus</i> Greef et Deu (Fonte: Fernando, 2005).....	4
Figura 2.2 - Produtividades ($t \cdot ha^{-1} \cdot ms$) registadas em diversos locais na Europa (Fonte: Fernando, 2005).....	6
Figura 2.3- Produtividades das plantas de <i>Miscanthus x giganteus</i>, no <i>Campus</i> da Caparica, entre 1991 e 2000 (Fonte: Fernando e Oliveira, 2005)	7
Figura 2.4- Algumas das utilizações dos <i>Miscanthus</i>. (Fonte: Fernando, 2005).	9
Figura 3.1 – Pelletes (à esquerda) e Briquetes (à direita) (Fonte: Greenpro, 2004).....	15
Figura 3.2 – Salamandra (à esquerda) e Forno de pelletes (à direita) (Fonte: Greenpro, 2004).18	
Figura 3.3 - Secção de uma caldeira alimentada por pelletes com sistema de alimentação inferior (à esquerda), com sistema de retorta (ao centro) e com sistema de alimentação superior (à direita) (Fonte: Greenpro, 2004).....	19
Figura 3.4 - Secção de uma caldeira alimentada por estilhas em que é apresentado o seu transporte até à câmara (Fonte: Greenpro, 2004)	20
Figura 5.1 – Energia necessária para a produção, transporte e conversão de <i>Miscanthus</i>, para os cenários apresentados	30
Figura 5.2 – Representação gráfica da eficiência energética (Produção/Consumo), para várias quantidades de N – Fertilizante administradas	31
Figura 5.3 – Representação gráfica da eficiência energética (Produção/Consumo), com rega e sem rega da cultura, a partir do 3º ano e seguintes	32
Figura 5.4 – Gráfico representativo da eficiência energética (Produção/Consumo), para valores diferentes de produtividade	33
Figura 5.5 – Gráfico representativo da eficiência energética (Produção/Consumo), para diferentes datas de colheita	34
Figura 5.6 – Gráfico representativo da eficiência energética (Produção/Consumo), para diferentes distâncias	35
Figura 5.7 – Gráfico representativo da eficiência energética (Produção/Consumo), para diferentes rendimentos energéticos dos equipamentos	36
Figura 5.8 – Variação da eficiência energética do Cenário 1, tendo em conta os parâmetros modificados na análise de sensibilidade	37

Índice de Quadros

Quadro 2.1- Qualidade da biomassa das plantas de <i>Miscanthus x giganteus</i> , obtida no <i>Campus</i> da Caparica, entre 1991 e 2000 (Fonte: Fernando e Oliveira, 2005)	7
Quadro 4.1 - Produtividade de <i>Miscanthus</i> , em matéria seca e com humidade, nas colheitas de Setembro (Fonte: Fernando, 2005)	23
Quadro 5.1 – Calculo do balanço energético na produção e conversão em energia dos <i>Miscanthus</i> , supondo uma duração do campo de 15 anos.....	29
Quadro 5.2 – Eficiência energética (Produção/Consumo), para várias quantidades de N – Fertilizante administradas (dados de produtividade de Fernando, 2005 e de Duarte <i>et al.</i> , 1996)	31
Quadro 5.3 – Eficiência energética (Produção/Consumo), com rega e sem rega da cultura, a partir do 3º ano e seguintes (dados de Fernando, não publicados)	32
Quadro 5.4 – Eficiência energética (Produção/Consumo), para valores diferentes de produtividade.....	33
Quadro 5.5 – Eficiência energética (Produção/Consumo), para diferentes datas de colheita (dados de produtividade de Fernando, 2005)	34
Quadro 5.6 – Eficiência energética (Produção/Consumo), para diferentes distâncias.....	35
Quadro 5.7 – Eficiência energética (Produção/Consumo), para diferentes rendimentos energéticos dos equipamentos	36

1 Enquadramento

Os principais estudos realizados no controlo, gestão e exploração das reservas de petróleo existentes, com as actuais tecnologias, indicam que o pico de produção de petróleo poderá ser atingido nas primeiras décadas do século XXI, dando lugar depois a uma redução, devido à possível escassez deste recurso. É evidente que este será um acontecimento que terá as suas consequências, nomeadamente no que diz respeito ao preço do petróleo, prevendo-se que irá subir gradualmente ao longo dos anos. Este aumento terá repercussões económicas e sociais em todo o mundo, especialmente nos países que mais dependem dele. Portugal é sem dúvida um país cuja economia depende do preço do petróleo, tendo em conta que esta é a principal fonte de energia utilizada.

Considera-se que a solução para esta problemática consiste num maior desenvolvimento e interesse nas energias renováveis, nomeadamente a eólica, hídrica, fotovoltaica, solar térmica, geotérmica e a partir de biomassa. Apesar de Portugal já apresentar um grande investimento a nível de energia eólica e hídrica, o mesmo não se verifica com as outras energias renováveis. Surge assim a necessidade de melhorar, desenvolver e diversificar as formas de energia, limpas e sustentáveis, e de solucionar a questão da sua intermitência.

Os incentivos à utilização de energias renováveis e o grande interesse que este assunto levantou nestes últimos anos, deveram-se principalmente à consciencialização da possível escassez dos recursos fósseis (como o petróleo) e da necessidade de redução das emissões de gases nocivos para a atmosfera - os Gases de Efeito de Estufa (GEE). As atenções direccionadas para este tema devem-se, em parte, às preocupações com as alterações climáticas, aos objectivos da União Europeia e à homologação do Protocolo de Quioto. Em termos de recursos renováveis energéticos, considera-se a Bioenergia - energia proveniente da biomassa - como uma das mais promissoras para utilização a curto prazo, podendo ser aproveitada sob diversas formas, quer como combustível sólido, ou como combustível líquido através da sua transformação em Bioetanol e em Biodiesel, entre outras hipóteses.

Neste contexto, a cultura de *Miscanthus x giganteus* Greef et Deu, perene, originária do sudeste asiático, pode ser muito benéfica visto que a sua biomassa herbácea apresenta

uma capacidade calorífica muito elevada, podendo ser aproveitada economicamente na produção de energia. O interesse neste tipo de cultura reside não só na possibilidade da sua utilização como fonte de energia renovável, especialmente em países como Portugal onde não existem recursos conhecidos de combustíveis fósseis, mas também devido ao facto destas plantas apresentarem produtividades muito elevadas, mesmo em terras menos produtivas. Para além destas qualidades, estas plantas caracterizam-se por possuírem uma elevada resistência a pragas e doenças e um sistema radicular do tipo rizoma, muito extenso, profundo e com facilidade na translocação de nutrientes das raízes/rizoma para caule/folhas e vice-versa, apresentando uma elevada eficiência na assimilação e uso de azoto e água (Jones e Walsh, 2001).

Na perspectiva de um desenvolvimento sustentável e tendo em conta a Reforma da Política Agrícola Comum, pretende-se com este trabalho, avaliar o balanço energético da produção e utilização de *Miscanthus* na produção de energia, tendo em conta as condições do sul de Portugal.

Na produção de energia, considerou-se a combustão da biomassa, por ser o processo que já está implementado a nível industrial e comercial. Consideraram-se, no entanto, quatro cenários diferentes para a sua combustão: a) numa Central Térmica de elevada dimensão, como a de Mortágua; b) numa Central Térmica de pequena dimensão; c) sistema doméstico de combustão de pellets de *Miscanthus* (como as salamandras, por exemplo), em que as pellets são produzidas numa unidade transformadora situada na fronteira da exploração agrícola; d) sistema idêntico ao anterior, mas em que as pellets são produzidas no campo de *Miscanthus*, na colheita da biomassa.

No estudo, é feita uma análise de sensibilidade, em que se pretende avaliar a influência de determinados factores, no balanço energético. São estudados factores relacionados com a produção agrícola da cultura, como o nível de fertilização azotada, a irrigação, a data da colheita e a produtividade, assim como factores relacionados com o seu processamento e utilização, como a distância entre o local de produção dos *Miscanthus* e a unidade transformadora e o rendimento energético das unidades transformadoras.

2 Caracterização da planta *Miscanthus x giganteus*

O género *Miscanthus* pertence à família das Poáceas (Jones e Walsh, 2001). Originário do sudeste asiático, o *Miscanthus x giganteus* Greef et Deu., é um híbrido que resulta do cruzamento entre o *M. sinensis* e o *M. sacchariflorus* (Scallly *et al.*, 2001). É uma planta lenhosa, perene, rizomatosa, que utiliza o mecanismo fotossintético em C₄, que se propaga fácil e rapidamente através do rizoma (Jones e Walsh, 2001). Como planta perene, esta cultura energética apresenta vantagens face às anuais: uma elevada eficiência na assimilação e uso de azoto e água, necessidades reduzidas de fertilizantes e pesticidas, aumento da matéria orgânica no solo, conduzindo a um maior armazenamento de carbono no solo e à redução do risco de erosão – limitada também pela cobertura do solo no Inverno -, e contributo para a biodiversidade e riqueza da paisagem (Fernando *et al.*, 2010). É também uma cultura que apresenta um balanço energético muito elevado e um contributo significativo na redução das emissões de GEE (Rettenmaier *et al.*, 2010).

A plantação dos rizomas deve ser efectuada quando as temperaturas do solo são superiores a 10°C, de modo a evitar os efeitos das geadas da Primavera (na Europa, Março a Maio, dependendo do clima) (El Bassam, 1998; Long e Beale, 2001). Contudo não deverá ser demasiado tardia, de modo a garantir o bom estabelecimento das plantas, o seu crescimento e a translocação das reservas para o rizoma, antes do início do Inverno (Fernando, 2005). O rizoma é a fonte de nutrientes que suporta o crescimento inicial, até que os caules e as folhas começam a produzir assimilados e mantêm, por si, o crescimento que é menor no primeiro ano (1.5-2m) devido ao estabelecimento do sistema radicular, muito ramificado, extenso e profundo, mas que pode atingir os 4m nos anos seguintes, quando a cultura atinge a maturidade (El Bassam, 1998). Os caules são finos (cerca de 10 mm de diâmetro), sólidos e não ramificam; as folhas são caulinas, planas e lineares; as flores dispõem-se no topo do caule em racimos abundantes, ao longo de um eixo central (El Bassam, 1998)(Figura 2.1).



Figura 2.1 - *Miscanthus x giganteus* Greef et Deu (Fonte: Fernando, 2005).

No Sul da Europa, após a florescência, os caules começam a lenhificar, a planta começa a secar e é acelerada a senescência da cultura (Agosto-Setembro); no Centro e Norte da Europa, o fim do período vegetativo verifica-se na sequência da diminuição da temperatura atmosférica, do prolongamento do período noturno e do aparecimento das primeiras geadas, podendo não ocorrer a florescência (Fernando e Oliveira, 2005).

No final do ciclo vegetativo, verifica-se a translocação de nutrientes da parte aérea da planta para o sistema radicular. Desta forma, a biomassa aérea colhida apresenta baixos teores em elementos minerais, e, uma vez estabelecida a cultura, não são necessárias elevadas aplicações de fertilizantes, para suportar o crescimento (Fernando e Oliveira, 2005). A extensa rede radicular, que tem uma longa duração (15-20 anos), permite, igualmente, assegurar uma eficiente intercepção dos fertilizantes aplicados, minimizando as perdas por lixiviação (Fernando e Oliveira, 2005, Jørgensen, 2010). De acordo com El Bassam (1998), 50kg N, 20kg P₂O₅ e 100kg de K₂O, ha⁻¹, são suficientes para garantir a manutenção sustentada de produtividades adequadas.

Embora a cultura de *Miscanthus* não seja muito exigente quanto à qualidade do solo, solos arenosos ou franco-arenosos, contendo até 10% de argila, bem arejados, com uma elevada capacidade de retenção de água e um teor elevado em matéria orgânica, mostraram ser os mais adequados para a produção de *Miscanthus* (El Bassam, 1998; Christian e Haase, 2001). A cultura de *Miscanthus* apresenta, também, uma elevada

eficiência no uso da água, estimando-se que sejam necessários cerca de 500 mm de água para se produzirem 30t.ha⁻¹ de matéria seca (Long e Beale, 2001). No entanto, a irrigação, especialmente no Sul da Europa, poderá ser necessária, para garantir produtividades elevadas.

O controlo das ervas deve ser rigoroso, após a plantação e ao longo dos primeiros dois anos, uma vez que nesta fase os *Miscanthus* podem ser facilmente dominados por ervas daninhas (El Bassam, 1998). Após este período, a necessidade de monda é menor, devido à formação de uma cobertura, fechada e alta, que reduz a penetração da luz e, durante a senescência, ao manto de folhas na superfície do solo. A aplicação de herbicidas nas bermas da plantação pode constituir o máximo que é necessário fazer, após o estabelecimento da cultura (Christian e Haase, 2001). Na Europa, não existem relatos de doenças que coloquem significativamente em risco a produção de *Miscanthus* (El Bassam, 1998; Christian e Haase, 2001). Contudo, quanto maior for a produção de *Miscanthus*, na Europa e na região do Mediterrâneo, maior é o risco da cultura poder ser atacada por doenças comuns nestas zonas (Fernando, 2005).

A colheita deve ser realizada quando o teor em matéria seca for elevado, o que permite evitar ou reduzir a secagem, e quando a maior parte dos nutrientes se encontrarem sequestrados nos rizomas, para que estes consigam sobreviver ao Inverno, garantindo o crescimento das novas plantas na Primavera, geralmente entre Janeiro e Março (Fernando e Oliveira, 2005).

Embora a cultura prefira climas mais quentes e húmidos, os *Miscanthus* podem desenvolver-se com bons resultados nos climas europeus temperados e frios. Com efeito, esta cultura desenvolveu características que tornam a planta capaz de realizar a fotossíntese a baixas temperaturas, resistindo ao frio, em contraste com outras plantas em C₄ conhecidas (El Bassam, 1998; Long e Beale, 2001). No entanto, os mecanismos bioquímicos que podem explicar esta tolerância são complexos e não estão ainda devidamente clarificados (Jørgensen, 2010).

A Figura 2.2 mostra a variação da produtividade da cultura no espaço europeu.

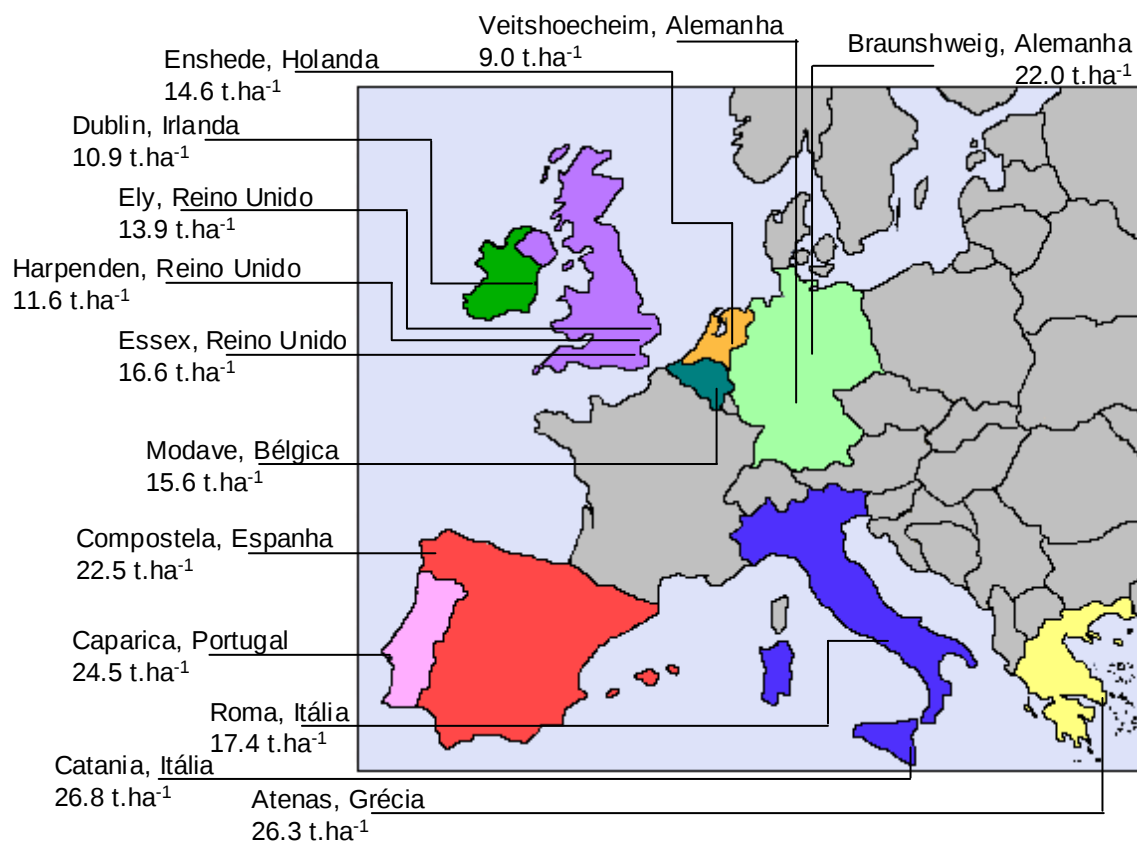


Figura 2.2 - Produtividades (t.ha⁻¹ ms) registadas em diversos locais na Europa (Fonte: Fernando, 2005).

No Norte da Europa, a maior limitação reside na capacidade de sobrevivência dos rizomas ao primeiro Inverno, devido às temperaturas negativas do solo e quando os rizomas não são capazes de acumular reservas metabólicas suficientes (Fernando e Oliveira, 2005). No entanto, este problema tem vindo a ser ultrapassado através de um conhecimento mais profundo da interacção entre o clima e a variabilidade genética da cultura e do desenvolvimento de metodologias mais eficazes no estabelecimento da cultura, com redução dos custos associados em cerca de 80% (Jørgensen, 2010). No Sul da Europa, o factor limitante é a água (Fernando e Oliveira, 2005).

Em Portugal, os primeiros estudos experimentais realizados com o *Miscanthus* (*M. x giganteus*) foram iniciados em 1990, no âmbito da “*Miscanthus* Productivity Network” (Rede de trabalho sobre a produtividade do *Miscanthus*), nos campos localizados na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL), no *Campus* da Caparica, sob orientação e coordenação do Grupo de Disciplinas de Ecologia da Hidrosfera (GDEH). Estes estudos demonstraram que nas condições pedoclimáticas da zona do estuário do Tejo, podem ser alcançados elevados rendimentos a partir do terceiro ano (25 t.ha⁻¹, em matéria seca), tendo-se verificado que

a produtividade não foi influenciada pela fertilização azotada embora se verifique uma tendência para o aumento da produtividade com o aumento da adubação azotada (Fernando e Oliveira, 2005)(Figura 2.3). A limitação da resposta do *Miscanthus x giganteus* à fertilização azotada, de acordo com Davis *et al.* (2010), deve-se à presença de organismos fixadores de azoto nos rizomas.

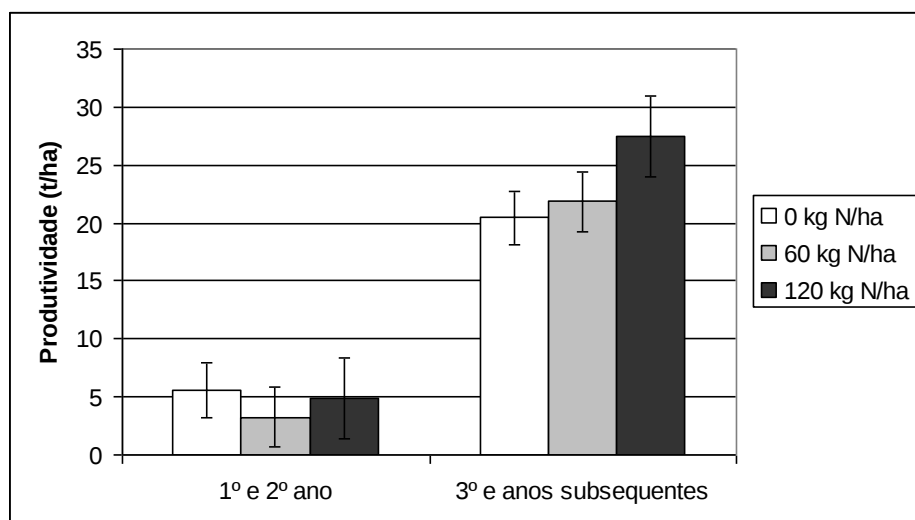


Figura 2.3- Produtividades (t/ha matéria seca) das plantas de *Miscanthus x giganteus*, no *Campus* da Caparica, entre 1991 e 2000 (Fonte: Fernando e Oliveira, 2005).

O Quadro 2.1 apresenta a qualidade da biomassa de *Miscanthus* obtida no *Campus* da Caparica entre 1991 e 2000, no momento da colheita (Dezembro). Em relação aos parâmetros analisados, não se verificaram diferenças significativas na qualidade da biomassa devido aos diferentes níveis de fertilização azotada (Fernando e Oliveira, 2005).

Quadro 2.1- Qualidade da biomassa das plantas de *Miscanthus x giganteus*, obtida no *Campus* da Caparica, entre 1991 e 2000 (Fonte: Fernando e Oliveira, 2005).

Humidade (%)	34 ± 14
Cinzas (% ms)	3,4 ± 1,0
Azoto (% ms)	0,13 ± 0,07
Fósforo (% ms)	0,12 ± 0,09
Poder calorífico Inferior (GJ.t ⁻¹ ms)	18
Fibra bruta (%)	50

Depois da colheita, o produto deverá ser armazenado, podendo ser depois processado e utilizado. A secagem, o armazenamento e o processamento, são determinados pelo tipo de utilização pretendido da biomassa de *Miscanthus*.

O factor mais importante no que respeita ao armazenamento é o teor em humidade (Fernando, 2005). Se a humidade for muito elevada, a actividade microbiológica pode desenvolver-se imediatamente, podendo traduzir-se na perda de matéria seca e na contaminação esporulada do material (El Bassam e Huisman, 2001). Os fardos, podem ser armazenados com teores até 25% em humidade, mas fardos de elevada densidade deverão apresentar uma humidade inferior a 18% (El Bassam, 1998). O armazenamento pode ser feito em armazéns, mas pode também ocorrer ao ar livre, sem cobertura, ou com uma cobertura de plástico ou de materiais orgânicos (por exemplo, feno ou palha)(Fernando, 2005).

Existem diferentes métodos que podem ser aplicados na secagem dos *Miscanthus*, de modo a atingir-se uma humidade que permita a estabilização da biomassa armazenada e/ou o seu processamento e utilização (Fernando, 2005). A secagem no campo constitui a forma mais eficiente em termos de custos, na medida em que utiliza a ventilação natural do ar ambiente e a radiação solar (El Bassam e Wuisman, 2001). Quando o teor em humidade da biomassa for elevado, o material deverá ser desidratado por ventilação mecânica, em armazém (Fernando, 2005). Se for utilizado ar quente, pode ser utilizado no seu aquecimento o excesso de calor da combustão de biomassa já seca (El Bassam, 1998). A ensilagem é uma boa opção, quando os teores em humidade são demasiado elevados para garantir a estabilidade da biomassa armazenada e quando a secagem, natural ou artificial, não constitui uma opção aceitável (El Bassam e Wuisman, 2001).

O processamento dos *Miscanthus* pode envolver a formação de fardos, ou a compactação em "pelletes", briquetes ou "wafers" (El Bassam, 1998). A compactação torna o produto mais fácil de transportar e pronto para ser utilizado (Fernando, 2005).

Os *Miscanthus* têm sido utilizados principalmente na produção de energia e na produção de pasta de papel, mas este material tem vindo a ser cada vez mais explorado para outras utilizações, devido à sua elevada estabilidade, à sua robustez e ao peso reduzido dos seus caules (Fernando, 2005)(Figura 2.4).



Figura 2.4- Algumas das utilizações dos *Miscanthus*. (Fonte: Fernando, 2005).

2.1 Aplicações da planta *Miscanthus x giganteus* para fins energéticos

Como a capacidade calorífica da biomassa dos *Miscanthus* é muito elevada (El Bassam, 1998; Fernando, 2005), as plantas podem ser utilizadas na produção de energia. De acordo com Fernando e Oliveira (2005), a produção de energia potencial, que pode ser obtida pela combustão da biomassa produzida por ha pelas plantas de *Miscanthus*, em Portugal, é equivalente a 9000 l de gasolina, a 10000 l de diesel ou a 14,5 t de carvão.

A combustão da biomassa em casas, comunidades, ou indústrias, para produzir calor, ou, a nível regional e/ou nacional, para a geração de electricidade, é um processo que já está implementado a nível industrial e comercial. No Norte da Europa, em particular na Dinamarca e no Reino Unido, o *Miscanthus* tem sido utilizado na co-combustão com carvão, em centrais termoeléctricas. A eficiência do processo não é afectada, o recurso fóssil carvão é poupado e as emissões de Dioxido de Carbono (CO₂), óxido de azoto (NO_x) e de dióxido de enxofre (SO₂) são mais reduzidas (Visser e Pignatelli, 2001). Os *Miscanthus* têm, também, sido utilizados como substituto da palha, nas centrais de co-combustão com carvão. Como esta cultura energética apresenta teores reduzidos de

cinzas e em potássio e cloro, o nível de incrustamento nas câmaras de combustão é mais reduzido (Visser e Pignatelli, 2001). A substituição da palha não conduz a aumentos significativos de emissões de SO₂, de Monóxido de carbono (CO) e de partículas e os teores mais reduzidos em potássio e cloro nas cinzas volantes, possibilitam a sua reutilização (Visser e Pignatelli, 2001). No entanto, os *Miscanthus* gastam mais 35% de energia do que a palha, no seu pré processamento (Visser e Pignatelli, 2001).

Os *Miscanthus* têm também sido utilizados como combustível em sistemas de aquecimento descentralizados, especialmente em quintas, em substituição da palha. De acordo com Visser e Pignatelli (2001), conseguem-se melhores eficiências. Em termos ambientais, a combustão é mais regular e gera menores emissões de partículas.

No Reino Unido, a Central Energética a biomassa de 35 MegaWatt (MW), de Ely, perto de Cambridge, tem contratos com os produtores para queimar não só palha de cereais mas também *Miscanthus* (Fernando, 2005). No verão de 2010, esta central (a maior do mundo a utilizar palha), estava a ser alimentada com mistura de palha e *Miscanthus* (50:50)(Jørgensen, 2010).

A cultura de *Miscanthus* também tem sido estudada em ensaios de gasificação e pirólise, como por exemplo, nos trabalhos de Khelfa *et al.* (2009), de de-Jong *et al.* (1999) e de Yorgun e Şimşek (2008), e como biocombustível de segunda geração para produção de etanol (Sorensen *et al.*, 2008; Hayes e Hayes, 2009) e na produção de hidrogénio (de-Vrije *et al.*, 2002).

3 Tecnologias de conversão de biomassa herbácea em energia

A biomassa herbácea pode ser convertida em combustíveis líquidos, sólidos e gasosos com a ajuda de processos de conversão físicos, químicos e biológicos: combustão directa, pirólise, gasificação, liquefacção, digestão anaeróbia, fermentação, hidrólise ácida, hidrólise enzimática e transesterificação, são alguns dos processos. A conversão dos materiais de biomassa tem o objectivo de transformar materiais sólidos carbonáceos, que são originalmente difíceis de manusear, volumosos e com teores energéticos baixos, em combustíveis com características físico-químicas que permitam um armazenamento económico e a possibilidade de transferência através de sistemas de bombeamento (Demirbas, 2004).

A biomassa como recurso energético, representa 35% do consumo de energia primária, nos países em vias de desenvolvimento, elevando o total mundial para 14% do consumo de energia primária, mas nos países industrializados, representa apenas 3% do consumo de energia primária (Demirbas, 2005). A maioria da energia proveniente da biomassa é produzida a partir de madeira e de resíduos de madeira (64%), de resíduos sólidos (24%), de resíduos agrícolas (5%) e de gases de aterro (5%) (Demirbas, 2005). Estima-se que até 2050 a biomassa poderá fornecer cerca de 38% do consumo mundial de combustível directo e 17% da electricidade do mundo (Demirbas, 2004). Se a biomassa for produzida de forma mais eficiente e utilizada através das modernas tecnologias de conversão, pode fornecer uma gama considerável e diversa de combustíveis em pequenas e grandes escalas.

A conversão térmica directa, ou seja, a combustão, é a forma mais antiga de utilização da biomassa herbácea e, também, a que comercialmente está mais difundida. Esta tecnologia será abordada com detalhe, mais à frente neste capítulo, pois é o processo considerado no trabalho para aproveitamento energético dos *Miscanthus*.

Porém, existem outras formas de utilização da biomassa herbácea para energia.

A produção de etanol a partir de biomassa, é um dos processos de mais ampla aplicação e divulgação, sobretudo devido ao exemplo do Brasil, que produz em larga escala etanol a partir de cana de açúcar. Neste processo, o açúcar é extraído da biomassa e fermentado a etanol, sendo necessário uma destilação subsequente para concentração e purificação do produto. O etanol produzido pode ser utilizado como um suplemento

(geralmente até 10%) ou substituto da gasolina (neste caso, os motores dos veículos têm de ser adaptados)(Greenpro, 2004). O etanol pode ainda ser canalizado para a produção de éter etil-ter-butílico (ETBE), por reacção com o isobuteno, na presença de um catalisador (Fernando, 2007). Este componente pode ser adicionado à gasolina (até 15%), podendo substituir o éter metil-ter-butílico (MTBE), um aditivo commumente utilizado (Greenpro, 2004).

O etanol pode ser produzido a partir de biomassa que contenha açúcares, amido ou celulose. A fonte mais conhecida de etanol é a cana-de-açúcar podendo, no entanto, ser usados outros materiais, incluindo o trigo, o milho e outros cereais e a beterraba sacarina (Fernando, 2007). A biomassa baseada no amido é geralmente mais económica do que os materiais baseados em açúcar, mas requer um processamento adicional (a hidrólise do amido)(Demirbas, 2001). De forma semelhante, os materiais celulósicos tais como a madeira e a palha, estão disponíveis de forma imediata, mas requerem um processo adicional de decomposição e hidrólise que, tecnologicamente, ainda não foi implementado em larga escala (Greenpro, 2004).

A extracção de óleos vegetais e a sua utilização como combustíveis *in natura* ou após transesterificação, é outro processo que tem vindo a ser largamente utilizado para a produção de um portador de energia a partir de biomassa. Quer os óleos quer os seus ésteres metílicos podem ser usados para alimentar os motores diesel. Os ésteres metílicos (biodiesel) são mais comuns no mercado, porque podem ser usados nos motores diesel tradicionais sem haver necessidade de efectuar modificações técnicas complicadas. Existe uma grande variedade de culturas que podem ser usadas neste processo, por apresentarem uma elevada proporção de óleo na semente (culturas oleaginosas). A colza, o girassol, a soja são exemplos (Fernando, 2007).

Embora usados ocasionalmente na cogeração ou na produção de calor, estes biocombustíveis líquidos (etanol, biodiesel e óleo vegetal) são principalmente usados no sector automóvel. Isto deve-se parcialmente às suas propriedades físicas, como seja a capacidade de serem bombeados e a sua elevada densidade energética (Greenpro, 2004).

A biomassa herbácea lenhosa de baixa humidade, como os *Miscanthus*, é a mais adequada para ser utilizada em processos de decomposição termoquímica (Demirbas, 2001).

A pirólise é definida como a destruição térmica de materiais orgânicos, na ausência de oxigénio. A biomassa é aquecida na ausência de oxigénio, ou parcialmente queimada com um fornecimento limitado de oxigénio, para produzir uma mistura de gases ricos em hidrocarbonetos, um líquido semelhante a óleo/petróleo e um resíduo sólido rico em carbono (Demirbas, 2005). O processo pode ser ajustado à maximização da produção de carvão vegetal, de óleo pirolítico, de gás ou outros (Demirbas, 2001). Por exemplo, se o objectivo é a maximização dos rendimentos dos produtos líquidos resultantes da pirólise da biomassa, é preferível utilizar temperaturas moderadas (925K), velocidades de aquecimento superiores a 100°C/s e tempos de residência curtos (Demirbas, 2001; Dias e Gulyurtlu, 2005).

A carbonização refere-se aos processos nos quais, o carvão é o principal produto de interesse. À temperatura habitual de carbonização, de cerca de 675K , o carvão representa o maior componente da decomposição da biomassa (Demirbas, 2001a). A torrefacção é um método viável para a melhoria das propriedades da biomassa como combustível. Consiste num aquecimento lento da madeira numa atmosfera inerte a uma temperatura máxima de 575K e o tratamento produz um produto sólido uniforme, com menor teor de humidade e maior teor de energia comparados com os da biomassa inicial (Demirbas, 2005).

A liquefacção é um processo termoquímico semelhante à pirólise, que ocorre a temperaturas moderadas e elevadas pressões, na presença de um catalisador, obtendo-se como produto um líquido oleoso (Demirbas, 2001).

A gasificação é uma forma de pirólise, realizada a altas temperaturas, por forma a otimizar a produção de gás, na qual se utiliza o vapor de água e/ou ar como agente de gasificação (Dias e Gulyurtlu, 2005). O gás resultante, é uma mistura de monóxido de carbono, hidrogénio e metano, juntamente com o dióxido de carbono e o azoto. Este gás é mais versátil do que a biomassa sólida inicial, podendo ser queimado para produzir calor e vapor, ou usado em turbinas a gás para produzir electricidade (Demirbas, 2001, Greenpro, 2004). O gás produzido pode ainda ser utilizado na síntese de outros compostos (Dias e Gulyurtlu, 2005). O gás produzido pode ser usado numa unidade de cogeração, que aproveita o teor de energia do combustível para um efeito máximo, através da combinação de calor e energia (Greenpro, 2004). O principal problema é a

contaminação do gás produzido, por partículas de alcatrão e, por vezes, quantidades consideráveis de materiais orgânicos condensáveis (Greenpro, 2004).

Outras tecnologias têm vindo a ser estudadas e desenvolvidas neste campo. Por exemplo, extracção supercrítica e produção de hidrogénio a partir da biomassa (Demirbas, 2001).

3.1 Combustão de biomassa herbácea

A combustão é um processo amplamente utilizado em várias escalas para converter a energia da biomassa em calor e/ou vapor para cozinhar, aquecimento ambiente, para processos industriais e/ou para geração de electricidade (em fogões, caldeiras e centrais eléctricas) (Demirbas, 2001).

No processo de combustão, a biomassa é oxidada a dióxido de carbono e água. A deficiência em oxigénio provoca uma combustão incompleta da qual resulta a formação de muitos subprodutos. O excesso de ar arrefece o sistema. (Demirbas, 2005)

A combustão da biomassa está relacionada com a proporção de material queimado, com os produtos da combustão, com o excesso de ar necessário para a combustão ser completa, e com as temperaturas à qual ocorre a combustão. (Demirbas, 2005)

É portanto, fundamental, conhecer as propriedades da biomassa que se destina a processos de combustão. Estas propriedades podem ser agrupadas em propriedades físicas, químicas e térmicas. Os valores das características físicas variam consideravelmente e as propriedades tais como a porosidade e a área da superfície interna estão relacionadas com o tipo de biomassa, enquanto que a densidade, o tamanho das partículas e a forma de distribuição estão relacionadas com o processamento pós-colheita. A composição química (análise elementar, teor de humidade, teor de cinzas e seus constituintes e teor de voláteis e seus constituintes) e o poder calorífico varia consoante as espécies, a fracção da biomassa e as condições de crescimento, mas podem também depender do ambiente de combustão. Um outro parâmetro também importante na avaliação da biomassa para combustão é a temperatura de fusão das cinzas. (Demirbas, 2005)

A biomassa herbácea apresenta, geralmente um poder calorífico mais reduzido e uma menor densidade energética, face ao material lenhoso da madeira. Este aspecto pode ser

superado por intermédio da densificação da biomassa (pelletização, briquetagem, etc), processo que podem onerar a fileira de produção e utilização da biomassa, em termos económicos e energéticos, mas que pode também abater custos associados ao armazenamento e transporte da biomassa (Picco, 2010).

As pellets (de menor dimensão) e os briquetes (de maior dimensão) são formas mecanicamente estáveis de biomassa (Figura 3.1). Na produção de pellets e briquetes, a biomassa é comprimida a altas pressões, sendo necessário, previamente, secar a biomassa. Como resultado da secagem e compactação, as pellets têm um teor de água máximo de 8% e uma densidade superior a 650 kg.m^{-3} e os briquetes um teor de água inferior a 10% e uma densidade de cerca de 450 kg.m^{-3} . Esta transformação permite um aumento da eficiência de muitos processos, tais como, um aumento do fluxo favorável e melhoria de propriedades de combustão, permitindo que a biomassa se mantenha estável, durante o transporte e enchimento, até à sua queima. (Greenpro, 2004)



Figura 3.1 – Pelletes (à esquerda) e Briquetes (à direita) (Fonte: Greenpro, 2004)

A composição da biomassa herbácea pode afectar criticamente o processo de combustão. A elevada humidade, a diversidade da composição química e o elevado teor de cinzas e de alguns macroatómos (N, K, Cl, S, por ex) na biomassa, pode causar problemas nos sistemas tradicionais de combustão, especificamente estudados para a combustão de madeira (a produção muito elevada de cinzas cria também o problema da sua gestão). A presença de metais alcalinos em quantidade elevada em combinação com outros elementos da biomassa, tais como a sílica e o enxofre e na presença de cloro, são responsáveis por muitas reacções indesejáveis de combustão em fornos e caldeiras geradoras de energia, dando origem, por exemplo, aos problemas críticos de

corrosão, “fouling” (formação de depósitos em superfícies de propagação de aquecimento) e “slagging” (formação de depósitos completamente ou parcialmente fundidos nas paredes dos fornos ou superfícies de propagação de aquecimento expostas a calor radiante) e à emissão de dioxinas e furanos (devido ao cloro), de óxidos de azoto (NO_x), ácido cianídrico e óxido nitroso (N_2O) (devido ao azoto) e de óxidos de enxofre (SO_x) (devido ao enxofre). (Demirbas, 2005 e Picco, 2010).

A produção de calor, energia e vapor através da combustão é aplicada desde uma pequena escala (aquecimento doméstico) até uma escala acima dos 100 MWe. A co-combustão da biomassa em centrais eléctricas a carvão de elevada dimensão é uma opção especialmente atractiva devido à elevada eficiência de conversão destas centrais. A eficiência das redes eléctricas das centrais de combustão de biomassa vai dos 20% aos 40%. As eficiências mais elevadas são obtidas com sistemas acima dos 100 MWe, ou quando é efectuada a co-combustão da biomassa em centrais a carvão. (Demirbas, 2001)

As aplicações em pequena escala, tais como cozinhar ou aquecimento ambiente, podem ser bastante ineficientes, com perdas de transferência de calor entre os 30% e os 90%. Este problema pode ser resolvido através do uso de fogões e fornos tecnologicamente mais eficientes. (Demirbas, 2001)

A uma escala maior, a biomassa pode ser alvo de combustão em fornos e caldeiras para produzir calor ou vapor para um gerador de turbina a vapor. O tamanho da central eléctrica é limitado pela disponibilidade da matéria-prima local e é, normalmente, inferior a 25 MW. Contudo, utilizando abastecimentos de matéria-prima dedicados, tais como plantações de pequena rotação ou culturas energéticas herbáceas, o tamanho pode ser aumentado para 50-70 MW. (Demirbas, 2001)

Os sistemas de produção de energia de biomassa, em larga escala, podem ser comparados, em termos de eficiência, aos sistemas de combustíveis fósseis tendo um custo mais elevado devido à humidade presente na biomassa. Contudo, utilizando a biomassa em sistemas de produção de calor e electricidade (sistemas de co-geração), o factor económico é significativamente melhorado. A co-geração é viável onde haja uma procura local tanto por calor como por electricidade. (Demirbas, 2001)

3.1.1 Sistemas de combustão de biomassa lenhosa

Existem numerosas alternativas para fornecer os edifícios com aquecimento a partir da biomassa lenhosa. É possível desenvolver não só sistemas de aquecimento central, mas aplicações descentralizadas de lareiras. A escolha dos sistemas de combustão é determinada por parâmetros técnicos, sendo necessário ter um conhecimento preciso de todas as qualidades dos geradores de calor. Os seguintes sistemas de geração de calor estão disponíveis no mercado: lareiras abertas e fechadas, salamandras, fornos a pellets, fogões de aquecimento central, fornos de cerâmica, caldeiras (com toros, com pellets ou com estilhas). (Greenpro, 2004)

As lareiras abertas, que apresentam uma câmara de combustão aberta para a divisão, têm um efeito de aquecimento muito baixo. Se for queimada lenha numa lareira aberta, apenas cerca de 20% da sua energia é usada para aquecimento do espaço na forma de radiação. O restante escapa através da chaminé, sem ser usado. As lareiras abertas requerem uma chaminé própria e entrada de ar fresco. (Greenpro, 2004)

As lareiras fechadas ou embutidas incluem uma câmara de combustão, fechada, com colector de cinzas, colector dos gases de escape, entre outros. Neste sistema, a entrada de ar de combustão é controlada mais eficazmente, aumentando a temperatura da câmara, o que conduz a um aumento perceptível na eficiência e qualidade de combustão. Algumas lareiras fechadas são equipadas adicionalmente com condutas de convecção e tubos de ar quente, para aumento da renovação do ar na divisão. São alimentadas manualmente com lenha, com toros ou briquetes e o calor é emitido por radiação para a divisão. Dependendo do tamanho e do fabricante, as lareiras fechadas têm uma saída térmica entre 5 e 10 kW, apresentando uma eficiência global reduzida. (Greenpro, 2004)

As salamandras, tecnicamente melhoradas, podem ser colocadas em qualquer local da divisão, têm portas frontais herméticas, com fecho, que normalmente têm uma vidraça de quartzo que permite observar a combustão e são ligadas à chaminé por meio de uma conduta (Figura 3.2). As salamandras emitem a maior parte do seu calor por radiação a partir da superfície aquecida, com saídas térmicas entre 2 e 15 kW. Muitos tipos têm um revestimento de convecção que permite que o ar frio seja extraído da envolvente, antes de ser novamente libertado como ar quente através de aberturas na parte superior. (Greenpro, 2004)

Os fornos verticais de pellets são essencialmente idênticos às salamandras em termos de instalação, classe de desempenho e ligação à chaminé (Figura 3.2). São usados para o fornecimento de calor em espaços habitáveis, apresentando um limite de saídas de calor à volta de 11kW, com a possibilidade de ligação do forno ao sistema de aquecimento central. Em termos técnicos, os fornos de pellets diferem das salamandras porque, para além do ventilador, estão equipados com medição automática e alimentação de pellets a partir de uma tremonha. (Greenpro, 2004)



Figura 3.2 – Salamandra (à esquerda) e Forno de pellets (à direita) (Fonte: Greenpro, 2004)

Os fogões de aquecimento central modernos são usados não só para cozinhar e aquecer cozinhas como podem também aquecer todo o edifício incluindo o aquecimento das águas. Tecnicamente o calor excedente que não é usado para cozinhar é usado para o sistema de aquecimento central ou é armazenado como água quente num acumulador integrado no sistema. Estes sistemas podem atingir uma eficiência global de aproximadamente 65% porque o calor irradiado na divisão onde está instalado o fogão é usado para aquecimento e não deverá ser perdido. (Greenpro, 2004)

Os fornos cerâmicos, que na maioria estão situados num local central nos edifícios, aquecem áreas que normalmente se prolongam por várias divisões. São geralmente instalados como aquecimento adicional ao aquecimento central existente e, muitas vezes, acoplados ao circuito de aquecimento central. Nos fornos cerâmicos, simples ou de ar quente, o calor gerado na câmara de combustão é armazenado pela cerâmica, que emite calor por um período de 6 a 24 horas, apresentando eficiências de aquecimento entre 75% e 89%. Os sistemas de aquecimento têm geralmente um permutador de calor para integrar o forno cerâmico com o sistema de aquecimento central. Alguns

fabricantes têm sistemas de aquecimento com tanques de armazenamento para água quente. (Greenpro, 2004)

As caldeiras de aquecimento central convencionais são aquecidas com biomassa cortada ou briquetes e podem cobrir as necessidades de calor de um edifício inteiro. Estas caldeiras de gasificação, como também são conhecidas, são usadas para fornecer o calor completo para moradias simples e grandes edifícios. O fogo de baixa temperatura resultante, produz gases que são retirados para uma câmara de combustão secundária, onde são completamente queimados. O calor produzido no sistema da caldeira é armazenado na água que é bombada para os utilizadores, por meio de tubagem. Os gases podem também ser usados em motores de combustão ou turbinas a gás, para produzir electricidade, ou calor e electricidade combinados. (Greenpro, 2004)

Como as caldeiras de gasificação, também caldeiras alimentadas por pellets oferecem uma alternativa completa ao aquecimento com combustíveis fósseis, incluindo aquecimento de espaços e fornecimento de água quente (Figura 3.3). As pellets são predominantemente usadas para fornecer aquecimento em edifícios residenciais privados ou pequenos edifícios comerciais. Actualmente, estão disponíveis sistemas de aquecimento central de pellets com uma saída de calor de cerca de 5 – 50 kW. Estas caldeiras a pellets requerem até 5000 kg de pellets por ano. (Greenpro, 2004)



Figura 3.3 - Secção de uma caldeira alimentada por pellets com sistema de alimentação inferior (à esquerda), com sistema de retorta (ao centro) e com sistema de alimentação superior (à direita) (Fonte: Greenpro, 2004)

Além das pellets, podem também ser usadas estilhas como combustível nas caldeiras automáticas. As estilhas são geralmente introduzidas na caldeira com transportadores

em espiral ou de parafuso (Figura 3.4). Devido ao volume e à heterogeneidade deste material, que aumenta o risco de bloqueios dos sistemas transportadores e tremonhas, estas caldeiras de estilhas são mais robustas e maiores do que as caldeiras de pellets, apresentando capacidades mínimas de combustão de 35 kW. Dependendo do projecto, os sistemas de aquecimento de estilhas são também produzidos como centrais de larga escala, que podem produzir uma saída de calor até 7 MW. Embora a tecnologia destas caldeiras seja bem desenvolvida e eficiente, elas não são adequadas para habitações domésticas devido aos elevados custos da caldeira, depósito de armazenamento e equipamento de transporte. Porém, em termos económicos são ideais para aplicações em que as caldeiras de pellets já não são adequadas, isto é, para edifícios de apartamentos e públicos. (Greenpro, 2004)



Figura 3.4 - Secção de uma caldeira alimentada por estilhas em que é apresentado o seu transporte até à câmara (Fonte: Greenpro, 2004)

Os sistemas combinados de caldeiras podem ser usados para aplicações onde seja necessária uma elevada flexibilidade em termos de tipos de combustíveis, devido à sua variabilidade (pelletes, estilhas, toros, serradura). Estes são similares, em construção, às caldeiras de gasificação. (Greenpro, 2004)

4 Metodologia

O desenvolvimento e o estudo aprofundado de culturas energéticas, actualmente, reside não só na possibilidade da sua utilização como fonte de energia renovável, mas também no facto de se poder, assim, fazer uso de terras em pousio ou mesmo abandonadas, limitando o risco de erosão do solo. As culturas energéticas oferecem algumas vantagens ecológicas claras em relação aos combustíveis fósseis. Apresentam, por exemplo, um balanço de carbono positivo (devido à actividade fotossintética da biomassa que é utilizada como matéria prima), o que contribui para a redução das emissões de gases, que contribuem para o efeito estufa. Um outro contributo positivo resulta do seu baixo teor em enxofre, o que contribui para a redução da emissão de gases acidificantes (Gosse, 1995). No entanto, as culturas energéticas apresentam também algumas desvantagens, uma vez que a produção agrícola da biomassa é realizada de forma intensiva. Existe, portanto, o risco de se poluírem as águas com nitratos, fosfatos e pesticidas, assim como o perigo da redução da biodiversidade, quando a biomassa for cultivada na forma de monocultura (Kaltschmitt *et al.*, 1996). A utilização de culturas energéticas deve, portanto, ser estudada também em termos da avaliação dos seus impactes ambientais negativos, de modo a integrar os mesmos no desenvolvimento de uma agricultura sustentável.

Os *Miscanthus* possuem uma capacidade calorífica elevada e nas condições pedoclimáticas da zona do estuário do Tejo, sem limitação de água, podem ser alcançados elevados rendimentos a partir do terceiro ano (20-30 t.ha⁻¹, Fernando e Oliveira, 2005). Este facto permite considerar promissora esta cultura, em termos da sua valorização energética (e económica), especialmente num país como Portugal onde não existem recursos conhecidos de combustíveis fósseis, em condições economicamente exploráveis. Mas será que a energia potencial produzida a partir dos *Miscanthus*, em Portugal, é superior aos gastos energéticos decorrentes da sua produção, transporte e processamento? De forma a viabilizar a sua utilização na produção energética?

De modo a avaliar o balanço energético decorrente da utilização dos *Miscanthus* na produção de energia, em Portugal, foi aplicada a metodologia desenvolvida por Biewinga e van der Bijl (1996). Na produção de energia, considerou-se a combustão da biomassa, por ser o processo que já está implementado a nível industrial e comercial.

Neste contexto, estudaram-se quatro cenários diferentes para a sua combustão: a) numa Central Térmica de Biomassa com 10 MW de potência instalada, como a de Mortágua; b) numa Central Térmica de Biomassa de pequena dimensão, com 0,1MW de potência instalada, destinada a aquecimento (incluindo águas) de espaços públicos, como uma piscina; c) sistema doméstico de combustão de pellets de *Miscanthus*, em que as pellets são produzidas numa unidade transformadora situada na fronteira da exploração agrícola; d) sistema idêntico ao anterior, mas em que as pellets são produzidas no campo de *Miscanthus*, na colheita da biomassa.

No estudo, é feita uma análise de sensibilidade, em que se pretende avaliar a influência de determinados factores, no balanço energético. São estudados factores relacionados com a produção agrícola da cultura, como o nível de fertilização azotada, a irrigação, a data da colheita e a produtividade, assim como factores relacionados com o seu processamento e utilização, como a distância entre o local de produção dos *Miscanthus* e a unidade transformadora e o rendimento energético das unidades transformadoras.

O balanço energético é calculado por subtração do consumo energético à energia potencial produzida, sob a forma de biomassa. O consumo energético é a soma dos gastos energéticos utilizados na produção das plântulas, dos fertilizantes, pesticidas, assim como na produção e utilização de maquinaria, no cultivo dos *Miscanthus*. O consumo energético reflecte também os gastos utilizados no armazenamento, transporte e processamento da biomassa. A energia produzida corresponde à energia potencial total que se poderá obter por combustão das plantas, que corresponde ao produto Produtividade ($t \cdot ha^{-1}$) x Calor de combustão. A este valor é multiplicado o rendimento energético da máquina.

Como a cultura é perene, considerámos que a sua produção teria uma duração de 15 anos. Em todos os cálculos utilizámos como unidade funcional 1 ha de produção de *Miscanthus* por ano. É contabilizado o gasto energético decorrente da implementação de plântulas no terreno, no 1º ano. Para a realização deste balanço energético, foi necessário ter em linha de conta alguns aspectos, nomeadamente dados respeitantes à produtividade, ao uso de fertilizantes e pesticidas, ao uso de água e à caracterização da biomassa. Estes dados foram obtidos no trabalho de Fernando (2005) de campos de *Miscanthus* localizados no *Campus* da FCT/UNL, do Monte de Caparica.

Em relação aos dados da produtividade e da composição da biomassa, utilizaram-se os valores das colheitas efectuadas em Setembro, quando, globalmente, a produção de *Miscanthus* foi superior. De acordo com Fernando (2005), a humidade das plantas de *Miscanthus* colhidas em Setembro (40-54%), é maior do que a das plantas colhidas em Novembro ou em Janeiro (30-40%). No entanto, as produtividades obtidas nas colheitas de Novembro e Janeiro são menores do que no final do Verão, em cerca de 17 e 26%, respectivamente, em matéria seca, devido não só à queda das folhas e à perda de pelugem da panícula, mas também à degradação dos caules.

O Quadro 4.1 apresenta os dados de produtividade de *Miscanthus*, em matéria seca e com humidade, obtidos de Fernando (2005), nas colheitas de Setembro. Considerou-se que a biomassa apresentava, em Setembro, cerca de 40% de humidade.

Quadro 4.1 - Produtividade de *Miscanthus*, em matéria seca e com humidade, nas colheitas de Setembro (Fonte: Fernando, 2005)

Idade da cultura	Produtividade (t.ha ⁻¹ , ms)	Produtividade (t.ha ⁻¹ , mh)
1º e 2º ano	3,3	5,5
3º ano e seguintes	26,3	43,9

Para o cálculo do balanço energético foram incluídos todos os passos desde a propagação das plantas e preparação dos campos até à colheita e transporte da biomassa e seu processamento.

Os parâmetros respeitantes à mecanização, uso e produção de energia, uma vez que não foram directamente determinados, foram estimados com base em dados obtidos na literatura. Considerou-se que a exploração agrícola se localizaria perto da barragem do Alqueva, uma vez que esta região possui características climáticas que permitem antever o estabelecimento desta cultura com sucesso. A barragem possibilita, por sua vez, o fornecimento de água para a irrigação.

Inicialmente será gasta uma certa quantidade de energia na propagação das plântulas, no seu transporte até ao campo, na preparação do campo e na colocação das plântulas em campo. A energia gasta neste conjunto de acções será agrupada e designada por “plântulas”.

Devido à sua característica híbrida, o *Miscanthus x giganteus* não forma sementes férteis. Propaga-se pela divisão dos rizomas ou *in vitro* ou através de micro-propagação. A micro-propagação é o método mais comum usado e a comercialização dos *Miscanthus* assentam neste método. O primeiro passo na micro-propagação é a indução *in vitro* de culturas estéreis. De seguida as plantas são multiplicadas num meio de perfilhamento. Um ciclo de multiplicação demora 4 semanas. As plântulas crescem em estufas durante 6 – 8 semanas a uma temperatura de 20 – 25° C antes de serem plantadas nos campos. A energia necessária à propagação das plantas varia consoante a região, uma vez que o combustível consumido para aquecer a estufa depende directamente da temperatura predominante. Assume-se que o consumo de energia do período de multiplicação é igual ao do período de crescimento das plantas. No caso de estudo, assume-se que as plântulas poderiam ser produzidas em estufas em Portugal.

A energia associada ao transporte das plantas, depende da distância da estufa até ao campo de *Miscanthus*, da capacidade de carregamento do camião e do seu consumo de combustível. Neste caso, assumiu-se que a distância entre a estufa e o campo seria, no máximo de 100 km.

Após o transporte para o campo, é necessário preparar o campo para colocação das plântulas. Nesta preparação, os passos necessários são arar e gradar. Após a preparação do terreno, o *Miscanthus* pode ser plantado.

Em Portugal, a plantação pode ser realizada desde o meio de Março até ao princípio de Maio, desde que a temperatura do solo seja superior a 10°C. A plantação pode ser feita com máquinas convencionais. Foi assumido que a densidade de plantação seria de 4 plantas por m², e que o período de vida seria de 15 anos.

De acordo com Lewandowski *et al.* (1995), a energia total necessária para a propagação, transporte e plantação das plântulas (incluindo a preparação do terreno) é de 3,3 GJ.ha⁻¹, para uma densidade de plantação de 2 plântulas por m². Portanto, na situação em estudo, considerou-se que seria necessário o dobro da energia, ou seja, 6,6 GJ.ha⁻¹.

A necessidade de adição de fertilizantes é calculada baseada no rendimento esperado e no teor de nutrientes do material vegetal colhido. Comparado com outros materiais como por exemplo a palha, o teor de nutrientes minerais nos *Miscanthus* é mais baixo, devido à translocação dos nutrientes minerais da parte aérea para os rizomas no final do

ciclo vegetativo. Os ensaios em campo mostraram que 60kg de azoto no 1º ano e seguintes, são suficientes para cobrir a procura de azoto do *Miscanthus*. Uma dose anual de fertilizante de 140kg K e a aplicação no 1º ano e no 11º ano de 100kg P/ha cobre totalmente a procura das plantas por potássio e fósforo. (Fernando, 2005)

A **produção de fertilizantes** envolve um consumo energético que tem de ser contabilizado. A produção de fertilizante azotados é o processo energeticamente mais intenso. Para a produção de 1kg de azoto, são necessários 38,6MJ (Melman *et al*, 1994). O superfosfato (fertilizante fosfatado utilizado nos campos) é principalmente obtido em minérios provenientes do norte da África, sendo necessários 7,6 MJ/kg P para a sua extracção e comercialização (Melman *et al*, 1994). A mineração do potássio requer menos energia do que a mineração do fósforo, uma vez que os depósitos estão mais próximos da superfície terrestre, sendo necessários 3,0 MJ/kg P para a sua extracção e comercialização (Melman *et al*, 1994). O consumo energético associado à produção de fertilizantes inclui todos os gastos da sua fileira.

O **controlo das ervas daninhas** é apenas necessário no 1º ano após a plantação. De acordo com Lewandowski *et al*. (1995), são gastos cerca de 96 MJ.ha⁻¹ neste controlo mecânico. A partir do 2º ano, o *Miscanthus* é suficientemente competitivo para se sobrepor às ervas daninhas, não sendo necessário o controlo mecânico. Actualmente não são conhecidas pragas que se tenham tornado relevantes relativamente ao *Miscanthus*. Sendo assim, não tem sido necessário a aplicação de pesticidas. (Fernando, 2005)

Depois da plantação é necessário **irrigar**. De acordo com Fernando (2005) no 1º e 2º anos a rega deve ser mais intensa, para garantir o correcto estabelecimento dos rizomas e para evitar o stress hídrico, sendo necessária uma aplicação de 680mm de água no período de Junho a Agosto. No 3º ano e seguintes, é necessária apenas uma adição de 350 mm no período de Junho a Agosto. De acordo com Morais (2003), a energia consumida por cada m³ de água de rega, em Portugal, equivale a 1,31 MJ.

Ao longo dos anos, o **trabalho mecânico** envolvido na produção agrícola de *Miscanthus*, consome uma certa quantidade de energia. Esse trabalho mecânico corresponde à energia consumida na aplicação dos fertilizantes e na limpeza do campo após a colheita, correspondendo a um valor de 348 MJ.ha⁻¹. No 1º ano, a este valor é adicionado o consumo associado ao controlo das ervas daninhas. No último ano (15º) é

necessário remover os rizomas do solo, o que consome 154 MJ.ha^{-1} . (Lewandowski *et al.*, 1995)

O trabalho mecânico envolve também a **colheita**. Como já referido, assumimos que a colheita é realizada no final de Setembro. Nesta altura o teor de matéria seca pode chegar aos 60%, o que é suficiente para a combustão, não sendo necessário um processo adicional de secagem da biomassa (Barroso, 2001). No estudo, separámos o valor energético associado a este consumo pois nos diferentes cenários a colheita foi realizada de maneira diferente, envolvendo consumos diferentes. Considerando o Cenário 1 e 2, nos quais a biomassa será queimada em Centrais Térmicas, a biomassa é colhida numa máquina que ceifa e tritura para um vagão, consumindo $2,7 \text{ GJ.ha}^{-1}$ (Lewandowski *et al.*, 1995). No Cenário 3, em que as pellets são produzidas numa unidade transformadora situada na fronteira da exploração agrícola, a biomassa é colhida e triturada com a mesma máquina, consumindo $2,7 \text{ GJ.ha}^{-1}$, e a pelletização consome uns adicionais $0,36 \text{ GJ.ha}^{-1}$ (Lewandowski *et al.*, 1995). No Cenário 4, as pellets são directamente produzidas numa máquina, em campo, que ceifa, estilhando e pelletizando num único passo, e que consome cerca de $5,8 \text{ GJ.ha}^{-1}$ (Lewandowski *et al.*, 1995). Na produção de pellets, o material é pré-seco utilizando a energia térmica da máquina, sendo necessário um gasto superior em campo, pois a biomassa apresenta mais humidade em campo do que quando chega, em estilha, à unidade transformadora situada na fronteira da exploração agrícola (Fernando, 2007).

No transporte, tem de se calcular a energia dispendida entre o local de produção e a sua conversão em energia (calor). É considerada a ida em separado da volta. Na ida considera-se que o camião vai carregado com a biomassa com humidade (40%, no caso da estilha, 6-10% no caso das pellets) e considera-se que as produtividades no 1º e 2º anos são diferentes do 3º ano e seguintes. Na volta, o camião retorna vazio. Cada camião tem capacidade para transportar cerca de 20 toneladas de carga útil. No transporte da estilha, devido à baixa densidade do material (80 kg/m^3), cada camião transporta 12t. No transporte das pellets, devido à elevada densidade do material (500 kg/m^3), o camião transporta a totalidade da carga útil (20t). O valor de energia gasto, é de $0,0008 \text{ GJ.(t.km)}^{-1}$ (Melman *et al.*, 1994). No Cenário 1 e 2, considera-se que as centrais de combustão estão situadas num raio de 30 km. No Cenário 3 e 4, considera-se uma distância média de 150 km entre a unidade produtora de pellets e a unidade doméstica de utilização das pellets.

Na **conversão energética** da biomassa consideraram-se os seguintes valores:

- Poder calorífico do *Miscanthus* no 1º e no 2º ano = 15.7 GJ.t^{-1} (matéria seca);
Poder calorífico do *Miscanthus* no 3º ano e seguintes = 17.2 GJ.t^{-1} (matéria seca)
(Fernando, 2005)
- Na conversão energética nas Centrais, a energia necessária ao processo é igual a $0,27 \text{ GJ.t}^{-1}$ (Biewinga e van der Bijl, 1996). A utilização da caldeira de pellets assume um consumo eléctrico de 280 W (em média), necessário para a ignição eléctrica e para o motor de extração de fumos (AGenergy, 2010). Considerando um consumo médio de 1,8 kg de pellets por hora (Vimasol, 2010), a energia necessária ao processo corresponde a $0,56 \text{ GJ.t}^{-1}$.
- Rendimento térmico garantido da Central Térmica de Biomassa com 10 MW de potência instalada - 81% (Barroso, 2001).
- Rendimento térmico garantido da Central Térmica de Biomassa de pequena dimensão, com 0,1MW de potência instalada - 74%. (Jones e Walsh, 2001).
- Rendimento térmico garantido na caldeira de pellets - 90% (Vimasol, 2010).

Balanço Energético GJ/ha ao longo de 15 anos, para se obter este valor é necessário efectuarem-se os seguintes cálculos:

Balanço Energético GJ/ha ao longo de 15 anos

$$= (\text{produção energética} - \text{consumo energético} - \text{energia necessária conversão energética})$$

Balanço Energético em GJ/t por ano, consegue-se obter este valor, dividindo-se o valor obtido para o Balanço Energético GJ/ha ao longo de 15 anos, pelo número de anos (15) e dividi-se outra vez pelo valor médio da produção com humidade obtida nos 15 anos ($38,8 \text{ t.ha}^{-1}$).

Balanço Energético em GJ/t por ano

$$= \frac{\text{Balanço Energético GJ/ha ao longo de 15 anos}}{\frac{\text{número de anos (15)}}{\text{valor médio da produção com humidade obtida nos 15 anos}}}$$

Eficiência, do uso do solo em termos de balanço energético em GJ/ha/ano, consegue-se obter o valor correspondente, dividindo o valor do Balanço Energético GJ/ha ao longo de 15 anos, pelo numero de anos (15).

$$\text{Eficiência (GJ/(ha. ano))} = \frac{\text{Balanço Energético GJ/ha ao longo de 15 anos}}{\text{numero de anos (15)}}$$

Eficiência energética, este campo não tem unidades, visto tratar se de uma razão, para se calcular esta razão é necessário dividir o valor obtido na produção energética pelo consumo global de energia (soma do consumo energético na produção, transporte e conversão energética).

$$\text{Eficiência energética} = \frac{\text{Produção energética}}{(\text{consumo energético} + \text{conversão energética})}$$

Equivalências energéticas

Carvão (kg). O carvão apresenta 29.3GJ.t⁻¹(Lewandowski *et al.*, 1995). Tendo em conta a energia produzida por 1 t de *Miscanthus*, é possível calcular, em termos energéticos, o equivalente em carvão.

$$\text{Carvão (kg)} = \frac{\text{balanço energético em MJ/t por ano}}{29,3}$$

Diesel (l). O diesel apresenta 42,7GJ.t⁻¹(Lewandowski *et al.*, 1995) e a massa específica do diesel é igual a 0,835 kg/l. Tendo em conta a energia produzida por 1 t de *Miscanthus*, é possível calcular, em termos energéticos, o equivalente em diesel.

$$\text{Diesel (l)} = \frac{\text{balanço energético em MJ/t por ano}}{42,7 * 0,835}$$

5 Resultados e sua Discussão

5.1 Balanço energético da utilização de *Miscanthus* na produção de energia, por combustão, em Portugal

O principal objectivo deste capítulo será, portanto, a apresentação e avaliação do balanço energético da utilização de *Miscanthus* na produção de energia (calor), por combustão, em Portugal. O Quadro 5.1 apresenta os resultados para os quatro cenários.

Quadro 5.1 – Calculo do balanço energético na produção e conversão em energia dos *Miscanthus*, supondo uma duração do campo de 15 anos.

Fases do processo		Factores	Utilização (ha ⁻¹)	Energia (GJ.ha ⁻¹)			
				Cenários			
				1	2	3	4
Fase agronómica	N - Fertilizantes	0,0386 GJ.kg ⁻¹ (a)	60 kg, 15 anos	34,74	34,74	34,74	34,74
	P - Fertilizantes	0,0076 GJ.kg ⁻¹ (a)	100 kg, 1º e 11º ano	1,52	1,52	1,52	1,52
	K - Fertilizantes	0,003 GJ.kg ⁻¹ (a)	140 kg, 15 anos	6,3	6,3	6,3	6,3
	Plântulas	6,6 GJ.ha ⁻¹ (b)	1º ano	6,6	6,6	6,6	6,6
	Trabalho mecânico	0,348 GJ.ha ⁻¹ (b)	15 anos, inclui controlo de ervas, 1º ano e remoção rizomas no 15º ano	5,5	5,5	5,5	5,5
	Máquina de colheita	2,7 GJ.ha ⁻¹ (b)	15 anos	40,5	40,5	40,5	
	Pelletização	0,36 GJ.ha ⁻¹ (b)				5,4	
	Maquina de colheita e pelletização	5,8 GJ.ha ⁻¹ (b)					87
	Rega	0,00131 GJ.m ⁻³ (c)	6800 m ³ , 1º e 2º anos, 3500 m ³ , 3º anos e seguintes	77,4	77,4	77,4	77,4
Transporte		0,0008 GJ.(t.km) ⁻¹ (a)	30 km, 15 anos	14,3	14,3		
Transporte		0,0008 GJ.(t.km) ⁻¹ (a)	150 km, 15 anos			71,6	71,6
Consumo energético (soma das fracções anteriores) (a1)				187	187	250	291
Conversão energética (a2)		0,27 GJ.t ⁻¹ (d)	15 anos	157	157		
Conversão energética (a2)		0,56 GJ.t ⁻¹ (e)	15 anos			326	326
Consumo energético total (GJ.ha ⁻¹) (A = a1+a2)				344	344	576	617
Produção energética x rendimento instalação (GJ.ha ⁻¹) (B)				4855	4435	5394	5394
Balanço energético (em 15 anos) (GJ.ha ⁻¹) (B-A)				4511	4091	4819	4778
Balanço energético (GJ.t ⁻¹ por ano)				7.8	7.0	8.3	8.2
Eficiência do uso do solo em termos de balanço energético (GJ.ha ⁻¹ por ano)				301	273	321	319
Eficiência energética				14,1	12,9	9,4	8,8
Carvão equivalente (kg)		29,3GJ.t ⁻¹ (b)		265	240	283	280
Diesel equivalente (l)		42,7GJ.t ⁻¹ (b)	0,835 kg.l ⁻¹ (b)	217	197	232	230

(a) Melman *et al.* (1994); (b) Lewandowski *et al.* (1995); (c) Morais *et al.* (2003); (d) Biewinga e van der Bijl (1996); (e) AGenergy (2010) e Vimasol (2010); (f) Fernando (2005), Barroso (2001), Jones e Walsh (2001)

Em todos os Cenários pode verificar-se que as eficiências são superiores à unidade e que o balanço energético é positivo. Portanto, considerando o aspecto energético, pode ser uma possibilidade, em Portugal, a utilização dos *Miscanthus* para energia. Como podemos verificar, da análise do quadro 5.1, onde se apresenta o estudo efectuado para os quatro cenários, verifica-se que o cenário mais vantajoso é o Cenário 3, se considerarmos o balanço energético, ou seja a quantidade de energia que se consegue obter por ha, por ano. No entanto se considerarmos a eficiência energética, ou seja a razão entre a quantidade de energia produzida por energia consumida, então o cenário mais vantajoso é o Cenário 1. O valor da razão dos Cenários 1 e 2 enquadram-se no intervalo de valores apontado por Venturi e Monti (2005)(12-66). Os valores apresentados nos restantes cenários (3 e 4) estão abaixo do intervalo. Todos os ganhos líquidos ($\text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ por ano) estão dentro dos intervalos apontados por Venturi e Monti (2005)(242-523 $\text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ por ano). Entre Centrais, a Central Térmica de Biomassa com 10 MW de potência instalada é a mais eficiente. Entre o Cenário 3 e 4, verifica-se que é mais eficiente ceifar e depois peletizar, do que ceifar e peletizar em conjunto.

A Figura 5.1 que se apresenta em seguida, apresenta a energia necessária para a produção, transporte e conversão da biomassa de *Miscanthus*.

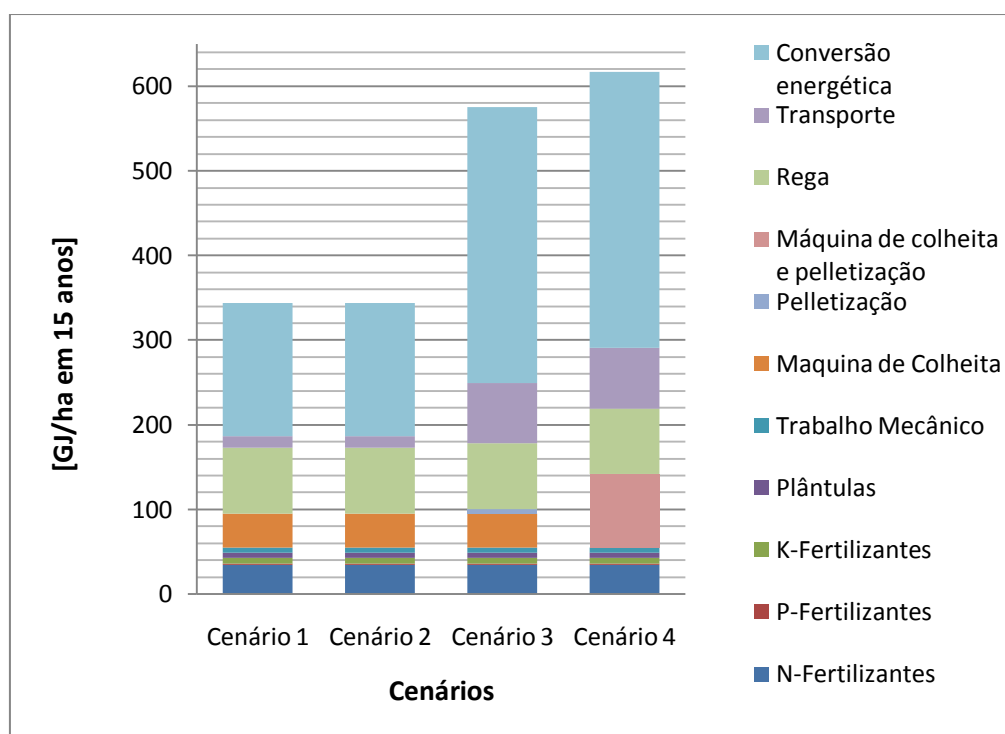


Figura 5.1 – Energia necessária para a produção, transporte e conversão de *Miscanthus*, para os cenários apresentados.

Em análise aos consumos apresentados nos vários cenários, verifica-se que a conversão energética e a rega, são os factores que mais contribuem para o consumo energético. Nos Cenários 3 e 4, o transporte também contribui com significado para o total do consumo energético.

5.2 Análise de Sensibilidade

Relativamente, aos cenários analisados anteriormente, através de uma análise de sensibilidade, pretende-se avaliar a influência de algumas variáveis na eficiência energética.

5.2.1 Variável: N - Fertilizante

No estudo em causa, a quantidade de N administrada na cultura é feita variar verificando-se quais as consequências perante a eficiência energética. A variação da administração de azoto implica variação na produtividade, afectando a produção de energia.

Quadro 5.2 – Eficiência energética (Produção/Consumo), para várias quantidades de N – Fertilizante administradas (dados de produtividade de Fernando, 2005 e de Duarte *et al.*, 1996)

		Quantidade de N - Fertilizante		
		0 kg.ha ⁻¹	60 kg.ha ⁻¹	120 kg.ha ⁻¹
Produtividade 1º e 2º ano (t/ha, ms)		4,3	5,5	8,2
Produtividade 3º ano e seguintes(t/ha, ms)		41,0	43,9	55,1
Eficiência energética	Cenário 1	15,2	14,1	14,4
	Cenário 2	13,9	12,9	13,2
	Cenário 3	9,8	9,4	9,5
	Cenário 4	9,1	8,8	9,0

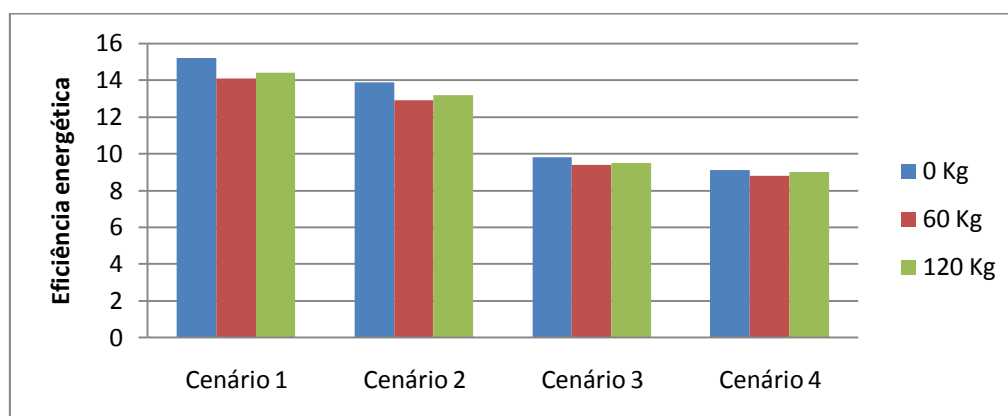


Figura 5.2 – Representação gráfica da eficiência energética (Produção/Consumo), para várias quantidades de N – Fertilizante administradas

Perante os resultados que se apresenta, verifica-se que quer não aplicando azoto quer aumentando a quantidade administrada, se verifica um aumento na eficiência energética em todos os Cenários, embora esse aumento seja maior se não for adicionado N-fertilizante aos campos (o que até é benéfico em termos de redução das emissões de azoto para a atmosfera, solos e águas).

5.2.2 Variável: Rega

Com esta variável pretende-se analisar a eficiência energética em dois cenários: a cultura é regada ou não, a partir do 3º ano e seguintes. A não aplicação de irrigação traduz uma diminuição da produtividade.

Quadro 5.3 – Eficiência energética (Produção/Consumo), com rega e sem rega da cultura, a partir do 3º ano e seguintes (dados de Fernando, não publicados)

		Com Rega	Sem Rega
Produtividade 3º ano e seguintes (t/ha, ms)		43,9	39,5
Eficiência energética	Cenário 1	14,1	16,4
	Cenário 2	12,9	14,9
	Cenário 3	9,4	10,2
	Cenário 4	8,8	9,4

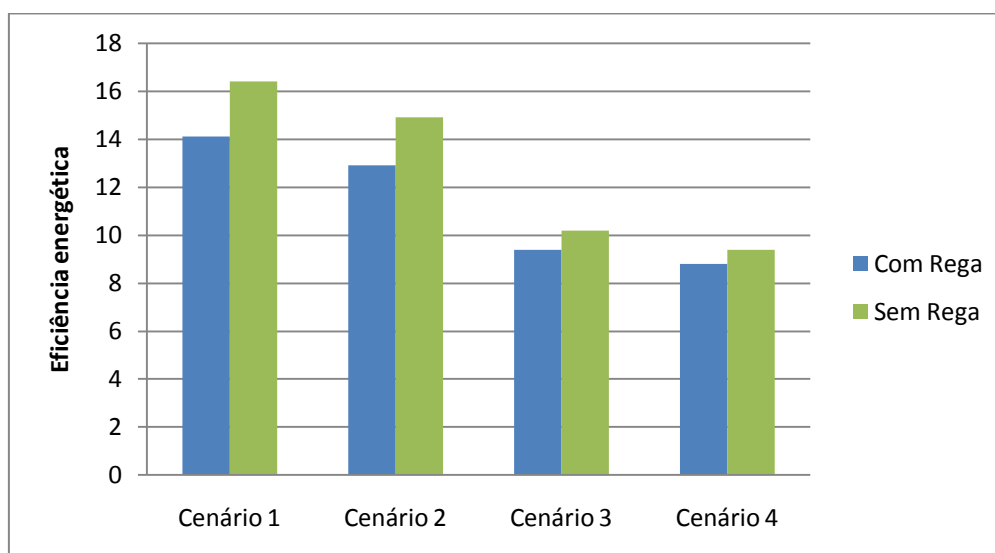


Figura 5.3 – Representação gráfica da eficiência energética (Produção/Consumo), com rega e sem rega da cultura, a partir do 3º ano e seguintes

Se a opção for não regar, a partir do 3º ano, embora a produtividade seja mais reduzida, a eficiência energética aumenta, em todos os Cenários, pois a rega representa uma

parcela importante no consumo de energia e a perda de produtividade não é tão significativa.

5.2.3 Variável: Produtividade

Neste caso o que se pretende analisar é a variação na eficiência energética se a produtividade for alterada (pode aumentar devido ao melhoramento da espécie ou diminuir, com a ocorrência de pragas). Considera-se um aumento de 20% na produção e de 20% de redução na produção.

Quadro 5.4 – Eficiência energética (Produção/Consumo), para valores diferentes de produtividade

		Factor multiplicativo		
		0.8	1	1.2
Produtividade 1º e 2º ano (t/ha, ms)		4,4	5,5	6,6
Produtividade 3º ano e seguintes (t/ha, ms)		35,1	43,9	52,7
Eficiência energética	Cenário 1	12,5	14,1	15,4
	Cenário 2	11,5	12,9	14,1
	Cenário 3	8,7	9,4	9,9
	Cenário 4	8,0	8,8	9,3

Neste caso, como já se previa, à medida que a produtividade aumenta, não sendo alterados os restantes factores, o resultado da eficiência energética, também aumenta, em qualquer dos Cenários.

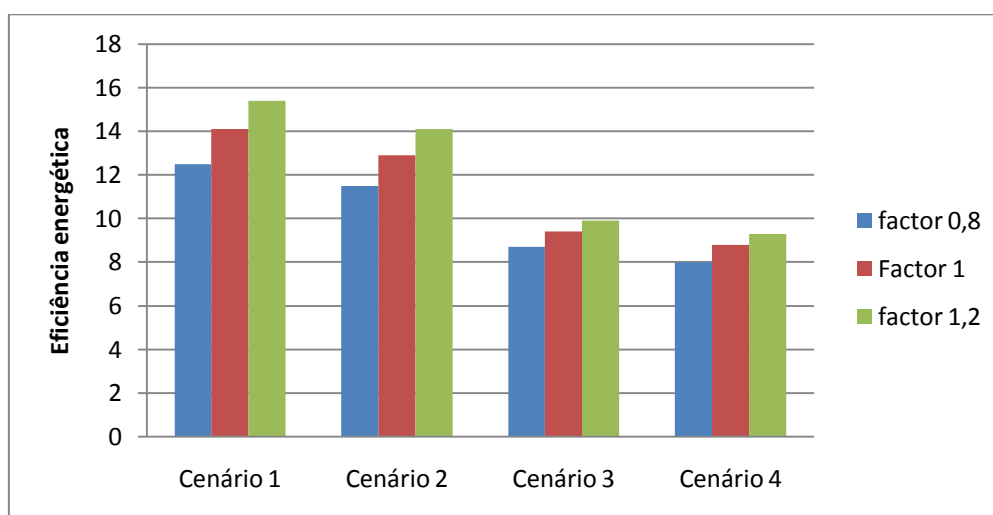


Figura 5.4 –Gráfico representativo da eficiência energética (Produção/Consumo), para valores diferentes de produtividade

5.2.4 Variável: Data da colheita

Nos cálculos, considerou-se que a cultura seria colhida em Setembro. Outra possibilidade é a colheita ser realizada em Janeiro. Nesta situação, a humidade da cultura diminui para 34%, mas a produtividade também é mais reduzida (Fernando, 2005).

Quadro 5.5 – Eficiência energética (Produção/Consumo), para diferentes datas de colheita (dados de produtividade de Fernando, 2005)

		Setembro	Janeiro
Produtividade 1º e 2º ano (t/ha, ms)		5,5	3,6
Produtividade 3º ano e seguintes (t/ha, ms)		43,9	27,3
Eficiência energética	Cenário 1	14,1	11,9
	Cenário 2	12,9	10,9
	Cenário 3	9,4	8,7
	Cenário 4	8,8	7,9

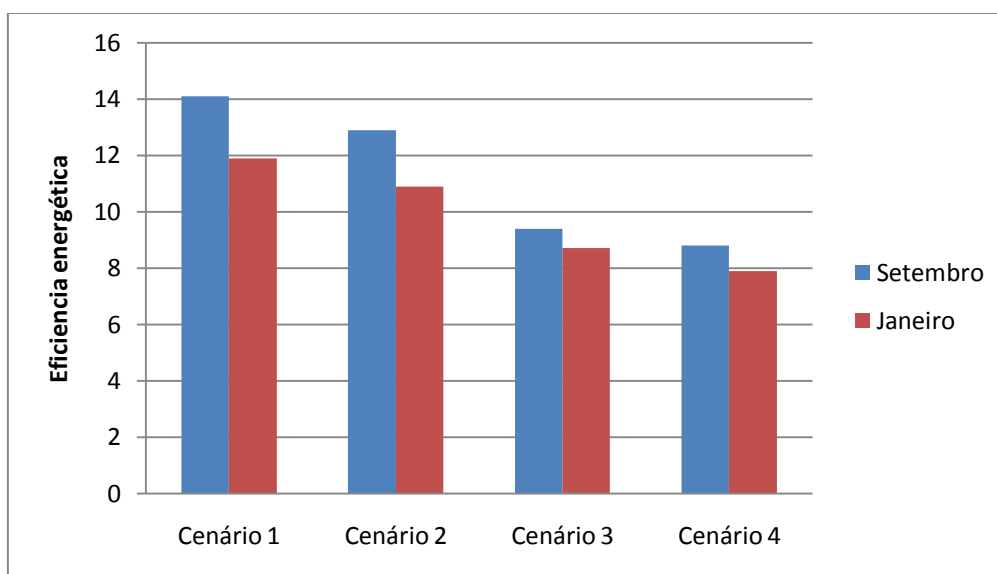


Figura 5.5 – Gráfico representativo da eficiência energética (Produção/Consumo), para diferentes datas de colheita

Neste caso de estudo, em todos os cenários verifica-se que o melhor mês para se realizar a colheita é o mês de Setembro, em termos da eficiência energética. No entanto, em Janeiro, a biomassa apresenta menor quantidade de nutrientes na sua biomassa (Fernando, 2005), o que pode tornar o processo de combustão mais eficaz, em termos tecnológicos (com a diminuição dos problemas associados à corrosão, etc, nas câmaras

de combustão) e ambientalmente também melhor (menores emissões de gases de azoto, etc). É, portanto, necessário, entrar em conta com estes aspectos na tomada de decisão da data da colheita da biomassa.

5.2.5 Variável: Distância

Pretende-se analisar, com esta variável, a variação da eficiência energética, quando aumentamos ou diminuimos o numero de km associados ao transporte, isto é quando aumentamos ou diminuimos, a distância entre a exploração agrícola e a unidade de conversão em energia. Neste caso, assumimos que a unidade de conversão pode estar mais próxima (multiplicamos as actuais distâncias por 0,75) ou mais longe (multiplicamos por 1,5).

Quadro 5.6 – Eficiência energética (Produção/Consumo), para diferentes distâncias

Factor Multiplicativo	Eficiência energética			
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
0,75	14,3	13,0	9,7	9,0
1	14,1	12,9	9,4	8,8
1.5	13,8	12,6	8,8	8,3

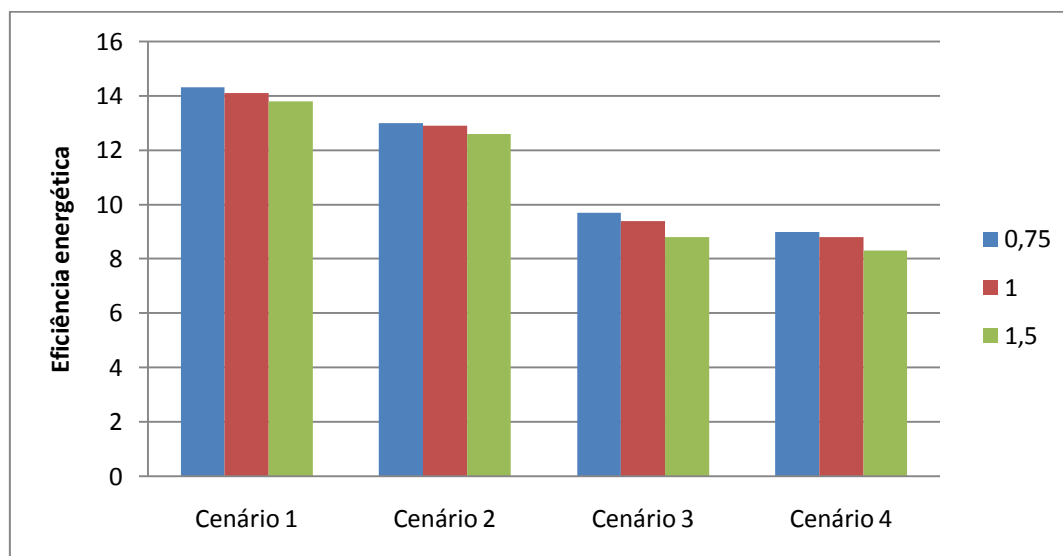


Figura 5.6 – Gráfico representativo da eficiência energética (Produção/Consumo), para diferentes distâncias

Perante os valores obtidos, o que se verifica, em qualquer um dos cenários é que com o aumento da distância, a eficiência energética diminui.

5.2.6 Variável: Rendimento

Neste caso assume-se que os rendimento térmicos dos equipamentos podem melhorar 10% face aos actuais.

Quadro 5.7 – Eficiência energética (Produção/Consumo), para diferentes rendimentos energéticos dos equipamentos

Factor Multiplicativo	Eficiência energética			
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Actual	14,1	12,9	9,4	8,8
Melhoria de 10%	15,5	14,1	10,3	9,6

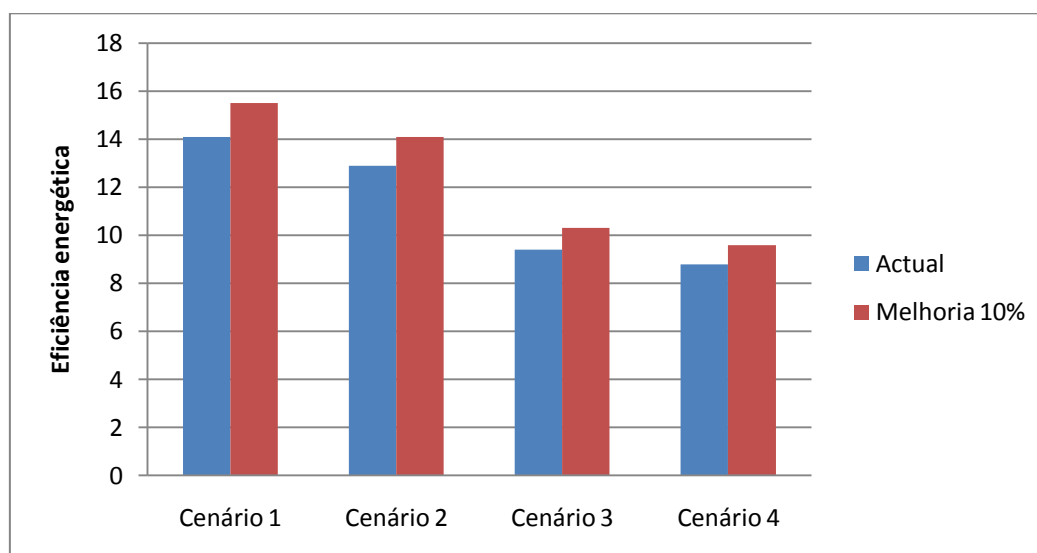


Figura 5.7 – Gráfico representativo da eficiência energética (Produção/Consumo), para diferentes rendimentos energéticos dos equipamentos

Com base nos valores obtidos e como seria de esperar, caso o rendimento aumentasse, os valores da eficiência energética também aumentam, em qualquer um dos cenários.

A Figura 5.8 mostra, para o caso do Cenário 1, como a análise de sensibilidade pode fazer variar a eficiência.

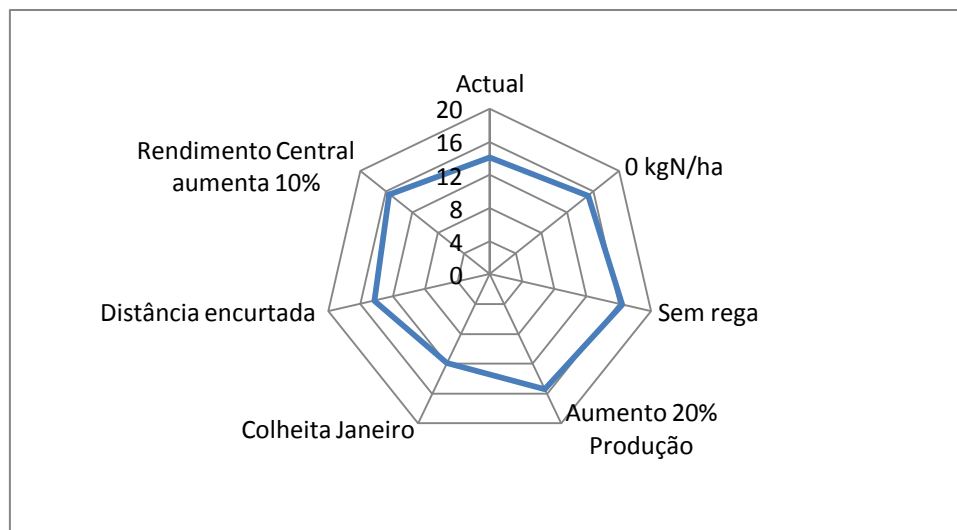


Figura 5.8 – Variação da eficiência energética do Cenário 1, tendo em conta os parâmetros modificados na análise de sensibilidade.

Da análise do gráfico apresentado na Figura 5.8, verifica-se que a rega e a data da colheita foram os factores que mais afectaram a eficiência energética do sistema. Não regar a partir do 3º ano traduz-se num aumento significativo da eficiência e a colheita em Janeiro traduz-se por uma diminuição significativa da eficiência do sistema.

6 Conclusões

Em termos de recursos renováveis energéticos, é de todo o interesse a utilização do *Miscanthus*, devendo-se a vários factores: é uma cultura perene, de longa duração, com reduzida susceptibilidade a pragas e infestações, e que pode ser aproveitada economicamente na produção de energia, pois apresenta uma capacidade calorífica muito elevada e uma produtividade elevada. Além disso é uma cultura não alimentar e a sua produção pode fazer-se em terras em pousio ou mesmo abandonadas, limitando o risco de erosão do solo, daí não interferir com as culturas alimentares.

Além das características já referidas, é uma cultura que é resistente a condições climáticas duras, tais como alagamentos, no Outono, Inverno e Primavera, e a seca, no Verão. Neste sentido, poderá considerar-se como uma hipótese atractiva, a cultura desta planta na região da barragem do Alqueva. Esta região, pelas suas características climáticas, permite antever que o estabelecimento desta cultura poderá ser efectuado com condições de sucesso. A barragem possibilitaria o fornecimento de água para a irrigação, podendo reduzir-se os efeitos de salinização dos solos, devido à acumulação de sais nos rizomas da planta. Daí, nos quatro cenários estudados, se ter considerado que a exploração agrícola se situaria nesta região.

No Cenário 1, considerou-se a aplicação da biomassa numa central termoelétrica, situada a 30 km da exploração agrícola, onde é produzida a biomassa, com características semelhantes as da Central Termoelétrica de Mortágua. No Cenário 2, considerou-se que a biomassa seria canalizada para uma central de pequenas dimensões, que tem como objectivo, o aquecimento de uma piscina (incluindo águas), piscina essa que poderá ser por exemplo uma piscina municipal. Considerou-se que a referida central se encontrava a uma distância de 30 km, da exploração agrícola onde é produzida a biomassa.

Um outro cenário estudado, designado por Cenário 3, utiliza a biomassa num sistema domestico de combustão de pellets, que estaria localizado, em média, a uma distância de 150 km da exploração agrícola e da unidade onde foram produzidas as mesmas. Considerou se também que as pellets em causa são feitas numa unidade de pelletização na fronteira do campo após a colheita da cultura. No Cenário 4, considerou-se um cenário em tudo semelhante ao apresentado no cenário anterior, mas neste caso as

pelletes são produzidas numa máquina que simultaneamente ceifa, estilha e produz as pelletes.

Em todos os Cenários pode verificar-se que as eficiências são superiores à unidade e que o balanço energético é positivo. Portanto, considerando o aspecto energético, pode ser uma possibilidade, em Portugal, a utilização dos *Miscanthus* para energia.

O cenário mais vantajoso é o Cenário 3 – utilização da cultura sob a forma de pelletes num sistema doméstico de combustão, em que as pelletes são produzidas numa unidade situada na fronteira do campo, se considerarmos o balanço energético, ou seja a quantidade de energia que se consegue obter por ha, por ano.

No entanto se considerarmos a eficiência energética, ou seja a razão entre a quantidade de energia produzida por energia consumida, então o cenário mais vantajoso é o Cenário 1 – utilização da biomassa numa Central Térmica de Biomassa com 10 MW de potência instalada. Entre Centrais (comparação do Cenário 1 com o 2), a central de maiores dimensões (Central Térmica de Biomassa com 10 MW de potência instalada) é a mais eficiente. Entre o Cenário 3 e 4, verifica-se que é mais eficiente ceifar e depois peletizar, do que ceifar e peletizar em conjunto. Em análise, pode verificar-se que a conversão, a rega, e no caso da utilização de pelletes, o transporte, são os factores que mais contribuem para o consumo energético.

Após uma análise dos vários cenários estudados, verifica-se, na análise de sensibilidade efectuada, que a rega e a data da colheita foram os factores que mais afectaram a eficiência energética do sistema. Não regar a partir do 3º ano traduz-se num aumento significativo da eficiência e a colheita em Janeiro traduz-se por uma diminuição significativa da eficiência do sistema.

Não aplicar o fertilizante azotado também contribui para o aumento da eficiência, até porque as diferenças na produtividade com e sem fertilizante azotado não são significativas (talvez devido à água utilizada na rega que pode ter muitos nitratos). Mas esta situação a longo prazo pode levar à depleção no solo, deste nutriente. Portanto, esta situação teria de ser acautelada. Se a distância entre a exploração agrícola e a unidade geradora de energia for encurtada, a eficiência energética aumenta, assim como se o rendimento das unidades geradoras de energia também aumentar. Se se conseguir melhorar a espécie no sentido do aumento da sua produtividade, também se verifica um

aumento na eficiência. Diminuir as necessidades energéticas na conversão da biomassa em energia poderá também contribuir para o aumento da eficiência.

7 Referências Bibliográficas

- AGenergy (2010) disponível em www.agenergy.ie, consultada em Setembro de 2010
- Barroso, V.C. (2001) Bioenergia sob a perspectiva de uma empresa de electricidade – a central termoeléctrica de Mortágua. *Livro de actas do Workshop Internacional Biomassa e Energia - Economia, Mercados e Oportunidades*. Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 15 e 16 de Outubro, pp 11-19.
- Biewinga EE, van der Bijl G (1996) *Sustainability of energy crops in Europe. A methodology developed and applied*. Centre for Agriculture and Environment, Utrecht, CLM 234 -1996.
- Christian, D.G. e Haase, E. (2001) Agronomy of *Miscanthus*. In: Jones, M.B. e Walsh, M. (eds), *Miscanthus for energy and fibre*, James & James (Science Publishers) Ltd, Londres, Reino Unido, pp 21-45.
- Davis SC, Parton WJ, Dohleman FG, Smith CM, Del Grosso S, Kent AD, DeLucia EH (2010) Comparative biogeochemical cycles of bioenergy crops reveal nitrogen-fixation and low greenhouse gas emissions in a *Miscanthus x giganteus* agro.ecosystem. *Ecosystems*, **13**, 144-156.
- De-Jong W, Andries J, Hein KRG (1999) Coal/biomass co-gasification in a pressurised fluidised bed reactor. *Renewable Energy*, **16**, 1110-1113
- Demirbas A (2001) Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, **42**, 1357 – 1378
- Demirbas A (2001a) Carbonization ranking of selected biomass for charcoal, liquid and gaseous products, *Energy Conversion and Management*, **42**, 1229 – 1238.
- Demirbas A (2004) Combustion characteristics of different biomass fuels, *Progress in Energy and Combustion Science*, **30**, 219–230
- Demirbas A (2005) Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues, *Progress in Energy and Combustion Science*, **31**, 171–192.
- de-Vrije T, de-Haas GG, Tan GB, Keijzers ERP, Claassen PAM (2002) Pretreatment of *Miscanthus* for hydrogen production by *Thermotoga elfii*. *International Journal of Hydrogen Energy*, **27**, 1381 – 1390.

- Dias M e Gulyurtlu I (2005) Biomassa: Uma fonte de energia, *Biologia Vegetal e Agro-Industrial*, **2**, 97-110
- Duarte, M.P., Fernando, A.L. e Oliveira, J.F.S. (1996) *Portuguese final report of the E.C. contract AIR1-CT 92-0294-P, European Miscanthus Network (1990-1996)*. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 31 p.
- El Bassam N., 1998. *Energy Plant Species*, James & James (Science Publishers) Ltd.
- El Bassam, N. e Huisman, W. (2001) Harvesting and storage of *Miscanthus*. In: Jones, M.B. e Walsh, M. (eds), *Miscanthus for energy and fibre*, James & James (Science Publishers) Ltd, Londres, Reino Unido, pp 86-108.
- Fernando AL (2007) *Folhas de Apoio à disciplina de Produção de Culturas Energéticas*, GDEH, FCT/UNL
- Fernando, A.L., Duarte, M.P., Almeida, J., Boléo, S., Mendes, B. (2010) Environmental impact assessment of energy crops cultivation in Europe. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, **4**, 594–604
- Fernando, A.L., Oliveira, J.F.S. (2005) Caracterização do potencial da planta *Miscanthus x giganteus* em Portugal para fins energéticos e industriais. *Biologia Vegetal e Agro-Industrial*, **2**, 195-204
- Fernando, ALAC (2005) Fitorremediação por *Miscanthus x giganteus* de solos contaminados com metais pesados, dissertação de Doutoramento, FCT/UNL, Lisboa, 502 p.
- Gosse G (1995) Environmental Issues and Biomass. In *Proceedings of the 8th European Conference on Biomass for Energy, Environment, Agriculture and Industry*, Ed. P. Chartier, A.A.C.M.Beenackers, G. Grassi, Pergamon Press, 1^o volume, pp 52 - 62.
- Greenpro (2004) *Bioenergia, manual sobre tecnologias, projecto e instalação*, IST, DGS, Ecofys, Altener, 242 p.
- Hayes DJ, Hayes MHB (2009) The role that lignocellulosic feedstocks and various biorefining technologies can play in meeting Ireland's biofuel targets. *Biofuel, Bioproducts and Biorefining*, **3**, 500-520.
- Jones, M.B. e Walsh, M. (2001), *Miscanthus for energy and fibre*, James & James (Science Publishers) Ltd, Londres, Reino Unido, 192p.
- Jørgensen U. (2010) Benefits versus risks of growing biofuel crops: the case of *Miscanthus*. *Current Opinions in Environmental Sustainability*, **3**, 1-7
- Kaltschmitt M, Reinhardt GA, Stelzer T (1996) LCA of biofuels under different environmental aspects. In *Proceedings of the 9th European Conference on Biomass*

- for Energy and the Environment*, Eds Ph. Chartier, G. L. Ferrero, U. M. Henius, S. Hultberg, J. Sachau and M. Wiinblad, Londres, Pergamon Press, 1º volume, pp 369 - 385.
- Khelfa A, Sharypov V, Finqueneisel G, Weber JV (2009) Catalytic pyrolysis and gasification of *Miscanthus Giganteus*: Haematite (Fe₂O₃) a versatile catalyst. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **84**, 84-88
- Lewandowski I, Kicherer A, Vonier P (1995) CO₂ – Balance for the cultivation and combustion of *Miscanthus*, *Biomass and Bioenergy* , **8**, 81-90.
- Long, S.P. e Beale, C.V. (2001) Resource capture by *Miscanthus*. In: Jones, M.B. e Walsh, M. (eds), *Miscanthus for energy and fibre*, James & James (Science Publishers) Ltd, Londres, Reino Unido, pp 10-20.
- Melman AG, Schiphouwer H, Hendriksen, LJAM.(1994) *Energy content standards for arable farming and horticulture, part 1 and 2*. Applied Natural Science Research Institute (TNO-ME), Apeldoorn, Holanda.
- Morais, JCB (2003) *Relatório de aula teórico-prática. Avaliação ambiental da cultura de sorgo sacarino*. Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica, FCT/UNL, Lisboa, 52 p.
- Picco, D. (2010) *Colture energetiche per il disinquinamento della laguna di Venezia*, Veneto Agricoltura Azienda Regionale per i Settori Agricolo, Forestale e Agroalimentare, Legnaro, Italia. 148 p.
- Rettenmaier N, Köppen S, Gärtner SO, Reinhardt GA (2010) Life cycle assessment of selected future energy crops for Europe. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, **4**, 620–636.
- Scallly, L., Hodgkinson, T. e Jones, M.B. (2001) Origins and taxonomy of *Miscanthus*. In: Jones, M.B. e Walsh, M. (eds), *Miscanthus for energy and fibre*, James & James (Science Publishers) Ltd, Londres, Reino Unido, pp 1-9.
- Sorensen A., Teller PJ, Hilstrom T, Ahring BK (2008) Hydrolysis of *Miscanthus* for bioethanol production using dilute acid presoaking combined with wet explosion pre-treatment and enzymatic treatment. *Bioresource technology*, **99**, 6602-6607.
- Venturi, G., Monti, A. (2005) Energia da colture dedicate: aspetti ambientali ed agronomici. *Conferenza Nazionale sulla Politica Energetica in Italia. Bologna 18-19 aprile 2005*, disponível em www.tecnosophia.org/documenti/2005_04_conferenza_energia_bologna.htm
- Vimasol (2010) disponível em www.vimasol.pt, consultada em setembro de 2010

- Visser, P e Pignatelli, V. (2001) Utilisation of *Miscanthus*. In: Jones, M.B. e Walsh, M. (eds), *Miscanthus for energy and fibre*, James & James (Science Publishers) Ltd, Londres, Reino Unido, pp 109-154.
- Yorgun S, Şimşek Y E (2008) Catalytic pyrolysis of *Miscanthus × giganteus* over activated alumina. *Bioresource Technology*, **99**, 8095-8100