



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
Universidade Técnica de Lisboa

**Análise ambiental e energética da produção de *Eucalyptus globulus* para conversão em energia eléctrica**

**Maria Margarida Serra Gonçalves**

maria.goncalves@ist.utl.pt

Dissertação para obtenção do grau de mestre em  
**Engenharia do Ambiente**

**Júri**

Presidente: Professor Doutor Ramiro Joaquim de Jesus Neves  
Orientador: Professor Doutor Tiago Morais Delgado Domingos  
Co-orientador: Engenheira Tatiana Raquel Alves Valada  
Vogais: Doutora Helena Maria Campos Martins  
Professor Doutor Mário Manuel Gonçalves da Costa

**Novembro de 2010**



# Índice

Agradecimentos.....	VI
Resumo .....	IX
Abstract.....	XI
1 Introdução.....	1
1.1 Objectivos e motivação.....	1
1.2 Estado da arte.....	1
1.3 Definição de conceitos.....	4
1.4 Situação actual mundial e na Europa.....	4
1.5 Situação em Portugal.....	7
1.6 Importância e vantagens .....	9
1.7 Problemáticas e desvantagens.....	10
2 Método.....	11
2.1 Análise Ambiental .....	11
2.2 Modelos de crescimento e produção de povoamento florestais .....	12
3 Descrição do sistema em estudo e análise por fases.....	13
3.1 Produção de <i>E. globulus</i> .....	20
3.1.1 Simulação da produção de <i>E. globulus</i> no Ribatejo e Oeste .....	26
3.1.2 Actividades silvícolas .....	30
3.1.3 Análise ambiental e energética da produção de <i>E. globulus</i> .....	34
3.2 Sistema logístico e transporte de biomassa.....	40
3.2.1 Análise ambiental e energética do transporte de biomassa .....	42
3.2.2 Análise ambiental e energética do sistema logístico, produção e transporte de biomassa ..	43
3.3 Central termoelectrica.....	45
3.3.1 Combustão .....	45
3.3.1.1 Emissões atmosféricas decorrentes da combustão .....	45
3.3.1.2 Importação de carvão e fluxos de <i>input</i> da central .....	46
3.3.1.3 Análise ambiental e energética da combustão .....	48
3.3.2 Co-combustão.....	51
3.3.2.1 Emissões atmosféricas decorrentes da co-combustão .....	51
3.3.2.2 Análise ambiental e energética da co-combustão .....	53
4 Resultados Finais e discussão.....	59
4.1 Análise ambiental e energética.....	59
4.2 Análise ambiental e energética pela alteração do uso do solo .....	66
5 Conclusões e Críticas.....	71
Anexo I.....	i



## Índice das Tabelas

Tabela 1 - Espécies arbóreas utilizadas em cultivos energéticos na Europa.....	7
Tabela 2 - Dados informativos sobre o carvão em Portugal. ....	8
Tabela 3 - Centrais termoeléctricas ligadas à Rede Nacional de Transporte de Energia Eléctrica. ....	14
Tabela 4 - Informação técnica da central termoeléctrica de Sines. ....	15
Tabela 5 - Poder calorífico de <i>E. globulus</i> e do Carvão betuminoso. ....	16
Tabela 6 - Percentagens típicas de oxigénio, água e cinzas presentes nos combustíveis sólidos.....	16
Tabela 7 - PC do carvão e <i>E. globulus</i> determinado e utilizado no presente estudo. ....	17
Tabela 8 - Quantidade de combustível em co-combustão e combustão para produzir 1 kWh <sub>e</sub> .....	18
Tabela 9 - Produtividade anual da plantação de milho e de <i>E. globulus</i> no RO.....	19
Tabela 10 - Características da central termoeléctrica de Sines e do Pego. ....	19
Tabela 11 - Classificação da gravidade de impactos ambientais de cultura energética de Eucalipto. ....	22
Tabela 12 - Dados de inicialização do modelo de silvicultura 3PG .....	29
Tabela 13 - Normais climatológicas para a região de Santarém de 1961 a 1990. ....	29
Tabela 14 - Produtividade anual e por ciclo de rotação de um povoamento de <i>E. globulus</i> no RO. ...	29
Tabela 15 - Operações e actividades na unidade silvícola durante um ciclo de produção. ....	31
Tabela 16 - Nutrientes contidos na biomassa de <i>E. globulus</i> na altura do corte.....	33
Tabela 17 - Quantidade de fertilizantes e de Herbicida. ....	33
Tabela 18 - Emissões que provêm da fertilização em sistemas agro-florestais de curta rotação. ....	33
Tabela 19 - Emissões que provêm da fertilização de <i>E. globulus</i> em curta rotação. ....	34
Tabela 20 - Operações mecanizadas e actividades na unidade silvícola. ....	34
Tabela 21 – Impactos ambientais das actividades e operações na unidade silvícola.....	36
Tabela 22 – Impactos ambientais das operações e actividades silvícolas.....	38
Tabela 23 - Distância entre a central e a plantação e carga por quilómetro percorrido. ....	42
Tabela 24 - Impactos ambientais de diferentes raios de distância. ....	43
Tabela 25 - Impactos ambientais da produção de <i>E. globulus</i> e transporte de biomassa. ....	44
Tabela 26 - Produção líquida de electricidade e emissões atmosféricas em 2005, central de Sines. .	45
Tabela 27 - Emissões atmosféricas na central de Sines no ano de 2003 e 2007. ....	45
Tabela 28 - Emissões atmosféricas específicas de combustão na central de Sines. ....	46
Tabela 29 - Características do carvão recebido na central termoeléctrica de Sines.....	46
Tabela 30 - Emissões atmosféricas específicas de combustão na central do Pego. ....	46
Tabela 31 - Carvão importado por país e transportes utilizados, para um total de 1 kg de carvão. ....	47
Tabela 32 - Inputs para a combustão de 1MJ de carvão na central termoeléctrica. ....	47
Tabela 33 - Inputs para a construção da central termoeléctrica. ....	48
Tabela 34 - Impactos ambientais da mineração, transporte e combustão de carvão na central de Sines.....	49
Tabela 35 - Impactos ambientais da mineração, transporte e combustão de carvão na central do Pego. ....	50
Tabela 36 - Emissões atmosféricas da queima de madeira em partículas em suspensão. ....	51
Tabela 37 - Características da <i>E. globulus</i> . ....	52

Tabela 38 - Emissões atmosféricas específicas de co-combustão na central de Sines..	53
Tabela 39 - Emissões atmosféricas específicas de co-combustão na central do Pego.	53
Tabela 40 - Impactos ambientais da ACV da Co-combustão, central de Sines.	54
Tabela 41 - Impacto ambiental por actividade da co-combustão na central do Pego.	55
Tabela 42 - Impacto ambiental por actividade da co-combustão na central de Sines.	56
Tabela 43 - Impactos ambientais da ACV da combustão e co-combustão e Impacto Evitado, central de Sines.	60
Tabela 44 - Impactos ambientais da ACV da combustão e co-combustão e Impacto Evitado, central do Pego.	61
Tabela 45 - Comparação do impacto evitado do presente estudo com dados bibliográficos.	63
Tabela 46 – Emissões de CO <sub>2</sub> em ciclo de vida e pala queima de combustível.	64
Tabela 47 - Dióxido de carbono emitido e absorvido pela biomassa.	65
Tabela 48 - Impacto ambiental do cultivo de milho no RO e ARG e <i>E. globulus</i> no RO.	66
Tabela 49 - Factor de Alteração do Uso do Solo.	67
Tabela 50 - Impacto Evitado considerando a alteração do uso do solo.	68

## Índice de gráficos

Gráfico 1 – Energias renováveis no mundo para 2007 (GWh).	6
Gráfico 2 - Número de centrais na UE que efectuavam co-combustão com biomassa em 2007.	7
Gráfico 3 - Análise de sensibilidade dos cenários elaborados para a unidade silvícola.	35
Gráfico 4 - Impacto ambiental (%) por processo/actividade na unidade silvícola, RO.	37
Gráfico 5 - Análise de sensibilidade entre os raios de distância.	43
Gráfico 6 - Impactos ambientais da combustão e co-combustão na central de Sines.	62
Gráfico 7 - Impactos ambientais da combustão e co-combustão na central do Pego.	62

## Índice de figuras

Figura 1 - Evolução mundial do consumo de energia primária (Mtoe) por combustível.	5
Figura 2 – Emissões de CO <sub>2</sub> (Mton) por combustível.	6
Figura 3 - Representação esquemática do modo de ACV pelo <i>Eco-indicador 95</i> .	11
Figura 4 - Representação esquemática do modo de ACV pelo <i>Eco-indicador 99</i> .	12
Figura 5 - Sistema em estudo.	13
Figura 6 - Localização do RO e das centrais termoeléctricas de Sines e do Pego.	14
Figura 7 - Fronteira do sistema em estudo.	15
Figura 8 - Valores típicos da percentagem mássica de humidade, matéria volátil, carbono fixo e cinzas e do PCS da madeira e carvão	18
Figura 9 - Representação do ciclo e tempo de rotação e do tipo de regime de exploração.	27
Figura 10 - <i>Inputs</i> necessários para a afectação do terreno à plantação de <i>E. globulus</i> num ciclo.	30
Figura 11 - Sistema logístico em estudo.	41
Figura 12 - Ciclo de vida de CO <sub>2</sub> dentro da fronteira de estudo	65

## Lista de abreviaturas

ACV - Avaliação de ciclo de vida

AFN – Autoridade Florestal Nacional

AFN – Autoridade Florestal Nacional

ARG – Argentina

BOFA - *Boosted Over Fire Air*

CBE - Centro da Biomassa para Energia

CE - Comissão Europeia

*E. globulus - Eucalyptus globulus*

EUBIA - Associação Europeia da Indústria da Biomassa

FAUS – Factor de Alteração do Uso do Solo

GEE - Gases com Efeito de Estufa

IE - Impacto Evitado

IEA - Agencia Internacional de Energia

ISA – Instituto Superior de Agronomia

IST – Instituto Superior Técnico

NETBIOCOF – *Integrated European Network for Biomass Co-firing*

PAC - Política Agrícola Comum

PC - poder calorífico

PCI - Poder Calorífico Inferior

PCS - Poder Calorífico Superior

QBE - Queimadores de Baixa Emissão

R - Referência

RCM - Resolução de Conselho de Ministros

RO - Ribatejo e Oeste

UE - União Europeia

UF - Unidade Funcional

## Lista de Compostos e de Substâncias

BaP - Benzo(a)pireno

C – Carbono

CFC - Clorofluorcarbonetos

CH<sub>4</sub> – Metano

CO<sub>2</sub> - Dióxido de carbono

CO<sub>2eq.</sub> - Dióxido de carbono equivalente

COVNM - Compostos Orgânicos Voláteis Não-Metânicos

COV - Compostos orgânicos voláteis

HAP - Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos

N<sub>2</sub>O - Óxido nitroso

NH<sub>3</sub> – Amónia

NO<sub>x</sub> - Óxido de azoto

SO<sub>2</sub> - Dióxido de enxofre

## Lista de Unidades e de Conversão

wt% - Percentagem Mássica

Energia

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$$

$$1 \text{ tep} = 4,1868 \times 10^{10} \text{ J}$$

$$1 \text{ Mtoe} = 4.1868 \times 10^4 \text{ TJ}$$

Rega

$$1 \text{ Ml/ha} = 100 \text{ mm/m}^2 = 100 \text{ l/m}^2$$

## SI, Prefixos

Prefixo	Símbolo	1000 <sup>m</sup>	10 <sup>n</sup>	Decimal
Tera	T	1000 <sup>4</sup>	10 <sup>12</sup>	1000000000000
Giga	G	1000 <sup>3</sup>	10 <sup>9</sup>	1000000000
Mega	M	1000 <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup>	1000000
kilo	k	1000 <sup>1</sup>	10 <sup>3</sup>	1000
Micro	μ	1000 <sup>-2</sup>	10 <sup>-6</sup>	0.000001



## Agradecimentos

Agradeço ao Professor Doutor Tiago Domingos a orientação e oportunidade de adquirir conhecimento nesta área científica. À Engenheira Tatiana Valada por toda a disponibilidade, atenção prestada e conselhos úteis durante o desenvolvimento do presente estudo.

Quero manifestar a minha gratidão, para com as pessoas que tiveram a boa vontade de colaborar. Este trabalho seria certamente muito diferente sem a sua ajuda. Agradeço por isso a importante ajuda de:

Eng.<sup>a</sup> Clara Araújo (Altri)

Eng.<sup>a</sup> Hermínia Sousa (AFN)

Eng.<sup>o</sup> Alejandro Oliveros García (Ence, Iberflorestal)

Eng.<sup>o</sup> António Lorena (IST)

Eng.<sup>o</sup> Henrique Machado (AFN)

Eng.<sup>o</sup> José Luís Carvalho (Portucel Soporcel, EnerForest)

Eng.<sup>o</sup> Luís Leal (Altri)

Doutora Helena Martins (IST)

Prof. Doutor Mário Costa (IST)

Prof. Doutora Margarida Tomé (ISA)

Prof. Doutora Paula Soares (ISA)

Desejo também expressar o meu profundo agradecimento à minha família e amigos pelo carinho, apoio e incentivo no decorrer do presente estudo.

### Contacto da Autora:

[maria.goncalves@ist.utl.pt](mailto:maria.goncalves@ist.utl.pt)

[gs.margarida@gmail.com](mailto:gs.margarida@gmail.com)



## Resumo

O presente estudo tem como objectivo a análise em ciclo de vida da viabilidade ambiental e energética da produção de cultura de floresta dedicada, como substituto parcial de carvão em centrais termoeléctricas. Para tal consideram-se dois cenários, o da combustão exclusiva de carvão e o da co-combustão com 10% de substituição térmica de carvão por biomassa. Para o cenário da co-combustão introduziu-se a inovação da implicação da alteração do uso do solo entre o cultivo de milho e a plantação de *Eucalyptus globulus*.

De forma a garantir a comparabilidade dos resultados obtidos com outros estudos, é efectuada também a análise do cenário da co-combustão sem a consideração da alteração do uso do solo. Nesta situação, os resultados mostram que o cenário favorável em termos ambientais e energéticos é o da co-combustão. Tendo em consideração a alteração do uso do solo, a maioria dos benefícios ambientais da co-combustão diminuem, contudo, continuam a registar-se impactos evitados para a maioria das categorias ambientais.

**Palavras-chave:** cultura energética de floresta dedicada, co-combustão, combustão, alteração do uso do solo, impacto ambiental.



## Abstract

Through the use of biomass in combustion, operating coal plants have an opportunity to reduce their environmental impact. In order to assess such impact reduction, a Life Cycle Assessment (LCA) has been conducted on a coal-fired power plant able to co-fire *Eucalyptus globulus* from Short Rotation Woody Crops (SRWC). Besides comparing the production and emissions of the two fuels in both scenarios, we also consider the consequences regarding land use, assuming that production of *Eucalyptus globulus* from SRWC competes with maize production. However, to ensure comparability with other studies, we also conducted the LCA neglecting land use change. In this case, co-firing has better environmental and energetic performance. If land use change impacts are considered, then most positive impacts of co-firing are reduced, but the scenario still compares favorably to the combustion scenario.

**Keywords:** SRWC, co-firing, combustion, land use change, environmental impact



# 1 Introdução

## 1.1 Objectivos e motivação

O presente estudo tem por objectivo a realização de uma comparação ambiental e energética da substituição parcial de combustível fóssil, carvão, por biomassa, considerando a alteração do uso do solo. Atendendo à contínua aposta na biomassa como fonte de energia renovável pela estratégia política portuguesa e recentemente com a promoção da produção de biomassa florestal de cultivos energéticos (RCM n.º 29/2010 de 15 de Abril de 2010 e RCM n.º 81/2010 de 3 de Novembro), o combustível em análise é a biomassa sólida proveniente de uma cultura energética de floresta dedicada. É então objectivo de estudo a análise de ciclo de vida de dois cenários: a conversão em energia eléctrica do carvão e da biomassa, de *Eucalyptus globulus*.

A motivação para a realização do trabalho prende-se com o facto de, existirem alguns projectos de cariz experimental sobre a produção de culturas energéticas de floresta dedicada, no contexto nacional, a contrastar com a inexistência de estudos de cariz ambiental sobre a produção das mesmas. O estudo introduz, de uma forma sistemática em ciclo de vida, a inovação da consideração da alteração do uso do solo, necessária à implementação da cultura energética.

O trabalho incidiu sobre as Centrais termoeléctricas de Sines e do Pego, pelo facto de uma das medidas para o cumprimento do protocolo de Quioto ser a meta MA2007e3, que consta na RCM n.º 1/2008 de 4 de Janeiro, e que consiste na incorporação de 5 % a 10 % de biomassa no combustível queimado nas respectivas centrais.

## 1.2 Estado da arte

A utilização de biomassa como fonte de energia não é um tema recente, tendo sido já alvo de diversos estudos científicos e alvo de interesse de diferentes sectores e organizações. No âmbito nacional refere-se o Centro da Biomassa para Energia (CBE), a qual é uma associação de direito privado sem fins lucrativos.

Dos documentos que seguidamente se citam, a maioria efectua uma avaliação integral (económica, social e ambiental) da utilização de bioenergias no contexto actual, focam vantagens e problemáticas da sua utilização e aludem à necessidade da diminuição do consumo de combustíveis fósseis e de redução de emissão de gases com efeito de estufa (GEE) decorrentes da utilização dos mesmos.

No que respeita a documentos publicados, destaca-se os da Agência Internacional de Energia (IEA). Compete ao comité IEA-bionergy, e pela tarefa 32 ainda a decorrer, a elaboração e publicação de documentos que viabilizam estudos de carácter técnico, económico e ambiental sobre a combustão e co-combustão de biomassa sólida. Até agora, dos diversos estudos elaborados e publicados, a IEA-*bionergy* conclui que a co-combustão é uma abordagem atraente em todas as vertentes para os projectos bioenergéticos, aquando de sua inserção em centrais que efectuem a combustão de carvão. Partindo do pressuposto que num futuro próximo se irá registar uma procura crescente por biocombustíveis, a IEA-*bionergy* assume que a produção de culturas energéticas de curta rotação, onde se insere a produção de floresta dedicada, irá desempenhar um papel fundamental. É por isso

criado um comité, pela tarefa 30 ainda a decorrer, cujo objectivo é adquirir e sintetizar conhecimentos práticos e teóricos para o desenvolvimento sustentável deste tipo de explorações, assim como estimular o mercado para a implementação a larga escala dos mesmos. Deste último grupo de trabalho salienta-se o documento IEA (2009), o estudo incide sobre os impactos ambientais associados à produção de floresta dedicada para conversão em energia. Conclui que, por comparação às culturas anuais, estas explorações apresentam benefícios ambientais, *p. ex.* menores emissões de GEE.

A Comissão Europeia (CE) surge neste âmbito também com a elaboração de documentos e planos de acção vinculativos e essenciais à concretização das metas estabelecidas na Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Abril de 2009 relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis, e também para a COM (2008) conhecida por Pacote Energia Clima 20-20-20. O documento COM (2009) incide sobre a importância de investimento no desenvolvimento de tecnologias descarbonizadas. Este plano diz que, à excepção da co-combustão e produção de biogás através de resíduos agrícolas, todas as outras tecnologias de cariz bioenergético deverão continuar a ser sujeitas a desenvolvimentos tecnológicos. A nível nacional, o desenvolvimento destas tecnologias compete à Unidade de Emissões Zero (UEZ) do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG). A CE, no relatório COM (2010), indica que provavelmente o maior contributo para o aumento do desenvolvimento da bioenergia provirá da biomassa sólida. Refere ainda a importância da produção de culturas energéticas de uma forma sustentável, devido à sua interligação com outros ecossistemas e com o *stock* de carbono das florestas. Com este intuito refere-se o documento *Vis et al.* (2008), o qual indica que a produção de culturas energéticas poderá ter repercussões negativas sobre o ambiente. O objectivo do estudo é providenciar mecanismos de apoio à decisão para a CE, sobre a produção de culturas energéticas na União Europeia (UE) e da importação de biomassa, baseando-se numa análise de custo/benefício sobre a economia, sociedade e ambiente. É ainda elaborado neste documento uma revisão crítica sobre a certificação ou não destas explorações. Destaca-se por último, no âmbito da UE, o livro de Rechberger *et al.* (2009) pela contextualização actual no que respeita à produção de culturas energéticas e respectivos usos finais na UE.

Existem documentos cuja abordagem se centra principalmente na análise ambiental, económica e social das consequências da utilização e produção de biocombustíveis, tais como EEA (2006), EEA (2007), Escobar *et al.* (2009) e FAO (2010). Focam questões pertinentes, as quais constituem problemáticas a ter em consideração, como a segurança alimentar, necessidade de subsídios e consequências ao nível do uso do solo. Concluem, de uma forma geral, que a oferta sustentável de produtos alimentares poderá estar comprometida a nível mundial num futuro próximo, devido aos efeitos das alterações climáticas sobre a agricultura e à procura crescente de produtos alimentares e de biomassa pelo sector energético.

Existem estudos que efectuem uma análise de ciclo de vida da utilização de biomassa sólida integrando a vertente ambiental, energética e económica. Contudo, o âmbito da maioria dos estudos recai sobre a combustão e co-combustão de biomassa florestal residual, como é o caso de Mann e



Spath (2001). Quando os estudos abrangem a produção de culturas energéticas de floresta dedicada, a maioria não atribui como destino plausível a produção de energia eléctrica em co-combustão, como são exemplo os dois estudos que se referem a seguir e, que focam a análise na combustão dedicada de biomassa.

O estudo de Rafaschieri *et al.* (1999) incide sobre a produção de energia eléctrica tendo como combustível a biomassa sólida de Choupo. Conclui que existem vantagens ambientais e energéticas da sua utilização, por comparação aos combustíveis fósseis convencionais. No entanto, o estudo não considera a alteração do uso do solo.

O estudo de Heller *et al.* (2003) incide sobre a produção de cultura energética de Salgueiro concluindo que existem inúmeros benefícios. Um balanço energético positivo (por 1 unidade de energia fóssil consumida em todo o ciclo de vida, há a produção de 11 vezes mais de energia eléctrica) e a emissão neutra de dióxido de carbono são dois exemplos dos benefícios. No entanto, o estudo não compara os resultados da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) obtidos com os do combustível fóssil que a energia produzida por biomassa poderá substituir, e mais uma vez não é considerada a alteração do uso do solo.

No respeitante à produção de energia eléctrica em co-combustão a partir de biomassa proveniente de culturas energéticas de floresta dedicada, realça-se o estudo de Keoleian e Volk (2005) e de Heller *et al.* (2004).

O estudo de Keoleian e Volk (2005) realiza uma avaliação ambiental e económica, afirmando que o cenário em estudo é favorável. O estudo compara ainda diferentes tipos de energias renováveis e conclui que a biomassa se apresenta, em termos ambientais, dentro da média de poluição evitada, e em termos de ocupação de uso do solo é a que requer uma maior área.

O estudo de Heller *et al.* (2004) afirma que o cenário em estudo é favorável em termos ambientais e que a co-combustão de biomassa proveniente de culturas energéticas é ligeiramente favorável ao uso de resíduos florestais. Contudo, em ambos os estudos, não se considera a alteração do uso do solo.

É de referir que, no estudo de Vega *et al.* (2010), é citado que as vantagens da produção de cultivos energéticos de floresta dedicada prendem-se com o facto de terem um balanço energético positivo e um ciclo de carbono 100% reciclado (100% *carbon closure*).

No que se refere à análise da ACV, os estudos acima citados não efectuam uma comparação entre a biomassa sólida e o combustível que visam substituir pela consideração da alteração do uso do solo, necessária à implementação de culturas energéticas. Pelo que, segundo Cherubini *et al.* (2009), estão a subestimar as emissões de GEE decorrentes do cenário que contabiliza a produção de biomassa sólida. Outro argumento contra os resultados que indicam como favorável o cenário da produção de culturas energéticas consiste na utilização de factores de emissão de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) decorrentes da utilização incorrectas de fertilizantes, pelo que a emissão de GEE está subestimada, segundo Crutzen *et al.* (2007).

### 1.3 Definição de conceitos

A Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Abril de 2009 refere que o termo biomassa aplica-se a toda a fracção biodegradável de produtos e resíduos provenientes da agricultura (incluído substâncias vegetais e animais), da silvicultura e das indústrias conexas, bem como a fracção biodegradável dos resíduos industriais e urbanos.

No presente estudo, o objecto de análise é a biomassa sólida, comumente referida como biocombustível sólido, proveniente de floresta dedicada, cujo produto bioenergético é a estilha.

Cultura energética de floresta dedicada é uma fonte de biomassa florestal e corresponde à biomassa resultante de plantações de curta rotação (3 a 5 anos), isto é, florestas de crescimento rápido como o Salgueiro, Choupo e Eucalipto. As espécies arbóreas a serem utilizadas devem possuir as seguintes características: um crescimento juvenil rápido e vigoroso, boa capacidade de produzir varas com origem em gomos epicórmicos<sup>1</sup> após o primeiro corte (regime de talhadia), resistência elevada a pragas e doenças, tolerância a densidades de plantação elevadas e uma eficiência alta no que consta à utilização dos recursos hídricos e de nutrientes (Vega *et al.*, 2010).

Os objectivos de produção florestal intensiva da maioria das explorações florestais de curta rotação levam a que se utilize normalmente árvores geneticamente melhoradas e densidades de plantação elevadas (Keoleian e Volk, 2005). A condução destes povoamentos florestais pode ser realizada sob dois regimes: alto fuste e talhadia. O alto fuste é o regime em que a perpetuidade dos povoamentos é alcançada a partir de sementeira, plantação ou regeneração natural. No regime de talhadia, o maciço florestal regenera-se por gomos epicórmicos que se desenvolvem a partir do cepo deixado no terreno após o corte das árvores, ou seja, após o fim da rotação. A partir da primeira rotação, a condução do povoamento faz-se em regime de talhadia.

Toiça é o cepo a partir da 2ª rotação, após activação dos gomos epicórmicos. Se, todavia, não há intenção de se avançar com uma outra rotação, há que proceder ao arranque dos cepos para se proceder a nova reflorestação.

Co-combustão consiste na queima conjunta de dois combustíveis diferentes em mistura, no mesmo dispositivo de queima para produção de energia eléctrica. Denomina-se de co-combustão, no presente estudo à queima agregada de carvão com biomassa sólida.

### 1.4 Situação actual mundial e na Europa

O uso intensivo de energia proporcionado pela utilização maciça dos combustíveis fósseis sustentou a revolução industrial e permitiu-nos chegar à civilização contemporânea. No entanto, está apenas acessível a alguma da população mundial, o que constitui um paradigma actual. Neste contexto, a energia assume uma relevância especial devido à importância da sua posição central na base dos modelos de desenvolvimento social e económico. Satisfazer a procura de energia necessária ao

---

<sup>1</sup> Após o corte da árvore surgem gomos epicórmicos (ou adventícios), na linguagem comum rebentos, que com o crescimento da árvore originam ramos.

desenvolvimento nos próximos cem anos é provavelmente o desafio mais importante e difícil com que nos veremos confrontados no século XXI. Contudo, os combustíveis fósseis são um recurso não renovável com crescente dificuldade de extração, o que se reflecte no aumento do seu custo. Os impactos globais, associados à utilização deste tipo de combustíveis para a obtenção de energia, constituem actualmente uma questão central das políticas ambientais que se pretendem implementar a nível mundial.

No início da revolução industrial no século XIX, o uso da máquina a vapor foi generalizado e o consumo de carvão teve um enorme incremento, constituindo o principal suporte energético do processo de industrialização, durante o qual a produção aumentou de cerca de 10 para cerca de 1.000 milhões de toneladas por ano (Santos, 2007). Por volta de 1890, a quantidade global de energia consumida a partir de combustíveis fósseis (carvão e petróleo) tornou-se superior à proveniente da biomassa. Actualmente a maior parte do consumo mundial de energia é baseada nos combustíveis fósseis, designadamente petróleo, carvão e gás natural visível, na Figura 1.

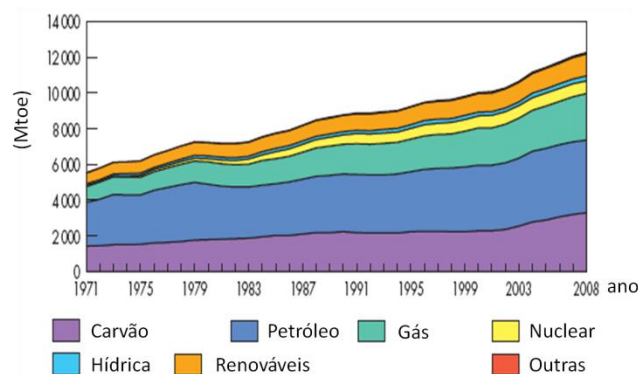


Figura 1 - Evolução mundial do consumo de energia primária (Mtoe) por combustível.  
Fonte: Figura adaptada de IEA, 2010.

A dependência pelos combustíveis fósseis tem o inconveniente de estar a gerar um grave problema ambiental de poluição atmosférica à escala global. Na combustão do carvão produz-se  $\text{CO}_2$ , parte do qual se dissolve nos oceanos e/ou é absorvido pelas plantas e árvores por meio da fotossíntese. A outra parte acumula-se na atmosfera, alterando a sua composição e, por ser um gás que provoca o efeito de estufa, tende a aumentar a temperatura média global da baixa atmosfera (Troposfera e Estratosfera) e a tornar mais frequentes os fenómenos climáticos extremos. No aproveitamento energético da biomassa através da sua combustão, emite-se  $\text{CO}_2$  para a atmosfera. Efectivamente na utilização desta fonte renovável, apenas são repostas na atmosfera as quantidades que foram fixadas por via da fotossíntese. Assim, supõe-se que não há um aumento de  $\text{CO}_2$  na atmosfera e consequentemente há a diminuição de emissões de GEE por energia eléctrica produzida em comparação com os combustíveis fósseis. Um aspecto importante é que, em termos de emissões de  $\text{CO}_2$ , o carvão é o combustível fóssil mais poluente, seguido do petróleo e do gás natural (Santos, 2007) (ver Figura 2).

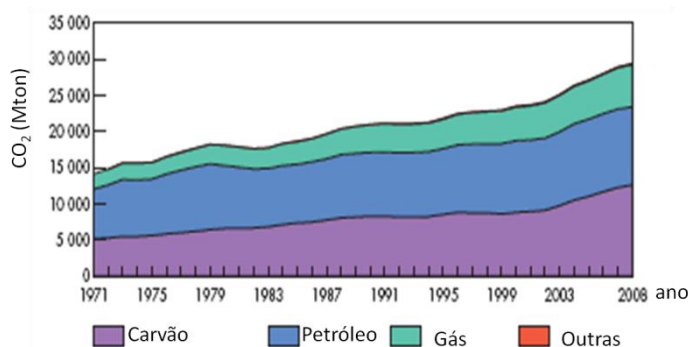


Figura 2 – Emissões de CO<sub>2</sub> (Mton) por combustível.  
Fonte: Figura adaptada de IEA, 2010.

Outro inconveniente consiste no agravamento das desigualdades na qualidade de vida e no poder económico entre países desenvolvidos e em desenvolvimento. Cerca de um terço da população mundial continua sem acesso à energia comercializada e a depender da biomassa (Santos, 2007). Presentemente, a fonte de energia renovável que mais contribui para a produção de electricidade é a energia hídrica seguida da biomassa (de acordo com o Gráfico 1). Esta última, sob a forma de madeira e resíduos orgânicos, é utilizada sobretudo pelos países em desenvolvimento e nestes pelas pessoas mais desfavorecidas.

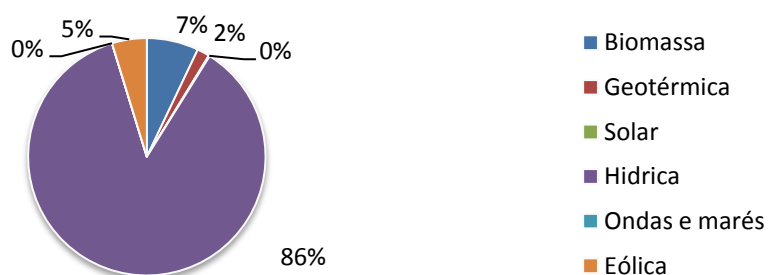


Gráfico 1 – Energias renováveis no mundo para 2007 (GWh).  
Fonte: <http://www.iea.org>, consultado a 6 de Setembro de 2010.

Segundo o documento IEA (2004), prevê-se um aumento de 60% do consumo mundial de energia primária até 2030 e uma duplicação até 2050. A manutenção das actuais taxas de consumo irá inevitavelmente esgotar as reservas não renováveis, mais tarde ou mais cedo. Contudo, as estimativas indicam que, às taxas actuais de consumo, as reservas de carvão são as mais duráveis por comparação às de petróleo e gás natural (Santos, 2007). É por isso muito provável que o carvão constitua uma fonte de energia primária significativa no futuro. As razões são de várias ordens: o custo é relativamente baixo e há reservas suficientemente abundantes para satisfazer o consumo de energia durante a maior parte deste século. Há porem um inconveniente grave. A utilização intensiva de carvão como principal fonte primária de energia provocará um aumento das emissões de CO<sub>2</sub>, com potenciais consequências para as alterações climáticas.

Uma das possíveis soluções eficaz e praticável, em fase de desenvolvimento, para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> das centrais a carvão é a co-combustão (IEA, 2008). Segundo a Associação Europeia da Indústria da Biomassa (EUBIA), actualmente, com o Programa Europeu para as Alterações Climáticas, a co-combustão representa uma oportunidade para substituir até cerca de 20% o carvão por biomassa, o que corresponde a uma diminuição acentuada das emissões de CO<sub>2</sub>. O

projecto NETBIOCOF – *Integrated European Network for Biomass Co-firing (2005-2007)* – teve como objectivo principal a promoção da cooperação europeia entre organismos de investigação sobre co-combustão com biomassa. No Gráfico 2 apresenta-se o número de centrais que efectuavam co-combustão na Europa em 2007. Actualmente o número é maior.

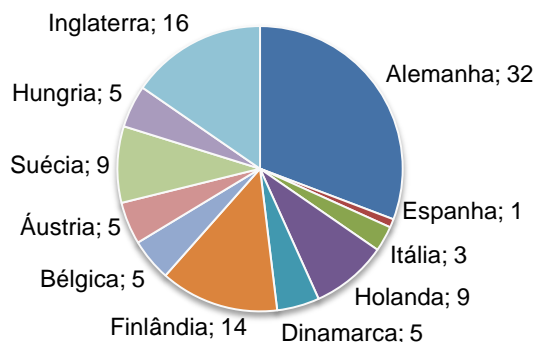


Gráfico 2 - Número de centrais na UE que efectuavam co-combustão com biomassa em 2007.  
Fonte: <http://www.eubia.org>, consultado a 6 de Setembro de 2010.

Embora o caso ideal corresponda à fonte de biomassa localizar-se junto da central, a maioria das instalações de co-combustão, indicadas no Gráfico 2, importa grandes quantidades de biomassa de outros locais, segundo a EUBIA.

Na Suécia existem culturas energéticas de Salgueiro que têm como finalidade (embora também possam ter outros destinos) abastecer centrais termoeléctricas a co-combustão (IEA, 2008). Os cultivos energéticos de floresta dedicada surgem desta maneira com um interesse crescente para diferentes agentes da sociedade. As culturas energéticas florestais podem, potencialmente, tornar-se num dos grandes pilares do desenvolvimento da bioenergia (Vega *et al.*, 2010).

As espécies arbóreas mais utilizadas a nível mundial são o Salgueiro, no Centro e Norte da Europa, o Choupo, na América do Norte e Canadá, o Eucalipto, na Nova Zelândia, América do Sul e Norte e Sul da Europa (Vega *et al.*, 2010). Com menos expressão destacam-se outras espécies como a Acácia e a Paulónia. No contexto europeu as espécies mais utilizadas são as descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Espécies arbóreas utilizadas em cultivos energéticos na Europa.  
Fonte: Vega *et al.*, 2010.

Cultivo energético florestal	País
Salgueiro	Suécia, Finlândia, Reino Unido, Irlanda, Alemanha, Bélgica, Dinamarca, Holanda, Áustria, Itália e Grécia.
Choupo	Reino Unido, Irlanda, Alemanha, Bélgica, Holanda, Áustria, Itália e Espanha.
Eucalipto	Itália, Grécia, Espanha, Áustria, Finlândia

## 1.5 Situação em Portugal

Em Portugal, as culturas energéticas de floresta dedicada são de carácter experimental. Refere-se a título de exemplo o projecto da empresa *Arsal Ambiente*, com sede na região de Guimarães, a qual iniciou um projecto de produção de floresta dedicada, de Salgueiro no Minho, Trás-os-Montes, Alentejo e Beiras.

Destaca-se que a espécie utilizada em regime de curta rotação é sobretudo o Eucalipto (Vega *et al.*, 2010) e está relacionada com a indústria madeireira/papeleira. Aqui, a curta rotação refere-se a cortes com um intervalo de 8 a 10 anos e a densidades de plantação na ordem das 1.100 - 1.400 plantas/ha, consoante a qualidade das plantas e da estação (Correia e Oliveira, 2003).

No âmbito do Protocolo de Quioto e no seio da UE, Portugal assumiu o compromisso de limitar o crescimento das suas emissões de GEE a 27%, no período de 2008-2012, face às emissões registadas em 1990. A nível nacional, a produção de floresta dedicada, poderá representar uma fonte de combustível para a central termoelétrica do Pego e de Sines. O sistema de Informação Cumprir Quioto ([www.cumprirquioto.pt](http://www.cumprirquioto.pt)) indica que a execução de co-combustão nestas centrais está presentemente a ser estudada pelas respectivas empresas, sobre a incorporação de biomassa equivalente a 5% do consumo total de combustível (equivalência energética) em substituição de carvão, de acordo com a RCM n.º 1/2008, de 4 de Janeiro. Esta medida é de enorme relevância, uma vez que potencialmente terá uma repercussão positiva na redução de emissão de GEE. Dado que as actuais previsões apontam para que, mesmo com as políticas e medidas definidas no Plano Nacional de Alterações Climáticas (PNAC) em 2006 e as novas metas assumidas em 2007, Portugal esteja, no período de cumprimento do Protocolo de Quioto, 5% acima do tecto de emissões estabelecido, ou seja em mais 17 Mton CO<sub>2eq</sub>. (Anuário de Sustentabilidade, 2010). A implementação de co-combustão pode ser uma contribuição notável para a diminuição do excedentário da nossa quota.

Para além de redução de GEE durante o processo de queima, a incorporação de biomassa proveniente de floresta dedicada localizada em território nacional atenua a nossa dependência energética. No ano de 2008, a grande fatia do carvão importado teve como destino final a produção de electricidade nas centrais termoelétricas, segundo consta na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados informativos sobre o carvão em Portugal.

Fonte: <http://www.dgge.pt/>, consultado a 2 de Agosto.

Tipo de uso Carvão	Total de Carvão (tep <sup>2</sup> )
Centrais termoelétricas	2 444 703
Indústrias transformadoras Químicas e plásticos	15 369
Indústrias transformadoras Cimento	49 637
Indústrias transformadoras Siderurgia	6 313

O DL n.º 225/2007 de 31 de Maio refere que uma das metas nacionais no sector energético é de que, até ao final de 2010, a potência instalada em centrais de biomassa seja de 250 MW<sub>e</sub>. No final de 2009 a potência instalada em centrais de biomassa sem cogeração era de 101 MW<sub>e</sub> (DGEG, 2009). A RCM n.º 29/2010 de 15 de Abril indica que se pretende actualmente a implementação da capacidade já atribuída de 250 MW<sub>e</sub>, e que esta será atingida com a disponibilização de biomassa florestal no mercado. Quer isto dizer que as medidas de promoção de produção de biomassa florestal, ou seja culturas energéticas de floresta dedicada, serão aprovadas para assegurar a satisfação das necessidades de consumo das centrais (RCM n.º 29/2010). Significa que o potencial destas culturas é de grande interesse no mercado nacional e que é um destino plausível quer para a co-combustão

---

<sup>2</sup> tonelada equivalente de petróleo (tep); 1 tep = 4,1868x10<sup>10</sup> J

quer para queima dedicada. Refere-se a título de curiosidade, que no mercado nacional existem 14 empresas relacionadas com o sector do processamento de biomassa para energia, segundo o jornal trimestral *The Bioenergy International* (2010).

## 1.6 Importância e vantagens

De seguida é elaborado um resumo das principais vantagens da produção de culturas energéticas de floresta dedicada para produção de energia eléctrica, em consonância com o Plano de Acção Biomassa (COM, 2005), a Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Abril de 2009 e com a RCM n.º 33/2010 de 15 de Abril de 2010 e dados da Autoridade Florestal Nacional (DGRF, 2007a):

- É uma medida de acção para a concretização dos compromissos assumidos no Protocolo de Quioto e em outros programas que abrangem a mitigação das alterações climáticas como “Duas vezes 20 até 2020: As alterações climáticas, uma oportunidade para a Europa” (COM, 2008);
- Providencia a diversificação do abastecimento energético e permite a diminuição da dependência dos combustíveis fósseis. Potencia assim pressão na diminuição dos preços, devido à diminuição da procura;
- Em relação às fontes de energia convencionais, bem como em relação a outras energias renováveis, os custos são relativamente mais baixos, há uma menor dependência em relação a variações climáticas de curto prazo, há a promoção de estruturas económicas regionais e o facto de constituir uma fonte de rendimento para os agricultores;
- Promoverá uma gestão profissional das florestas, contribuindo para a redução dos riscos associados, nomeadamente incêndios, bem como para a sua sustentabilidade;
- A actual expansão do comércio internacional da bioenergia pode representar uma oportunidade para os produtores florestais nacionais aumentarem os seus rendimentos.

Em relação à tecnologia, a co-combustão tem custos de investimento reduzidos em comparação com outras tecnologias (ECOFYS, 2009), a biomassa sólida poderá, à partida, substituir directamente o combustível fóssil sem necessidade de grandes modificações nos equipamentos. Segundo a NETBIOCOF, a co-combustão é uma opção tecnicamente viável e com um enorme potencial para o abastecimento energético e desenvolvimento sustentável da UE. A co-combustão, de partículas em suspensão, providencia a vantagem de uma maior eficiência de conversão em energia eléctrica em relação a outros sistemas de queima. Destaca-se ainda que, pela queima da mistura de combustível, há uma redução de emissões atmosféricas de CO<sub>2</sub>, de SO<sub>2</sub>, e geralmente de NO<sub>x</sub> (Vega *et al.*, 2010). Além disto, a biomassa contém uma concentração inferior de elementos, como enxofre ou metais, por comparação ao carvão (Vega *et al.*, 2010).

## 1.7 Problemáticas e desvantagens

Uma das problemáticas associadas à produção de culturas energéticas é a intensidade do uso de área agrícola (COM, 2005). A produção de culturas energéticas, no que diz respeito a práticas agrícolas e florestais sustentáveis, está prevista na regulamentação que rege a Política Agrícola Comum (PAC). Associada à produção de culturas energéticas de floresta dedicada, surgem potenciais impactos sobre a (EEA, 2007; EEA, 2006):

- Conservação e protecção da biodiversidade;
- Qualidade, compactação e erosão do solo;
- Qualidade e consumo de água;
- Lixiviação de nutrientes.

Adianta-se de uma forma geral que, os potenciais impactos de cariz ambiental da produção de floresta dedicada são inferiores aos das culturas energéticas anuais, como os de cereais (EEA, 2006; Vega *et al.*, 2010). Sucede que as plantações de floresta dedicada, de uma forma geral, diminuem o risco de erosão e necessitam de menor tratamento do solo, ou seja menor utilização de fertilizantes e pesticidas, por comparação às culturas anuais (EEA, 2006; Vega *et al.*, 2010). Esta situação verifica-se desde que sejam cumpridos os seguintes requisitos: cuidado com a escolha da maquinaria; a altura das actividades florestais; a topografia do terreno; o tipo de solo e as infra-estruturas existentes (linhas de escoamento associadas a áreas e estradas florestais).

A produção de floresta dedicada, para produção de energia eléctrica, implementada em terrenos férteis poderá concorrer com a produção de culturas alimentares, *p. ex.* cereais, podendo ocorrer uma competição entre o uso do solo. Há ainda os efeitos intra-sectoriais do complexo industrial baseado na produção de madeira, os quais não são de menosprezar, em particular na competição pelo uso do solo e na produção de matérias-primas e, portanto, na actividade das restantes indústrias florestais. Todavia tudo indica que se verifica, a este respeito, uma larga zona de não conflitualidade decisiva de origens e destinos no contexto nacional (Alves *et al.*, 2007).

A produção de cultivos energéticos de floresta dedicada em Portugal necessita de um marco legislativo de ajudas e apoios (Ferreira, 2008). Por ser uma actividade em fase experimental e por existirem poucos projectos em exploração, no momento de se realizarem grandes investimentos em projectos-piloto, que sirvam de demonstração para futuros investidores, há muitas incertezas (Ferreira, 2008). Os custos associados ao cultivo e recolha destas explorações continuam demasiado altos para serem assumidos como custos de matéria-prima (Ferreira, 2008).

A principal desvantagem da co-combustão prende-se com o facto de a biomassa ter um poder calorífico inferior e teores de humidade superiores, ao do carvão.



## 2 Método

### 2.1 Análise Ambiental

Para efectuar a análise ambiental é utilizada a técnica de Avaliação de Ciclo de Vida – ACV (Life Cycle Assessment - LCA). Esta consiste na contabilização de todos os impactos ambientais, desde a extração e processamento de matérias-primas, do transporte e fabricação de produtos até ao impacto de fim de vida. É por isso um método utilizado para avaliar o impacto ambiental de um produto ou serviço, durante o seu ciclo de vida, consistindo numa avaliação sistemática que quantifica fluxos de energia e de materiais (<http://www.pre.nl>, consultado a 1 de Setembro de 2010). A metodologia da técnica de ACV inclui, de acordo com a norma ISO 14040, quatro fases principais que se inter-relacionam, nomeadamente, e por ordem cronológica: a definição do objectivo e do âmbito da análise; inventário dos processos envolvidos e respectivos fluxos de energia e materiais; avaliação dos impactos ambientais; e por último a interpretação dos resultados das fases de inventário e avaliação, tendo em conta os objectivos do estudo.

No presente estudo, o programa utilizado foi o *software* SimaPro 7.2, desenvolvido pela empresa holandesa *Pré Consultants*, o qual permite uma realização expedita de ACV. A informação no SimaPro está organizada por projectos, os quais podem incluir diversos ciclos de vida de um ou vários produtos e cujos processos podem ser extraídos das bases de dados do SimaPro. A base de dados está organizada em sete categorias, a saber: Materiais; Energia; Transportes; Processos; Utilizações; Estratégias de condicionamento de resíduos e de tratamento de resíduos. Uma vez definido o ciclo de vida, o SimaPro calcula a soma das diversas intervenções ambientais associadas à unidade funcional definida na modelação. Para proceder à avaliação de impacto ambiental, no presente estudo, foram considerados dois indicadores, o *Eco-indicador 95* e o *Eco-indicador 99*.

O *Eco-indicador 95* permite efectuar uma classificação, caracterização e normalização dos impactos ambientais de acordo com os seus efeitos (Geodkoop, 1996), tal como descrito na Figura 3.

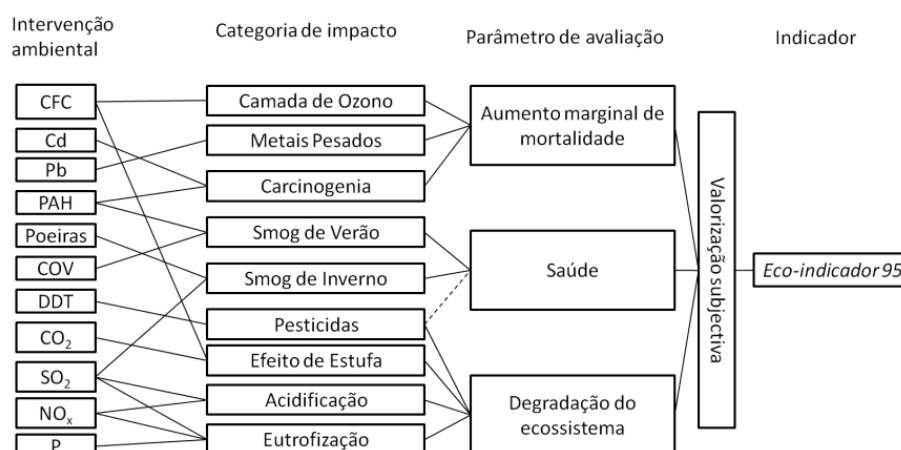


Figura 3 - Representação esquemática do modo de ACV pelo *Eco-indicador 95*.  
Fonte: Geodkoop, 1996.

Os impactos ambientais relacionados com o produto ou serviço são primeiramente agregados em efeitos a eles associados. Estes são posteriormente caracterizados de acordo com o dano associado (Geodkoop, 1996).

O *Eco-indicador 99* para efectuar o cálculo do impacto ambiental parte da definição dos indicadores de impacto finais (danos ambientais), e dos seus factores de ponderação, para posteriormente estabelecer modelos de dano que os relacionem com as intervenções ambientais (Goedkopp e Spriensma, 2001). O método considera três tipos de indicadores de dano ambiental, e a partir dos quais se definem modelos que os relacionem com os resultados de inventário, provenientes da ACV, como indicado na Figura 4.

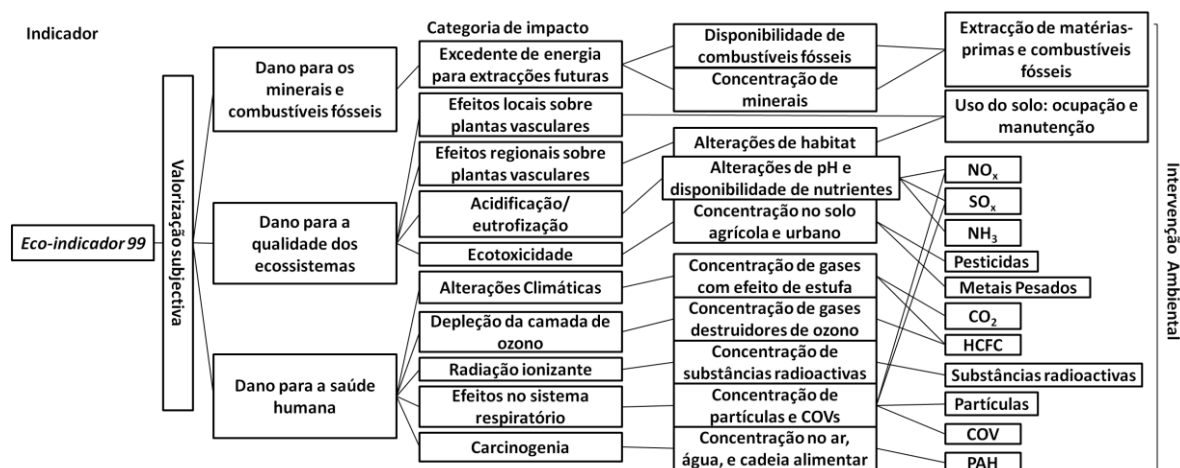


Figura 4 - Representação esquemática do modo de ACV pelo *Eco-indicador 99*.  
Fonte: Goedkopp e Spriensma, 2001.

As categorias de impacto ambiental (ver Figura 4) relacionam-se com as intervenções ambientais (emissões para o ar, a água e o solo) identificadas na Figura 4. A fase de classificação/caracterização estabelece essa correspondência, através da atribuição de factores de conversão que ponderam o contributo das diversas intervenções em cada categoria de impacto.

## 2.2 Modelos de crescimento e produção de povoamentos florestais

Foram utilizados dois modelos de projecção do volume em pé, o modelo 3PG 2.5, desenvolvido por Joe Landsberg e Dick Waring (CSIRO - *Australian Commonwealth Scientific and Research Organization*), e o modelo Globulus 3, desenvolvido por Margarida Tomé, Tânia Oliveira e Paula Soares (Instituto Superior de Agronomia).

O 3PG é um modelo fisiológico, que usa como *inputs* dados que caracterizam o potencial produtivo do local (clima e solo) e parâmetros ecofisiológicos que traduzem a forma/eficiência com que as árvores utilizam os recursos desse local. Com base nestes dados, o 3PG projecta o crescimento e o potencial produtivo dos povoamentos florestais à idade desejada e permite, por isso, determinar o volume de madeira que vamos obter quando cortarmos o povoamento. Tal como outros modelos fisiológicos, o 3PG é muito útil quando não se dispõe de dados de inventário florestal de apoio às projecções de crescimento (medições e registos de várias medidas biométricas das árvores *in situ*) (Sands, 2004).

O Globulus é um modelo empírico que utiliza os valores medidos em inventário florestal para projectar o crescimento do povoamento florestal até à idade em que pretendemos cortar e, assim, estimar o volume que vamos obter (Tomé *et al.*, 2001).

Os dois modelos foram articulados de forma a colmatar a dificuldade do 3PG em lidar com a talhadia.

### 3 Descrição do sistema em estudo e análise por fases

Como referido anteriormente, o principal objectivo do estudo é a análise comparada da produção de energia eléctrica na central termoeléctrica de Sines e do Pego, usando apenas combustível fóssil, a saber carvão betuminoso, versus a co-combustão a 10% (substituição de 10% de energia térmica produzida através de carvão, por 10% de energia térmica produzida por biomassa proveniente de floresta dedicada de *Eucalyptus globulus*). Na Figura 5 consta o sistema em estudo, o ciclo e o fluxo de CO<sub>2</sub>, de materiais e de energia por actividade e/ou processo dentro da fronteira de estudo.

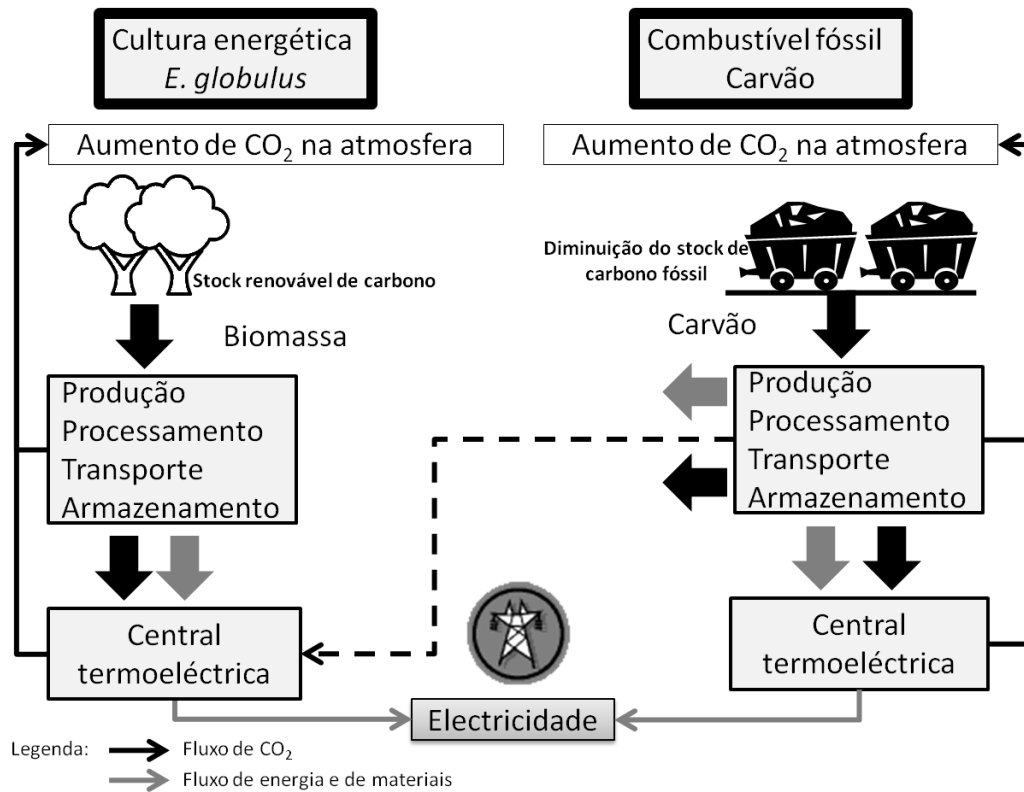


Figura 5 - Sistema em estudo.

É considerada a existência de um terreno de regadio na Região do Ribatejo e Oeste (RO), o qual possui como equipamento de rega um sistema gota-a-gota e é utilizado para a produção de *Eucalyptus globulus* (*E. globulus*). A região em estudo foi o RO porque coincide com a macrozonagem para a produção de *E. globulus* e porque existem dados científicos suficientes sobre a região para se viabilizar o estudo sobre a alteração do uso do solo. O estudo pretende identificar os impactos ambientais decorrentes da produção da cultura energética de *E. globulus* no RO. Na Figura 6 está identificada a região do RO e a localização das centrais do Pego e de Sines.



Figura 6 - Localização do RO e das centrais termoelétricas de Sines e do Pego.

### Cenário combustão

Com o intuito de enquadrar o presente estudo na realidade do contexto nacional, para a produção de energia eléctrica, optou-se por modelar as duas centrais termoelétricas em Portugal que usam carvão como combustível e que estão ligadas à Rede Nacional de Transporte de Energia Eléctrica, nomeadamente a central do Pego e de Sines (ver Tabela 3).

Tabela 3 - Centrais termoelétricas ligadas à Rede Nacional de Transporte de Energia Eléctrica.

Fonte: <http://www.centrodeinformacao.ren.pt>, consultado a 10 de Agosto de 2010.

Centrais	Localização	Ano entrada em serviço
Pego	Abrantes	1993
Sines	Sines	1985

### Cenário co-combustão

O terreno é afecto ao cultivo de *E. globulus*, que é depois utilizado como combustível na central termoelétrica de Sines e do Pego como substituto de parte do carvão utilizado. Admitiu-se uma mistura de combustível, em que a taxa de substituição de carvão betuminoso por biomassa é de 10% térmico, com base no respectivo poder calorífico do carvão.

Uma vez que o terreno de plantação de *E. globulus* concorre directamente com outros tipos de ocupação do uso do solo, torna-se necessário considerar a alteração do uso do mesmo (ver Capítulo 4.2). A região agrícola do RO é uma das áreas com maior produtividade de milho (INE, 2010). Assumindo que o consumo nacional de milho se mantém constante, e que para garantir que a oferta do produto também se mantém, assume-se que o milho é importado da Argentina (ARG).

Para concretizar a ACV a cada um dos cenários, são necessários, de um modo geral, *inputs* de recursos naturais, operações e mão-de-obra, os quais constam na Figura 7. Como resultante de todo o processo é possível considerar a existência de impactos ambientais, tais como a emissão de GEE, degradação do solo e emissão de substâncias acidificantes, entre outros, e que constam no esquema da Figura 7. Nesta figura é apresentado a tracejado a fronteira do sistema em estudo.

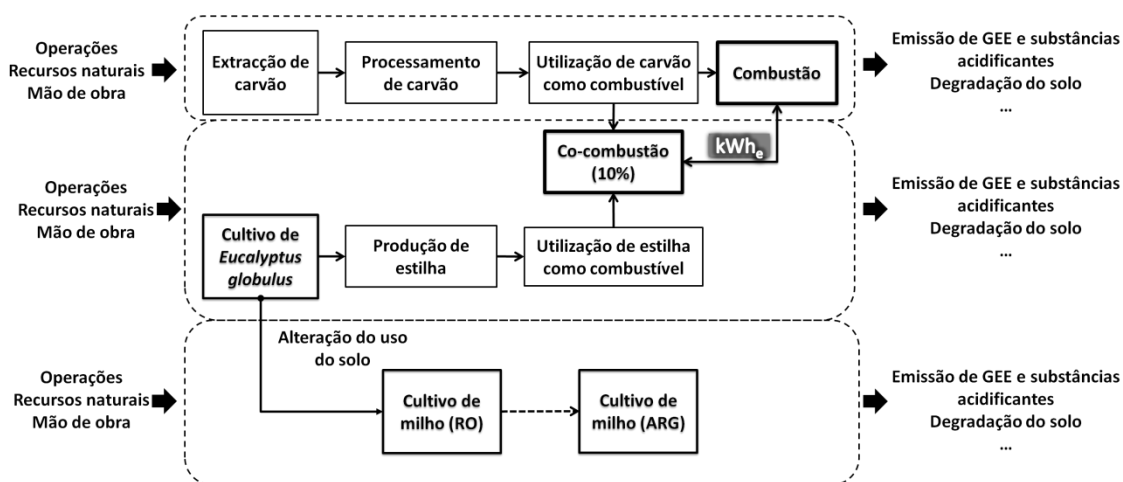


Figura 7 - Fronteira do sistema em estudo.

A ACV é efectuada tendo como Unidade Funcional (UF) a produção de 1 kWh<sub>e</sub>. Assim sendo, é útil, numa fase inicial, perceber quais as implicações em termos de afectação de área e de substituição de carvão por biomassa. Para tal são considerados os dados indicados na Tabela 4 para a central termoelétrica de Sines.

Tabela 4 - Informação técnica da central termoelétrica de Sines.  
 Fonte: <http://www.a-nossa-energia.edp.pt>, consultado a 17 de Julho de 2010.

Rendimento do gerador de vapor (%)	87
Rendimento da turbina (%)	45

Para facilitar o procedimento de cálculo, considera-se um rendimento ( $\eta$ ) líquido ou global de 39% para a central de Sines e dado pela Equação 1.

$$\eta_{global} = \eta_{gerador\ de\ vapor} \times \eta_{turbina} \quad \text{Equação 1}$$

A eficiência térmica (%) da central do Pego, para o ano de 2005, foi de 38,3% (<http://www.tejoenergia.com>, consultado a 27 de Agosto de 2010). Considerou-se no presente estudo que no ano de 2009 o rendimento é de 39% na respectiva central.

A quantidade de energia no combustível, ou mistura de combustíveis, deve ser de 9 MJ para se produzir 1 kWh<sub>e</sub><sup>3</sup>, tendo em consideração o  $\eta_{global}$  dado pela Equação 2.

$$\eta_{global} = \frac{\text{Energia produzida}}{\text{Energia do combustível}} \left[ \frac{J}{J} \right] \quad \text{Equação 2}$$

No cenário de combustão, esta energia provem unicamente do carvão betuminoso. No cenário de co-combustão com 10% de substituição térmica, 8,1 MJ provêm do carvão e 0,9 MJ da biomassa.

É de notar que, devido às diferentes características dos dois combustíveis, a substituição de um pelo outro não ocorre na proporção de 1 para 1. É necessário atender ao Poder Calorífico (PC) de cada combustível e que estão reportados na Tabela 5. O PC divide-se em superior e inferior. Embora para o carvão a diferença entre estes nunca seja mais que 10%, para a biomassa a diferença pode ser muito acentuada devido à humidade nela contida. O Poder Calorífico Superior (PCS) refere-se à

<sup>3</sup> 1kWh<sub>e</sub> é equivalente a  $3.6 \times 10^6$ J

energia total que é libertada na combustão por quantidade de combustível. O Poder Calorífico Inferior (PCI) corresponde à energia útil da combustão, depois de se serem descontadas as perdas de energia associadas à evaporação da água do combustível no estado livre e quimicamente ligada (Groot *et al.*, 2007). O PCI é, pelo anteriormente explicado, inferior ou igual ao PCS (ver Tabela 5).

Tabela 5 - Poder calorífico de *E. globulus* e do Carvão betuminoso.

Combustível	PCS base seca (MJ/kg)	PCI base seca (MJ/kg)	Fonte bibliográfica
<i>E. globulus</i>	19,230	17,938	Kitani e Hall, 1989
	18,000	16,790	Groot <i>et al.</i> , 2007
	-	Valor médio: 17,364	-
Carvão betuminoso	31,600	30,577	Doorn, 1996
	32,260	31,234	Costen <i>et al.</i> , 1994
	29,469	28,400	Kurkela, 1996
	26,117	25,200	Kurkela, 1996
	30,226	29,200	Kurkela, 1996
	-	Valor médio: 28,922	-

A composição dos combustíveis sólidos pode ser expressa de várias formas, nomeadamente “as-received” (inclui água e cinzas), em base seca (exclui a água), ou em base seca sem cinzas. Uma vez que os combustíveis sólidos não apresentam uma composição uniforme, não podem ser representados por uma fórmula química definida. A sua caracterização é realizada através de dois tipos de análises químicas, a análise imediata e a elementar. A análise elementar de um combustível é determinada experimentalmente em laboratório e quantifica as percentagens dos elementos individuais de um combustível, especificamente, as percentagens mássicas de carbono, hidrogénio, azoto, enxofre, oxigénio e cinzas. À semelhança desta, a análise imediata é determinada experimentalmente em laboratório e quantifica as percentagens mássicas de humidade, matéria volátil, carbono fixo e cinzas (Coelho e Costa, 2007). As características típicas do carvão e da madeira constam na Tabela 6 e na Figura 8.

Tabela 6 - Percentagens típicas de oxigénio, água e cinzas presentes nos combustíveis sólidos.

Fonte: Tabela adaptada de Coelho e Costa, 2007.

Combustível	Oxigénio (base seca, sem cinzas)	Água (sem cinzas)	Cinzas (base seca)
Madeira	45%	15 – 50%	0,1 – 1%
Carvão betuminoso	5%	5%	>5%

A percentagem de humidade contida na biomassa é um dos factores que determina o seu PC (Groot *et al.*, 2007). A madeira acabada de cortar possui, tipicamente e em termos mássicos, 50% de água, a qual baixa para 15 a 20% após exposição ao ar durante um ano (Coelho e Costa, 2007). Assumiu-se que a percentagem de água na biomassa, na central termoelétrica, é 20%.

Sabendo que a biomassa contém 20% de humidade em termos mássicos (wt%), significa que há 20% de água e 80% de matéria fibrosa. Considerando que todo o combustível é fibra e utilizando o valor médio do PCI de *E. globulus* da Tabela 5, vem que:

$$PC \left[ \frac{MJ}{kg} \right] = 0,8 \times 17,364 \left[ \frac{MJ}{kg} \right] = 13,891 \left[ \frac{MJ}{kg} \right]$$

A energia gasta associada à vaporização da água (Q, [kJ]) contida em uma determinada quantidade de combustível é dada pela Equação 3.

$$Q [kJ] = m[kg] \times C_{pf} \left[ \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \right] \times \Delta T [^\circ C] + m[kg] \times h_{fg} \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad \text{Equação 3}$$

Em que m é a quantidade de água presente no combustível [kg],  $C_{pf}$  o calor específico [kJ/kg °C] respectivamente 4,18 kJ/kg °C a 25°C,  $\Delta T$  é a variação de temperatura [°C], respectivamente de 25°C para 100°C e  $h_{fg}$  o calor latente de vaporização à pressão atmosférica (1 bar) [kJ/kg], respectivamente 2257 kJ/kg.

Pela Equação 3 a energia associada à vaporização da água contida em 1 kg de biomassa de *E. globulus* é 0,514 MJ. A energia útil é:

$$13,891 \left[ \frac{MJ}{kg} \right] - 0,514 \left[ \frac{MJ}{kg} \right] = 13,378 \left[ \frac{MJ}{kg} \right] \approx 13 \left[ \frac{MJ}{kg} \right] \quad (\text{ver Tabela 7})$$

O carvão betuminoso pode apresentar percentagens mássicas de água na ordem de 5%. A quantidade de água presente no combustível sólido influencia a taxa de combustão e a eficiência global de um dado sistema de combustão (Coelho e Costa, 2007). Considerou-se, por isso, no presente estudo 5% humidade. Tendo em consideração o valor médio do PCI do carvão betuminoso da Tabela 5, vem que:

$$PC \left[ \frac{MJ}{kg} \right] = 0,95 \times 28,922 \left[ \frac{MJ}{kg} \right] = 27,476 \left[ \frac{MJ}{kg} \right] \approx 27 \left[ \frac{MJ}{kg} \right] \quad (\text{ver Tabela 7})$$

Tendo em consideração a energia gasta na evaporação da água, 0,129 kJ (Equação 3), a energia útil é 27 MJ/kg. Na Tabela 7 apresenta-se o PC calculado no presente estudo, e considerado para os cálculos posteriores, do carvão betuminoso e de *E. globulus*, considerando respectivamente 5 e 20 %wt humidade.

Tabela 7 - PC do carvão e *E. globulus* determinado e utilizado no presente estudo.

Combustível	PC (MJ/kg)
<i>E. globulus</i>	13
Carvão betuminoso	27

As cinzas são o resíduo inorgânico que permanece depois de o combustível ter sido completamente queimado, num dado equipamento de combustão. A presença de cinzas nos combustíveis sólidos reduz o seu PC (Coelho e Costa, 2007). Apesar de estarem associadas algumas desvantagens à presença de humidade e cinzas nos combustíveis sólidos, apenas foram contabilizadas as relacionadas à humidade, uma vez que é nesta característica que surgem os valores mais discrepantes entre os dois combustíveis (Figura 8).

A matéria volátil resulta principalmente de combinações entre o carbono e hidrogénio. O teor de matéria volátil de um combustível sólido afecta directamente o processo de combustão, em particular, a estabilidade da chama, a formação de poluentes e a eficiência global da combustão. O carbono fixo é a fracção residual do combustível, descontados os teores de humidade, matéria volátil e cinzas, desempenhando um papel crucial no processo de combustão (Coelho e Costa, 2007). Na Figura 8 é visível que a percentagem mássica (wt%) de carbono fixo é muito superior no carvão betuminoso por comparação à madeira.

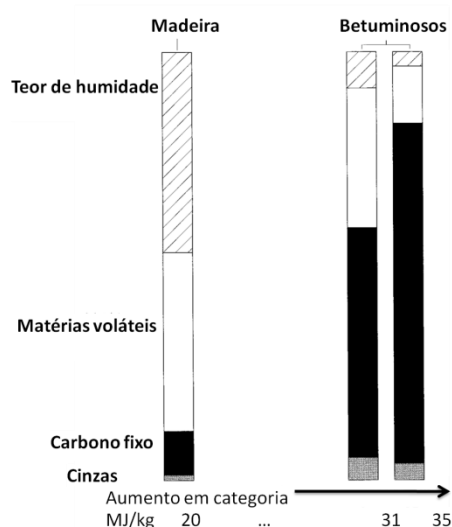


Figura 8 - Valores típicos da percentagem mássica de humidade, matéria volátil, carbono fixo e cinzas e do PCS da madeira e carvão.

Fonte: Figura adaptada e extraída de Coelho e Costa, 2007.

Sendo o PC do *E. globulus* inferior ao do carvão betuminoso, é necessária uma quantidade mássica maior de *E. globulus* para produzir a mesma quantidade de energia. Na Tabela 8 é indicada a quantidade necessária de combustível para produzir 1 kWh<sub>e</sub> em combustão e em co-combustão com base no PC indicado na Tabela 7.

Tabela 8 - Quantidade de combustível em co-combustão e combustão para produzir 1 kWh<sub>e</sub>.

Co-combustão a 10%	Quantidade de biomassa (kg)	0,07
	Quantidade de carvão (kg)	0,30
Combustão	Quantidade de carvão (kg)	0,3(3)

Para produzir 1 kWh<sub>e</sub> é necessário que o combustível, quer em regime de combustão ou co-combustão, contenha uma energia de 9 MJ, dado pela Equação 2. Se considerarmos o PC indicado para o carvão e para a biomassa na Tabela 7, vem que é necessário 0,3(3) kg de carvão no cenário de combustão e de 0,30 kg de carvão e 0,07 kg de biomassa no cenário de co-combustão. Entre os dois cenários há um incremento de peso, ou seja por o PC da biomassa ser inferior ao do carvão o peso da mistura em co-combustão é superior em 0,037 kg, o que corresponde a um aumento percentual do peso da mistura em relação ao peso do carvão no cenário da combustão em cerca de 11%.

É possível constatar pelos dados reportados na Tabela 8 que, para produzir 1 kWh<sub>e</sub>, é necessário 0,07 kg de *E. globulus*. Considerou-se que esta quantidade tem 20 %wt de humidade na base húmida, tendo de se converter esta quantidade para matéria seca, visto que os modelos de crescimento e produção de floresta utilizados trabalham com matéria seca. Para tal considera-se a Equação 4 e os dados reportados na Tabela 8. A percentagem mássica de humidade de uma amostra é definida pelo quociente, expresso em percentagem, da massa de água que se evapora do material por secagem, pela massa da amostra original.

$$\% \text{Humidade}_{\text{base húmida}} = \frac{\text{massa}_{\text{húmida}} [\text{kg}] - \text{massa}_{\text{seca}} [\text{kg}]}{\text{massa}_{\text{húmida}} [\text{kg}]} \times 100\% \quad (\text{Walker, 2006}) \quad \text{Equação 4}$$

Vem que, para produzir 1 kWh<sub>e</sub>, é necessário 0,056 kg de matéria seca de *E. globulus*. Assumiu-se que, durante todo o processo, desde o corte da árvore até à sua entrada na central ocorrem 7% de



perdas em matéria seca, valor indicativo para o contexto nacional. Efectivamente, tendo em consideração as perdas de matéria seca, 0,004 kg, para produzir 1 kWh<sub>e</sub> é necessário 0,06 kg (matéria seca) de *E. globulus* na plantação. As perdas de matéria seca estão primordialmente relacionadas com as operações mecanizadas, com o tempo de armazenamento e com as condições edafoclimáticas.

Não existindo actualmente em Portugal produção de cultura energética de floresta dedicada regada, uma fase do presente estudo consistiu na modelação e simulação de produção de *E. globulus* no RO (ver Capítulo 3.1.1).

Para avaliar a quantidade de milho a importar da ARG é necessário conhecer a produtividade anual da cultura de *E. globulus* e de milho no RO. Para tal, são considerados os dados constantes da Tabela 9.

Tabela 9 - Produtividade anual da plantação de milho e de *E. globulus* no RO.

Tipo de cultivo no RO	ton/ha /ano
Produtividade anual da cultura de <i>E. globulus</i> , (ver Capítulo 3.1.1)	16
Produtividade anual da cultura de milho – sementeira convencional (Basílio, 2004)	13

Como é possível constatar pela Tabela 9, a produção de 0,06 kg de matéria seca de *E. globulus*, concorre com a produção de 0,05 kg de milho no RO. O estudo da alteração do uso do solo é baseado neste valor (ver Capítulo 4.2).

Interessa ainda, nesta fase inicial, indicar a nível macroscópico a ocupação do cultivo de *E. globulus* em termos de área, de maneira a garantir o abastecimento contínuo ao longo do ano à central. Para tal é necessário o conhecimento das características de cada uma das centrais, que constam na Tabela 10.

Tabela 10 - Características da central termoelétrica de Sines e do Pego.

Fonte: Costa e Azevedo, 2007 e <http://www.tejoenergia.com>, consultado a 27 de Agosto de 2010.

Central Sines	Disponibilidade anual da central (h)	5.000
	Potência máxima (MW <sub>e</sub> )	1.268
Central Pego	Disponibilidade anual da central (h)	3.000
	Potência unitária máxima (MW <sub>e</sub> )	628

Considerando os valores da Tabela 10, para a central de Sines a produção anual é aproximadamente 6,3 TWh<sub>e</sub>, a funcionar à máxima carga. Atendendo que para a produção de 1 kWh<sub>e</sub> é necessário 0,06kg de *E. globulus* na plantação, em co-combustão a 10% térmico, assumindo que toda a biomassa provém da cultura energética, é necessária a produção de 380 kton (matéria seca) de *E. globulus*.

Considera-se que a plantação tem uma média de produtividade anual de 16 ton/ha e que o corte é executado de 3 em 3 anos, pelo que na altura do corte a biomassa explorável é de 48 ton/ha. Para abastecer a central num ano é necessária uma área de 7.925 ha. Como os cortes são feitos com um intervalo de 3 anos é necessário que existam pelo menos 3 talhões para rotação anual de corte. A área total de plantação de *E. globulus* é cerca de 23.775 ha.

Com base nos valores reportados na Tabela 10, na central do Pego a produção anual é de 1,9 TWh<sub>e</sub>. Em co-combustão a 10% é necessário o consumo de 113 kton de *E. globulus*, que em termos de afectação de solo corresponde a que cada talhão compreenda 2.355 ha, e em termos totais à plantação de 7.065 ha.

A região agrária do RO compreende uma área de 1.200.000 ha, DL n.º46/89 de 15 de Fevereiro ANEXO IV - Zonas Agrárias. O cultivo de *E. globulus* necessita, aproximadamente, de 23.775 ha (para a central de Sines) e 7.065 ha (para a central do Pego). A área necessária para alimentar as duas centrais com biomassa num regime de co-combustão a 10% é de cerca de 3% da área agrária total do RO.

Para efeitos de análise são consideradas as seguintes fases:

- Produção de *E. globulus*: considera-se a simulação do crescimento de *E. globulus* no RO, as operações e actividades na unidade silvícola e a avaliação dos impactos ambientais através da análise de ACV;
- Sistema logístico e transporte de biomassa: nesta fase é efectuada a análise ambiental e energética de diferentes raios de distância entre a unidade silvícola e a central, e é realizada a avaliação dos impactos ambientais do sistema de produção de biomassa até à central pela ACV;
- Central termoelétrica: É efectuada a avaliação dos impactos ambientais através da análise de ACV da combustão e co-combustão na central de Sines e do Pego;

Seguidamente são integrados todos os itens correspondentes a cada um dos cenários, sendo obtida a comparação final pretendida.

### **3.1 Produção de *E. globulus***

Os impactos da produção de floresta dedicada dependem da espécie arbórea cultivada, é essencial discernir quais os impactos ambientais da utilização de *E. globulus* como cultivo energético. Não obstante, é essencial enquadrar as pressões ambientais do sistema na região em estudo. Pelo que é primeiramente realizada uma contextualização ambiental do RO.

Tendo em conta que a zona do RO é, por excelência, uma região de produção agrícola, a qualidade ambiental da região prende-se manifestamente com as práticas agrícolas aí exercidas. As culturas de talhadia de curta rotação podem ser consideradas explorações agro-florestais devido ao seu processo de cultivo, produção e tempo de rotação reduzido. Neste contexto, podem portanto ser equiparadas às explorações agrícolas.

Para avaliar a qualidade ambiental do RO e os potenciais impactos ambientais da inserção deste tipo de explorações na região RO utilizam-se indicadores agro-ambientais (INE, 2009), o índice da qualidade do ar (<http://www.qualar.org>), o índice da qualidade da água superficial (<http://snirh.pt>) e alguns estudos científicos sobre a qualidade dos recursos hídricos na região. Os indicadores agro-ambientais (IAA) pretendem identificar, qualificar, quantificar e avaliar tendências das interações mais significativas entre a agricultura e o meio ambiente, nomeadamente em termos das pressões poluidoras e da redução dos recursos naturais (INE, 2009).

O RO é uma região crítica no que concerne a problemas ambientais, em virtude da adopção crescente de práticas agrícolas intensivas (INE, 2009). O aumento do consumo de fertilizantes minerais, de produtos fitofarmacêuticos, da utilização de água na actividade agrícola, e da

especialização das explorações agrícolas, são os principais factores que contribuem para os impactos ambientais decorrentes das práticas agrícolas intensivas.

O posicionamento da região do RO, tendo em consideração o resultado agregado dos riscos representados pelas pressões poluidoras (balanço do azoto, GEE e emissões de amoníaco), permite estabelecer a classificação de risco relativo de existência de pressões negativas da agricultura sobre o ambiente como médio. Quanto à qualidade do ar, a região do Vale do Tejo e Oeste, no ano de 2008, deteve, para o índice de qualidade do ar, a classificação de bom (<http://www.qualar.org>, consultado em 16 de Julho de 2010).

O impacto das actividades agrícolas sobre a paisagem, no RO, varia entre muito baixo e elevado (INE, 2009). As tendências demonstradas nos últimos anos permitem constatar que os efeitos da actividade agrícola foram mais prejudiciais para o estado da paisagem e a qualidade da água do que para a biodiversidade, em termos de espécies de aves.

Embora a avaliação global da qualidade de água superficial no RO varie entre a classificação de água razoável (C) e a classificação de má (D) (<http://snirh.pt>, consultado em 16 de Julho de 2010), a análise da presença de nitratos e fosfatos nos meios hídricos permitiu concluir que os valores mais elevados observam-se sobretudo no próprio Rio Tejo e com maior expressão a jusante da foz do Zêzere (MA, 1999). Todavia, os valores encontrados nunca atingem limites a partir dos quais as águas se considerem poluídas (MA, 1999). Estudos realizados sobre recursos hídricos subterrâneos evidenciam contaminações com pesticidas e nitratos em algumas zonas agrícolas do Ribatejo (Batista *et al.*, 1998). A vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos freáticos por nitratos e pesticidas é alta no RO (Paralta *et al.*, 2001).

As potenciais pressões ecológicas relacionadas com a exploração de culturas energéticas arbóreas resultam da acção conjunta de vários factores. Na Tabela 11 é efectuado um resumo das principais tensões e agentes envolvidos.

Em termos gerais, as influências ambientais da plantação de eucaliptais dependem fundamentalmente da técnica de silvicultura utilizada e têm resultados que variam consoante as condições do meio e a intensidade de exploração.

De uma forma geral, segundo a EEA (2006), os sistemas de talhadia de curta rotação, na sua maioria, têm impactos ambientais inferiores aos das culturas energéticas anuais. As culturas dedicadas originam menor impacto ambiental do que as culturas anuais uma vez que as primeiras diminuem o risco de erosão e necessitam de menor tratamento de solo, o que significa um menor *input* de fertilizantes e pesticidas (EEA, 2006). Para além disso, as suas raízes mais profundas reduzem o risco de compactação do solo (EEA, 2006).

Tabela 11 - Classificação da gravidade de impactos ambientais de cultura energética de Eucalipto.  
Fonte: EEA, 2006.

Tipo de impacto	Classificação	Motivo
Erosão	Risco baixo a médio	Cultura permanente <sup>4</sup> , no entanto pode deixar o solo nu.
Compactação do solo	Risco baixo	Cultura permanente com sistema radicular bem desenvolvido.
Lixiviação de nutrientes	Risco baixo	Apresenta uma boa assimilação dos nutrientes.
Poluição por pesticidas	Risco baixo	O povoamento florestal exerce uma competição acentuada.
Captação de água	Risco médio	Requer que o solo contenha uma determinada quantidade de humidade. Suspeita-se que interfira negativamente com o regime hidrológico.
Risco de incêndio crescente	Risco elevado	Devido ao elevado teor inflamável (óleos)
Biodiversidade	Risco elevado	Suprime quase toda a vegetação.
Diversidade de espécies vegetais	Risco elevado	Em algumas regiões é a cultura dominante.

Embora, como referido anteriormente, a inclusão destes sistemas produtivos no RO não acarretem à partida impactos ambientais significativos, é essencial proceder a uma análise contextualizada das implicações do uso de uma espécie exótica, pela avaliação da pressão no meio ambiente. Quando os eucaliptos são cultivados como exóticos, como é o caso, há que evitar efeitos negativos do eucalipto nos sistemas adjacentes e garantir a possibilidade de reconversão, findo o ciclo produtivo.

No que diz respeito ao tipo de exploração, a produção de floresta dedicada evita que o solo fique a descoberto por longos períodos de tempo, protegendo o solo de fenómenos de erosão. No presente cenário em estudo (ver Capítulo 3.1.2), o solo encontra-se a descoberto apenas no início da plantação ou no início de cada talhadia. Contudo, o solo não está totalmente “desprotegido”, uma vez que o sistema radicular só é removido na última talhadia, continuando a existir um bom suporte físico para o solo após o corte da árvore. No entanto, poderá haver, de facto, erosão laminar por arrastamento do solo no caso da existência de declives, devido ao efeito da chuva sobre as camadas superficiais do solo.

Considerando a qualidade do solo, os Eucaliptos explorados intensivamente, sobretudo em regime de talhadia de rotações curtas, em povoamentos de elevada densidade, conduzem a uma redução de nutrientes do ecossistema, nas camadas superficiais do solo (Alves *et al.*, 2007). No presente estudo um dos focos de partida para a quantificação de fertilizantes a aplicar no solo, foi que a quantidade de nutrientes, a aplicar via fertirrigação, seria a quantidade de nutrientes removidos do sistema, ou seja os nutrientes acumulados na biomassa explorável (ver Capítulo 3.1.2). Logo, a exportação de nutrientes não acarreta, por isso, consequências negativas para a qualidade do solo, uma vez que esta é assegurada pela realização do balanço de nutrientes. A qualidade do solo onde se insere a produção de floresta dedicada, RO, é um solo fértil e mineral (ver Capítulo 3.1.1). No entanto, é

---

<sup>4</sup> De notar que o termo permanente é aplicado a culturas agrícolas. No entanto, uma vez que a produção de floresta dedicada permite que o solo fique coberto a maior parte do tempo, foi considerado, para efeitos de erosão, que a produção de eucalipto é equiparável a uma cultura permanente.

preciso atender a que a implementação deste tipo de explorações em solos de muita baixa fertilidade e de matérias originárias com uma diminuta reserva em minerais será de esperar um empobrecimento do sistema no que se refere à qualidade do solo. Numa perspectiva de gestão sustentada, as camadas orgânicas dos solos das plantações de *E. globulus*, ou seja, a serapilheira, não deverá ser removida. Desta maneira, minimizam-se perturbações no ciclo biológico dos nutrientes. Apesar de os nutrientes contidos na serapilheira serem diminutos, estes são de extrema importância para os organismos que coabitam o solo.

As acções sobre o solo, aquando da exploração e da preparação do terreno, são apontadas como outra causa de depleção de nutrientes e de carbono orgânico, bem como da alteração das características físicas dos solos (Alves *et al.*, 2007). Contudo, segundo os mesmos autores, não se têm observado diferenças acentuadas nas características físicas, na disponibilidade de nutrientes e nas condições biológicas do solo, por práticas como a gradagem e a fertilização aplicadas durante a rotação (Alves *et al.*, 2007). Apesar da utilização de maquinaria estar associada à compactação do solo e possível deterioração da camada superficial, devido ao número de intervenções mecanizadas e ao sistema radicular ser bem desenvolvido a compactação do solo é reduzida (EEA, 2006), podendo ocorrer no limite uma compactação moderada (Souch *et al.*, 2004).

Associado à utilização de fertilizantes encontra-se o fenómeno de lixiviação de nutrientes, nomeadamente de nitratos e fosfatos (EEA, 2006). Estes nutrientes, sobe a forma de compostos, são lixiviados para o solo e para os recursos hídricos (EEA, 2006). A contaminação das águas subterrâneas e superficiais é mais susceptível de acontecer quando o solo está a descoberto e sujeito a fenómenos de erosão. Quando o solo está a descoberto a interacção da precipitação com as camadas superficiais de solo é maior uma vez que há uma maior área de solo disponível.

A probabilidade de ocorrer lixiviação está sobretudo relacionada com o acto de fertilização, quer isto dizer com os procedimentos (*p. ex.* método, quantidade e tipo de fertilizante aplicado num determinado tipo de solo). Contudo, é pertinente referir que os Eucaliptos apresentam uma elevada eficiência de uso dos nutrientes (Alves, *et al.*, 2007; EEA, 2006). Por o sistema radicular só ser removido na última talhadia existe a contínua capacidade de assimilação de nutrientes durante todo o ciclo produtivo. Apesar da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos freáticos por nitratos ser alta no RO (Paralta, *et al.*, 2001), a contaminação destes, por este tipo de povoamentos poderá ser reduzida, atendendo unicamente às características fisiológicas da espécie.

Os fertilizantes estão ainda associados à emissão de compostos responsáveis por fenómenos de acidificação, de eutrofização e alterações climáticas (Pluimers *et al.*, 2000). Não obstante, devido às características do cultivo destas plantações, eficiência alta na assimilação de nutrientes, estes impactos vêem-se bastante diminuídos, pelo referido anteriormente. Sobretudo quando comparadas a outros tipos de culturas anuais (EEA, 2006).

No presente estudo considerou-se que a aplicação de herbicida só é efectuada durante a preparação do terreno (ver Capítulo 3.1.2), sendo o controlo da vegetação espontânea à posteriori controlado por meios mecânicos. Uma vez que o povoamento de *E. globulus* necessita de quantidades reduzidas de herbicidas, a poluição associada a estes compostos é bastante atenuada. A saber, os herbicidas são

responsáveis por fenómenos de acidificação e alterações nas estruturas biológicas do solo (Pluimers *et al.*, 2000). Conclui-se que, embora a caracterização ambiental actual do RO indique que um ponto sensível é a vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas por herbicidas (Paralta *et al.*, 2001), a produção de floresta dedicada de acordo com o cenário elaborado (ver Capítulo 3.1.2) para as operações e actividades na unidade de silvicultura não exerce pressão acrescida sobre os recursos hídricos subterrâneos.

Os impactos na paisagem e na biodiversidade são similares aos de outros tipos de florestas de produção e dependem da escala e do modo de implementação. O facto de a espécie ser exótica é um factor adverso adicional para as pressões negativas de explorações monoespecíficas, uma vez que pode impedir que a vegetação natural prolifere e conseqüentemente alterar a dinâmica de vida da fauna existente. Embora a fauna consiga fazer uso da espécie *E. globulus*, principalmente em termos de alimentação (Alves *et al.*, 2007), a circunstância de se tratar de uma espécie exótica introduzida há relativamente pouco tempo e possuidora de características bastante distintas do arvoredo autóctone, não deixa de ser um contributo para a pobreza das comunidades animais que poderão colonizar as respectivas plantações. Pode-se concluir, também, que as operações relacionadas com o abate no fim de vida e com a instalação de novas plantações podem constituir uma perturbação considerável para a biodiversidade.

À escala da paisagem, a manutenção da diversidade biológica passa pela diversificação dos tipos de ocupação do solo. A existência de plantações de floresta dedicada dispersas, à partida, não poderá ser encarada como um problema para a paisagem e biodiversidade. Já a constituição de grandes manchas uniformes pode ter impactos apreciáveis na perda de espécies, devido à fragmentação dos habitats. A integração de diferentes usos do solo, como formações abertas de pastagens e mato, e principalmente a existência de mosaicos equilibrados de distintas classes de idade de povoamentos de *E. globulus*, poderá atenuar em parte as pressões negativas de explorações monoespecíficas em regime de talhadia de rotações curtas de *E. globulus* sobre a paisagem (Alves *et al.*, 2007).

O aumento das áreas regadas tem contribuído para a escassez de água, traduzida numa diminuição de água subterrânea e do nível de água em rios e lagos e conseqüente salinização, perda de terras húmidas e outros habitats, com especial incidência em regiões mais secas da Europa (COM, 2007).

Nas florestas, as perdas de água por evapotranspiração estão relacionadas com o processo produtivo das plantas. As folhas, ao realizarem a fotossíntese, assimilam carbono e libertam vapor de água, fenómeno denominado de transpiração. Para além disto, quando chove, uma parte da água fica retida na copa das árvores e perde-se por evaporação. Desta maneira, o consumo de água pela vegetação, ou seja a evapotranspiração, está relacionada com a assimilação de carbono, depende do clima e da área de folhas do coberto florestal. A análise do consumo da água tem duas componentes: o consumo total de água e a eficácia da utilização da água.

O consumo total de água pode influenciar os recursos hídricos de uso comum. Deve por isso ser analisado a uma escala regional, atendendo os interesses de todos os potenciais utilizadores, *p. ex.* uso agrícola, industrial e urbano. Relativamente aos impactos sobre os recursos, há resultados experimentais que revelam que os eucaliptais têm consumos de água semelhantes aos povoamentos

de pinhal, para índices de área foliar semelhantes (Alves *et al.*, 2007). As influências hidrológicas de qualquer tipo de floresta dependem do modo como o coberto vegetal é gerido no espaço e no tempo e os consumos por evapotranspiração podem ser diminuídos, reduzindo a densidade de plantação (Alves *et al.*, 2007). Situação que à partida não é desejável na floresta dedicada.

Quanto à eficiência de uso da água, a *E. globulus* apresenta uma eficiência elevada, devido a características fisiológicas, mas quando comparado com outras espécies de árvores a eficiência é equitativa (Alves *et al.*, 2007).

Embora, segundo a EEA (2006), o consumo de água deste tipo de plantações seja inferior ao de culturas anuais, há estudos que indicam que estas árvores consomem mais água que as culturas agrícolas (Benyon *et al.*, 2007). Ou seja, embora o montante de água a fornecer por irrigação possa efectivamente ser ligeiramente inferior, há que ter em consideração que o sistema radicular das árvores é bem desenvolvido em profundidade por comparação ao das culturas agrícolas, de entre outros factores. Convém esclarecer que esta característica não se prende especificamente com a espécie em questão, mas sim com povoamentos arbóreos. Aquando da produção de floresta em regadio, no presente estudo fertirrigação, o sistema radicular não se desenvolve tanto em profundidade mas preferencialmente ao longo das camadas superficiais do solo, uma vez que é nestas zonas que a água e nutrientes têm um maior concentração.

A produção de floresta dedicada de curta rotação pode ser incorporada em sistemas agrícolas, como práticas agro-florestais (USDA Forest Service, 1998). O rápido crescimento das espécies arbóreas, aptas a este tipo de plantações e a compatibilidade com os métodos convencionais da agricultura fazem com que a produção de floresta dedicada em regime de talhadia seja adequada a práticas agro-florestais. De seguida são descritos alguns exemplos onde esta simbiose proporciona benefícios ambientais.

A produtividade de biomassa de florestas dedicadas é maximizada em plantações com configuração em bloco. Contudo, os benefícios ambientais são maximizados em configurações de plantação em linha em sistemas de produção agrícola (USDA Forest Service, 1998). Por exemplo, este tipo de configuração, implementado na fronteira da plantação, proporciona protecção contra o vento, para a cultura agrícola. Em 2009 no RO devido a ventos fortes muitas das explorações agrícolas em estufas foram destruídas, que caso existissem as protecções naturais indicadas poderiam ter sido poupadas.

A aplicação de fertilizantes aumenta os custos de produção e, conseqüentemente, o custo da biomassa para o utilizador final. Como modo de reduzir os custos de produção e aumentar o contributo ambiental do sistema é possível a utilização de resíduos orgânicos como as lamas de ETAR e a utilização de efluentes ricos em nutrientes e matéria orgânica, como substitutos dos fertilizantes industriais. Como exemplo desta última aplicação é de referir a utilização de efluentes provenientes de explorações agro-pecuárias. A utilização deste tipo de efluentes no solo, para além de reduzir os custos em fertilização e suprimir alguma da necessidade em água, providencia um impacto positivo no meio ambiente por evitar que estes efluentes sejam sujeito à descarga e/ou escorrência para cursos de água. Neste caso, a colecta frequente de biomassa em curta rotação torna-se essencial, por ser necessária a remoção de grandes quantidades de nutrientes do solo

provindas do efluente e, principalmente, porque é necessário garantir que o efluente não se infiltre no solo e atinja lençóis freáticos. Cria-se assim um dinamismo que potencia o uso sustentável da terra, sendo este um sistema que tem de ser monitorizado (Guo *et al.*, 2002).

Estas plantações podem ainda ser usadas para tratamento de efluentes específicos. A título de exemplo refere-se o caso prático ocorrente em Oregon, EUA, em que a produção de floresta dedicada é aliada a um sistema tampão em aterro (USDA Forest Service, 1998). As plantações com elevada densidade, de Choupo, de rápido crescimento são plantadas em cima de aterros sanitários concluídos, porque reduzem a quantidade de água da chuva que passa através do aterro por captarem a água que se infiltra no solo. Este tipo de plantações reduz a quantidade de lixiviados do aterro sanitário, os quais teriam de ser submetidos a tratamentos caros. Salienta-se ainda que as galerias ripícolas, plantações de configuração em linha ao longo de zonas ribeirinhas, para além da absorção de sedimentos, nutrientes, *etc.* das águas de escorrência agrícolas, podem representar faixas de tampão para águas e inundações (USDA Forest Service, 1998).

### **3.1.1 Simulação da produção de *E. globulus* no Ribatejo e Oeste**

De forma a estudar um modelo o mais consensual possível, foi recolhida informação sobre a produção de cultura energética de *E. globulus* e sobre o modelo logístico junto de especialistas, nomeadamente: Luís Leal (Altri); Hermínia Sousa (AFN); José Carvalho (Portucel Soporcel, EnerForest); Paula Soares (ISA); Alejandro García (Ence, Iberflorestal) e Clara Araújo (Altri).

Para a simulação da produção de floresta dedicada no contexto nacional, em particular no RO, foi essencial o conhecimento e estudo prévio de diversas características deste tipo de explorações, *p. ex.* espécie florestal existente em Portugal mais apta a este tipo de cultivo, tempo de rotação e características edafoclimáticas do RO. De seguida apresenta-se um resumo do estudo efectuado sobre as principais características a ter em consideração para a produção de floresta dedicada e para a simulação realizada.

As espécies passíveis de serem utilizadas em Portugal são o Eucalipto, Salgueiro, Choupo e Paulónia. É importante que as espécies arbóreas sejam correctamente seleccionadas para que se atinja a máxima produção de biomassa. A *E. globulus* é uma das espécies de maior interesse para a produção de florestas energéticas de curta rotação com ou sem rega (Guo *et al.*, 2002). No contexto nacional este resultado também é corroborado, a *E. globulus* é a espécie florestal que revela maior potencial produtivo de biomassa em comparação com outras espécies arbóreas como o Salgueiro e o Choupo (Santos, 2009). Facto pelo qual, no presente estudo se optou por escolher a espécie *E. globulus* para produção dedicada de biomassa.

A *E. globulus* é uma espécie de crescimento rápido originária da Austrália, que em regime de talhadia obtém uma produtividade de biomassa elevada (Alves *et al.*, 2007). Segundo o Inventário Florestal Nacional de 2005-2006 a distribuição geográfica da espécie de Eucalipto em Lisboa e Vale do Tejo compreendia uma área de 145.000 ha e na região Centro uma área de 258.000 ha (DGRF, 2007b).

As culturas de curta rotação em regime de talhadia, para fins energéticos, devem ser cultivadas em solos férteis e em climas temperados (Sims *et al.*, 1999). No território nacional, segundo a AFN, a



produção de culturas energéticas de Eucalipto devem ser projectadas preferencialmente em zonas arenosas do Litoral e Vale do Tejo, no Centro-Interior e Sul de Portugal continental. Tendo em consideração a macrozonagem indicada e a necessidade da inserção destas plantações em solos férteis, a projecção da produção de floresta dedicada incidu na região do RO.

A densidade de plantação de culturas energéticas de Eucalipto é muito variável, podendo atingir as 20.000 plantas/ha (Vega *et al.*, 2010). A densidade de plantação recomendada pela AFN para a plantação com fins energéticos de Eucalipto em Portugal é de 2.500 a 5.000 plantas/ha. Adianta-se que, no presente estudo, aquando da análise dos impactos ambientais de produção de biomassa usando as diferentes densidades de plantação, indicadas pela AFN, concluiu-se que os consequentes impactos ambientais são bastante similares. Deste modo, optou-se por analisar em detalhe a densidade de plantação de 3.000 plantas/ha por também ter sido sugerida e confirmada pelos Eng.º Luís Leal e Eng.º Alejandro García.

Quanto ao espaçamento entre as plantas, ou seja, o compasso, não existe um valor recomendado. No entanto, o espaçamento deve garantir a passagem de máquinas entre as linhas de plantação para que os processos mecanizados possam ser realizados sem lesar as árvores e potencialmente conduzir a perdas de matéria seca.

A Figura 9 é uma ilustração do cultivo energético de Eucalipto, onde estão representadas algumas variáveis silvícolas adoptadas no presente estudo, e que seguidamente são explicadas.

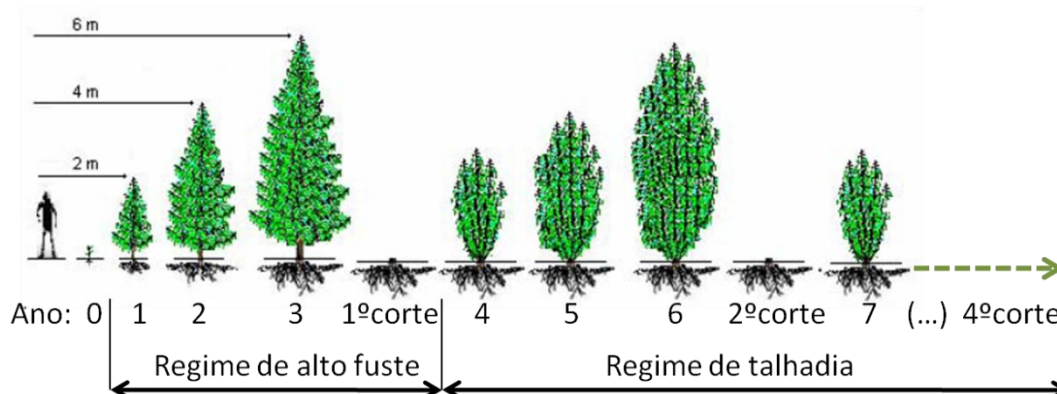


Figura 9 - Representação do ciclo e tempo de rotação e do tipo de regime de exploração.  
Fonte: imagem adaptada de <http://www.uhu.es>, consultado a 27 de Agosto de 2010.

O número ideal de cortes, antes da replantação, para culturas energéticas de *E. globulus* é de quatro rotações, ou seja 3 cortes em talhadia e um corte em alto fuste (Sims *et al.*, 1999; Sims e Venturi, 2004). O tempo de rotação óptimo para a *E. globulus* é de 3 anos, pois é por volta desta altura que a produção máxima de biomassa é obtida (Guo *et al.*, 2002). Estes foram os valores considerados no presente estudo por também terem sido sugeridos pelo Eng.º Luís Leal.

O sistema de rega a utilizar deve ser um sistema automatizado de irrigação gota-a-gota (Coleman *et al.*, 2004). A vantagem da irrigação, acoplada à fertilização, é o aumento da produção de biomassa induzido pelo acréscimo da taxa de crescimento da árvore (Guo *et al.*, 2002). Contudo, por motivos logísticos, poderá não ser possível regar em determinadas áreas do país com fortes défices hídricos. Tal ocorre devido a escassez de água e consequente transporte dispendioso.

A quantidade de água a fornecer pode ser determinado por um balanço hídrico. A água de rega deve ser concebida para suprir o défice hídrico e garantir que a humidade do solo se mantenha na zona de conforto hídrico da espécie. Dado a faixa de evapotranspiração potencial de florestas de Eucalipto ser entre 800 a 1200 mm/ano (Vital, 2007), na ausência de limitação ao crescimento pela água existente no solo, conhecendo a precipitação média anual na zona Centro e Litoral, 700mm/ano, a quantidade de água a fornecer por irrigação é a necessária para compensar as perdas por evapotranspiração, cerca de 100 a 500 mm/ano, de forma a repor o armazenamento de água no solo. Em termos práticos, a quantidade de água fornecida está sujeita a perdas, *p. ex.* evaporação directa de água no solo, pelo que o valor de água a fornecer pelo equipamento de rega é superior ao indicado pelo balanço. No presente estudo considera-se que o valor de rega a fornecer à cultura é de 500 mm/ano. A cultura deve ser regada durante 4 meses num ano, respectivamente nos meses de maior défice hídrico, entre o final de Maio e meados de Setembro (comunicação pessoal de Clara Araújo). A rega deve ser efectuada uma vez por semana ao final da tarde ou início da noite para garantir que existe a menor perda possível de água por evaporação directa (comunicação pessoal de Paula Soares). A quantidade de água a fornecer a culturas energéticas de *E.globulus*, depende de várias características de onde se insere a plantação, *p. ex.* precipitação. Em Espanha, Huelva, o valor é de 200 mm/ano, na Nova Zelândia é de 20 mm/semana (Guo *et al.*, 2002) e na Austrália o total de irrigação e precipitação é de 1.300 mm/ano (Resh *et al.*, 2003).

Por não existirem dados experimentais e ou práticos publicados sobre a produção de floresta dedicada de curta rotação em regadio em Portugal, foi necessário simular o crescimento de *E. globulus*. Contactou-se as Professoras Margarida Tomé e Paula Soares do Instituto Superior de Agronomia (ISA) que facultaram os modelos de crescimento (3PG e Globulus) e indicaram os procedimentos correctos para a obtenção de resultados fiáveis. O estudo foi realizado para povoamentos de *E. globulus* no RO. O modelo 3PG foi parametrizado com as variáveis de estado, clima e características do povoamento de *E. globulus* (ver Tabela 12 e Tabela 13) e calibrado com o modelo Globulus. Após o corte em alto fuste, considerou-se que em cada toíça ocorre a emergência de 5 novos caules, nas 3 rotações em talhadia. Desta maneira, em regime de talhadia para uma densidade inicial de 3.000 plantas por hectare, teremos 15.000 varas por hectare. No que se refere à caracterização do solo, considerou-se que o solo agrícola do RO é do tipo Franco-argiloso (cl). É considerado que não existem restrições nutricionais uma vez que se procede à adubação da plantação (FR=1). Quanto à permeabilidade do solo, considera-se que o valor máximo de água disponível no solo é 150mm (ASW 150mm).

O modelo 3PG foi inicializado com os diferentes parâmetros acima citados e agora indicados na Tabela 12 e Tabela 13.

Tabela 12 - Dados de inicialização do modelo de silvicultura 3PG  
(comunicação pessoal de Paula Soares)

Ano de plantação	2010
Mês de plantação	Outubro
Tempo de rotação (anos)	3
Densidade à plantação em alto fuste (plantas/ha)	3000
Densidade à plantação em talhadia (varas/ha)	15000
ASW inicial (mm)	150
ASW máximo (mm)	150
Massa da planta no momento da plantação (kg)	0,95725
Latitude (°)	39,23
Taxa de fertilização (FR)	1
Tipo de solo	cl
Rega (Ml/ha/ano)	5
Espécie arbórea	<i>E. globulus</i>

Para caracterizar a região em estudo, utilizaram-se as normais climatológicas de 1961 a 1990, disponíveis no Atlas do Ambiente, como dados de input no programa 3PG (ver Tabela 13).

Tabela 13 - Normais climatológicas para a região de Santarém de 1961 a 1990.

Fonte: Atlas do Ambiente Digital – Instituto do Ambiente, <http://www.iambiente.pt>.

Mês	T (°C) Max.	T (°C) Min.	Precipitação (mm/mês)	Evapotranspiração Potencial (mm/dia)	Radiação Solar global (MJ/m <sup>2</sup> /dia)	Dias de Chuva (N.º)	Dias de Geada (N.º)
Janeiro	14,50	5,20	94,90	1,31	7,93	13	4
Fevereiro	15,60	6,10	107,50	1,80	10,84	11	2
Março	17,90	7,10	75,20	2,63	15,51	9	1
Abril	19,70	8,40	53,20	3,29	18,63	10	0
Mai	22,90	10,40	43,30	4,19	22,86	9	0
Junho	26,90	13,10	25,40	5,31	25,87	5	0
Julho	30,10	14,90	3,10	6,91	26,35	2	0
Agosto	30,50	15,00	3,10	6,25	24,17	2	0
Setembro	28,50	14,10	32,90	4,42	18,35	5	0
Outubro	23,40	11,70	64,40	2,53	12,64	10	0
Novembro	17,90	8,10	80,10	1,53	8,70	11	1
Dezembro	14,80	5,80	86,10	1,14	6,72	12	4

Os dados de *output* do 3PG, quanto à produção de biomassa explorável, constam no Anexo I e encontram-se aqui os valores médios resumidos na Tabela 14 por ciclo de exploração (12 anos) e por produtividade anual. Considerou-se que a biomassa explorável corresponde aos troncos e varas, às folhas e na última talhadia à extração da raiz. A queda de folhas e ramos que ocorre durante o crescimento da árvore não é considerado no presente estudo como biomassa explorável. É oportuno referir que a utilização do sistema radicular poderá acarretar algumas dificuldades de transformação devido à presença de elementos estranhos, p. ex. pedras, assim como pelo facto de ser uma massa disforme e irregular.

Tabela 14 - Produtividade anual e por ciclo de rotação de um povoamento de *E. globulus* no RO.

Densidade à plantação (plantas/ha)	Folhas (ton /ciclo)	Raiz (ton/ciclo)	Tronco e varas (ton/ciclo)	Produtividade (ton/ha/ano)
3000	29	18	139	16

Os resultados obtidos na presente simulação, pela comparação com as produtividades reportadas em dois casos práticos referidos em Vega *et al.* (2010), encontram-se dentro da gama de valores de produtividades da respectiva espécie para explorações bioenergéticas. As produtividades de

plantações de Eucalipto oscilam entre 16 a 21 ton/ha/ano pelo estudo realizado por Pereira *et al* (1996), e de 5 a 20 ton/ha/ano (dados reportados pela empresa *Ceasa Agroforestal*).

### 3.1.2 Actividades silvícolas

Uma cultura de *E. globulus* de regime de talhadia de curta rotação necessita, de um modo geral, dos *inputs* da Figura 10.

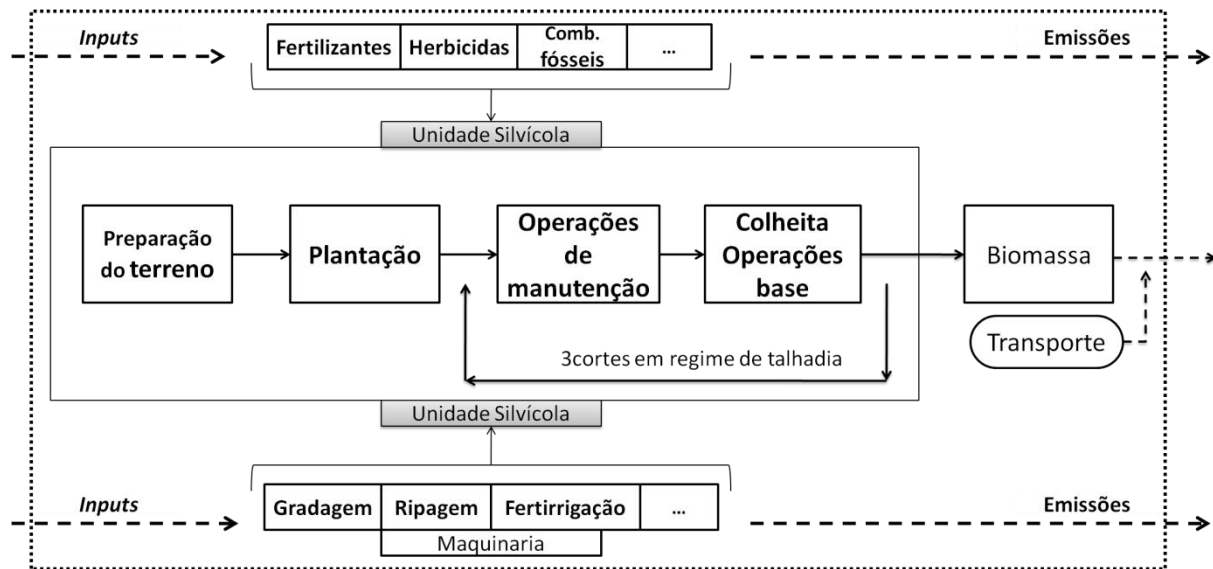


Figura 10 - *Inputs* necessários para a afectação do terreno à plantação de *E. globulus* num ciclo (12anos).

As actividades silvícolas para a produção de Eucalipto em curta rotação envolvem a preparação do terreno, o controlo da vegetação espontânea, a irrigação, a fertilização, a colheita e a extracção da biomassa.

Torna-se então pertinente o conhecimento das operações que têm lugar na unidade silvícola, por ordem cronológica, considerando o regime de alto fuste e de talhadia (ver Tabela 15). A concretização das operações descritas inclui a utilização de maquinaria diversa assim como a adição de fertilizantes e de herbicida. As operações que têm lugar na unidade silvícola tiveram como ponto de partida as indicadas em artigos científicos da especialidade, destaca-se Sims e Venturi (2004), Rafaschieri *et al.* (1999), Heller *et al.* (2003), Carrilho *et al.* (2011) e Vega *et al.* (2010) de entre outros.

As operações mecanizadas e actividades foram adaptadas para o caso específico da plantação ser regada e da sua inserção nas características do RO, *p. ex.* topografia do terreno. São elaborados dois cenários no que se refere as operações e actividades que têm lugar na unidade silvícola, o cenário de referência (R), totalmente automatizado, e o cenário RO ajustado à realidade da região em estudo em que a mecanização é menor (cenários confirmados por Luís Leal), representados na Tabela 15.

Tabela 15 - Operações e actividades na unidade silvícola durante um ciclo de produção.  
 Legenda de símbolos abaixo da tabela.

Operações	Tipo de operação	Cenário RO	Nº Evento	Cenário R	Nº Evento
Preparação do terreno <sup>5</sup>	Gradagem	✓	1	✓	1
	Ripagem	✓	1	✓	1
	Herbicida pré-emergente	✓	1	✓	1
Adubação à instalação <sup>5</sup>	Adubação à plantação	✓	-	✓	-
Plantação <sup>5</sup>	Mecanizada	x	x	✓	1
	Manual	✓	1	x	x
Operações de manutenção	Controlo da vegetação espontânea (mecanizada)	✓	4	✓	8
	Adubação de manutenção	✓	-	✓	-
Operações base	Corte	✓	4	✓	4
	Extracção	✓	4	✓	4
	Rechega	✓	4	✓	4
	Trituração	✓	4	✓	4
Rega gota-a-gota	-	✓	-	✓	-
Transporte	-	✓	-	✓	-

Legenda:  
 ✓: a operação é contabilizada no cenário;  
 x: a operação não é contabilizada no cenário;  
 -: não se pode traduzir por número de ocorrências.

As operações relacionadas com a aplicação de fertilizantes são realizadas mediante o sistema de rega, denominado de fertirrigação. A produção de estilha, ou seja a trituração da biomassa, é executada por um *Mobile chopper* e é realizada na unidade silvícola devido ao sistema logístico escolhido para o presente estudo (ver Capítulo 3.2).

A preparação do terreno visa criar ou melhorar as condições necessárias à instalação e ao crescimento de *E. globulus* e inclui intervenções realizadas quer acima do solo quer no próprio solo, tais como o controlo da vegetação espontânea, a remoção dos cepos (no caso de reconversão de terrenos) e a mobilização do solo. A mobilização do solo consiste na gradagem e na ripagem (na maior profundidade possível) na linha de plantação. A eficácia destas operações irá traduzir-se numa boa ou má implementação do povoamento florestal de curta rotação.

O controlo da vegetação espontânea consiste na sua eliminação total ou parcial, de modo a facilitar os trabalhos subsequentes de mobilização do solo e também a eliminar a competição exercida relativamente à água, luz e nutrientes. As técnicas são variáveis, podem ser manuais, mecanizadas ou químicas, dependendo do tipo de vegetação a eliminar, do declive do terreno e do tipo de solo. Embora o povoamento de *E. globulus* ofereça uma competição elevada à vegetação espontânea, o controlo desta é de extrema importância neste tipo de explorações bioenergéticas. É necessário realizar um controlo seguro da vegetação espontânea, quer por meios mecanizados quer pela aplicação pontual de herbicidas, porque se procede à fertirrigação e principalmente porque a causa mais comum do fracasso da implementação destes povoamentos é o controlo ineficaz de herbáceas (Vega *et al.*, 2010). Na gradagem, nas entrelinhas, são utilizadas grades de discos, acopladas ou rebocadas a tractores, que cortam, misturam e enterram, não só a parte aérea da vegetação, como também o seu sistema radicular. Esta operação requer um tempo de trabalho médio de 3,5h/ha e um

<sup>5</sup> Só em alto fuste

consumo médio de gasóleo de 13,5L/h (Dias, 2005). A gradagem não é aconselhável para terrenos com pedregosidade elevada e para declives superiores a 30-35%. Não sendo esta a realidade do RO adoptou-se esta técnica como controlo de vegetação espontânea durante as operações de manutenção, uma a duas por rotação (n.º de ocorrências distinto entre os cenários elaborados, ver Tabela 15). Para garantir a eliminação de herbáceas, é aplicado um herbicida, de pré-emergência, na preparação do terreno, Glifosato 2,5 kg/ha (Heller *et al.*, 2003), cuja formula química é  $C_3H_8NO_5P$ .

A mobilização do solo, gradagem e ripagem, tem como objectivo eliminar horizontes impermeáveis que possam existir e promover a sua descompactação, melhorando o arejamento e a infiltração. A ripagem consiste na abertura de sulcos em profundidade, provocando a ruptura dos horizontes do solo num plano vertical, mas sem os inverter. A maquinaria usada nesta operação é o tractor de rasto contínuo equipado com dentes de *ripper*. Para a mobilização do solo, a gradagem apresenta um valor médio de tempo de trabalho de 1,25 h/ha e a ripagem 4,25 h/ha, o consumo médio de gasóleo é respectivamente 11,5 L/h e 20,5 L/h (Dias, 2005).

A remoção de cepos pode ser efectuada por meios mecânicos, tais como dentes de *ripper* ou pinças, sendo necessário, em média, 8 h/ha de tempo de trabalho e 15 L/ha de consumo de gasóleo (Dias, 2005).

O Eucalipto é normalmente instalado através de plantação, que consiste na colocação de plantas produzidas em viveiro, em solo previamente preparado. A plantação pode ser efectuada de modo manual ou por meios mecanizados, contudo a técnica usual é a manual (situação distinta entre os cenários apresentados na Tabela 15).

A colheita e a extracção de biomassa são efectuadas por operações mecanizadas. As operações base são o abate (corte de madeira), a extracção, a rechega, a trituração e o transporte até ao local de transformação.

O corte de madeira pode ser realizado por um processador como *Combine harvester*, o qual consiste numa debulhadora de parcelas de corte de madeira. O tempo de trabalho é 0,10 h/m<sup>3</sup> (a massa volúmica da madeira de Eucalipto na idade de corte, 3 anos, é 450 kg matéria seca/m<sup>3</sup>), e o consumo de gasóleo de 12 L/h (Dias, 2005). Embora cada operação possa ser realizada por uma máquina distinta, existe maquinaria capaz de desempenhar várias funções, como é o caso do *fellerbuncher* que, para além de cortar a biomassa, empilha o material cortado dentro da plantação.

A operação de extracção e rechega consiste na movimentação do material lenhoso para junto de uma via principal, onde ficará empilhado em determinadas áreas designadas por carregadouros ou estaleiros. No presente estudo considerou-se que o material lenhoso permanece cerca de 1 a 2 meses no estaleiro a céu aberto ou fechado, localizado nas imediações da plantação, para perder humidade. Na fase de rechega o material que se encontra disperso no local de abate é deslocado para junto dos trilhos de extracção. A extracção consiste no deslocamento do material lenhoso para os estaleiros. Esta operação é realizada por tractores transportadores, também denominados de tractores carregadores-transportadores com grua, ou por *forwarders* que transportam o material lenhoso num reboque. O empilhamento pode ser efectuado manualmente ou com o mesmo

equipamento de extracção como *p. ex.* com um *Fodder loading, by self loading trailer* em que o tempo de trabalho é 0,08h/m<sup>3</sup> e o consumo de gasóleo de 12L/h (Dias, 2005).

Durante o crescimento da árvore, uma parte reduzida dos nutrientes assimilados por esta é devolvida ao solo, na forma de serapilheira. Uma das grandes preocupações com a produção de floresta dedicada prende-se com a sustentabilidade dos sistemas florestais, devido à diminuição dos nutrientes do solo, provocado pela exploração intensiva. Esta situação é intensificada por se usarem ciclos de rotação muito curtos, juntamente com a colecta de toda a biomassa existente, em que no final da última talhadia a parte aérea da árvore e o cepo juntamente com as raízes são recolhidos (Guo *et al.*, 2002). Para remediar esta situação, deve-se proceder à reposição dos nutrientes retirados do solo, nomeadamente através de uma correcta fertilização. A quantificação de nutrientes a aplicar deve ser projectada mediante um balanço nutricional, de forma a promover a sustentabilidade e o equilíbrio das características do solo. Desta maneira, procedeu-se a um balanço nutricional à produção de *E. globulus* com sistema de fertirrigação. A quantidade de nutrientes contidos na biomassa explorável na altura do corte, 3 anos, corresponde àqueles que devem ser fornecidos ao solo e constam na Tabela 16.

Tabela 16 - Nutrientes contidos na biomassa de *E. globulus* na altura do corte.  
Com sistema de fertirrigação

Biomassa de <i>E. globulus</i> (kg/ton seca de biomassa)			Fonte
N	P	K	
5,8	1,4	7	(Pereira, 1999)
8,0	0,8	6,7	(Ralph e Drusilla, 2000)
7,5	0,6	4,6	(Guo <i>et al.</i> , 2002)
9,6	0,7	8,1	(Guo <i>et al.</i> , 2006)
7,7	0,9	6,6	Valores médios

A quantidade necessária de fertilizantes, com base no balanço de nutrientes, e de herbicida encontram-se descritas na Tabela 17, para a UF 1 kWh<sub>e</sub> ou seja para a colecta de 0,06 kg (matéria seca) de *E. globulus*.

Tabela 17 - Quantidade de fertilizantes e de herbicida. UF: 1 kWh<sub>e</sub>

Descrição	Tipo	Quantidade (kg)
Fertilizantes	N	5x10 <sup>-4</sup>
	P	6x10 <sup>-5</sup>
	K	4x10 <sup>-4</sup>
Herbicida	Glifosato	1x10 <sup>-5</sup>

As emissões que provêm da utilização de fertilizantes são tidas em conta, assim como a lixiviação de nitrato (NO<sub>3</sub>). Os factores de emissão considerados constam na seguinte Tabela 18.

Tabela 18 - Emissões que provêm da fertilização em sistemas agro-florestais de curta rotação.  
Fonte: Cherubini *et al.*, 2009.

Emissão	Percentagem (%)	
Emissão de NH <sub>3</sub>	10	de N aplicado
Emissão de N <sub>2</sub> O, originada pela deposição atmosférica de NH <sub>3</sub>	1	de emissão de NH <sub>3</sub>
Emissão de N <sub>2</sub> O, devido ao uso de fertilizantes azotados	1	de N aplicado
Lixiviação de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	30	de N aplicado
Emissão de N <sub>2</sub> O, devido à lixiviação de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,75	de NO <sub>3</sub> -lixiviado

Os valores de emissão por 1 kWh<sub>e</sub>, ou seja por 0,06 kg (matéria seca) de *E. globulus*, encontram-se na Tabela 19.

Tabela 19 - Emissões que provêm da fertilização de *E. globulus* em curta rotação. UF: 1 kWh<sub>e</sub>

Emissão	Quantidade	Unidade
Emissão de NH <sub>3</sub>	5x10 <sup>-5</sup>	kg NH <sub>3</sub> /kWh
Emissão de N <sub>2</sub> O, originada pela deposição atmosférica de NH <sub>3</sub>	5x10 <sup>-7</sup>	kg N <sub>2</sub> O/kWh
Emissão de N <sub>2</sub> O, devido ao uso de fertilizantes azotados	5x10 <sup>-6</sup>	kg N <sub>2</sub> O/kWh
Lixiviação de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,5x10 <sup>-4</sup>	kg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /kWh
Emissão de N <sub>2</sub> O, devido à lixiviação de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,1x10 <sup>-4</sup>	kg N <sub>2</sub> O/kWh

De seguida na Tabela 20, apresentam-se as actividades e operações mecanizadas, de acordo com a UF (1 kWh<sub>e</sub>). Convém referir que a distância entre a produção de fertilizante e a cultura dedicada foi estabelecida em 160 km.

Tabela 20 - Operações mecanizadas e actividades na unidade silvícola. UF: 1 kWh<sub>e</sub>.

Operações	Tipo de operação	Cenário RO	Cenário R
Preparação do terreno	Gradagem (ha)	3x10 <sup>-7</sup>	3x10 <sup>-7</sup>
	Ripagem (km)	1,9x10 <sup>-6</sup>	1,9x10 <sup>-6</sup>
	Herbicida pré-emergente (kg)	1x10 <sup>-5</sup>	1x10 <sup>-5</sup>
Plantação	Mecanizada	x	3x10 <sup>-7</sup>
Manutenção	Controlo da vegetação espontânea (gradagem nas entrelinhas) (ha)	1,1x10 <sup>-6</sup>	2,3x10 <sup>-6</sup>
Base	Corte (ha)	1,1x10 <sup>-6</sup>	1,1x10 <sup>-6</sup>
	Extracção e rechega (m <sup>3</sup> )	1,3x10 <sup>-4</sup>	1,3x10 <sup>-4</sup>
	Trituração (kg)	0.06	0.06
Rega gota-a-gota	Quantidade de água (Ml/ha/ano) <sup>6</sup>	5	5
Transporte	Fertilizantes (tkm)	1,5x10 <sup>-4</sup>	1,5x10 <sup>-4</sup>

### 3.1.3 Análise ambiental e energética da produção de *E. globulus*

O facto de determinada área estar sujeita à produção de floresta em curta rotação, em consonância com a utilização de diversos *inputs*, faz com que potencialmente exista um conjunto de pressões ecológicas relevantes, os quais são analisados através da ACV.

Foram introduzidos no SimaPro 7.2 os dados correspondentes às alternativas em análise, tendo sido os impactos ambientais analisados através do *Eco-indicador 95* e *Eco-indicador 99 (H)* e obtidos os resultados da Tabela 21 e Tabela 22. Os factores de produção, entendam-se *inputs* de maquinaria, fertilizantes e outros, referentes a um ciclo de produção de *E. globulus*, 12 anos, foram aferidos para a UF de 1 kWh<sub>e</sub>.

Primeiramente, o estudo recai sobre a análise de sensibilidade entre os cenários elaborados para a unidade silvícola, no Gráfico 3 e na Tabela 21 estão reportados os resultados finais. Para melhor interpretação dos resultados é definido um factor F, como o quociente entre o impacto proveniente do cenário RO em relação ao cenário R, para cada categoria de impacto e indicado na Tabela 21. Posteriormente é efectuada a análise detalhada da magnitude de impacto de cada operação na unidade silvícola na Tabela 22. É realizada uma percentagem de impacto por operação e actividade

<sup>6</sup> Este valor não está afecto à U.F.



da produção de *E. globulus* com base na caracterização dos respectivos impactos na Tabela 22 e no Gráfico 4 para o cenário RO.

De acordo com a análise de sensibilidade, indicada no Gráfico 3, e pela análise do factor F, indicado na Tabela 21, para todas as categorias em análise o impacto ambiental associado ao cenário RO é inferior ao do cenário R. No entanto, a diferença não é muito significativa pois ambos os cenários apresentam a mesma ordem de grandeza para cada categoria de impacto, para a UF 1 kWh<sub>e</sub>, que está aferido à produção de 0.06 kg (matéria seca) de *E. globulus*.

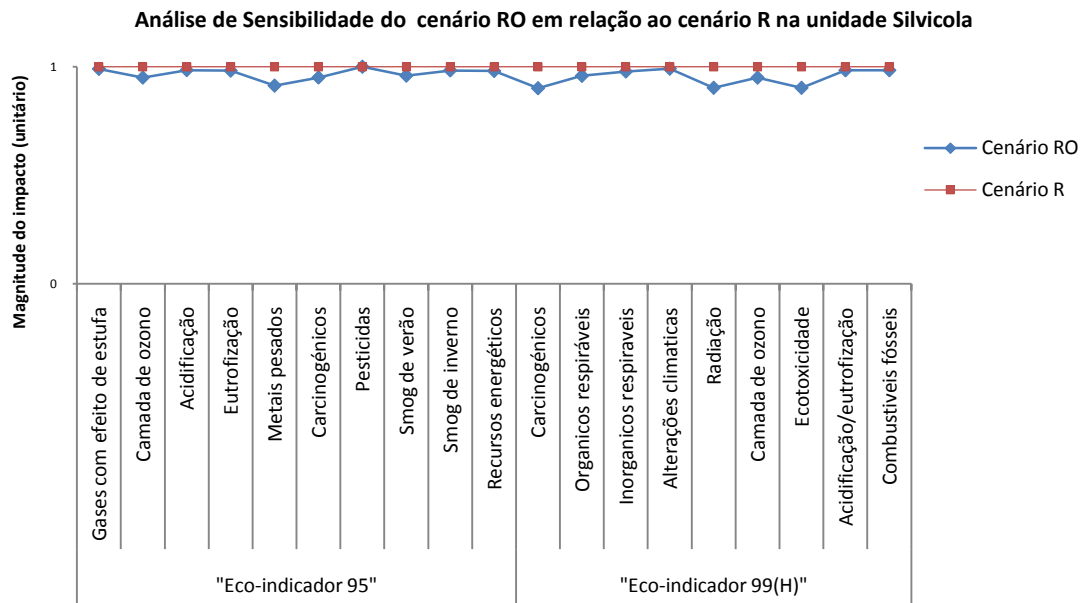


Gráfico 3 - Análise de sensibilidade dos cenários elaborados para a unidade silvícola. UF: 1 kWh<sub>e</sub>. Este resultado evidencia a diminuição da intensificação da exploração, pelo uso de menor quantidade de maquinaria a operar, resultado que era previsto. Também seria de esperar uma diminuição de impactos, caso outros factores de produção fossem menores, *p. ex.* fertilizantes. A diferença dos impactos ambientais entre os dois cenários está relacionada principalmente com uma diminuição do uso de combustíveis fósseis.

A queima de combustíveis fósseis permite a libertação de substâncias e compostos responsáveis pelas categorias de impacto analisadas. A diferença é mais significativa para as seguintes categorias de impacto: radiação, ecotoxicidade, carcinogénicos, metais pesados e camada de ozono (ver Tabela 21). Convém realçar que a diferença é mais acentuada para estas categorias, uma vez que é nestas que as operações mecanizadas têm mais impactos, perceptível na Tabela 22. É primeiramente elaborada a análise dos potenciais impactos ambientais, nas categorias mais relevantes de impacto em que praticamente só as operações mecanizadas exercem pressão sobre o ambiente pela análise dos dados da Tabela 21.

Tabela 21 – Impactos ambientais das actividades e operações na unidade silvícola. UF: 1 kWh<sub>e</sub>.  
F= Impacto Cenário RO/ Impacto Cenário R.

Método	Categoria de impacto	Unidade	Cenário R	Cenário RO	F
Eco-indicador 95	Gases com efeito de estufa	kg CO <sub>2</sub>	5,88E-03	5,82E-03	0,99
	Camada de ozono	kg CFC <sub>11</sub>	2,03E-10	1,93E-10	0,95
	Acidificação	kg SO <sub>2</sub>	2,98E-05	2,94E-05	0,98
	Eutrofização	kg PO <sub>4</sub>	4,26E-06	4,19E-06	0,98
	Metais pesados	kg Pb	1,11E-08	1,01E-08	0,91
	Carcinogénicos	kg B(a)P	5,12E-10	4,87E-10	0,95
	Pesticidas	kg act.subst	0,00E+00	0,00E+00	1,00
	Smog de verão	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,12E-06	1,08E-06	0,96
	Smog de inverno	kg SPM	8,66E-06	8,52E-06	0,98
	Recursos energéticos	MJ LHV	5,20E-02	5,10E-02	0,98
Eco-indicador 99 (H)	Carcinogénicos	DALY	4,49E-11	4,05E-11	0,90
	Orgânicos respiráveis	DALY	3,32E-12	3,18E-12	0,96
	Inorgânicos respiráveis	DALY	3,93E-09	3,85E-09	0,98
	Alterações climáticas	DALY	1,38E-09	1,36E-09	0,99
	Radiação	DALY	1,88E-12	1,70E-12	0,90
	Camada de ozono	DALY	1,63E-13	1,55E-13	0,95
	Ecotoxicidade	PAF*m <sup>2</sup> yr	2,40E-04	2,16E-04	0,90
	Acidificação/eutrofização	PDF*m <sup>2</sup> yr	1,92E-04	1,89E-04	0,98
Combustíveis fósseis	MJ surplus	6,40E-03	6,29E-03	0,98	

Embora a diferença seja, como referida, na mesma ordem de grandeza (ou seja, pouco significativa) é interessante analisar os respectivos impactos com o intuito de discernir em que medida a adopção de práticas agro-florestais menos intensivas, se reflecte na diminuição das potenciais pressões exercidas no ambiente.

As substâncias e compostos que concorrem para o impacto na categoria camada de ozono são o clorofluorcarbonetos (CFC), hidrocarbonetos halogenados e CH<sub>4</sub>. São emitidos principalmente na produção, extracção e processamento (refinaria) do combustível. Pelo *Eco-indicador 99 (H)*, a juntar-se a estes poluentes surge o bromotrifluoro. As principais operações responsáveis pela emissão de substâncias passíveis de danificar a camada de ozono na unidade silvícola são as operações mecanizadas.

Para a categoria de impacto radiação, as substâncias e compostos radioactivos são o radon-222 e o carbono-14. São emitidos principalmente aquando da queima de combustíveis fósseis e sobre a forma de resíduos no processo de extracção de urânio e energia nuclear, as quais contribuem para o Mix energético no país de construção (energia esta que é utilizada no processo de fabrico da maquinaria).

A emissão de metais pesados, como crómio, zinco e níquel, concorrem para a categoria de impacto ecotoxicidade. Tal pode ser explicado pela deposição de tais emissões em solo agrícola e urbano. As fontes de emissão são a produção, construção e o final da vida da maquinaria. Estas contêm na sua constituição estes materiais, p. ex. ligas metálicas. Embora sem confirmação da parte dos autores do *software* SimaPro, é oportuno referir que se especula que o *software* considere que os equipamentos e estruturas que tenham na sua constituição metais, os emitam, na sua totalidade, sobre a forma de poluentes. O programa assume erradamente que a decomposição dos metais é total, pelo que as categorias de impacto que os contabilizem têm um erro considerável de incerteza no resultado. O

erro associado será maior, nas categorias de impacto onde os compostos metálicos mais contribuem para a magnitude do impacto.

A categoria de impacto carcinogénicos prende-se essencialmente com a utilização de equipamentos mecanizados que usam combustíveis fósseis. As principais substâncias que contribuem para a categoria de impacto são os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP), o crómio<sup>7</sup>, o benzo(a)pireno (BaP) e o ião arsénio. A emissão destes compostos provém da queima dos combustíveis fósseis.

Uma vez que a diferença entre os dois cenários não é muito significativa, para a UF (1 kWh<sub>e</sub>), para a análise detalhada, apresentam-se os resultados dos impactos ambientais percentuais, no Gráfico 4, e por magnitude de impacto, na Tabela 22, por operação e actividade que tem lugar na unidade silvícola do cenário RO. Pela análise do Gráfico 4 é possível concluir que as operações mecanizadas e a fertirrigação exercem mais pressões sobre o meio ambiente.

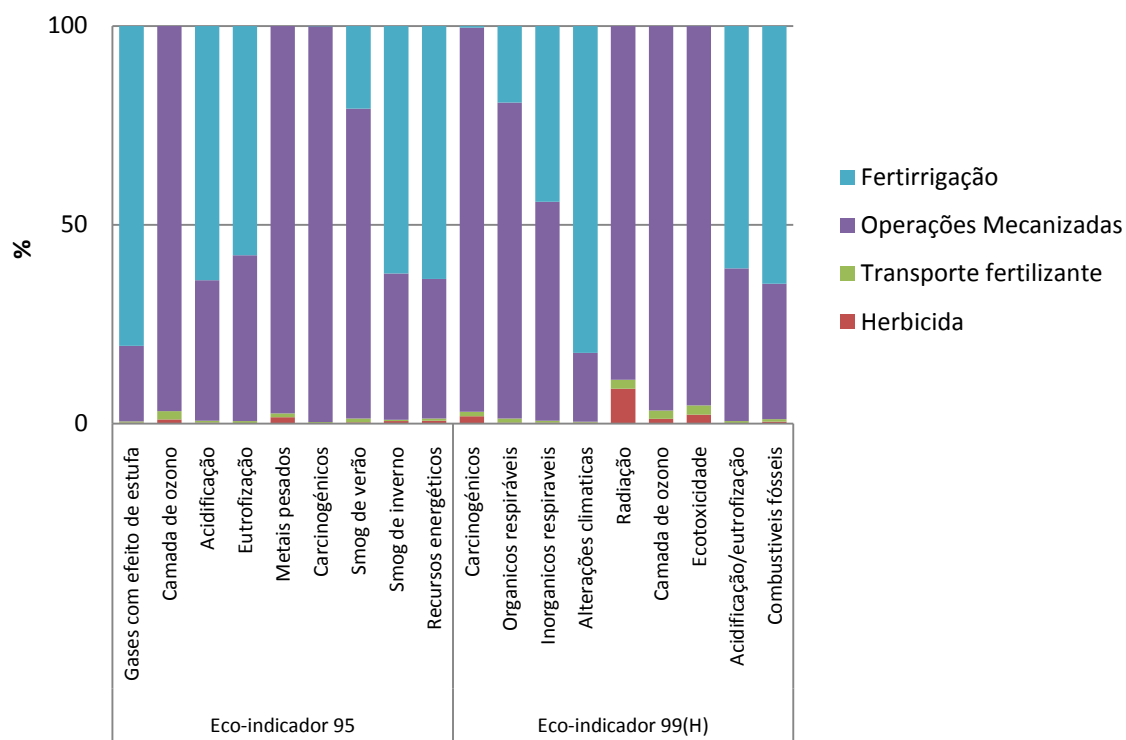


Gráfico 4 - Impacto ambiental (%) por processo/actividade na unidade silvícola, RO.

Pela ACV, conclui-se que a maioria dos impactos ambientais, para cada categoria de impacto ambiental, relaciona-se directamente com a utilização de maquinaria, que utiliza combustíveis fósseis, com a produção e utilização de fertilizantes, que incorpora a extracção de matérias-primas e a queima de combustíveis fósseis. Estas actividades possibilitam a libertação de substâncias e compostos que são responsáveis pelas categorias de impacto em análise.

<sup>7</sup> Cr é um elemento químico metálico, chama-se à atenção de que esta categoria de impacto tem um grau de incerteza no resultado.

Importa notar que, atendendo à totalidade do ciclo de vida do sistema em análise, são consumidos mais combustíveis fósseis na fertirrigação, uma vez que esta operação ocorre mais vezes que as operações mecanizadas e a produção de fertilizantes e o seu transporte também requerem consumo de energia. É de seguida efectuado um estudo detalhado sobre os impactos ambientais com base nos resultados da Tabela 22.

Tabela 22 – Impactos ambientais das operações e actividades silvícolas. UF: 1 kWh<sub>e</sub>.  
Cenário RO. Legenda abaixo da tabela.

M	Categoria de Impacto	U	T	OM	F	H	TF
Eco-indicador 95	G. efeito de estufa	kg CO <sub>2</sub>	5,82E-03	1,11E-03	4,69E-03	1,12E-05	1,84E-05
		%	100	19	80	0	0
	Camada de ozono	kg CFC11	1,93E-10	1,87E-10	0,00E00	1,93E-12	4,02E-12
		%	100	97	0	1	2
	Acidificação	kg SO <sub>2</sub>	2,94E-05	1,04E-05	1,88E-05	6,09E-08	1,30E-07
		%	100	35	64	0	0
	Eutrofização	kg PO <sub>4</sub>	4,19E-06	1,74E-06	2,42E-06	3,65E-09	2,21E-08
		%	100	42	58	0	1
	Metais pesados	kg Pb	1,01E-08	9,87E-09	0,00E00	1,56E-10	1,01E-10
		%	100	97	0	2	1
	Carcinogénicos	kg B(a)P	4,87E-10	4,84E-10	6,77E-13	6,88E-13	1,28E-12
		%	100	99	0	0	0
	Pesticidas	kg act.subst	0,00E00	0,00E00	0,00E00	0,00E00	0,00E00
		%	0	0	0	0	0
Smog de verão	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,08E-06	8,39E-07	2,23E-07	2,72E-09	1,06E-08	
	%	100	78	21	0	1	
Smog de inverno	kg SPM	8,52E-06	3,13E-06	5,30E-06	5,04E-08	3,00E-08	
	%	100	37	62	1	0	
Recursos energéticos	MJ LHV	5,10E-02	1,79E-02	3,25E-02	3,33E-04	3,23E-04	
	%	100	35	64	1	1	
Eco-indicador 99(H)	Carcinogénicos	DALY	4,05E-11	3,91E-11	1,74E-13	7,38E-13	4,52E-13
		%	100	97	0	2	1
	Orgânicos respiráveis	DALY	3,18E-12	2,53E-12	6,13E-13	7,76E-15	3,17E-14
		%	100	79	19	0	1
	Inorgânicos respiráveis	DALY	3,85E-09	2,12E-09	1,70E-09	6,80E-12	2,07E-11
		%	100	55	44	0	1
	Alterações climáticas	DALY	1,36E-09	2,36E-10	1,12E-09	2,42E-12	3,94E-12
		%	100	17	82	0	0
	Radiação	DALY	1,70E-12	1,52E-12	0,00E00	1,49E-13	3,73E-14
		%	100	89	0	9	2
	Camada de ozono	DALY	1,55E-13	1,50E-13	0,00E00	1,83E-15	3,20E-15
		%	100	97	0	1	2
	Ecotoxicidade	PAF*m <sup>2</sup> yr	2,16E-04	2,07E-04	1,90E-09	4,79E-06	5,02E-06
		%	100	95	0	2	2
Acidificação eutrofização	PDF*m <sup>2</sup> yr	1,89E-04	7,26E-05	1,15E-04	1,63E-07	9,18E-07	
	%	100	38	61	0	0	
Combustíveis fósseis	MJ surplus	6,29E-03	2,15E-03	4,08E-03	2,80E-05	3,85E-05	
	%	100	34	65	0	1	

Legenda:

M – Método; U – Unidade; T – Total; OM – Operações mecanizadas;  
F – Fertirrigação; H – Herbicida TF – Transporte fertilizante.

Convém aqui atender ao facto de a aplicação de herbicida ter pouca expressão para as diversas categorias de impacto. Isto deve-se, sobretudo, ao facto de a sua aplicação ser meramente pontual à plantação, herbicida pré-emergente. O controlo da vegetação espontânea, ao longo da exploração é realizado por meios mecânicos. A utilização de meios mecânicos para controlar a vegetação espontânea tem impactos ambientais distintos do caso em que o controlo é realizado pela aplicação

de químicos. Se o controlo for realizado só pela aplicação de agentes químicos a principal diferença nos impactos seria uma pressão acrescida na categoria de impacto acidificação.

Os compostos orgânicos voláteis não-metânicos (COVNM) e os compostos orgânicos voláteis (COV) combinam-se com os óxidos de azoto, e originam ozono troposférico, que é um dos principais constituintes do smog de verão. As emissões de COVNM e de COV correspondem principalmente aos hidrocarbonetos resultantes das moléculas de combustível que não foram, ou foram apenas parcialmente, queimados. Facto pelo qual a maior percentagem para esta categoria de impacto advém das operações mecanizadas.

O smog de inverno tem como principais poluentes atmosféricos o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e o material particulado, partículas com diâmetros aerodinâmicos igual ou inferior a 10 µm (PM10) e a 2,5 µm (PM1.5). Salienta-se o facto de algumas partículas provenientes da combustão de combustível em motores diesel poderem também ser cancerígenas. A emissão de SO<sub>2</sub> está aliada à produção de fertilizantes e à queima dos combustíveis.

A categoria de impacto orgânicos respiráveis tem maior expressão na utilização de equipamentos mecanizados, devido à utilização de combustíveis fósseis. Os compostos emitidos são principalmente COVNM e hidrocarbonetos (pentano e butano). A produção de fertilizantes também contribui para estas emissões. Associado ao processo de extracção de matérias-primas, há o consumo de combustíveis fósseis e durante o processo de fabricação do mesmo. Aqui as emissões mais significativas são também os COVNM, o metano e o formaldeído.

O material particulado, óxido de azoto (NO<sub>x</sub>), SO<sub>2</sub> e amónia (NH<sub>3</sub>) são os principais poluentes atmosféricos que contribuem para a categoria de impacto, inorgânicos respiráveis. Quase de modo equitativo, para esta categoria de impacto temos o equipamento mecanizado e a fertirrigação. Salienta-se a importância da queima de combustíveis fósseis e a utilização e produção de fertilizantes, para a emissão dos referidos compostos.

As principais operações passíveis de emitir GEE são a fertirrigação e as operações mecanizadas, através da emissão atmosférica de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>. A fertirrigação contribui largamente para esta categoria de impacto, cerca de 80%, devido ao processo de fabrico dos fertilizantes e à sua utilização. De facto, o peso deste impacto é explicado pela emissão de N<sub>2</sub>O devido ao uso de fertilizantes azotados; à deposição atmosférica de NH<sub>3</sub> e à lixiviação e escorrências de NO<sub>3</sub>. A emissão de CO<sub>2</sub>, e de outros compostos, ocorre sobretudo aquando da queima do combustível fóssil. O mesmo sucede para categoria de impacto alterações climáticas, pelo *Eco-indicador 99 (H)*.

É geralmente referido que a biomassa é um emissor neutro de CO<sub>2</sub>, a quantidade de carbono que incorpora durante o seu crescimento é depois emitida aquando da combustão sobre a forma de CO<sub>2</sub> (admitindo a combustão completa em que não há formação de monóxido de carbono). Para a *E. globulus* o sequestro de carbono é cerca de 9 ton Carbono/ha/ano, superior à média das florestas em clima temperado (Alves *et al.*, 2007).

Apesar da capacidade de sequestro de carbono da floresta dedicada, a verdade é que durante o seu ciclo de vida é emitido CO<sub>2</sub>, devido à utilização de maquinaria, fertilizantes, herbicidas e transportes os quais utilizam primordialmente combustíveis fósseis. Urge por isso realizar um balanço da emissão

de CO<sub>2</sub> durante o ciclo de vida da biomassa, para quantificar a emissão de CO<sub>2</sub> por kWh<sub>e</sub> produzido (ver Capítulo 4.1). Durante a fase de crescimento da árvore há a formação de serapilheira, que corresponde à queda de folhas e pequenos ramos da árvore. Este material embora seja uma fonte de *input* de nutrientes para o solo e conseqüentemente para a árvore, ao longo da sua decomposição emite CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e metano (CH<sub>4</sub>). No que se refere às emissões de CO<sub>2</sub> ocorre a potencial emissão de 3,1 gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub> e 3,2 gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub> e de dióxido de carbono equivalente<sup>8</sup> (CO<sub>2eq.</sub>) de 5,8 gCO<sub>2eq.</sub>/kWh<sub>e</sub> e 5,9 gCO<sub>2eq.</sub>/kWh<sub>e</sub>, respectivamente para o cenário do RO e R na unidade silvícola.

A acidificação está relacionada primordialmente com a emissão atmosférica de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e NH<sub>3</sub>. Devido à utilização de fertilizantes azotados e fosfatos, há a emissão destes compostos e a lixiviação de NH<sub>3</sub>. O uso de combustíveis fósseis nas operações mecanizadas e a produção de fertilizantes também contribui para estas emissões. A eutrofização é causada pela emissão de NH<sub>3</sub> e de NO<sub>x</sub>. O uso de fertilizantes é a principal causa de eutrofização, com menos expressão mas também importante a queima de combustíveis fósseis. O mesmo sucede no *Eco-indicador 99 (H)* na categoria de impacto Acidificação/Eutrofização, em que as substâncias responsáveis por provocar alterações de pH e disponibilidade de nutrientes são o NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> e NH<sub>3</sub>.

Como conclusão salienta-se que as categorias de impacto ambiental analisadas na ACV, as que têm maior importância são as seguintes: concentração de gases destruidores da camada de ozono, GEE, alterações climáticas e eutrofização/acidificação.

### **3.2 Sistema logístico e transporte de biomassa**

Os principais custos da produção de floresta dedicada estão associados à logística do sistema, onde o transporte de biomassa está inserido. O qual tem um contributo acentuado para os custos totais (Spinelli *et al.*, 2009).

Existem alguns estudos de carácter económico sobre esta temática, cujo objectivo é determinar qual o melhor sistema logístico de entre as várias possibilidades. Realça-se o estudo científico de Sims e Venturi (2004) onde é realizado um estudo de viabilidade económica de diferentes sistemas logísticos e tipos de gestão de produção de floresta dedicada de curta rotação de Eucalipto. O estudo analisa e compara diferentes variáveis, tais como o tipo de maquinaria que opera na unidade silvícola, tempo de armazenamento da biomassa, transporte de biomassa e localização do estaleiro, de entre outras. A principal conclusão do estudo é que sistemas logísticos que viabilizem a colheita contínua de biomassa ao longo de todo o ano, consoante as necessidades energéticas da central, têm benefícios económicos aquando da comparação com sistemas logísticos em que o abate das árvores é realizado durante um período fixo (Sims e Venturi, 2004). A colheita ao longo de todo o ano apresenta benefícios económicos, principalmente porque há uma redução de custos de armazenamento de biomassa na unidade silvícola (Sims e Venturi, 2004). O armazenamento de grandes volumes de biomassa é caro e resulta em perdas de matéria seca ao longo do tempo.

---

<sup>8</sup> É uma medida internacionalmente padronizada de quantidade de gases de efeito estufa como o CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e o CH<sub>4</sub>.

Contudo, temos de atender que embora seja útil a compreensão de que sistemas logísticos potenciam à partida uma redução de custos, os resultados não devem ser desmedidamente generalizados a uma escala global, porque os subsídios *verdes* são diferentes entre países, a potência da central, a distância entre a unidade silvícola e a central pode influenciar significativamente o resultado final. Para além disto, a colheita contínua de *E. globulus* ao longo de todo o ano necessita de um planeamento adequado dos talhões de corte.

De um modo geral podemos dividir os diversos sistemas logísticos em dois grupos, um em que a estilha é produzida na unidade silvícola e um outro em que a estilha é produzida na central (Vega *et al.*, 2010). No sistema logístico em que a estilha é produzida na central o transporte de biomassa é realizado mediante a árvore inteira, pelo que para otimizar o custo do transporte é necessário que a biomassa permaneça cerca de 6 meses na plantação para perder humidade e conseqüentemente diminuir a carga a transportar. No entanto, como referido anteriormente, quanto maior for o tempo de armazenamento de biomassa, na unidade silvícola, maiores são os custos do sistema (Sims e Venturi, 2004).

O sistema logístico adoptado no presente estudo corresponde ao sistema em que a produção de estilha é realizada na unidade silvícola e encontra-se esquematizado na Figura 11. Este é o sistema actualmente mais utilizado, por ser relativamente simples e por existirem máquinas adequadas à produção de estilha no local de abate da árvore (Vega *et al.*, 2010). Neste sistema a biomassa é transportada em forma de estilha até à central (ver Figura 11).



Figura 11 - Sistema logístico em estudo.

Fonte: figura adaptada de Sims e Venturi, 2004 e Gasol *et al.*, 2009.

Para minimizar os custos de transporte é recomendável que a plantação de floresta dedicada esteja a um raio de distância da central de 30 a 40 km (Vega *et al.*, 2010). Para as distâncias percorridas pelos transportes de mercadorias, entre a central termoelétrica e a cultura dedicada, foram elaboradas diversas hipóteses, uma vez que a distância é um dos factores cruciais em termos da viabilidade económica destes projectos. De notar que a viabilidade económica de um trajecto maior depende do subsídio verde e da escala da plantação. As hipóteses deliberadas sobre o raio de distância entre a central e a cultura dedicada foram-no primeiramente tendo em conta a situação ideal, 10 km, e uma distância máxima de 60 km. Estas distâncias são todas viáveis para a central do Pego, tendo-se fixado, à posteriori, a distância de 50km para a conseqüente ACV. Se tivermos em conta a localização da central de Sines o raio de distância entre a cultura e a central é de 200 km.

Embora seja referido que a partir de 60 km a 70 km de distância, a viabilidade do sistema possa estar comprometida economicamente, tudo depende da escala da produção de floresta dedicada pelo que é plausível a consideração de distâncias superiores. As diferentes hipóteses referentes ao raio de distância entre a central e o cultivo de *E. globulus* no RO são: 10 km; 20 km; 40 km; 60 km; 50 km – Central do Pego; 200 km – Central de Sines.

O meio de transporte seleccionado foi o camião de mercadorias com capacidade de 40 ton brutas, o que corresponde a 30 ton de carga, por ser a carga máxima de biomassa que é permitido transportar em Portugal. Assume-se que a biomassa permanece entre 1 a 2 meses na unidade silvícola e na altura de transportar a estilha, esta detém cerca 40 wt% humidade. De referir que, na elaboração dos cálculos para determinar as toneladas por quilómetros (tkm), reportados na Tabela 23, contabilizou-se apenas o trajecto de ida, assumiu-se que no trajecto de volta o meio de transporte de mercadorias transporta outro tipo de cargas fora da fronteira do estudo considerado. Assumiu-se que, na altura do transporte, a biomassa tem 40 wt% de humidade, na base húmida, pelo que a carga real a transportar corresponde a 0.1 kg de biomassa para a produção de 1 kWh<sub>e</sub>, tendo em consideração a Equação 4.

Tabela 23 - Raios de distância entre a central e a plantação e carga por quilómetro percorrido.  
UF: 1 kWh<sub>e</sub>.

Distância (km)	10	20	40	60	50 (Pego)	200 (Sines)
Carga (tkm)	1,00E-03	2,00E-03	4,00E-03	6,00E-03	5,00E-03	2,00E-02

### 3.2.1 Análise ambiental e energética do transporte de biomassa

Na Tabela 24 são reportados os resultados da ACV no que respeita aos impactos ambientais dos diferentes cenários para o raio de distância entre a plantação e a central (10, 20, 40 e 60 km). No Gráfico 5 é efectuada a análise de sensibilidade entre a variação de magnitude de impacto ambiental em relação às diferentes distâncias em estudo. É de notar que o meio de transporte considerado usa como fonte de energia combustível fóssil. A produção dos equipamentos requerer a extracção de matérias-primas e a queima de combustíveis fósseis. Estas situações permitem a libertação de substâncias/compostos responsáveis pelas categorias de impacto analisadas.

Das categorias de impacto em análise na Tabela 24, destaca-se a de inorgânicos respiráveis, alterações climáticas, GEE, acidificação e eutrofização. Os principais poluentes responsáveis por estas categorias de impacto são o NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e o CO<sub>2</sub>. Estes poluentes são emitidos não só durante o transporte de biomassa como durante toda a cadeia de valor, desde o processamento do combustível até à sua utilização pelo meio de transporte.



Tabela 24 - Impactos ambientais de diferentes raios de distância. UF: 1 kWh<sub>e</sub>.

Método	Categoria de Impacto	Unidade	Distâncias (km)			
			10	20	40	60
Eco-indicador 95	Gases com efeito de estufa	kg CO <sub>2</sub>	1,01E-04	2,03E-04	4,05E-04	6,08E-04
	Camada de ozono	kg CFC11	2,25E-11	4,50E-11	9,01E-11	1,35E-10
	Acidificação	kg SO <sub>2</sub>	3,78E-07	7,55E-07	1,51E-06	2,27E-06
	Eutrofização	kg PO <sub>4</sub>	5,85E-08	1,17E-07	2,34E-07	3,51E-07
	Metais pesados	kg Pb	5,74E-10	1,15E-09	2,30E-09	3,44E-09
	Carcinogénicos	kg B(a)P	7,40E-12	1,48E-11	2,96E-11	4,44E-11
	Smog de verão	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	5,56E-08	1,11E-07	2,22E-07	3,33E-07
	Smog de inverno	kg SPM	1,52E-07	3,04E-07	6,09E-07	9,13E-07
	Recursos energéticos	MJ LHV	1,80E-03	3,60E-03	7,21E-03	1,08E-02
Eco-indicador 99 (H)	Carcinogénicos	DALY	2,40E-12	4,80E-12	9,61E-12	1,44E-11
	Orgânicos respiráveis	DALY	1,65E-13	3,31E-13	6,61E-13	9,92E-13
	Inorgânicos respiráveis	DALY	6,11E-11	1,22E-10	2,45E-10	3,67E-10
	Alterações climáticas	DALY	2,17E-11	4,34E-11	8,67E-11	1,30E-10
	Radiação	DALY	2,02E-13	4,04E-13	8,07E-13	1,21E-12
	Camada de ozono	DALY	1,79E-14	3,59E-14	7,17E-14	1,08E-13
	Ecotoxicidade	PAF*m <sup>2</sup> yr	2,90E-05	5,80E-05	1,16E-04	1,74E-04
	Acidificação/Eutrofização	PDF*m <sup>2</sup> yr	2,28E-06	4,56E-06	9,12E-06	1,37E-05
	Combustíveis fósseis	MJ surplus	2,15E-04	4,30E-04	8,59E-04	1,29E-03

A magnitude dos impactos ambientais é proporcional ao raio de distância, visível na Tabela 24 e no Gráfico 5. Para a análise de sensibilidade assume-se que os impactos ambientais decorrentes da distância 60km correspondem ao máximo. A variação da magnitude de impacto dos restantes cenários de distâncias são determinados pela elaboração do factor F. O F representa o quociente entre o impacto proveniente da distância de 10, 20 ou 40 km em relação à distância de 60 km.

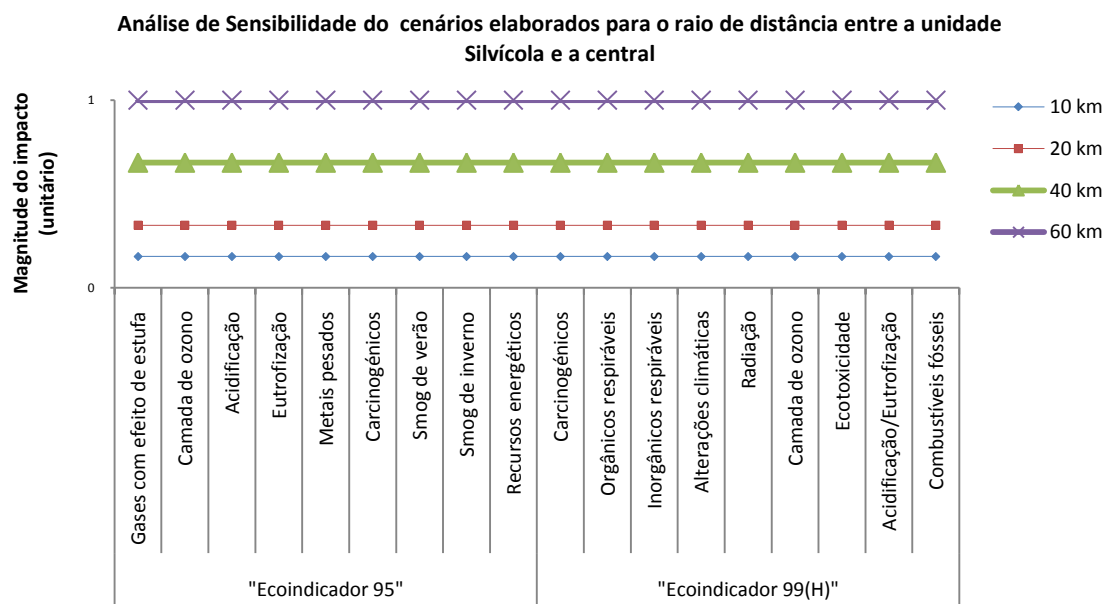


Gráfico 5 - Análise de sensibilidade entre os raios de distância. UF: 1 kWh<sub>e</sub>.

### 3.2.2 Análise ambiental e energética do sistema logístico, produção e transporte de biomassa

Para a análise conjunta dos impactos ambientais derivados da unidade silvícola e do transporte de biomassa, optou-se por analisar os dois cenários mais plausíveis de ocorrerem, o raio de distância de 50 km e 200 km, respectivamente para a central do Pego e Sines. Apresenta-se de seguida a comparação dos impactos ambientais da unidade silvícola para um raio de distância de 50 e 200 km

para o cenário R e para o cenário do RO na Tabela 25. É determinado o factor F que é quociente entre os impactos do cenário de 50 km e do cenário de 200 km, o qual consta na Tabela 25. O F permite compreender como é que um cenário varia em relação ao outro.

Pela análise conjunta dos potenciais impactos ambientes da unidade silvícola e transporte de biomassa, temos que as categorias de impacto com maior pressão sobre o ambiente são a acidificação, a eutrofização, o consumo de combustíveis fósseis, as alterações climáticas e GEE, indicados na Tabela 25.

Pelo transporte de biomassa ocorre a emissão, respectivamente para o caso do raio de distância 50 e 200km, de 0,51gCO<sub>2eq</sub>/kWh<sub>e</sub> e 2,03gCO<sub>2eq</sub>/kWh<sub>e</sub> e de 0,50gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub> e 1,20gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub>.

Tabela 25 - Impactos ambientais da produção de *E. globulus* e transporte de biomassa. UF:1kWh<sub>e</sub>.  
F<sup>9</sup> = Impacto Cenário R 50km/ Impacto Cenário R 200 km

Método	Categoria de impacto	Unidade	R 50km	R 200km	RO 50km	RO 200km	F
Eco-indicador 95	Gases com efeito de estufa	kg CO <sub>2</sub>	6,39E-03	7,91E-03	6,33E-03	7,85E-03	0,8
	Camada de ozono	kg CFC11	3,16E-10	6,54E-10	3,06E-10	6,44E-10	0,5
	Acidificação	kg SO <sub>2</sub>	3,17E-05	3,74E-05	3,12E-05	3,69E-05	0,8
	Eutrofização	kg PO <sub>4</sub>	4,56E-06	5,43E-06	4,48E-06	5,36E-06	0,8
	Metais pesados	kg Pb	1,40E-08	2,26E-08	1,30E-08	2,16E-08	0,6
	Carcinogénicos	kg B(a)P	5,49E-10	6,60E-10	5,24E-10	6,35E-10	0,8
	Smog de verão	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,40E-06	2,23E-06	1,35E-06	2,19E-06	0,6
	Smog de inverno	kg SPM	9,42E-06	1,17E-05	9,28E-06	1,16E-05	0,8
	Recursos energéticos	MJ LHV	6,10E-02	8,80E-02	6,00E-02	8,71E-02	0,7
Eco-indicador 99 (H)	Carcinogénicos	DALY	5,69E-11	9,30E-11	5,25E-11	8,85E-11	0,6
	Orgânicos respiráveis	DALY	4,15E-12	6,63E-12	4,01E-12	6,49E-12	0,6
	Inorgânicos respiráveis	DALY	4,24E-09	5,15E-09	4,15E-09	5,07E-09	0,8
	Alterações climáticas	DALY	1,48E-09	1,81E-09	1,47E-09	1,80E-09	0,8
	Radiação	DALY	2,89E-12	5,92E-12	2,71E-12	5,74E-12	0,5
	Camada de ozono	DALY	2,53E-13	5,22E-13	2,45E-13	5,14E-13	0,5
	Ecotoxicidade	PAF*m <sup>2</sup> yr	3,84E-04	8,19E-04	3,61E-04	7,96E-04	0,5
	Acidificação/eutrofização	PDF*m <sup>2</sup> yr	2,03E-04	2,38E-04	2,00E-04	2,35E-04	0,9
	Combustíveis fósseis	MJ surplus	7,47E-03	1,07E-02	7,37E-03	1,06E-02	0,7

É importante notar que a diferença de impactos ambientais entre os dois raios de distância é mais acentuada na categoria de impacto camada de ozono, radiação e ecotoxicidade. Como esperado, o cenário do RO detém menos impactos ambientais do que o cenário R, uma vez que há menos maquinaria a operar.

É plausível averiguar-se que a distância percorrida pode ser um ponto crítico quanto à viabilidade ambiental destes sistemas de produção. Contudo, tal conclusão só poderá ser determinada aquando da comparação de combustão *versus* co-combustão, que é realizada no Capítulo 4.

<sup>9</sup> O F de do cenário R e F do cenário RO tem o mesmo valor, motivo pelo qual só é apresentado um F na tabela.

### 3.3 Central termoelétrica

Para a viabilização do estudo foi necessário a elaboração de alguns cálculos, *p. ex.* emissões atmosféricas decorrentes da co-combustão. São apresentados no presente capítulo estes e outros cálculos importantes.

No presente trabalho, como referido anteriormente, assume-se que a distância da central à cultura dedicada é de 200 km para a central de Sines e de 50 km para a central do Pego. A central de Sines localiza-se sensivelmente a cerca de 10 km do porto de Sines, onde é descarregado o carvão transportado por via marítima, e a central do Pego a 250 km. De referir que, embora a central do Pego se localize mais perto da plantação do que a de Sines, esta está mais longe do ponto de descarga de carvão. Este é um dado importante a nível da interpretação dos impactos ambientais, não basta atender só à proximidade entre o local de plantação e a central mas também atender à distância entre o porto de desembarque de carvão.

É oportuno referir algumas das considerações realizadas sobre as centrais termoelétricas aquando da implementação da co-combustão. Considera-se que as centrais estão aptas a receber o fluxo de biomassa, como *p. ex.* detêm espaço suficiente de armazenamento. A taxa de substituição de carvão por biomassa não ocorre na proporção 1 por 1 em termos mássicos, pelo que poderá ter de ser efectuada uma alteração ao sistema de queima. Contudo, no presente estudo assume-se que ambas as centrais são passíveis de realizar a co-combustão com 10% de substituição de carvão por biomassa e que o rendimento eléctrico da co-combustão é igual ao da combustão.

#### 3.3.1 Combustão

##### 3.3.1.1 Emissões atmosféricas decorrentes da combustão

Para modelar a central termoelétrica de Sines usaram-se os últimos dados publicados pela EDP, para o ano de 2005, no que respeita às emissões atmosféricas (ver Tabela 26).

Tabela 26 - Produção líquida de electricidade e emissões atmosféricas em 2005, central de Sines.

Fonte: <http://www.edp.pt>, consultado em 1 de Agosto de 2010.

Produção líquida de electricidade (GWh)	9590,18	
Emissões atmosféricas (kt)	SO <sub>2</sub>	57,53
	NO <sub>x</sub>	22,31
	CO <sub>2</sub>	8596,17

De notar que, para o ano de 2005, não foram reportadas emissões de material particulado. Dada a importância destas emissões, em termos de pressão ambiental (WCI, 2005), foram aqui considerados como válidos os valores reportados para o ano de 2001, 0.12 g/kWh (EDP, 2001). Esta emissão encontra-se potencialmente majorada uma vez que, se entre 2001 e 2005 ocorreu algum melhoramento técnico, este não é aqui contabilizado. Contudo, dado que na central termoelétrica de Sines foi efectuado, após 2005, esforços na redução de emissões atmosféricas (ver Tabela 27) pela introdução de queimadores de baixa emissão (QBE) e *boosted over fire air* (BOFA) (Costa e Azevedo, 2007) a redução da emissão de poluentes é contabilizada no presente estudo pelo cálculo da taxa de remoção do poluente, indicado na Tabela 27 por poluente.

Tabela 27 - Emissões atmosféricas na central de Sines no ano de 2003 e 2007.

Fonte: Costa e Azevedo, 2007. Valores calculados para a variação percentual da emissão de poluentes pela introdução de QBE e BOFA.

Emissões atmosféricas	Ano de 2003	Ano de 2007	Taxa de remoção do poluente (%)
SO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> @6% O <sub>2</sub> )	1505	n.a.	-
NO <sub>x</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> @6% O <sub>2</sub> )	620	469	24
CO <sub>2</sub> (dry volume %)	15.2	14.7	3,3
Partículas (mg/Nm <sup>3</sup> @6% O <sub>2</sub> )	44	37	16

As emissões atmosféricas reportadas na Tabela 26 são extrapoladas para o ano de 2009, tendo em conta os valores calculados sobre a variação percentual de emissão de poluentes pela introdução de QBE e BOFA, indicados na Tabela 27. Os valores determinados e usados para as emissões atmosféricas da central de Sines constam na Tabela 28.

Tabela 28 - Emissões atmosféricas específicas de combustão na central de Sines. UF: 1 kWh<sub>e</sub>.

Poluente	Emissões atmosféricas específicas (g/kWh)
SO <sub>2</sub>	6,00
NO <sub>x</sub>	1,76
CO <sub>2</sub>	866,87
Partículas	0,101

A quantidade de cinzas produzidas é aproximadamente 10,56 wt% (base seca) do caudal de alimentação em carvão (ver Tabela 29). Para a produção de 1 kWh<sub>e</sub>, ou seja para a queima de 0,3(3) kg de carvão, há a produção de 0,035 kg de cinzas.

Tabela 29 - Características do carvão recebido na central termoelétrica de Sines.

Fonte: Costa e Azevedo, 2007.

Análise imediata (base seca wt %)	
Cinzas	10,56
Material volátil	32,40
Carbono fixo	57,04
Análise elementar (base seca wt %)	
Carbono	71,95
Hidrogénio	4,32
Azoto	1,48
Enxofre	0,67
Oxigénio	11,02

Para a modelação da central termoelétrica do Pego, o valor assumido para a produção de cinzas por 1 kWh<sub>e</sub> é também 0,035kg, com base no valor da análise imediata reportada na Tabela 29. As emissões atmosféricas constam na Tabela 30.

Tabela 30 - Emissões atmosféricas específicas de combustão na central do Pego. UF: 1 kWh<sub>e</sub>.

Fonte: Pegop, 2009

Poluente	Emissões atmosféricas específicas (g/kWh)
SO <sub>2</sub>	2,36
NO <sub>2</sub>	1,61
CO <sub>2</sub>	844,00
Partículas	0,10

### 3.3.1.2 Importação de carvão e fluxos de input da central

Os principais países que exportam carvão para a UE (25 países) são a África do Sul, Rússia, Austrália, Colômbia, Indonésia, EUA e o Canadá (COM, 2008b). A importação de carvão para Portugal é principalmente oriunda da Colômbia e da África do Sul (CEC, 2007; Pegop, 2009).

O transporte de carvão para o mercado nacional é realizado primordialmente por transporte marítimo. Contudo, ocorre também por transporte fluvial e por comboio, considerando o transporte no local de extracção para o porto de embarque e do porto de desembarque até à central (WCI, 2005).

Para a modelação do processo de extracção de carvão e importação para o mercado nacional utilizou-se o estudo realizado por Röder *et al.* (2007) o qual se encontra disponível na base de dados do SimaPro. Do referido estudo interessa indicar alguns dados relevantes, os quais estão indicados na Tabela 31, como o tipo de transportes de mercadorias incluídos e a quantidade percentual de carvão a importar de cada país produtor de carvão. Este estudo assume que as perdas de carvão são de 1%.

Tabela 31 - Carvão importado por país e transportes utilizados, para um total de 1 kg de carvão.

Fonte: Röder *et al.*, 2007.

Países Exportadores	Carvão (kg)	Carvão (%)	Meio de Transporte	tkm
Austrália	0,123	12,25	Transporte marítimo	9,19
Rússia	0,001	0,10	Transporte fluvial	0,02
África do Sul	0,420	41,83	Comboio	0,02
Colômbia	0,460	45,81		

Após o desembarque do carvão no Porto de Sines é daí transportado por caminho-de-ferro até à Central do Pego e de Sines, assumiu-se uma distância de 250 km e 10 km, respectivamente.

Os materiais necessários, recursos energéticos e emissões de poluentes decorrentes da construção e final de vida da central, das operações de manutenção, da maquinaria, da deposição das cinzas em aterro e de outros processos requeridos durante o funcionamento da mesma são modelados de acordo com o estudo realizado por Röder *et al.* (2007) para centrais termoeléctricas a carvão e adaptado ao contexto nacional. Segundo Röder *et al.* (2007), são então considerados os *inputs* constantes da Tabela 32.

Tabela 32 - Inputs para a combustão de 1MJ de carvão na central termoeléctrica.

Fonte: Röder *et al.*, 2007.

Descrição do fluxo (unidade)	Quantidade
Água de arrefecimento (m <sup>3</sup> )	0,0035
Água descalcificada (kg)	0,006
Água descarbonizada (kg)	0,15
Fuelóleo leve (kg)	1,7E-5
Cloro líquido (kg)	1,0E-5

Os fluxos de *input* para a construção da central, segundo Röder *et al.* (2007), constam na Tabela 33. O fluxo de inputs para a construção da central relaciona-se com a combustão de 1 MJ de carvão pelo valor de 1,3E-12 unidades.

Tabela 33 - Inputs para a construção da central termoelétrica.

Fonte: Röder *et al.*, 2007.

Descrição do fluxo (unidade)	Quantidade para a construção da central
Cobre (kg)	7,1E5
Aço (kg)	4,43E6
Aço de cromo (kg)	4,71E5
Alumínio (kg)	3,32E5
Betão (m <sup>3</sup> )	62600
Polietileno (kg)	4,01E5
Electricidade (kWh)	1,5E7
Gasóleo consumido pela maquinaria (MJ)	2,31E8
Fuelóleo (MJ)	2,31E8

As centrais em estudo redireccionam parte das cinzas produzidas para, por exemplo, indústrias betoneiras, reduzindo a quantidade de cinzas a depositar em aterro. No presente estudo este fluxo não foi modelado, considerando-se a deposição da totalidade das cinzas produzidas no aterro de resíduos da respectiva central.

### 3.3.1.3 Análise ambiental e energética da combustão

A transformação de energia relaciona-se com diversas preocupações ambientais. Para o caso particular do carvão, estas são a emissão de poluentes, como o CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, material particulado e elementos traço, *p. ex.* o mercúrio (WCI, 2005). Os impactos ambientais, determinados pela ACV, decorrentes da mineração, transporte e combustão de carvão estão reportados na Tabela 34, para a central de Sines e na Tabela 35 para a central do Pego. Os impactos ambientais mais relevantes, decorrentes da queima do carvão, são as alterações climáticas, os GEE, a acidificação, a eutrofização, o smog de inverno, a emissão de compostos inorgânicos respiráveis e o consumo de combustíveis fósseis (ver Tabela 34 e Tabela 35).

Os impactos ambientais da mineração, processamento e transporte de carvão prendem-se essencialmente com a utilização de maquinaria e transportes, os quais usam combustíveis fósseis. Na etapa de mineração e processamento de carvão os impactos ambientais mais relevantes prendem-se com a erosão do solo, a emissão de poeiras, ruído, poluição dos recursos hídricos e impactos sobre a biodiversidade (WCI, 2005). A poluição dos recursos hídricos está relacionada com o escoamento de compostos ácidos (WCI, 2005). Existem diversos métodos para controlar estas emissões, que passam pela própria configuração da exploração mineira e pela utilização de equipamentos de tratamento de efluentes líquidos. A principal fonte de poeiras e material particulado é a deslocação de veículos, a trituração do carvão e as operações de perfuração (WCI, 2005). Durante a exploração mineira há ainda a emissão de CH<sub>4</sub>, o qual está presente no carvão. Facto pelo qual é necessário proceder à ventilação das minas (WCI, 2005).

A análise de impacto de cada actividade ou processo, por categoria de impacto, está expressa em percentagem e em magnitude na Tabela 34 para a central termoelétrica de Sines e na Tabela 35 para a central do Pego. A percentagem de impacto permite uma compreensão rápida de que, tanto a actividade de mineração como a combustão do carvão têm impactos ambientais significativos.

Na modelação do programa SimaPro os impactos do transporte de carvão são divididos em duas partes. A mineração e transporte de carvão contempla o transporte até ao porto de descarga, sendo o

transporte desde o porto de descarga até à central incluídos nos impactos desta. A magnitude de impacto por cada actividade, ou processo, é similar em termos percentuais para o caso da central de Sines e da do Pego (ver Tabela 34 e Tabela 35). Contudo, a ligeira diferença entre ambas está relacionada principalmente com a distância de cada uma ao porto de Sines e com as emissões atmosféricas decorrentes da queima de combustível (ver Tabela 28 e Tabela 30). O âmbito do presente estudo não é comparar os impactos ambientais entre as duas centrais, mas sim realizar um estudo de carácter ambiental com vista à determinação das implicações ambientais da incorporação de co-combustão em ambas.

Tabela 34 - Impactos ambientais da mineração, transporte e combustão de carvão na central de Sines. UF: 1 kWh<sub>e</sub>.

Método	Categoria de impacto	Unidade	Sines		
			Total	Mineração e transporte	Central
Eco-indicador 95	Gases com efeito de estufa	kg CO <sub>2</sub>	9,25E-01	5,59E-02	8,69E-01
		%	100	6	94
	Camada de ozono	kg CFC11	6,90E-09	6,27E-09	6,32E-10
		%	100	91	9
	Acidificação	kg SO <sub>2</sub>	8,39E-03	1,14E-03	7,25E-03
		%	100	14	86
	Eutrofização	kg PO <sub>4</sub>	3,86E-04	1,28E-04	2,57E-04
		%	100	33	67
	Metais pesados	kg Pb	2,19E-06	2,96E-07	1,89E-06
		%	100	14	86
	Carcinogénicos	kg B(a)P	1,39E-08	1,32E-08	6,47E-10
		%	100	95	5
Smog de verão	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	4,63E-05	4,53E-05	1,02E-06	
	%	100	98	2	
Smog de inverno	kg SPM	6,52E-03	5,12E-04	6,01E-03	
	%	100	8	92	
Recursos energéticos	MJ LHV	1,18E+01	1,18E+01	4,96E-02	
	%	100	100	0	
Eco-indicador 99 (H)	Carcinogénicos	DALY	4,27E-08	2,12E-09	4,06E-08
		%	100	5	95
	Orgânicos respiráveis	DALY	1,35E-10	1,32E-10	2,99E-12
		%	100	98	2
	Inorgânicos respiráveis	DALY	6,26E-07	1,28E-07	4,98E-07
		%	100	20	80
	Alterações climáticas	DALY	1,96E-07	1,32E-08	1,83E-07
		%	100	7	93
	Radiação	DALY	2,77E-10	2,67E-10	9,48E-12
		%	100	97	3
	Camada de ozono	DALY	5,78E-12	5,18E-12	5,94E-13
		%	100	90	10
Ecotoxicidade	PAF*m <sup>2</sup> yr	2,09E-02	1,65E-02	4,48E-03	
	%	100	79	21	
Acidificação/eutrofização	PDF*m <sup>2</sup> yr	2,24E-02	5,98E-03	1,64E-02	
	%	100	27	73	
Combustíveis fósseis	MJ surplus	1,59E-01	1,54E-01	4,58E-03	
	%	100	97	3	

Tabela 35 - Impactos ambientais da mineração, transporte e combustão de carvão na central do Pego. UF: 1 kWh<sub>e</sub>.

Método	Categoria de impacto	Unidade	Pego		
			Total	Mineração e transporte	Central
Eco-indicador 95	Gases com efeito de estufa	kg CO <sub>2</sub>	9,05E-01	5,59E-02	8,49E-01
		%	100	6	94
	Camada de ozono	kg CFC11	7,16E-09	6,27E-09	8,86E-10
		%	100	88	12
	Acidificação	kg SO <sub>2</sub>	4,66E-03	1,14E-03	3,52E-03
		%	100	24	76
	Eutrofização	kg PO <sub>4</sub>	3,68E-04	1,28E-04	2,40E-04
		%	100	35	65
	Metais pesados	kg Pb	2,22E-06	2,96E-07	1,93E-06
		%	100	13	87
Carcinogénicos	kg B(a)P	1,42E-08	1,32E-08	9,92E-10	
	%	100	93	7	
Smog de verão	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	4,71E-05	4,53E-05	1,88E-06	
	%	100	96	4	
Smog de inverno	kg SPM	2,89E-03	5,12E-04	2,38E-03	
	%	100	18	82	
Recursos energéticos	MJ LHV	1,19E+01	1,18E+01	1,10E-01	
	%	100	99	1	
Eco-indicador 99 (H)	Carcinogénicos	DALY	4,30E-08	2,12E-09	4,08E-08
		%	100	5	95
	Orgânicos respiráveis	DALY	1,38E-10	1,32E-10	5,53E-12
		%	100	96	4
	Inorgânicos respiráveis	DALY	4,17E-07	1,28E-07	2,89E-07
		%	100	31	69
	Alterações climáticas	DALY	1,92E-07	1,32E-08	1,78E-07
		%	100	7	93
	Radiação	DALY	3,12E-10	2,67E-10	4,40E-11
		%	100	86	14
Camada de ozono	DALY	6,00E-12	5,18E-12	8,22E-13	
	%	100	86	14	
Ecotoxicidade	PAF*m <sup>2</sup> yr	2,16E-02	1,65E-02	5,12E-03	
	%	100	76	24	
Acidificação/ eutrofização	PDF*m <sup>2</sup> yr	1,78E-02	5,98E-03	1,18E-02	
	%	100	34	66	
Combustíveis fósseis	MJ surplus	1,62E-01	1,54E-01	7,90E-03	
	%	100	95	5	

Os impactos da combustão de carvão e da utilização de combustíveis fósseis (maquinaria e transportes) são contabilizados nas categorias de impactos em análise. Seguidamente é realizada uma análise discriminada para cada categoria de impacto dos processos e substâncias/compostos que exercem pressão sobre o ambiente.

Pela análise da Tabela 34 e da Tabela 35 é possível verificar que a categoria de impacto alterações climáticas e GEE são quase na totalidade causados pela central, devido à queima de carvão e consequente emissão atmosférica de CO<sub>2</sub>. Contudo, na fase do transporte transoceânico do carvão há a emissão de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, pela utilização de combustíveis fósseis, sendo que este transporte tem uma percentagem pouco significativa em relação à da central.



A emissão de COV e HAP contribui para a categoria de impacto smog de verão. São emitidos principalmente na actividade de extracção de carvão e perfuração da mina e uso de combustíveis fósseis no transporte. O smog de inverno ocorre sobretudo devido à emissão de SO<sub>2</sub> pela combustão do carvão.

A emissão de compostos carcinogénicos está relacionada com a emissão de HAP, arsénio, metais pesados e cádmio, sobre os recursos hídricos e a atmosfera. Pela análise do *Eco-indicador 95* destaca-se a actividade mineira e o transporte de mercadorias como principal fonte de emissão destes compostos/substâncias. No *Eco-indicador 99* é atribuído um peso percentual mais elevado à central que no *Eco-indicador 95*, devido a considerar um peso mais elevado à emissão de metais pesados pelas estruturas edificadas que tenham na sua constituição estes compostos.

Para a categoria de impacto orgânicos respiráveis a emissão COVNM e de CH<sub>4</sub> ocorre pelo uso de combustíveis fósseis nos transportes de mercadorias e pela actividade mineira.

As substâncias que concorrem para a categoria de impacto de inorgânicos respiráveis são o SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e material particulado. São emitidos pela queima de combustíveis fósseis, respectivamente carvão na central e derivados do petróleo no transporte transoceânico. A actividade de mineração também contribui para estas emissões no entanto numa percentagem menor quando comparada com as anteriores.

A emissão de substâncias radioactivas, carbono 14 e rádon 222, está sobretudo relacionada com a produção de energia nuclear a qual contribui para o *mix* energético dos países onde os equipamentos são construídos e sujeitos a operações de manutenção, *p. ex.* navios. Neste contexto trata-se de um impacto desprezível.

A depleção da camada de ozono ocorre sobretudo devido à emissão de gases como o metano e bromotrifluoro devido à utilização e queima de combustíveis fósseis. Na mineração e transporte de carvão.

A categoria de impacto ecotoxicidade está relacionada com a emissão de metais pesados. Esta não deve ser aqui contabilizada. Neste contexto trata-se de um impacto desprezível.

A categoria de impacto do SimaPro utilização de combustíveis fósseis já se encontra suficientemente explicada nos itens anteriores. Há a acrescentar que o consumo de combustíveis fósseis também contribui para a acidificação e eutrofização pela emissão de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> e NH<sub>3</sub>.

### 3.3.2 Co-combustão

#### 3.3.2.1 Emissões atmosféricas decorrentes da co-combustão

Na Tabela 36 é apresentado o valor médio de emissão de diversos poluentes atmosféricos pela combustão de partículas em suspensão da queima dedicada de madeira.

Tabela 36 - Emissões atmosféricas da queima de madeira em partículas em suspensão.

Fonte: tabela adaptada de Loo e Koppejan, 2008

Tecnologia	NO <sub>x</sub> como NO <sub>2</sub> (mg/MJ)	Partículas (mg/MJ)	CO (mg/MJ)	CH <sub>4</sub> (mg/MJ)	PAH (ug/MJ)
Partículas em suspensão	69	86	164	8	22

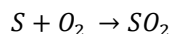
O cálculo das emissões atmosféricas em co-combustão não deve ser unicamente efectuado por um processo aditivo (biomassa mais carvão). As emissões de determinados poluentes dependem não só das características químicas da mistura de combustível como do processo de queima.

Para viabilizar o cálculo das emissões atmosféricas decorrentes da co-combustão é tido em consideração a mistura de combustível e a tecnologia de partículas em suspensão. Como referido anteriormente, para a produção de 1 kWh<sub>e</sub> em co-combustão com 10% térmico de substituição é necessário 0,3 kg de carvão e 0,056 kg (matéria seca) de *E. globulus* (a energia contida na mistura de combustível é: 8,1 MJ no carvão e 0,9 MJ na biomassa).

Os poluentes passíveis de serem determinados por processo aditivo são o CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub> e o CO<sub>2</sub>. O CO<sub>2</sub> emitido pela queima de biomassa não é contabilizado porque envolve um processo de reciclagem natural, já descrito anteriormente.

As emissões que não são passíveis de serem determinadas por processo aditivo são o NO<sub>x</sub> e o material particulado. Para estas emissões toma-se como válidas as emissões da combustão do carvão para a produção de 1 kWh<sub>e</sub> que estão na Tabela 28 e Tabela 30, respectivamente para a central de Sines e do Pego.

A emissão de alguns poluentes atmosféricos, como o SO<sub>2</sub> pode ser avaliada pelo somatório da quantidade de enxofre presente na mistura de combustível. Apresenta-se o procedimento de cálculo para a emissão de SO<sub>2</sub> em co-combustão na central de Sines. Considera-se primeiro as emissões decorrentes da queima de biomassa, em que todo o enxofre presente no combustível é emitido sobre a forma de SO<sub>2</sub>:



Se tivermos em consideração a massa molar vem que:

$$\frac{64 \text{ g } SO_2/mol}{32 \text{ g } S/mol} = 2 \frac{\text{ g } SO_2/mol}{\text{ g } S/mol}$$

Significa que por cada grama de enxofre queimado há a emissão de 2 g de SO<sub>2</sub>. Para quantificar a proporção de enxofre presente na mistura de combustível recorre-se aos valores indicados na Tabela 37 para a *E. globulus*.

Tabela 37 - Características da *E. globulus*.

Fonte: Kitani e Hall, 1989.

Análise imediata (base seca wt%)	
Cinzas	1,1
Material volátil	81,6
Análise elementar (base seca wt%)	
Carbono	48,2
Hidrogénio	5,92
Azoto	0,39
Enxofre	0,01
Oxigénio	44,2

Para produzir 1 kWh<sub>e</sub> é necessário 0,056 kg (matéria seca) de *E. globulus*, pelo que corre a emissão de 0,01 gSO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub> pela queima de biomassa. Para determinar a emissão de SO<sub>2</sub> pela queima de carvão atende-se aos valores da Tabela 28 e afecta-se as emissões reportadas a 0,3 kg carvão, vem

que ocorre a emissão de 5,40 gSO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub>. No total ocorre a emissão de 5,41 gSO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub> pela queima da mistura de combustíveis.

É oportuno referir que no presente trabalho não se considera a existência de enxofre nas cinzas bem como a existência de equipamento de remoção de SO<sub>2</sub> para o processo de cálculo da emissão de SO<sub>2</sub> pela queima de biomassa. Esta emissão encontra-se por isso majorada. O cálculo da determinação do factor de emissão de SO<sub>2</sub> (FE SO<sub>2</sub> g/GJ) é dado pela Equação 5:

$$(FE\ SO_2) \left[ \frac{g}{GJ} \right] = 2 \times C_S (1 - \alpha_S) \left[ \frac{kg}{kg} \right] \times \frac{1}{H_u} 10^6 \left[ \frac{kg}{MJ} \right] \times (1 - \eta_{des} \times \beta) \quad (\text{Ericsson, 2007}) \quad \text{Equação 5}$$

Em que C<sub>S</sub> é o enxofre presente no combustível (kg/kg), α<sub>S</sub> é a taxa de retenção de enxofre nas cinzas de combustão, η<sub>des</sub> é a taxa de redução de dessulfurização dos gases de combustão, H<sub>u</sub> o PCI do combustível (MJ/kg) e β é dessulfurização disponível.

Os valores determinados para a produção de 1 kWh<sub>e</sub> em co-combustão para a central de Sines constam na Tabela 38 e para a central do Pego na Tabela 39.

Tabela 38 - Emissões atmosféricas específicas de co-combustão na central de Sines. UF: 1 kWh<sub>e</sub>.

Poluente	Emissões atmosféricas (g)
SO <sub>2</sub>	5,41
NO <sub>x</sub>	1,76
CO <sub>2</sub>	780,18
Partículas	0,101

Tabela 39 - Emissões atmosféricas específicas de co-combustão na central do Pego. UF: 1 kWh<sub>e</sub>.

Poluente	Emissões atmosféricas (g)
SO <sub>2</sub>	2,14
NO <sub>2</sub>	1,61
CO <sub>2</sub>	759,60
Partículas	0,10

A formação de cinzas em co-combustão é ligeiramente menor do que na combustão. Para ambos os cenários o cálculo das cinzas produzidas tem em consideração as cinzas determinadas pela análise imediata indicada na Tabela 29 para a combustão do carvão e o valor indicado na Tabela 37 para a *E. globulus*. Considerando a proporção de biomassa e carvão na mistura, a quantidade de cinzas produzidas por 1 kWh<sub>e</sub> é de 0,032 kg.

### 3.3.2.2 Análise ambiental e energética da co-combustão

Na ACV da co-combustão, considera-se a mineração e transporte carvão, produção e transporte de biomassa e a queima da mistura de combustíveis. Os resultados da análise da ACV estão reportados na Tabela 40, no que refere ao comportamento ambiental dos cenários R e RO no respeitante à unidade silvícola, na Tabela 41e na Tabela 42 para a análise detalhada dos impactos ambientais da co-combustão a 10% em cada uma das centrais.

A descrição e identificação dos impactos ambientais das actividades em estudo foram efectuadas nos Capítulos 3.1.3, 3.2.1, 3.2.2 e 3.3.1.3. Os impactos associados à central termoelétrica e à mineração e transporte de carvão são os mesmos que os identificados para a combustão, só que menores na co-combustão porque o fluxo de carvão é menor.

Para a unidade silvícola foram anteriormente elaborados dois cenários referentes às operações mecanizadas, o cenário R, totalmente mecanizado, e o RO, adaptado à realidade da região (ver

Capítulo 3.1.2). É visível, pela análise da Tabela 40, que a contribuição dos impactos de cada cenário para a análise conjunta de todo o sistema é equitativa (F=1,00). Conclui-se pela análise da Tabela 41 e Tabela 42, que face à magnitude dos impactos ambientais provenientes das outras actividades/processos em análise, os impactos provenientes das operações mecanizadas na unidade silvícola não tem uma influência significativa nos impactos globais do sistema.

Tabela 40 - Impactos ambientais da ACV da Co-combustão, central de Sines. UF: 1 kWh<sub>e</sub>.  
F = Impacto Co-combustão C.RO / Impacto Co-combustão C.R

Método	Categoria de impacto	Unidade	Co-combustão		F
			Cenário RO	Cenário R	
Eco-indicador 95	Gases com efeito de estufa	kg CO <sub>2</sub>	8,41E-01	8,41E-01	1,00
	Camada de ozono	kg CFC11	6,91E-09	6,92E-09	1,00
	Acidificação	kg SO <sub>2</sub>	7,72E-03	7,72E-03	1,00
	Eutrofização	kg PO <sub>4</sub>	3,76E-04	3,76E-04	1,00
	Metais pesados	kg Pb	2,04E-06	2,04E-06	1,00
	Carcinogénicos	kg B(a)P	1,32E-08	1,32E-08	1,00
	Smog de verão	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	4,39E-05	4,39E-05	1,00
	Smog de inverno	kg SPM	5,89E-03	5,89E-03	1,00
	Recursos energéticos	MJ LHV	1,17E+01	1,17E+01	1,00
Eco-indicador 99 (H)	Carcinogénicos	DALY	3,93E-08	3,93E-08	1,00
	Orgânicos respiráveis	DALY	1,29E-10	1,29E-10	1,00
	Inorgânicos respiráveis	DALY	5,86E-07	5,86E-07	1,00
	Alterações climáticas	DALY	1,78E-07	1,78E-07	1,00
	Radiação	DALY	2,56E-10	2,56E-10	1,00
	Camada de ozono	DALY	5,76E-12	5,77E-12	1,00
	Ecotoxicidade	PAF*m <sup>2</sup> yr	1,99E-02	1,99E-02	1,00
	Acidificação/eutrofização	PDF*m <sup>2</sup> yr	2,14E-02	2,14E-02	1,00
Combustíveis fósseis	MJ surplus	1,54E-01	1,54E-01	1,00	

O cenário R permite aferir da confiança do resultado do cenário adaptado para a região RO. Tendo sido já também efectuada a validação deste cenário anteriormente no contexto só da unidade silvícola (ver Tabela 21 e Gráfico 3).

Na Tabela 41 e Tabela 42 são reportados os impactos ambientais da ACV do cenário da co-combustão, respectivamente central do Pego e Sines. Nestas tabelas consta a distribuição da magnitude de cada actividade/processo por categoria de impacto.

As actividades/processos que detêm mais impactos ambientais são a mineração e transporte de carvão e a central termoeléctrica. Os impactos ambientais mais significativos do cenário da co-combustão são, as alterações climáticas, os GEE, a acidificação, a eutrofização, o smog de inverno, a emissão de compostos inorgânicos respiráveis e o consumo de combustíveis fósseis, também verificado no cenário da combustão.

Os resultados obtidos mostram que os impactos ambientais provenientes do transporte e produção de biomassa são reduzidos por comparação com as restantes actividades e processos, para todas as categorias em estudo. Pela análise dos impactos percentuais, é perceptível que o transporte e produção de *E. globulus* têm uma maior expressão para os impactos totais, nas categorias depleção da camada de ozono, carcinogénicos, orgânicos respiráveis, ecotoxicidade e combustíveis fósseis.

Tabela 41 - Impacto ambiental por actividade da co-combustão na central do Pego. UF: 1 kWh<sub>e</sub>.  
 Legenda abaixo da tabela.

Método	Categoria de impacto	Unidade	Pego				
			Total	M. Carvão	T. Eucalipto	C. RO	Central
Eco-indicador 95	Gases com efeito de estufa	kg CO <sub>2</sub>	8,21E-01	5,04E-02	5,07E-04	5,82E-03	7,64E-01
		%	100	6	0	1	93
	Camada de ozono	kg CFC11	6,79E-09	5,64E-09	1,13E-10	1,93E-10	8,37E-10
		%	100	83	2	3	12
	Acidificação	kg SO <sub>2</sub>	4,34E-03	1,02E-03	1,89E-06	2,94E-05	3,29E-03
		%	100	24	0	1	76
	Eutrofização	kg PO <sub>4</sub>	3,57E-04	1,16E-04	2,92E-07	4,19E-06	2,37E-04
		%	100	32	0	1	66
	Metais pesados	kg Pb	2,06E-06	2,67E-07	2,87E-09	1,01E-08	1,78E-06
		%	100	13	0	0	86
Carcinogénicos	kg B(a)P	1,34E-08	1,19E-08	3,70E-11	4,87E-10	9,38E-10	
	%	100	89	0	4	7	
Smog de verão	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	4,38E-05	4,07E-05	2,78E-07	1,08E-06	1,73E-06	
	%	100	93	1	2	4	
Smog de inverno	kg SPM	2,62E-03	4,61E-04	7,61E-07	8,52E-06	2,15E-03	
	%	100	18	0	0	82	
Recursos energéticos	MJ LHV	1,17E+01	1,06E+01	9,01E-03	5,10E-02	1,01E+00	
	%	100	91	0	0	9	
Eco-indicador 99 (H)	Carcinogénicos	DALY	3,95E-08	1,91E-09	1,20E-11	4,05E-11	3,75E-08
		%	100	5	0	0	95
	Orgânicos respiráveis	DALY	1,28E-10	1,19E-10	8,27E-13	3,18E-12	5,08E-12
		%	100	93	1	2	4
	Inorgânicos respiráveis	DALY	3,96E-07	1,15E-07	3,06E-10	3,85E-09	2,76E-07
		%	100	29	0	1	70
	Alterações climáticas	DALY	1,74E-07	1,19E-08	1,08E-10	1,36E-09	1,61E-07
		%	100	7	0	1	92
	Radiação	DALY	2,83E-10	2,41E-10	1,01E-12	1,70E-12	3,91E-11
		%	100	85	0	1	14
	Camada de ozono	DALY	5,69E-12	4,66E-12	8,97E-14	1,55E-13	7,80E-13
		%	100	82	2	3	14
Ecotoxicidade	PAF*m <sup>2</sup> yr	2,00E-02	1,48E-02	1,45E-04	2,16E-04	4,81E-03	
	%	100	74	1	1	24	
Acidificação/eutrofização	PDF*m <sup>2</sup> yr	1,71E-02	5,38E-03	1,14E-05	1,89E-04	1,16E-02	
	%	100	31	0	1	67	
Combustíveis fósseis	MJ surplus	1,53E-01	1,39E-01	1,07E-03	6,29E-03	7,31E-03	
	%	100	90	1	4	5	

Legenda: M.carvão - Mineração e transporte de carvão; T.Eucalipto - Transporte de biomassa; C RO - Cenário RO.

Tabela 42 - Impacto ambiental por actividade da co-combustão na central de Sines. UF: 1 kWh<sub>e</sub>.  
Legenda abaixo da tabela.

Método	Categoria de impacto	Unidade	Sines				
			Total	M. Carvão	T. Eucalipto	C. RO	Central
Eco indicador 95	Gases com efeito de estufa	kg CO <sub>2</sub>	8,41E-01	5,04E-02	2,03E-03	5,82E-03	7,82E-01
		%	100	6	0	1	93
	Camada de ozono	kg CFC11	6,91E-09	5,64E-09	4,50E-10	1,93E-10	6,17E-10
		%	100	82	7	3	9
	Acidificação	kg SO <sub>2</sub>	7,72E-03	1,02E-03	7,55E-06	2,94E-05	6,66E-03
		%	100	13	0	0	86
	Eutrofização	kg PO <sub>4</sub>	3,76E-04	1,16E-04	1,17E-06	4,19E-06	2,55E-04
		%	100	31	0	1	68
	Metais pesados	kg Pb	2,04E-06	2,67E-07	1,15E-08	1,01E-08	1,75E-06
		%	100	13	1	0	86
	Carcinogénicos	kg B(a)P	1,32E-08	1,19E-08	1,48E-10	4,87E-10	6,41E-10
		%	100	90	1	4	5
	Smog de verão	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	4,39E-05	4,07E-05	1,11E-06	1,08E-06	9,91E-07
		%	100	93	3	2	2
	Smog de inverno	kg SPM	5,89E-03	4,61E-04	3,04E-06	8,52E-06	5,42E-03
		%	100	8	0	0	92
	Recursos energéticos	MJ LHV	1,17E+01	1,06E+01	3,60E-02	5,10E-02	9,58E-01
		%	100	91	0	0	8
Eco-indicador 99 (H)	Carcinogénicos	DALY	3,93E-08	1,91E-09	4,80E-11	4,05E-11	3,73E-08
		%	100	5	0	0	95
	Orgânicos respiráveis	DALY	1,29E-10	1,19E-10	3,31E-12	3,18E-12	2,89E-12
		%	100	93	3	2	2
	Inorgânicos respiráveis	DALY	5,86E-07	1,15E-07	1,22E-09	3,85E-09	4,65E-07
		%	100	20	0	1	79
	Alterações climáticas	DALY	1,78E-07	1,19E-08	4,34E-10	1,36E-09	1,64E-07
		%	100	7	0	1	92
	Radiação	DALY	2,56E-10	2,41E-10	4,04E-12	1,70E-12	9,26E-12
		%	100	94	2	1	4
	Camada de ozono	DALY	5,76E-12	4,66E-12	3,59E-13	1,55E-13	5,82E-13
		%	100	81	6	3	10
	Ecotoxicidade	PAF*m <sup>2</sup> yr	1,99E-02	1,48E-02	5,80E-04	2,16E-04	4,26E-03
		%	100	75	3	1	21
	Acidificação/ eutrofização	PDF*m <sup>2</sup> yr	2,14E-02	5,38E-03	4,56E-05	1,89E-04	1,58E-02
		%	100	25	0	1	74
		%	100	56	3	5	36
	Combustíveis fósseis	MJ surplus	1,54E-01	1,39E-01	4,30E-03	6,29E-03	4,45E-03
%		100	90	3	4	3	

Legenda: M. Carvão - Mineração e transporte de carvão; T. Eucalipto - Transporte de biomassa; C. RO - Cenário RO.

O transporte de biomassa detém impactos mais reduzidos para todas as categorias de impacto no caso da central do Pego, uma vez que a distância à plantação é menor, menos de ¼ que a de Sines. No entanto, uma vez que a central do Pego se localiza mais longe do porto de Sines, 250 km, os impactos ambientais de transporte de carvão têm nesta mais expressão. Repare-se a distância considerada para o transporte de biomassa entre a central e a plantação vai inferir mais ou menos impactos ambientais ao sistema em análise.

Salienta-se que, associado à introdução de um fluxo de transporte de biomassa, ocorre a redução do fluxo de carvão a ser transportado desde o local da sua importação até ao porto de Sines e consequentemente até à respectiva central. Deste modo, ocorre a redução de alguns impactos ambientais. Associado à diminuição do fluxo de carvão há uma diminuição de consumo de

combustíveis fósseis. No entanto, surge o consumo de combustíveis fósseis associado à produção e transporte de *E. globulus*. O estudo da repercussão destes fluxos nos impactos ambientais é realizado no Capítulo 4.

Pela queima de *E. globulus* como substituto do carvão, ocorre uma diminuição de poluentes atmosféricos, emitidos aquando da queima do combustível (ver e comparar a Tabela 28 com Tabela 38 e Tabela 30 com a Tabela 39) e menor produção de cinzas a transportar para aterro.





## 4 Resultados Finais e discussão

O resultado final da ACV consiste na comparação energética, com base na categoria de impacto combustíveis fósseis do *Eco-indicador 99 (H)*, e dos impactos ambientais da combustão *versus* co-combustão 10% no Capítulo 4.1. Neste capítulo é também efectuado o estudo de ciclo de vida do CO<sub>2</sub>. No Capítulo 4.2 apresenta-se o resultado final da análise ambiental e energética da ACV considerando a alteração do uso do solo.

Para uma melhor interpretação dos resultados determinou-se a percentagem de impacto evitado (IE) da co-combustão, em relação à combustão, para cada categoria de impacto em análise. A percentagem máxima de IE é 10%, e corresponde à diminuição mássica de carvão utilizado na co-combustão em relação à combustão, respectivamente 0,3 kg e 0,(3) kg de carvão. Este raciocínio de máximo de impacto evitado, deixa de ser válido aquando da consideração da alteração do uso do solo. Neste contexto, aos impactos ambientais da co-combustão adicionam-se outros, resultantes de fluxos de materiais e de energia da produção e transporte de milho.

### 4.1 Análise ambiental e energética

Os resultados obtidos constam na Tabela 43 e Gráfico 6 e na Tabela 44 e Gráfico 7, para a central de Sines e do Pego respectivamente. Os resultados consistem nos valores dos impactos ambientais de cada cenário e no valor percentual de IE (%IE) da co-combustão em relação à combustão, nas centrais em estudo.

A %IE é dada pela Equação 6:

$$\%IE = 100\% - \frac{I_{cc} [\text{unidade da categoria de impacto}]}{I_c [\text{unidade da categoria de impacto}]} \times 100\% \quad \text{Equação 6}$$

Em que, o  $I_{cc}$  é o impacto ambiental do cenário da co-combustão e o  $I_c$  o impacto ambiental da combustão.

Os resultados mostram que, nas condições consideradas para o presente estudo, o cenário que se apresenta como favorável para a grande maioria das categorias ambientais é o da co-combustão 10%. Este cenário também é favorável em termos energéticos. Quer isto dizer que, para a mesma produção de energia eléctrica, são consumidos menos combustíveis fósseis em ciclo de vida.

Em geral, a co-combustão 10% faculta uma redução dos principais poluentes emitidos em todo o sistema em relação à combustão. O fluxo de carvão diminui e a queima da mistura, de *E. globulus* com carvão, emite, para a maioria dos poluentes, uma concentração mais baixa do que na combustão. Uma vez que é na mineração, transporte e queima de carvão que há maior ocorrência de pressões ambientais, a redução destes fluxos faculta uma menor emissão de poluentes responsáveis pelas categorias ambientais em análise.

Em simultâneo à redução de impactos associados à diminuição de consumo de carvão, há a introdução dos impactos provenientes da cultura energética e do transporte de biomassa. Embora os impactos ambientais provenientes do transporte e produção de *E. globulus* sejam reduzidos face aos provenientes da extracção de carvão e central termoeléctrica, estes não são desprezíveis (ver Tabela

43 e Tabela 44). Se estes impactos fossem realmente desprezíveis, ou seja se os únicos impactos ambientais derivassem do uso de carvão, teríamos que a incorporação de biomassa proveniente de uma cultura energética teria uma redução de impacto de 10% em todas as categorias ambientais em análise.

Pela análise da Tabela 43 e Tabela 44 verifica-se que o máximo de IE não é registado para nenhuma das categorias ambientais, como seria de esperar<sup>10</sup>.

Tabela 43 - Impactos ambientais da ACV da combustão e co-combustão e Impacto Evitado, central de Sines. UF: 1 kWh<sub>e</sub>.

Método	Categoria de impacto	Unidade	Sines		
			Combustão	Co-combustão	IE (%)
Eco-indicador 95	Gases com efeito de estufa	kg CO <sub>2</sub>	9,25E-01	8,41E-01	9,13
	Camada de ozono	kg CFC11	6,90E-09	6,91E-09	-0,03
	Acidificação	kg SO <sub>2</sub>	8,39E-03	7,72E-03	8,00
	Eutrofização	kg PO <sub>4</sub>	3,86E-04	3,76E-04	2,51
	Metais pesados	kg Pb	2,19E-06	2,04E-06	6,77
	Carcinogénicos	kg B(a)P	1,39E-08	1,32E-08	5,00
	Smog de verão	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	4,63E-05	4,39E-05	5,12
	Smog de inverno	kg SPM	6,52E-03	5,89E-03	9,71
	Recursos energéticos	MJ LHV	1,18E+01	1,17E+01	1,55
Eco-indicador 99 (H)	Carcinogénicos	DALY	4,27E-08	3,93E-08	8,00
	Orgânicos respiráveis	DALY	1,35E-10	1,29E-10	5,06
	Inorgânicos respiráveis	DALY	6,26E-07	5,86E-07	6,43
	Alterações climáticas	DALY	1,96E-07	1,78E-07	9,06
	Radiação	DALY	2,77E-10	2,56E-10	7,67
	Camada de ozono	DALY	5,78E-12	5,76E-12	0,27
	Ecotoxicidade	PAF*m <sup>2</sup> yr	2,09E-02	1,99E-02	5,12
	Acidificação/eutrofização	PDF*m <sup>2</sup> yr	2,24E-02	2,14E-02	4,40
	Combustíveis fósseis	MJ surplus	1,59E-01	1,54E-01	3,12

Valor de impacto evitado (%) da co-combustão em relação à combustão.

<sup>10</sup> Quando ocorre IE o valor é positivo, caso não ocorra o valor é negativo.

Tabela 44 - Impactos ambientais da ACV da combustão e co-combustão e Impacto Evitado, central do Pego. UF:1 kWh<sub>e</sub>.

Método	Categoria de impacto	Unidade	Pego		
			Combustão	Co-combustão	IE (%)
<i>Eco-indicador 95</i>	Gases com efeito de estufa	kg CO <sub>2</sub>	9,05E-01	8,21E-01	9,29
	Camada de ozono	kg CFC11	7,16E-09	6,79E-09	5,18
	Acidificação	kg SO <sub>2</sub>	4,66E-03	4,34E-03	6,69
	Eutrofização	kg PO <sub>4</sub>	3,68E-04	3,57E-04	2,92
	Metais pesados	kg Pb	2,22E-06	2,06E-06	7,28
	Carcinogénicos	kg B(a)P	1,42E-08	1,34E-08	5,99
	Smog de verão	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	4,71E-05	4,38E-05	7,05
	Smog de inverno	kg SPM	2,89E-03	2,62E-03	9,36
	Recursos energéticos	MJ LHV	1,19E+01	1,17E+01	1,84
<i>Eco-indicador 99 (H)</i>	Carcinogénicos	DALY	4,30E-08	3,95E-08	8,11
	Orgânicos respiráveis	DALY	1,38E-10	1,28E-10	7,02
	Inorgânicos respiráveis	DALY	4,17E-07	3,96E-07	5,17
	Alterações climáticas	DALY	1,92E-07	1,74E-07	9,22
	Radiação	DALY	3,12E-10	2,83E-10	9,31
	Camada de ozono	DALY	6,00E-12	5,69E-12	5,27
	Ecotoxicidade	PAF*m <sup>2</sup> yr	2,16E-02	2,00E-02	7,39
	Acidificação/eutrofização	PDF*m <sup>2</sup> yr	1,78E-02	1,71E-02	3,61
	Combustíveis fósseis	MJ surplus	1,62E-01	1,53E-01	5,33

Valor de impacto evitado (%) da co-combustão em relação à combustão.

Embora não seja do âmbito deste estudo, salienta-se que a diferença de impacto evitado entre as duas centrais prende-se essencialmente com a diferença entre as distâncias destas ao local de cultivo, de *E. globulus*, e da distância entre o entreposto de desembarque de carvão e as centrais, que se traduz num maior ou menor consumo de combustíveis fósseis.

Para a central do Pego registam-se IE positivos para todas as categorias em análise (ver Tabela 44). Conclui-se que a implementação de co-combustão a 10% nesta central, na situação em que biomassa provém de uma cultura energética localizada no RO, detém benefícios ambientais acrescidos face à combustão.

No caso da central de Sines, para a categoria de impacto camada de ozono, pelo *Eco-indicador 95*, verifica-se que a co-combustão tem mais impactos ambientais que a combustão, sendo que para as restantes categorias ocorre IE positivo (ver Tabela 43). O transporte de biomassa e a unidade silvícola representam 10% dos impactos registados na categoria camada de ozono do cenário da co-combustão, pelo *Eco-indicador 95* (ver Tabela 42), a estes ainda se adicionam os impactos provenientes da queima de biomassa. É por isso coerente que este impacto seja ligeiramente superior ao da combustão pelo *Eco-indicador 95*. Convém atender que, para esta categoria de impacto pelo *Eco-indicador 99*, ocorre, em termos percentuais, um ligeiro IE. Uma das maneiras de melhorar o desempenho ambiental é integrar o transporte de mercadorias entre as duas centrais, p. ex. o transporte por caminho-de-ferro do porto de Sines até ao Pego transportar carvão e no caminho de volta transportar biomassa. Contudo na central de Sines, embora o benefício ambiental da implementação da co-combustão 10% não seja verificado em uma das categorias ambientais, é essencial atender que nas categorias anteriormente identificadas como críticas ocorre IE positivo.

Verifica-se que, para as categorias de impacto identificadas anteriormente como críticas, ou seja de maior importância, ocorre uma redução significativa de impacto tanto na central de Sines (ver Gráfico 6) como na do Pego (ver Gráfico 7).

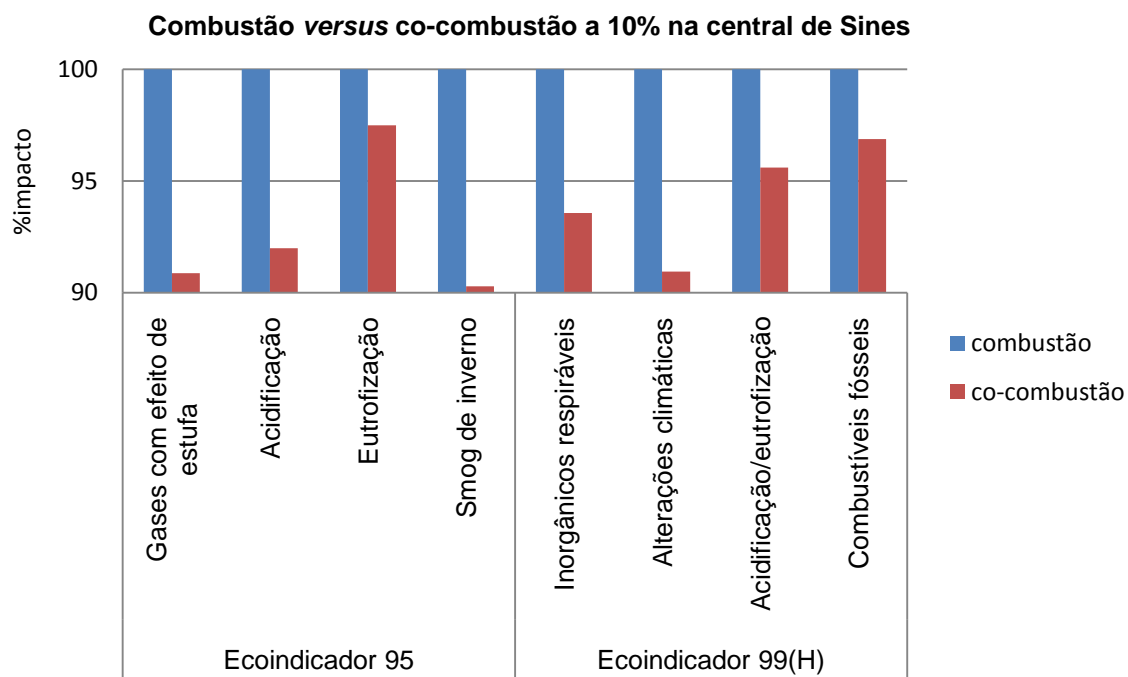


Gráfico 6 - Impactos ambientais da combustão e co-combustão na central de Sines.

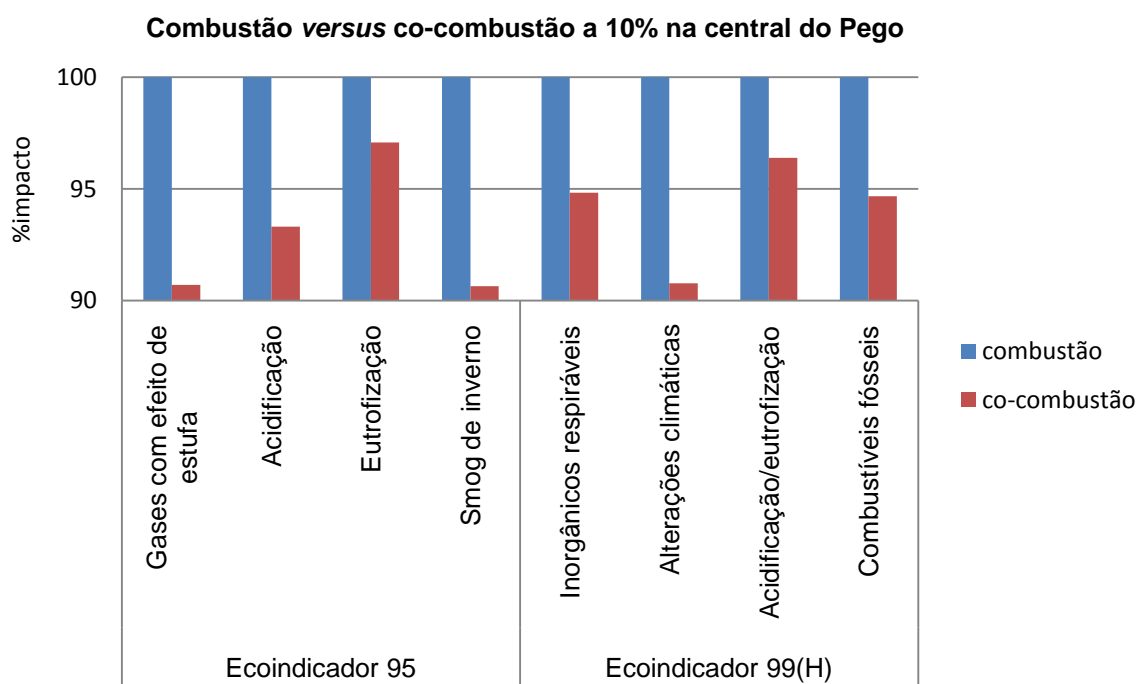


Gráfico 7 - Impactos ambientais da combustão e co-combustão na central do Pego.

Pela análise do Gráfico 6 e Gráfico 7 conclui-se que a redução mais significativa e importante ocorre na categoria de impacto GEE e alterações climáticas. Para as categorias ambientais smog de inverno e acidificação também se regista uma redução acentuada de impacto na co-combustão.

Com uma redução menos acentuada surge a categoria inorgânicos respiráveis e consumo de combustíveis fósseis. Embora ocorra uma redução mássica de carvão na co-combustão, é necessário o consumo de outros combustíveis fósseis na unidade silvícola e no transporte de biomassa até à central.

A aplicação de fertilizantes em conjunto com a utilização de combustíveis fósseis na unidade silvícola e transporte de biomassa, contribui largamente para a redução de IE menos significativo, na categoria de impacto eutrofização.

Conclui-se que as percentagens de impacto indicadas no Gráfico 6 e Gráfico 7 estão sempre situadas entre os 90% e os 100%, tomando como valores de referência os impactos da combustão (100%). Estes valores estão directamente relacionados com os fluxos de input de fertilizantes e de combustíveis fósseis.

Para a validação dos resultados obtidos é realizada a comparação do valor de IE calculado para cada central, indicados na Tabela 43 para a central de Sines e Tabela 44 para a central do Pego, com os obtidos noutro estudo científico para produção de floresta dedicada e co-combustão com 10% de substituição na Tabela 45.

Tabela 45 - Comparação do impacto evitado do presente estudo com dados bibliográficos.

Emissões	IE Pego (%)	IE Sines (%)	IE (%) Referência bibliográfica: (Heller <i>et al.</i> , 2004)
CO <sub>2</sub> (kg /kWh <sub>e</sub> )	9,13	9,29	9,90
Partículas sem tamanho específico (kg /kWh <sub>e</sub> )	9,71 <sup>11</sup>	9,36	6,6
SO <sub>2</sub> (kg /kWh <sub>e</sub> )	8,00	6,69	9,5

O cenário da co-combustão providencia uma redução nas emissões de SO<sub>2</sub> devido ao teor reduzido de enxofre na biomassa (ver Tabela 37), pela diminuição da mineração, transporte e queima de carvão. O potencial de redução determinado no presente estudo da co-combustão a 10% face à combustão foi em ciclo de vida de 8,00% para a central de Sines e de 6,69% para a central do Pego. A emissão de material particulado em ciclo de vida é reduzida em 9,71% na central de Sines e em 9,36% na central do Pego. No presente estudo assumiu-se que a emissão de NO<sub>x</sub> na co-combustão seria equitativa à emissão deste poluente em combustão (pelo explicado anteriormente no Capítulo 3.3), pelo que a análise da redução do mesmo em ciclo de vida não é discutida aqui.

### **Emissões atmosféricas de CO<sub>2eq</sub>.**

No presente estudo pela ACV, conclui-se que a co-combustão, em relação à combustão na central termoeléctrica do Pego e de Sines, tem um potencial de redução de CO<sub>2eq</sub> favorável.

Na central de Sines a redução, em ciclo de vida, da emissão de CO<sub>2eq</sub> é de 9,13% e na central do Pego de 9,29%. Na central de Sines, para o cenário da combustão, há a emissão total de 925 g CO<sub>2eq</sub>/kWh<sub>e</sub> e na central do Pego a emissão de 905 g CO<sub>2eq</sub>/kWh<sub>e</sub>, 94% destas emissões provêm da central termoeléctrica pela emissão de CO<sub>2</sub> e 6% pela mineração e transporte de carvão. A co-

<sup>11</sup> Refere-se apenas a partículas de dimensão reduzida (SPM)

combustão providencia a emissão total de 841g CO<sub>2</sub> eq./kWh<sub>e</sub> na central de Sines e 821 g CO<sub>2</sub> eq./kWh<sub>e</sub> na central do Pego. A co-combustão a 10% na central termoelétrica contribui para 93% destas emissões, a mineração e transporte de carvão 6% e apenas com 1% de contribuição surge a unidade silvícola.

### Ciclo de vida de CO<sub>2</sub> na produção de floresta dedicada e correspondente utilização energética

No que concerne à redução de emissões de CO<sub>2</sub> da co-combustão, em relação à combustão, ocorre em ciclo de vida para o cenário do Pego a redução total de 9,6% e para o caso de Sines a redução de 9,4% por kWh<sub>e</sub>. Na Tabela 46 estão reportados os valores das emissões de CO<sub>2</sub> em ciclo de vida em ambos os cenários para cada central.

Tabela 46 – Emissões de CO<sub>2</sub> em ciclo de vida e pela queima de combustível.  
Fonte: dados extraídos do SimaPro

Emissões atmosféricas (gCO <sub>2</sub> /kWh <sub>e</sub> )	Pego		Sines	
	Combustão	Co-combustão	Combustão	Co-combustão
Total de ciclo de vida	898,12	811,97	917,98	831,45
Queima de combustível	844,00	759,60	866,87	780,18

Um dos benefícios ambientais da biomassa, geralmente aceite na comunidade científica, é a emissão atmosférica neutra de CO<sub>2</sub>, ou seja o CO<sub>2</sub> emitido pela sua queima é o mesmo que a árvore absorve durante o seu crescimento, resultando num balanço nulo para o aumento de CO<sub>2</sub> atmosférico.

Uma vez que se trata de uma cultura dedicada, é necessário ponderar a emissão de CO<sub>2</sub> que ocorre em todo o sistema produtivo até ao seu uso final, p. ex. pelo equipamento mecanizado e fertilização. Há que ter em consideração os seguintes fluxos, que inferem alguma complexidade a esta questão: emissões durante a produção de biomassa na unidade silvícola e durante o seu transporte, o sequestro de carbono (C) no solo, e por fim nem todo o C contido na biomassa é convertido em CO<sub>2</sub>. Para compreender o potencial de redução de CO<sub>2</sub> pelo uso de biomassa é realizado um balanço, sendo o resultado final apresentado sobre a forma de percentagem de CO<sub>2</sub> que é reciclado dentro das fronteiras de estudo, pela Equação 7:

$$\begin{aligned} \% CO_2 \text{ renovável} &= 100\% - \frac{\text{Emissões}}{\text{Absorvido}} \left[ \frac{\frac{\text{g}}{\text{kWh}_e}}{\frac{\text{g}}{\text{kWh}_e}} \right] \times 100\% = \\ &= 100\% - \frac{U.Silvicola \frac{\text{g}}{\text{kWh}_e} + Transporte \frac{\text{g}}{\text{kWh}_e} + Central \frac{\text{g}}{\text{kWh}_e}}{\text{Absorvido} \frac{\text{g}}{\text{kWh}_e}} \times 100\% \end{aligned} \quad \text{Equação 7}$$

Na Equação 7 as *Emissões* correspondem à emissão de CO<sub>2</sub> (g/kWh) no sistema, depois de ser atribuído um crédito à quantidade de C absorvido pela biomassa. O CO<sub>2</sub> é emitido na unidade silvícola por meio de operações mecanizadas e da fertirrigação, durante o transporte de biomassa e na central devido ao transporte de cinzas resultantes da queima da biomassa. O denominador *Absorvido* é a quantidade de CO<sub>2</sub> (g/kWh) absorvido durante o crescimento da árvore.

Para determinar o CO<sub>2</sub> absorvido durante o crescimento da árvore é preciso conhecer a quantidade de C presente na biomassa, o qual consta na Tabela 37. Admite-se que o CO<sub>2</sub> absorvido pela biomassa corresponde ao C assimilado pela árvore, ou de outra maneira o CO<sub>2</sub> libertado pela queima de biomassa corresponde ao CO<sub>2</sub> que esta absorveu durante o crescimento.

Para quantificar o CO<sub>2</sub> absorvido pela biomassa, considera-se que todo o C presente na biomassa corresponde à absorção de CO<sub>2</sub> atmosférico. Se tivermos em consideração a massa molar vem que:

$$\frac{12 \text{ g } C_{fixo}/mol}{44 \text{ g } CO_2/mol} = 0,27(27) \frac{\text{g } C_{fixo}/mol}{\text{g } CO_2/mol}$$

Significa que, por cada 0,27(27) kg de C incorporado na biomassa, há a absorção de 1 kg de CO<sub>2</sub> atmosférico. Em 1 kg de biomassa contem 0,482 kg C, considerando a análise elementar indicada na Tabela 37. Para produzir 1 kWh<sub>e</sub> em co-combustão 10% é necessário 0,056 kg (base seca) de *E. globulus*, pelo que ocorre a absorção de 99,061 g CO<sub>2</sub> por 1 kWh<sub>e</sub> de energia produzida na central.

Para determinar o ciclo de vida de CO<sub>2</sub> é necessário conhecer a emissão de CO<sub>2</sub> por actividades e processos relacionados com a produção e utilização de *E. globulus* (estes dados estão reportados na Tabela 47). A percentagem de CO<sub>2</sub> renovável, indicada na Tabela 47, é superior na central termoeléctrica do Pego, 96,37%, uma vez que o transporte de biomassa apenas é realizado num trajecto de 50 km enquanto que em Sines é 200 km e a percentagem de CO<sub>2</sub> renovável é de 94,87%. A distância entre a central ao local de plantação assume aqui importância. Quanto maior o trajecto de transporte de biomassa, maior o consumo de combustíveis fósseis, o que se traduz em uma maior quantidade de CO<sub>2</sub> emitido para a atmosfera não renovável dentro das fronteiras de estudo.

Tabela 47 - Dióxido de carbono emitido e absorvido pela biomassa. UF: 1 kWh<sub>e</sub>

	Sines	Pego
Absorvido no crescimento de <i>E. globulus</i> (gCO <sub>2</sub> /kWh <sub>e</sub> )	99,06	99,06
U. Silvícola (gCO <sub>2</sub> /kWh <sub>e</sub> )	3,097	3,097
Transporte (gCO <sub>2</sub> /kWh <sub>e</sub> )	1,977	0,494
Central (gCO <sub>2</sub> /kWh <sub>e</sub> )	0,005	0,005
Emissões (gCO <sub>2</sub> /kWh <sub>e</sub> )	5,079	3,596
CO <sub>2</sub> renovável (%)	94,873	96,370

Pela Tabela 47, é possível determinar que 3,63% e 5,13%, respectivamente para o cenário do Pego e Sines, das emissões totais de CO<sub>2</sub> relacionadas com a produção e utilização final de *E. globulus* são de facto emitidas para a atmosfera. Ou seja 3,63% e 5,13% das emissões totais de CO<sub>2</sub> não são passíveis de serem absorvidas durante o processo fotossintético e de entrar para o ciclo de vida do CO<sub>2</sub> dentro da fronteira de estudo, como representado na Figura 12.

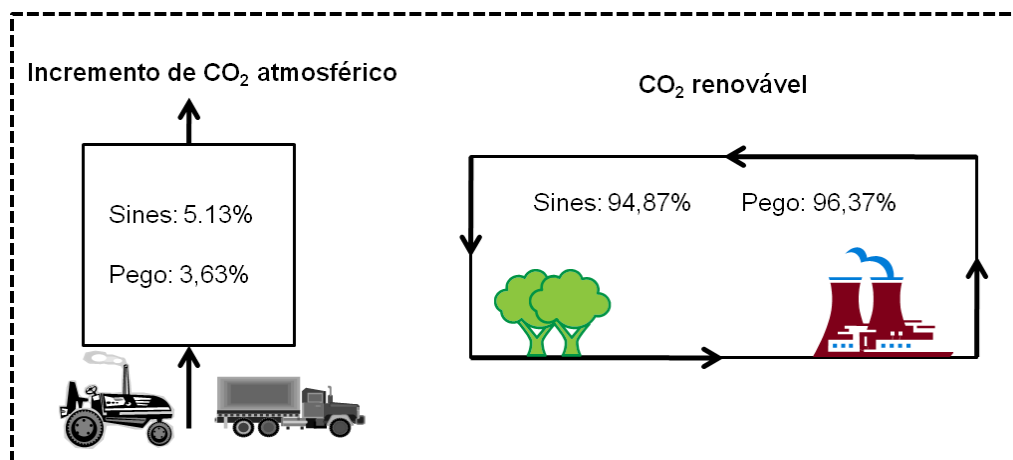


Figura 12 - Ciclo de vida de CO<sub>2</sub> dentro da fronteira de estudo. UF: 1 kWh<sub>e</sub>.

Os valores determinados pressupõem que a capacidade de sequestro de C no solo é nula. A capacidade anual de acumulação de C no solo em culturas dedicadas de árvores de curta rotação é

0,272 ton/ha (Mann e Spath, 1997; Vega *et al.*, 2010). Contudo, é importante denotar que, se o solo se encontrar degradado pelas operações mecanizadas, compactação do solo e deterioração das características físico-químicas, a capacidade de acumulação de C fica comprometida. Pelo que se optou por considerar que a capacidade de acumulação de C nula.

## 4.2 Análise ambiental e energética pela alteração do uso do solo

Uma vez que a produção de milho é comum no RO (INE, 2010), assume-se que a produção de *E. globulus* concorre com a produção de milho na região. É por isso contabilizada a importação de milho da ARG, que é um dos principais países exportadores de milho para Portugal (Teixeira *et al.*, 2007).

Para determinar os impactos ambientais associados à mudança de uso de solo e, conseqüente, alteração da localização da unidade produtiva de milho, é essencial perceber que a cultura de milho detém impactos ambientais. No presente estudo, para determinar estes impactos nas respectivas regiões, teve-se como base o estudo realizado por Teixeira *et al.* (2007), no qual é efectuado a ACV para o milho produzido no RO e para o importado da ARG. Na Tabela 9 estão reportadas a produtividade de milho e de *E. globulus* no RO, sendo a produtividade de milho na ARG de 8,5 ton/ha (Teixeira *et al.*, 2007).

Na Tabela 48 constam os impactos do cultivo de milho e de *E. globulus* por 1 ha de terreno. É possível verificar que os impactos ambientais, por área de plantação (1 ha), são sempre inferiores para a produção de *E. globulus* no RO, comparativamente à produção de milho. De facto, este resultado é explicado por uma menor intensidade em factores de produção. Relativamente aos impactos da produção de milho no RO e na ARG, há que ter em consideração que estes são distintos entre as duas regiões porque estas possuem: diferentes factores de produção, diferentes produtividades (RO - 13 t/ha, ARG - 8,5 t/ha) e que aos impactos da produção de milho na ARG somam-se os impactos do transporte do mesmo para Portugal.

Tabela 48 - Impacto ambiental do cultivo de milho no RO e ARG e *E. globulus* no RO. UF: 1 ha.

Método	Categoria de Impacto	Unidade	Milho (ARG)	Milho (RO)	<i>E. globulus</i> (RO)
Eco-indicador 95	Gases com efeito de estufa	kg CO <sub>2</sub>	4,93E+03	5,46E+03	1,55E+03
	Camada de ozono	kg CFC <sub>11</sub>	3,83E-04	5,59E-04	5,15E-05
	Acidificação	kg SO <sub>2</sub>	6,63E+05	6,11E+05	7,83E+00
	Eutrofização	kg PO <sub>4</sub>	1,45E+06	1,69E+04	1,12E+00
	Metais pesados	kg Pb	4,25E-02	8,97E-02	2,70E-03
	Carcinogénicos	kg B(a)P	3,83E-04	7,54E-04	1,30E-04
	Smog de verão	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,45E+00	2,34E+00	2,87E-01
	Smog de inverno	kg SPM	1,70E+05	1,17E+01	2,27E+00
	Recursos energéticos	MJ LHV	4,08E+04	5,98E+04	1,36E+04
Eco-indicador 99 (H)	Carcinogénicos	DALY	4,42E-04	1,30E-03	1,08E-05
	Orgânicos respiráveis	DALY	4,51E-06	7,15E-06	8,48E-07
	Inorgânicos respiráveis	DALY	5,44E-03	6,11E-03	1,03E-03
	Alterações climáticas	DALY	1,19E-03	1,27E-03	3,64E-04
	Radiação	DALY	8,25E-06	1,17E-05	4,54E-07
	Camada de ozono	DALY	3,32E-07	4,94E-07	4,14E-08
	Ecotoxicidade	PAF*m <sup>2</sup> yr	1,19E+03	2,99E+03	5,77E+01
	Acidificação/eutrofização	PDF*m <sup>2</sup> yr	4,34E+02	4,42E+02	5,04E+01
Combustíveis fósseis	MJ surplus	5,02E+03	7,41E+03	1,68E+03	



Para determinar a alteração do uso do solo é necessário atender à taxa de substituição de biomassa em relação à cultura alimentar, à expansão da área cultivada, à redução do período de rotação e à produtividade (Cherubini *et al.*, 2009). É possível constatar, pela análise da Tabela 9, que a produção de 0,06 kg de matéria seca de *E. globulus* faz com que seja importado 0,05 kg de milho.

Os impactos ambientais associados à alteração do uso do solo são determinados, para cada categoria em estudo, com base no diferencial de impactos entre a produção de milho no RO e do importado da ARG. O valor remanescente deste cálculo é o factor de alteração do uso do solo (FAUS) e consta na Tabela 49.

Tabela 49 - Factor de Alteração do Uso do Solo. UF: 1 kWh<sub>e</sub>.  
FAUS= Impactos do milho ARG - Impactos do milho RO

Método	Categoria de impacto	Unidade	FAUS
Eco-indicador 95	Gases com efeito de estufa	kg CO <sub>2</sub>	7,80E-03
	Camada de ozono	kg CFC <sub>11</sub>	9,75E-11
	Acidificação	kg SO <sub>2</sub>	1,51E+00
	Eutrofização	kg PO <sub>4</sub>	8,22E+00
	Metais pesados	kg Pb	-9,26E-08
	Carcinogénicos	kg B(a)P	-6,34E-10
	Smog de verão	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	-4,87E-07
	Smog de inverno	kg SPM	9,75E-01
	Recursos energéticos	MJ LHV	9,75E-03
Eco-indicador 99 (H)	Carcinogénicos	DALY	-2,34E-09
	Orgânicos respiráveis	DALY	-9,75E-13
	Inorgânicos respiráveis	DALY	8,29E-09
	Alterações climáticas	DALY	2,05E-09
	Radiação	DALY	3,41E-12
	Camada de ozono	DALY	4,87E-14
	Ecotoxicidade	PAF*m <sup>2</sup> yr	-4,39E-03
	Acidificação/eutrofização	PDF*m <sup>2</sup> yr	8,29E-04
	Combustíveis fósseis	MJ surplus	9,75E-04

Devido aos processos envolvidos na produção, acontece que, para determinadas categorias de impacto, o RO detém um impacto ambiental maior do que o valor da ARG, pelo que o FAUS tem um valor negativo (ver Tabela 49).

Para viabilizar a ACV da alteração do uso do solo considera-se os valores de IE de Sines e Pego na combustão e co-combustão, com e sem FAUS. O IE sem o FAUS foi previamente determinado, através da Equação 6, no Capítulo 4.1 e consta na Tabela 43 para a central de Sines e na Tabela 44 para a central do Pego. O IE pela consideração do uso do solo (IE<sub>FAUS</sub>) é determinado pela Equação 8 (aos impactos associados ao cenário da co-combustão adiciona-se o FAUS):

$$\%IE_{FAUS} = 100\% - \frac{(I_{CC} + FAUS)}{I_C} \times 100\% = \left(1 - \frac{(I_{CC} + FAUS)}{I_C}\right) \times 100\% = \left(\frac{I_C - (I_{CC} + FAUS)}{I_C}\right) \times 100\% \text{ Equação 8}$$

$$\text{em que, } \left[\frac{(I_{CC} + FAUS)}{I_C}\right] = \left[\frac{I_C - (I_{CC} + FAUS)}{I_C}\right] = \frac{[\text{unidade da categoria de impacto}]}{[\text{unidade da categoria de impacto}]} = 1$$

Quando a contabilização da alteração do uso do solo introduz mais impactos no cenário da co-combustão do que o da combustão, surge um valor negativo para o IE<sub>FAUS</sub>:

$$(I_{CC} + FAUS) > I_C \rightarrow \%IE_{FAUS} < 0$$

O contrário faculta um valor positivo. Os valores reportados na Tabela 50 correspondem ao valor absoluto, percentual, de  $IE_{FAUS}$ , nesta tabela apresenta-se um diagrama de cores com a seguinte correspondência:

$$|\%IE_{FAUS}| = \begin{cases} \%IE_{FAUS} & \text{se } \%IE_{FAUS} \geq 0, & \text{cor verde (2 tonalidades)} \\ -\%IE_{FAUS} & \text{se } \%IE_{FAUS} < 0, & \text{cor laranja (2 tonalidades)} \end{cases}$$

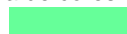
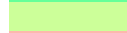


Para uma melhor interpretação dos resultados é ainda apresentado, por categoria ambiental, qual o cenário favorável (CF), combustão ou co-combustão, na análise de ACV em que se considera a alteração do uso do solo. O resultado final consta na Tabela 50 e consiste no IE da co-combustão *versus* combustão com e sem FAUS, por categoria ambiental.

Conclui-se, pela Tabela 50, que ocorre um  $IE_{FAUS}$  positivo na maioria das categorias ambientais e que o cenário mais favorável é o da co-combustão, com e sem a alteração do uso do solo. É importante verificar que pela afectação do uso do solo ocorrem três situações diferentes. Pode suceder uma diminuição, um acréscimo e por último não ocorrerem  $IE_{FAUS}$  por comparação ao IE (sem a alteração do uso do solo).

Tabela 50 - Impacto Evitado considerando a alteração do uso do solo.  
Legenda de cores abaixo da tabela. CC- co-combustão; C- combustão.

Método	Categoria de Impacto	Unidade	Sines			Pego		
			$IE_{FAUS}$	IE	CF	$IE_{FAUS}$	IE	CF
			%	%		%	%	
Eco-indicador 95	Gases com efeito de estufa	kg CO <sub>2</sub>	8,29	9,13	CC	8,43	9,29	CC
	Camada de ozono	kg CFC11	1,44	-0,03	C	3,81	5,18	CC
	Acidificação	kg SO <sub>2</sub>	18008	8,00	C	32451	6,69	C
	Eutrofização	kg PO <sub>4</sub>	2131835	2,51	C	2234583	2,92	C
	Metais pesados	kg Pb	11,01	6,77	CC	11,44	7,28	CC
	Carcinogénicos	kg B(a)P	9,57	5,00	CC	10,45	5,99	CC
	Smog de verão	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	6,18	5,12	CC	8,08	7,05	CC
	Smog de inverno	kg SPM	14934	9,71	C	33681	9,36	C
	Recursos energéticos	MJ LHV	1,47	1,55	CC	1,75	1,84	CC
Eco-indicador 99 (H)	Carcinogénicos	DALY	13,47	8,00	CC	13,56	8,11	CC
	Orgânicos respiráveis	DALY	5,78	5,06	CC	7,72	7,02	CC
	Inorgânicos respiráveis	DALY	5,10	6,43	CC	3,18	5,17	CC
	Alterações climáticas	DALY	8,01	9,06	CC	8,15	9,22	CC
	Radiação	DALY	6,43	7,67	CC	8,21	9,31	CC
	Camada de ozono	DALY	0,57	0,27	C	4,45	5,27	CC
	Ecotoxicidade	PAF.m <sup>2</sup> .yr	26,08	5,12	CC	27,73	7,39	CC
	Acidificação/eutrofização	PDF.m <sup>2</sup> .yr	0,69	4,40	CC	1,05	3,61	C
	Combustíveis fósseis	MJ surplus	2,51	3,12	CC	4,72	5,33	CC

Legenda de cores:

	$\%IE_{FAUS} > \%IE > 0\%$
	$\%IE > \%IE_{FAUS} > 0\%$
	Não ocorre IE e $IE_{FAUS}$ : $\%IE < 0\%$ e $\%IE_{FAUS} < 0\%$
	$IE_{FAUS} < 0\%$ e $IE > 0\%$

A percentagem de  $IE_{FAUS}$  reflecte a diferença de impactos da localização de produção de milho e do transporte do mesmo da ARG.

Segundo Teixeira *et al.* (2007) os aspectos ambientais mais pertinentes da produção de milho, em ACV, são, de entre outros, a acidificação e eutrofização. Para estas categorias os valores percentuais, absolutos, do  $IE_{FAUS}$  são extremamente elevados e estão relacionados com as práticas agro-florestais. As quais emitem substâncias/compostos que contribuem para as categorias citadas,

principalmente pela utilização de fertilizantes e consumo de combustíveis fósseis. O smog de inverno também tem uma  $\%IE_{FAUS}$  elevada e desfavorável. Está, sobretudo, relacionada com o transporte de milho da ARG para o mercado nacional. É importante reforçar a ideia de que o valor que estas categorias de impacto apresentam não se prende com a tecnologia, combustão ou co-combustão, mas sobretudo com os impactos da deslocalização da unidade produtiva de milho e com as práticas agro-florestais aí exercidas.

Pela análise da Tabela 50 verifica-se que, para a grande maioria das categorias ambientais, a co-combustão, com o FAUS, continua a apresentar benefícios ambientais e energéticos em relação à combustão. Há a salientar que há mais  $IE_{FAUS}$  do que a sua não ocorrência, sendo que para algumas categorias o  $IE_{FAUS}$  é superior ao IE: metais pesados, carcinogénicos, smog de verão, orgânicos respiráveis e ecotoxicidade. Contudo, para a maioria das categorias em que não ocorre  $IE_{FAUS}$ , quer isto dizer o impacto da co-combustão é superior ao da combustão, o impacto pela alteração do uso do solo é muito superior do que o impacto sem a sua contabilização.

Para a situação em que a co-combustão deixa de ter benefícios ambientais em relação à combustão, surgem as categorias: smog de inverno, acidificação, eutrofização e camada de ozono. Destas, as categorias que concorrem com maior magnitude são o smog de inverno, a eutrofização e a acidificação pelo *Eco-indicador 95* para o caso da central do Pego e de Sines. No entanto, pela análise do *Eco-indicador 99 (H)*, para a categoria acidificação e eutrofização, esta conclusão não é corroborada, apenas se mantém para o caso da central de Pego. Deve ser por isso considerado que apenas os impactos sobre as categorias eutrofização e acidificação na co-combustão, na central do Pego, são superiores aos da combustão. É de referir que a depleção da camada de ozono, pela ACV só se verifica para o caso da co-combustão em Sines. Tal resultado encontra-se relacionado com o facto de o IE já ser reduzido, pelo que quando se infere os impactos da alteração do uso do solo este fica “prejudicado”.

Pode-se concluir que, pela análise de ambos os *Eco-indicadores* e dos impactos na central do Pego e de Sines, em ciclo de vida, a categoria de impacto que concorre com maior expressão é o smog de inverno, por ser concordante em ambos os cenários.

Interessa focar a análise na categoria de impacto de GEE e alterações climáticas, uma vez que esta é a categoria que é mais vezes apontada a favor da substituição dos combustíveis fósseis. Há um decréscimo de IE em ambas as categorias. Uma redução de 8,29% de  $CO_2_{eq./kWh_e}$  face a 9,13%  $CO_2_{eq./kWh_e}$  para Sines e uma redução de 8,43% de  $CO_2_{eq./kWh_e}$  face a 9,29%  $CO_2_{eq./kWh_e}$  no Pego.

Conclui-se que, de uma maneira geral, a alteração do uso do solo pela introdução da cultura energética de *E. globulus* no RO não lesa o cenário da co-combustão em relação à combustão (ver Tabela 50). Verifica-se uma situação crítica, a maioria dos impactos ambientais aumenta, apesar de a co-combustão continuar a ter para a maioria das categorias benefícios ambientais (ver na Tabela 50 que é o cenário mais favorável - CF). Deve ser tido em consideração que  $IE_{FAUS}$  positivos em determinadas categorias de impacto acabam por estar relacionados com um incremento drástico de impactos na categoria smog de inverno.

Quando se afecta à ACV a alteração do uso do solo, não é fácil retirar conclusões simplificadas. Para tal é crucial um entendimento da caracterização ambiental de cada zona, para a compreensão assertiva de que categorias de impacto podem inferir danos maiores no ambiente. Por exemplo, as categorias de impacto eutrofização e acidificação, pelo *Eco-indicador 95*, detêm impactos extremamente negativos (ver Tabela 50), na realidade isto pode não ser verdade, porque o impacto real sobre o ecossistema depende da sua envolvência ambiental e da sua resiliência.

## 5 Conclusões e Críticas

Com este trabalho pretendeu-se realizar um estudo da viabilidade ambiental e energética de substituição de 10% de energia térmica produzida através de carvão por 10% de energia térmica produzida por biomassa de floresta dedicada de *E. globulus*, na central termoelétrica de Sines e do Pego. O estudo é efectuado num contexto de ACV e foi aqui considerado, para além da produção e queima de combustível, a implicação em termos de alteração do uso de solo agrícola.

A substituição de carvão por *E. globulus*, com origem numa cultura energética de floresta dedicada em regadio, representa, em termos de alterações climáticas e de emissão de GEE, uma medida bastante favorável. Em termos ambientais, o raio de distância entre o cultivo energético e a central apresenta-se como favorável, excepto no que concerne à depleção da camada de ozono pelo *Eco-indicador 95* para a condição limite, no presente estudo 200km. Este resultado não é no entanto corroborado pelo *Eco-indicador 99*, em que o impacto na categoria camada de ozono do cenário da co-combustão é praticamente equitativo ao do cenário da combustão.

Em termos energéticos, a substituição de carvão por biomassa apresenta uma ligeira vantagem, uma vez que em ciclo de vida, para a produção da mesma energia contida no combustível, ocorre uma diminuição de 3 a 5%, para um máximo de 10%, em combustíveis fósseis para a produção de *E. globulus* em relação ao carvão.

De um modo geral, a produção de *E. globulus* como cultura energética em termos de ACV apresenta-se como favorável em termos ambientais. Contudo, considerando que se trata de uma espécie exótica, aliado ao tipo de exploração, poderá ocorrer uma pressão acrescida sobre a biodiversidade e os recursos hídricos.

É de notar que neste estudo, pela contabilização da alteração do uso do solo, o cenário da co-combustão continua a apresentar benefícios em termos de utilização de recursos energéticos, contribuindo para uma potencial redução de importação de recursos fósseis. Em termos ambientais e de um modo geral, não são esperadas alterações nas conclusões com ou sem a afectação de uso do solo. Os potenciais impactos ambientais da alteração do uso do solo estão intimamente relacionados com o modo de produção da cultura agrícola, sendo que diferem consoante a sua localização. É por isso possível identificar como críticas algumas categorias de impacto, sendo a mais expressiva o smog de inverno, as quais se apresentam como desfavoráveis para a produção de *E. globulus* em detrimento da produção de milho no RO. Estas conclusões, pelo âmbito da ACV, não devem ser tomadas, por si só, como justificação da substituição da produção de milho por *E. globulus*. Quando falamos em alteração do uso do solo de uma cultura agrícola/alimentar por uma energética, é preciso ter consciência da situação actual e previsões futuras no que se refere à segurança alimentar mundial, à necessidade da independência energética de Portugal, à subida expectável do preço dos cereais e de combustíveis fósseis e à não menos importante necessidade de redução de emissão de GEE.

Conclui-se que, dentro do âmbito de ACV, a co-combustão a 10% de substituição de energia térmica produzida através de carvão por biomassa de cultivo energético de *E. globulus* no RO, detém

benefícios ambientais e energéticos face à combustão para a central termoelétrica de Sines (ver Gráfico 6) e central do Pego (ver Gráfico 7). Estas conclusões também são válidas para o caso da consideração da alteração do uso do solo (ver Tabela 50).

O presente estudo apresenta-se como relevante no panorama nacional, uma vez que o seu âmbito coincide com as directrizes da política energética portuguesa, tanto a nível da produção de energia eléctrica em co-combustão, como da produção de floresta dedicada para energia. O estudo acrescenta conhecimento para a comunidade científica, a nível nacional é o primeiro estudo deste cariz pelo método da ACV. De um modo geral para a comunidade científica, introduz a inovação da alteração do uso do solo, realizada de uma forma sistemática.

A realização do presente estudo teve um grau de dificuldade acrescido na fase de inventário dos processos envolvidos e respectivos fluxos de energia e materiais. De referir a não existência de dados publicados sobre a produção de cultura energética de floresta dedicada em regadio em Portugal, e em particular no RO. Para colmatar esta situação, e aproximar o melhor possível a produção de floresta para energia ao contexto do RO, para além da recolha de informação em dados bibliográficos, foi essencial a recolha de informação junto de especialistas. Foi, também, essencial proceder à simulação do crescimento e produção de povoamento florestal de *E. globulus* pela utilização de modelos de projecção do volume em pé, à quantificação de rega mediante de um balanço hídrico, à realização de um balanço de nutrientes para determinar a quantidade de fertilizantes a aplicar (num sistema com fertirrigação) de modo a garantir minimamente a perpetuidade da qualidade do solo.

O esforço realizado também consistiu, do mesmo modo, em adaptar de uma forma genérica o sistema logístico ao contexto nacional.

Relativamente às centrais em estudo destaca-se que a central de Sines não reporta dados desde 2006 sobre emissões atmosféricas pelo que uma fase do presente estudo consistiu em estimar as mesmas no decorrente ano. As emissões da co-combustão, em ambas as centrais, tiveram de ser calculadas, podendo para determinados poluentes estar sobrestimadas pelos motivos explicados no capítulo 3.3.

Concluo que os objectivos do presente estudo foram alcançados e as conclusões finais obtidas são interessantes. O âmbito e objectivo do estudo foram, sem dúvida alguma, ambiciosos. Um dos resultados do estudo, e que derivaram da sua ambição, é um bom suporte em informação e conhecimento base para trabalhos futuros na mesma área. Contudo, deve-se atender que será necessário, em futuros trabalhos, a obtenção de dados reais. Quer isto dizer que, com o actual desenvolvimento do sector bioenergético é espectável que a obtenção de dados reais seja cada vez mais acessível à comunidade científica num futuro próximo. A informação presente neste estudo permite, ainda assim, que futuros trabalhos se possam basear neste e aprimorar o mesmo, nos tópicos descritos no parágrafo anterior. O estudo assumiu que a produção de floresta incidia em terrenos do RO, os quais são por excelência solos agrícolas. Neste contexto seria interessante a consideração da produção de floresta em terrenos marginais, concluindo em que medida e escala as conclusões do presente estudo são alteradas.

Será ainda de extrema importância um estudo de viabilidade económica dos cenários elaborados no presente estudo, de forma a compreender qual o potencial de aplicação dos mesmos e a que escala. O estudo também poderia analisar os efeitos da produção destas culturas na indústria baseada na produção de madeira e concluir que zonas de não conflitualidade, de origens e destinos, existem.

Concluiu-se, no presente estudo, que a consideração da alteração do uso do solo repercute impactos ambientais positivos ou negativos, conforme o impacto associado ao uso do solo em questão. Um estudo que tenha como objectivo a análise ambiental de diferentes usos do solo, com os quais seja coerente admitir que a produção de cultura energética concorre, seria uma mais-valia para o conhecimento científico. Permitiria a compreensão de que cenários bioenergéticos apresentam efectivamente um benefício ambiental, em ciclo de vida, e em que terrenos deverão ser produzidos para maximizar os potenciais benefícios ambientais que possam possuir.

Sugere-se ainda como trabalho futuro, para os quais o presente estudo serve de base, à análise de ACV de:

- Co-combustão com diferentes taxas de substituição de carvão por biomassa e de diferentes origens de biomassa, *p. ex.* resíduos florestais a competir com culturas dedicadas;
- Centrais dedicadas de biomassa;
- Outros usos finais de *E. globulus*, como *p. ex.* a gaseificação e a produção de bioetanol no conceito das “biorefinarias do futuro”.

No presente estudo foi realizada uma análise de sensibilidade entre os diferentes cenários em estudo. A análise de incerteza foi viabilizada através da consideração de subcenários que permitem aferir da confiança nos resultados, tendo também sido efectuada uma comparação dos resultados obtidos com os disponíveis na bibliografia.





## Referências

- Alves, A., Pereira, S., Silva, J. (2007). *O Eucalipto em Portugal. Impactes Ambientais e Investigação Científica*. (I. ISBN: 978-972-8669-25-6, Ed.) Instituto Superior de Agronomia, Portugal.
- Anuário de Sustentabilidade (2010). *Caminhos Sustentáveis. A sustentabilidade como horizonte num mundo em mudança*. (R. & ISBN: 978-972-99688-3-9, Ed.) Bio rumo, Portugal.
- Basílio, A. (2004). Monitorização económica de ensaios na cultura de milho grão em regime de sementeira directa e de mobilização convencional. Direcção Regional de Agricultura e Pescas de Lisboa e Vale do Tejo, Vila Franca de Xira: Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas, Portugal.
- Batista, S., Cerejeira, M., Trancoso, A., Centeno, M., Fernandes, A. (1998). *Pesticidas e Nitratos em Águas Subterrâneas na Região do Ribatejo e Oeste em 1996*. projecto PAMAF-IED nº 4024, Portugal.
- Benyon, R., England, J., Eastham, J., Polglase, P., White, D. (2007). *Tree water use in forestry compared to other dry-land agricultural crops in the victorian context: Report prepared for the Department of Primary Industries Victoria to promote scientific knowledge in this area*. Technical report n.º159.50p. Ensis, Austrália.
- Carrilho, A., Marques, A., Acácio, V. (2001). *Caderno Técnico. O Eucalipto*. Silvicultores - Ambiente e Recursos Naturais, Federação dos Produtores Florestais de Portugal, Portugal.
- CEC (2007). Folha de dados de diversificação de energia - Portugal. *Comissão Europeia*, Portugal.
- Cherubini, F., Bird, N., Cowie, A., Jungmeier, G., Schlamadinger, B., Woess-Gallasch, S. (2009). Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resources, Conservation and Recycling* 53 , pp. 434-447.
- Coelho, P., Costa, M. (2007). *Combustão*. (I. 978-972-8620-10-3, Ed.) Portugal: Edições Orion, Portugal.
- Coleman, M., Coyle, D., Blake, J., Britton, K., Buford, M., Campbell, R. (2004). *Production of Short-Rotation Woody Crops Grown with a Range of Nutrient and Water Availability: Establishment Report and First-Year Responses*. Gen. Tech. Rep. SRS-72. NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, Estados Unidos da América.
- COM (2008). *Duas vezes 20 até 2020: As alterações climáticas, uma oportunidade para a Europa*. Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões, Bruxelas.
- COM (2007). *Enfrentar o desafio da escassez de água e das secas na União Europeia*. Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu e ao Conselho, Bruxelas.
- COM (2009). *Investing in the Development of Low Carbon Technologies (SET-Plan)*. Communication from the Commission to the European Parliament, the council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Bruxelas.
- COM (2005). *Plano de Acção Biomassa*. Comunicação da Comissão, Bruxelas.
- COM (2010). *Sustainability requirements for the use of solid and gaseous biomass sources in electricity, heating and cooling*. Report from the Commission to the Council and the European Parliament, Bruxelas.

COM (2008 b). *The Market for Solid Fuels in the EU in 2004-2006 and Trends in 2007*. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Bruxelas.

Correia, A., Oliveira, A. (2003). Principais espécies florestais com interesse para Portugal. Zonas de Influência Atlântica. Direcção Geral das Florestas. Colecção Estudos e Informação n.º 322. DGF, MADRP, Portugal.

Costa, M., Azevedo, J. (2007). Experimental characterization of an industrial pulverized coal-fired furnace under deep staging conditions. *Combustion Science and Technology* 179 , pp. 1923-1935.

Costen, P., Lockwood, C., Ou, J. (1994). *Analysis of solid waste fuels, APAS Clean Coal Technology*. London UK: Imperial College of Science, Technology and Medicine, EUcontract CT92-0002.

Crutzen, P., Mosier, A., Smith, K., Winiwarer, W. (2007). N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 7 , pp. 11191–11205.

DGEG (2009). *Estísticas rápidas. Renováveis Novembro/Dezembro, Nº 57/58*. Direcção Geral de Energia e Geologia, Portugal.

DGRF (2007a). *Análise da evolução do comercio externo de produtos florestais. Boletim de informação*. Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e Pescas: Direcção-Geral dos Recursos Florestais, Portugal.

DGRF (2007b). *Inventário florestal nacional 2005-06*. Direcção-Geral dos Recursos Florestais, Portugal.

Dias, A. (2005). *Avaliação do contributo do sector florestal para as alterações climáticas*. Universidade de Aveiro: Departamento de ambiente e ordenamento, Portugal.

Doorn, J. (1996). Combined combustion of biomass, municipal sewage sludge and coal in an atmospheric fluidized bed installation. *Fuel and Energy Abstracts* 37 , p. 204.

ECOFYS (2009). *Benchmark of bioenergy permitting procedures in the European Union*. D2 429-2006 S07.77495. DG TREN: Golder Associates, Bruxelas.

EDP (2001). *Rlatório de Ambiente*. Electricidade de Portugal, S.A, Portugal.

EEA (2007). *Environmentally compatible bio-energy potencial from European forests*. European Environment Agency, Dinamarca.

EEA (2006). *How much bioenergy can europe produce without harming the environment?* ISSN 1725-9177, European Environmental Agency, Dinamarca.

Ericsson, K. (2007). Co-firing - A strategy for bioenergy in Poland. *Energy - The international journal* 32 , pp. 1838-1847.

Escobar, J., Lora, E., Venturi, O., Yáñez, E., Castilho, E., Almazan, O. (2009). Biofuels: Environment, technology and food security. *Renewable and sustainable energy reviews* 13 , pp. 1275-1287.

FAO (2010). *Bioenergy and Food security. The BEFS analysis for Tanzania*. (I. M. Khwaja, Ed.) Food and Agriculture Organization of the United Nations, Itália.

- Ferreira, P. (2008). *Relatório de Projecto Cebio. Eixo1, Acção2: Identificação, caracterização e divulgação da envolvente do sector bioenergético*. Universidade do Minho. Relatório do projecto CEbio, Portugal.
- Gasol, C., Martínez, S., Rigola, M., Rieradevall, J., Anton, A., Carrasco, J. (2009). Feasibility assessment of poplar bioenergy systems in the Southern Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, pp. 801-812.
- Geodkoop, M. (1996). *The ecoindicator 95. Final report*. PRé Consultants, Amersfoort, Holanda.
- Goedkopp, M., Spriensma, R. (2001). *The ecoindicator 99. A damage oriented method for life cycle impact assessment, methodology report*. PRé consultants, Amersfoort, Holanda.
- Groot, P., Hemstock, S., Woods, J. (2007). *The Biomass Assessment Handbook. Bioenergy for a Sustainable Environment*. ISBN-13: 978-1-84407-285-9. Earthscan, Inglaterra.
- Guo, L., Sims, R., Horne, D. (2006). Biomass production and nutrient cycling in Eucalyptus short rotation energy forests in New Zealand: II. Litter fall and nutrient return. *Biomass and Bioenergy* 30, pp. 393-404.
- Guo, L., Sims, R., Horne, D. (2002). Biomass Production and nutriente cycling in Eucalyptus short rotation energy forests in New Zealand. I: Biomass and nutriente accumulation. *Bioresource Technology* 85, pp. 273 - 283.
- Heller, M., Keoleian, G., Volk, T. (2003). Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. *Biomass and Bioenergy* 25, pp. 147-165.
- Heller, M., Keoleian, G., Mann, M., Volk, T. (2004). Life cycle energy and environmental benefits of generating electricity from willow biomass. *Renewable Energy* 29, pp. 1023-1042.
- IEA (2008). *Energy technology perspectives. In support of the G8 Plan Action. Scenarios & Strategies to 2050*. International Energy Agency, França.
- IEA (2007). *Good Practice Guidelines: Bioenergy Project Development and Biomass Supply*. International Energy Agency, França.
- IEA (2010). *Key world energy statistics*. International Energy Agency, França.
- IEA (2009). *Short Rotation Crops for Bioenergy Systems. Identification of potencial co-products from short-rotations crops grown as an energy source*. International Energy Agency, Nova Zelândia.
- IEA (2004). *World Energy Outlook*. International Energy Agency, França.
- INE (2009). *Indicadores agro-ambientais 1989-2007. Informação à comunicação social*. Instituto Nacional de Estatística, Portugal.
- INE (2010). *Estatísticas agrícolas 2009*. ISBN 978-989-25-0085-4. Instituto Nacional de Estatística, I.P., Portugal.
- Keoleian, G., Volk, T. (2005). Renewable energy from willow biomass crops: Life cycle energy, environmental and economic performance. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24, pp. 385-406.
- Kitani, O., Hall, C. W. (1989). *Biomass Handbook*. New York: Gordon and Breach science publishers, Estados Unidos da América.
- Kurkela, E. (1996). *Formation and removal of biomass-derived contaminants in fluidized-bed gasification processes*. VTT Publications 287, Finlândia.

- Loo, S., Koppejan, J. (2008). *The Handbook of Biomass Combustion & Co-firing*. ISBN-13: 9781844072491. Earthscan, Inglaterra.
- Luger, E. (2003). *Eucalypt: Introduction as energy crop*. BLT Wiselburg, Austria.
- MA (1999). *Plano da bacia hidrológica do rio Tejo. 1ª fase. Análise e diagnóstico da situação de referência. Volume III - Análise*. Portugal: Ministério do Ambiente, Portugal.
- Mann, K., Spath, L. (1997). *A life cycle assessment of a biomass gasification combined-cycle system*. US Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory, Golden CO, Estados Unidos da América.
- Mann, M., Spath, P. (2001). A life cycle assessment of biomass cofiring in a coal-fired power plant. *Clean prod processes* 3 , pp. 81-91.
- Paralta, E., Oliveira, M., Francês, A., Ribeiro, L., Cerejeira, M. (2001). *Aplicação de SIG na avaliação da vulnerabilidade aquífera e cartográfica da contaminação agrícola por pesticidas e nitratos na região do Ribatejo*. In Actas do Seminário "A Hidroinformática em Portugal", ed CDROM. LNEC, Portugal.
- Pegop (2009). *Sumário 2008. Segurança Ambiente. Pegop*. Tejo Energia. Produção e Distribuição de Energia Eléctrica, S.A, Portugal.
- Pereira, H. (1999). Nutrient Content of Eucalypt Biomass. In E. Network (Ed.). Instituto Superior de Agronomia, Portugal.
- Pluimers, J., Kroeze, C., Bakker, E., Challa, H., Hordijk, L. (2000). Quantifying the environmental impact of production in agriculture and horticulture in the Netherlands: which emissions do we need to consider? *Agriculture systems* 66 , pp. 167-189.
- Rafaschieri, A., Rapaccini, M., Manfrida, G. (1999). Life cycle assessment of electricity production from poplar energy crops compared with conventional fossil fuels. *Energy conversion & management* 40 , pp. 1477-1493.
- Ralph, E. H., Drusilla, R. (2000). Sustainable production of short rotation forest biomass crops using aqueous waste management systems. *Biomass and Bioenergy* 15, pp 75 - 81.
- Rechberger, P., Lötjönen, T., Pahkala, K., Vesanto, P., Hiltunen, M., Xiong, S. (2009). *Energy from field energy crops - a handbook for energy producers*. Intelligent Energy, Europe: Jyväskylä Innovation Oy & MTT Agrifood Research, Finlândia.
- Resh, C., Battaglia, M., Worledge, D., Ladiges, S. (2003). Coarse root biomass for eucalypt plantations in Tasmania, Australia: sources of variation and methods for assessment. (s. Verlag, Ed.) *Trees* 13 , pp. 389 - 399.
- Röder, A., Bauer, C., Donnes, R. (2007). *Sachbilanzen von Energiesystemen. Final report No. 6ecoinvent data v2.0*. Dones R. Volume: 6. Swiss Centre for LCI, PSI. Dübendorf and Villigen, Suíça.
- Sands, P. (2004). *3PGpjs vsn 2.4 - a user friendly interface to 3-PG, the Landsberg and Waring model of forest productivity*. Technical Report 140. Cooperative Research Centre for Sustainable Production Forestry, Australia.
- Santos, F. (2007). *Que futuro? Ciência, tecnologia, desenvolvimento e ambiente*. (G. Valente, Ed.) Grávida. Fundação Calouste Gulbenkian, Portugal.

- Santos, J. (2009). *Avaliação da biomassa de plantas bioenergéticas*. Instituto Superior de Agronomia, Portugal.
- Sims, E., Venturi, P. (2004). All-year-round harvesting of short rotation coppice eucalyptus compared with the delivered costs of biomass from more conventional short season, harvesting systems. (Elsevier, Ed.) *biomass and Bioenergy* 26 , pp. 27 - 37.
- Sims, E., Senelwa, K., Maiava, T., Bullock, B. (1999). Eucalyptus species for biomass energy in new Zealand - Part II Coppice performance. *Biomass and Bioenergy* 17 , pp. 333 - 343.
- Souch, C., Martin, P., Stephens, W., Spoor, G. (2004). Effects of soil compaction and mechanical damage at harvest on growth and biomass production of short rotation coppice willow. (K. A. Publishers, Ed.) *Plant and soil* 263 , pp. 173 - 182.
- Spinelli, R., Ward, S., Owende, P. (2009). A harvest and transport cost model for Eucalyptus spp. fast-growing short rotation plantations. *Biomass and Bioenergy* 33 , pp. 1265-1270.
- Teixeira, R., Domingos, T., Simões, A., Rodrigues, O. (2007). Local vs global grain maize production. Where should you get your maize from? *Environment and Energy Section, DEM, Instituto Superior Técnico*.
- The Bioenergy international. (2010). PelletsMap. (L. Ljungblom, Ed.) *The Bioenergy internacional*. n.º7 - April 2010, Espanha.
- Tomé, M., Ribeiro, F., Soares, P. (2001). *O modelo Globulus 2.1*. Universidade Técnica de Lisboa - Instituto superior de Agronomia. Departamento de Engenharia Florestal. n.º1/2001. Grupo de Investigação e Modelação de Recursos Florestais, Portugal.
- USDA Forest Service (1998). Opportunities for growing short-rotation woody crops in agroforestry practices. *Agroforestry notes. National agroforestry center. Note-10, Rocky Mountain Research Station*, Estados Unidos da América.
- Vega, D., Dopazo, R., Ortiz, L. (2010). *Manual de cultivos energéticos*. (U. d. Vigo, Ed.) ISBN: 678-84-95046-45-1, Gamesal, Vigo.
- Vis, M., Vos, J., Berg, D. (2008). *Sustainability Criteria & Certification Systems for Biomass Production. Final report*. DG TREN, European Commission. BTG biomass technology group BV, Holanda.
- Vital, M. (2007). Impacto Ambiental de florestas de eucalipto. *Revista do BNDES* 14 , pp. 235-276.
- Walker, J. (2006). Primary Wood Processing. In *Principles and Practice* (pp. 70). Springer, Holanda.
- WCI (2005). *The Coal Resource. A comprehensive overview of coal*. London: World Coal Institute, Inglaterra.

### Comunicações Pessoais:

Eng. <sup>a</sup> Clara Araújo	Altri	Gestor Investigação e Desenvolvimento
Eng. <sup>a</sup> Hermínia Sousa	AFN	Direcção da Unidade das Fileiras Florestais
Eng. <sup>o</sup> Alejandro García	Iberflorestal	Administrador
	ENCE	Técnico da Divisão Florestal
Eng. <sup>o</sup> José Carvalho	EnerForest	Director da Enerforest do Grupo Portucel/Soporcel
Eng. <sup>o</sup> Luís Leal	Altri	Director de Desenvolvimento
Doutora Helena Martins	IST	Departamento de Engenharia Mecânica Área Científica de Ambiente e Energia
Prof. Doutor Mário Costa	IST	Departamento de Engenharia Mecânica Área Científica de Ambiente e Energia
Prof. Doutora Paula Soares	ISA	Centro de Estudos Florestais

### Contacto da Autora:

[maria.goncalves@ist.utl.pt](mailto:maria.goncalves@ist.utl.pt)

[gs.margarida@gmail.com](mailto:gs.margarida@gmail.com)

# Anexo I

Dados de *output* do 3PG

Run type	SingleSite	<u>Stand initialisation and site factor data</u>				<u>Silvicultural events</u>	
Site	FER C	Year planted	2010	Latitude	39,23	Irrigation	
Species	E. Globulus modified	Month planted	Oct	Fertility rating	1	Age	ML/ha/yr
Climate data	FER Metadata	Initial year	0	Soil class	cl	1	5
Met station	Mean data	Initial month	Oct	Maximum ASW	150	2	5
Title	Santarém	End age	3	Minimum ASW	0	3	5
		Seedling mass	0,95725				
		Initial WF					
		Initial WR					
		Initial WS					
		Initial stocking	3000				
		Initial ASW	150				
		<u>Output details</u>					
		Output frequency : A					
		Output data : BasArea, WL, NPP					
		Output sheet :					
		Output ages :					

#Output from 3PGjs 2.5 / 3-PG March 2005  
Stand development for FER C  
Santarém

Year month	Stand age	Stems	Foliage DM	Root DM	Stem DM	Stand volume	LAI	MAI	Mean DBH	Basal area	Total litter	NPP
2010 Oct	0,0	3000	0,001436	0,000718	0,000718	0,000399	0,001881	0	0,13347	0,004197		
2011 Oct	1,0	3000	0,410097	0,662262	1,064505	1,007107	0,126539	1,007107	1,982252	0,925825	0,009931	2,156874
2012 Oct	2,0	3000	2,694143	6,288433	12,06296	14,74361	1,123871	7,371806	4,86125	5,5681	0,200475	19,39459
2013 Oct	3,0	3000	4,916427	13,46565	28,20026	39,97343	2,094671	13,32448	6,653151	10,42956	0,776862	27,2214

Run type : SingleSite

Site : FER C  
 Species : E. Globulus - modified  
 Climate data : FER Metdata  
 Met station : Mean data  
 Title : Santarém

<u>Stand initialisation and site factor data</u>	
Year planted =	2010
Month planted =	Oct
Initial year =	0
Initial month =	Oct
End age =	3
Seedling mass =	0,95725
Initial WF =	
Initial WR =	
Initial WS =	
Initial stocking =	15000
Initial ASW =	150

<u>Output details</u>	
Output frequency :	A
Output data :	BasArea, WL, NPP
Output sheet :	
Output ages :	

<u>Silvicultural events</u>	
Irrigation	
Age	MI/ha/yr
1	5
2	5
3	5

#Output from 3PGpjs 2.5 / 3-PG March 2005  
 Stand development for FER C  
 Santarém

Year month	Stand age	Stems	Foliage DM	Root DM	Stem DM	Stand volume	LAI	MAI	Mean DBH	Basal area	Total litter	NPP
2010 Oct	0,0	15000	0,007179	0,00359	0,00359	0,001994	0,009405	0	0,13347	0,020986798		
2011 Oct	1,0	15000	1,621258	2,524509	4,001466	3,785706	0,543738	3,785706	1,783921	3,749145994	0,043605	8,232006
2012 Oct	2,0	15000	5,183953	10,39037	19,15472	23,41133	2,963572	11,70567	3,181789	11,92680246	0,560631	27,80668
2013 Oct	3,0	15000	8,087426	18,23712	36,97296	52,40859	3,739349	17,46953	4,057046	19,39103586	1,598025	31,27993



