

AVALIAÇÃO SÓCIO- ECONÓMICA E AMBIENTAL DA CO-COMBUSTÃO DE CARVÃO, BIOMASSA E RESÍDUOS NÃO TÓXICOS

Ana Sofia Garcia dos Santos

*Dissertação apresentada à
Universidade Nova de Lisboa,
Faculdade de Ciências e Tecnologia,
para a obtenção do grau de Mestre
em Engenharia do Ambiente*

**Monte da Caparica
Julho 2008**

A Ti, obrigada

FICHA TÉCNICA

Título: Avaliação Sócio-Económica e Ambiental da Co-Combustão de Carvão, Biomassa e Resíduos não Tóxicos

Autor: Ana Sofia Garcia dos Santos

Objectivo do presente trabalho: Dissertação apresentada à Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Ambiente

Âmbito do estudo: Comparação de indicadores sócio-económicos e ambientais na produção de energia numa central termoeléctrica, por leito fluidizado, através da co-combustão de carvão, biomassa e resíduos não tóxicos. Dissertação realizada no âmbito do projecto COPOWER

Orientador: Professor Doutor Nuno Lapa (Professor Auxiliar da FCT-UNL)

Co-Orientador: Doutora Helena Lopes (Investigadora Auxiliar do INETI)

Contacto do autor:
anasgs82@hotmail.com

Local: Monte da Caparica

Data: Julho de 2008

O conteúdo da presente dissertação é da inteira responsabilidade do autor.

Não é autorizada a cópia, total ou parcial, do conteúdo da presente dissertação.

É autorizada a citação do conteúdo da presente dissertação, desde que acompanhada da respectiva referência bibliográfica, de acordo com as normas internacionais de citação de trabalhos científicos.

Copyright

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Nuno Lapa, Professor Auxiliar da UNL-FCT, pela orientação do presente trabalho, e pela motivação, apoio e incentivo sempre presentes.

À Doutora Helena Lopes, Investigadora Auxiliar do Departamento de Engenharia Energética e Controlo Ambiental do INETI, co-orientadora do presente trabalho, pela co-orientação, e pela sua disponibilidade e motivação.

Aos meus pais e ao Tiago, pelo apoio. Ao Pedro, pela paciência e pela ajuda constantes.

Aos que fazem parte da vida a que chamo minha e a ajudam a construir todos os dias.

RESUMO

O projecto Europeu intitulado “COPOWER” teve como objectivo o estudo dos efeitos sinérgicos da utilização de biomassa e resíduos não tóxicos na produção de energia eléctrica através da co-combustão com carvão. Inserida no projecto COPOWER, a presente tese avalia, sob os pontos de vista ambiental e sócio-económico, a substituição parcial do carvão por biomassa e resíduos não tóxicos.

Foram estudados três cenários: o cenário 0 onde foi utilizado apenas carvão; o cenário 1 que correspondeu à co-combustão de carvão, lamas de ETAR e farinha de carne e ossos; e o cenário 2 que correspondeu à co-combustão de carvão, lamas de ETAR e *peletes* de madeira. Os ensaios de combustão e co-combustão foram realizados na Central Termoeléctrica de “Stadtwerke Duisburg AG” (SWDU), em Duisburg, na Alemanha, entre Agosto de 2004 e Novembro de 2005.

Para se proceder à avaliação dos três cenários foram utilizados diferentes indicadores sócio-económicos e ambientais. Os indicadores ambientais usados foram os seguintes: Uso de combustíveis fósseis; Emissão evitada de gases com efeito de estufa (GEE); Emissão de gases com efeito acidificante; Emissão de compostos que contribuem para a eutrofização; Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico; Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono.

Os indicadores sócio-económicos usados foram os seguintes: Potencial de criação de emprego; Custo de produção de electricidade; Custo da redução das emissões de CO₂.

Os valores dos indicadores foram convertidos numa escala uniformizada, sendo depois agregados. Foram também atribuídos pesos a cada indicador ambiental e sócio-económico, de forma a se poder avaliar a importância relativa de cada variável.

Atribuindo uma ponderação idêntica ao grupo de indicadores ambientais e ao grupo de indicadores sócio-económicos, observou-se que o cenário 1 apresentava o melhor comportamento, especialmente nos indicadores de emissão evitada de GEE, emissão de compostos que contribuem para a eutrofização e depleção da camada de ozono, custo de

produção de electricidade e custo da redução das emissões de CO₂. O cenário 2 apresentou um comportamento muito desfavorável nos indicadores emissão de compostos que contribuem para a eutrofização, nevoeiro fotoquímico, e depleção da camada de ozono, apesar de ser o indicador com melhor comportamento no potencial de criação de emprego. O cenário 2 tem uma clara desvantagem, relacionada com o custo elevado das *peletes* de madeira, o que afecta a sua competitividade.

Em seguida, procedeu-se a uma análise de sensibilidade a pesos de indicadores e a factores de custo. Na análise de sensibilidade a pesos de indicadores, testou-se o aumento da ponderação do grupo de indicadores ambientais face aos sócio-económicos, e do grupo dos sócio-económicos face aos indicadores ambientais. Na análise de sensibilidade a custos, testou-se a sensibilidade dos cenários à aplicação de licenças de emissão de CO₂, taxa de carbono e variação do preço do carvão. Nas várias hipóteses testadas, o cenário 1 apresentava os resultados mais favoráveis.

Conclui-se que, sob os pontos de vista ambiental e sócio-económico, o melhor cenário para produção de energia eléctrica é o de co-combustão de carvão, com lamas de ETAR e farinha de carne e ossos. É importante considerar que, ainda que este cenário seja o mais competitivo, não é possível garantir a longo prazo a existência ou disponibilidade da farinha de carne e ossos para substituição do carvão.

PALAVRAS-CHAVE: Co-combustão, Carvão, Biomassa, Peletes de madeira, Lama de ETAR, Farinha de carne e ossos, avaliação ambiental e sócio-económica.

ABSTRACT

The European Project “COPOWER” aimed to study the synergic effects of biomass and non-toxic wastes to produce electric energy in co-combustion with coal. The present thesis, part of this project, evaluates on a socio-economic and environmental perspective, the partial replacement of coal by biomass and non-toxic wastes.

Three combustion and co-combustion scenarios were studied: scenario 0 (combustion of coal), scenario 1 (co-combustion of coal+Sewage Sludge (SS)+Meat and Bone Meal (MBM)) and scenario 2 (co-combustion of coal+SS+Wood Pellets (WP)). The combustion and co-combustion tests were performed at the Stadtwerke Duisburg fluidised-bed power plant, in Germany, from August 2004 to November 2005

To be possible to evaluate the three scenarios, several socio-economic and environmental indicators were used. The environmental indicators used were the following: Use of fossil fuels; Avoided emission of green house gases (GHG); Emission of acidifying gases; Emission of eutrophication substances; Emission of smog substances; Emission of substances that contribute to the ozone depletion.

The socio-economic indicators used were as following: Employment creation potential; Electricity production cost; Cost of the reduction of CO₂ emission.

The values of these indicators were converted into a standardised scale, and then aggregated into a unique value, allowing comparisons between indicators values.

Each indicator was weighted in order to be assessed if the final result could be affected by attributing different weights to the socio-economic and environmental indicators.

With similar weights of environmental and socio-economic criteria, scenario 1 was the one showing the best performance, mainly due to the reduction on the emission of GHG and substances that contribute for eutrophication and ozone depletion, electricity production cost and cost of the reduction of CO₂ emission. Scenario 2 had a bad performance especially in the substances that contribute for eutrophication, emission of

smog substances and ozone depletion, although is the best scenario in the employment creation potential. Scenario 2 has a disadvantage due to the high price of the wood pellets.

A sensitive analysis studied the scenarios behaviour in changes of weights and costs previously assumed. With the increase of environmental criteria weight, or socio-economic weight, scenario 1 was the most competitive. In a medium/long term perspective, with the increase prices of coal, prices of emission allowances and the introduction of a carbon tax, scenario 1 still revealed as the most competitive.

Scenario 1, the co-combustion of coal+Sewage Sludge (SS)+Meat and Bone Meal is the most competitive of all the scenarios studied. Still, is important to mention that it is not guaranteed the existence and/or availability of MBM for the long term substitution of coal.

KEYWORDS: Co-combustion, Coal, Biomass, Wood pellets, Sewage sludge, Meat and bone meal, Environmental and Socio-economic assessment.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	A ENERGIA.....	3
2.1	Introdução.....	3
2.2	Breve cronologia da legislação energética.....	4
2.3	Perfil energético da UE.....	7
2.4	Combustíveis fósseis e emissões.....	11
3	CARACTERIZAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS EM ESTUDO.....	12
3.1	Biomassa.....	12
3.1.1	Introdução.....	12
3.1.2	<i>Peletes</i> de madeira.....	15
3.1.3	Farinha de carne e ossos.....	17
3.2	Resíduos Não Perigosos.....	17
4	SISTEMAS DE COMBUSTÃO EM LEITO FLUIDIZADO.....	19
5	INFORMAÇÃO DE BASE PARA A AVALIAÇÃO SÓCIO-ECONÓMICA E AMBIENTAL.....	22
5.1	Descrição dos cenários estudados e dos fluxos médios de combustíveis.....	22
5.2	Ensaios de combustão e co-combustão à escala industrial.....	23
5.2.1	Cenário 0.....	23
5.2.2	Cenário 1.....	24
5.2.3	Cenário 2.....	25
5.3	Proveniência e caracterização dos combustíveis.....	25
5.3.1	Carvão.....	26
5.3.2	Calcário.....	30
5.3.3	Lamas de ETAR.....	31
5.3.4	Farinha de carne e ossos.....	32
5.3.5	<i>Peletes</i> de madeira.....	34
6	INDICADORES SÓCIO-ECONÓMICOS E AMBIENTAIS UTILIZADOS NO PRESENTE ESTUDO.....	35
6.1	Indicadores ambientais.....	35
6.1.1	Uso de combustíveis fósseis.....	36
6.1.2	Emissão evitada de GEE.....	37
6.1.3	Emissão de gases com efeito acidificante.....	39
6.1.4	Emissão de compostos que contribuem para eutrofização.....	40
6.1.5	Emissão de compostos que contribuem para o nevoeiro fotoquímico ...	42
6.1.6	Emissão de gases que contribuem para depleção da camada de ozono	43
6.2	Indicadores sócio-económicos.....	44
6.2.1	Potencial de criação de emprego.....	44
6.2.2	Custo de produção de electricidade.....	45
6.2.3	Custo da redução das emissões de CO ₂	45
6.3	Síntese dos indicadores sócio-económicos e ambientais utilizados no presente estudo.....	46
6.4	Indicadores não incluídos neste estudo.....	46
7	SISTEMA DE AGREGAÇÃO DOS INDICADORES.....	49
7.1	Sistema matemático de agregação.....	49
7.2	Valores de referência.....	51
7.2.1	Uso de combustíveis fósseis.....	51
7.2.2	Emissões evitadas de GEE.....	51

7.2.3	Emissão de gases com efeito acidificante.....	52
7.2.4	Emissão de compostos que contribuem para eutrofização	52
7.2.5	Emissão de gases que contribuem para nevoeiro fotoquímico.....	52
7.2.6	Emissão de gases que contribuem para potencial de depleção da camada de ozono	53
7.2.7	Criação de emprego	53
7.2.8	Custo de produção de electricidade	53
7.2.9	Custo da redução da emissão de CO ₂	54
7.3	Atribuição de pesos	55
8	BALANÇO DE MASSA E ENERGIA.....	58
8.1	Emissões e energia associadas ao combustível carvão e calcário	58
8.1.1	Extracção do carvão e calcário	58
8.1.2	Moagem e classificação de carvão e calcário.....	61
8.1.3	Transporte e elevação de carvão, resíduos de solo e rocha, e calcário, nas minas	62
8.1.4	Consumo energético devido aos funcionários de El Cerrejón.....	64
8.1.5	Consumo de água em El Cerrejón	65
	Emissões de metano na mina.....	66
8.1.6	Transporte de carvão por comboio desde El Cerrejón até ao Porto de Bolivar	67
8.1.7	Transporte de carvão por navio de carga desde Porto Bolivar até ao Porto de Roterdão.....	68
8.1.8	Transporte do carvão, por navio, desde o Porto de Roterdão até ao Porto de Duisburg	69
8.1.9	Transporte de carvão do Porto de Duisburg até à Central Termoeléctrica, em Duisburg	71
8.1.10	Operações de carga e descarga de carvão no Porto de Bolivar, Porto de Roterdão e Porto de Duisburg	72
8.1.11	Transporte de calcário da mina de Wülfrath até à Central Termoeléctrica por camião	73
8.1.12	Consumo e perdas internas de energia na Central Termoeléctrica.....	74
8.2	Emissões e energia associadas ao combustível Lamas de ETAR	75
8.2.1	Transporte de Lamas de ETAR	75
8.3	Emissões e energia associadas ao combustível Farinha de carne e ossos	76
8.3.1	Transporte rodoviário na Irlanda (Dublin)	76
8.3.2	Transporte de navio da Irlanda até ao Porto de Duisburg	77
8.3.3	Transporte rodoviário do Porto de Duisburg para a Central Termoeléctrica	78
8.3.4	Operações de carga e descarga em Dublin e Duisburg	79
8.4	Emissões e energia associadas ao combustível peletes de madeira.....	80
8.4.1	Produção de madeira numa cultura de curta rotação.....	80
8.4.2	Transporte de madeira até ao local de peletização	81
8.4.3	Produção de <i>peletes</i>	82
8.4.4	Transporte de <i>peletes</i> até à Central Termoeléctrica de Duisburg.....	83
8.5	Emissões indirectas por tipo de combustível.....	84
8.6	Emissões totais por cenário	84
8.7	Energia consumida por combustível e por cenário.....	86
9	BALANÇO SÓCIO-ECONÓMICO	89
9.1	Potencial de criação de emprego	89
9.2	Custo de produção de electricidade	90

9.3	Custo do abatimento de emissões de GEE	91
10	AVALIAÇÃO GERAL DOS CENÁRIOS	93
10.1	Emissões obtidas por indicador ambiental	93
10.1.1	Uso de combustíveis fósseis	93
10.1.2	Emissão evitada de GEE.....	94
10.1.3	Emissão de gases com efeito acidificante.....	96
10.1.4	Emissão de compostos que contribuem para eutrofização	98
10.1.5	Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico.....	100
10.1.6	Potencial de Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono	102
10.2	Valores obtidos por indicador sócio-económico	104
10.2.1	Criação de emprego	104
10.2.2	Custo de produção de electricidade	105
10.2.3	Custo do abatimento das emissões de GEE.....	105
10.3	Resultado global	106
10.3.1	Agregação de indicadores.....	109
11	ESTUDO DE SENSIBILIDADE DOS CENÁRIOS ESTUDADOS	112
11.1	Estudo de sensibilidade aos pesos de indicadores	112
11.1.1	Hipótese 1: Posição Ambientalista	112
11.1.2	Hipótese 2: Posição Social	115
11.1.3	Hipótese 3: Posição Economista	120
11.2	Estudo de sensibilidade a custos de licenças de emissão de carbono, taxa de carbono e preço do carvão	123
11.2.1	Hipótese 4	124
11.2.2	Hipótese 5	127
11.2.3	Hipótese 6	132
12	CONCLUSÕES	136
13	BIBLIOGRAFIA	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de combustíveis na EU-25 em 2003	7
Figura 2 – Total de energia consumida, por combustível, na UE-25 de 1990 a 2004 (adaptado de EEA e Eurostat, 2006)	9
Figura 3 – Total de produção de electricidade por FER, em 2005, na UE.....	10
Figura 4 – Esquema simplificado da fotossíntese	13
Figura 5 – Produção de electricidade a partir de biomassa sólida, biogás e RSU na UE de 1990 a 2004 e extrapolando para 2010, a uma taxa de crescimento anual de 19%... 15	
Figura 6 – Exemplo de <i>peletes</i> de madeira (NISP, 2008 - disponível em: www.nisp.org.uk)	16
Figura 7 – Esquema de processos termoquímicos e principais produtos, de conversão energética de biomassa (Cabrita (2006), adaptado).....	19
Figura 8 - Esquema representativo do sistema de CLF utilizado na unidade de co-combustão Stadtwerke Duisburg AG (COPOWER, 2005; adaptado de Lopes, 2007)..	21
Figura 9 – Localização da mina El Cerrejón (Cerrejón, 2008 - disponível em: www.cerrejoncoal.com).....	26
Figura 10 – Vista parcial da mina El Cerrejón (El Colombiano, 2008 - disponível em: www.elcolombiano.com/proyectos/ReportajesGraficos/html/2004/Cerrejon.htm).....	27
Figura 11 – Processo de extracção do carvão na mina Cerrejon (Xstrata, 2006).....	28
Figura 12 – Processo de tratamento do carvão na mina Cerrejon (Xstrata, 2006).....	28
Figura 13 – Processo de armazenamento e transporte do carvão na mina Cerrejon (Xstrata, 2006).....	29
Figura 14- Exemplo de uma escala uniformizada para um indicador positivo	50
Figura 15 – Exemplo de uma escala uniformizada para um indicador negativo.....	51
Figura 16 – Pontuação por indicador por cenário	108
Figura 17 – Pontuação por cenário e pontuação global.....	111
Figura 18 – Pontuação global da hipótese 1	114
Figura 19 – Pontuação global da hipótese 2	117
Figura 20 – Pontuação global da hipótese 2.1	120
Figura 21 – Pontuação global da hipótese 3	122
Figura 22 – Pontuação global da hipótese 4	126
Figura 23 – Pontuação global da hipótese 5.1	129
Figura 24 – Pontuação global da hipótese 5.2	131
Figura 25 – Pontuação global da hipótese 6.1	133
Figura 26 – Pontuação global da hipótese 6.2	135

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Objectivos de produção de electricidade por FER para a UE até 2010.....	5
Quadro 2 – Total de energia consumida na UE em 2004 (%) (Eurostat, 2006).....	7
Quadro 3 – Fluxos de combustíveis considerados na avaliação sócio-económica e ambiental de cada cenário.....	23
Quadro 4 – Características da Central Termoeléctrica de Stadtwerke Duisburg AG (SWDU).....	23
Quadro 5 – Fluxos médios de alimentação de combustíveis no ensaio de co-combustão do cenário 1	24
Quadro 6 – Fluxos médios de alimentação de combustíveis no ensaio de co-combustão do cenário 2	25
Quadro 7 – Características dos combustíveis em estudo.....	25
Quadro 8 – Caracterização aproximada de combustíveis ensaiados na Central Termoeléctrica (COPOWER, 2007).....	26
Quadro 9 – Composição química de uma amostra de carvão da mina de El Cerrejón, semelhante à utilizada nos ensaios de combustão e co-combustão à escala industrial (COPOWER, 2007).....	30
Quadro 10 – Composição química de uma amostra de lamas de ETAR, semelhante à utilizada nos ensaios de co-combustão à escala industrial (COPOWER, 2007).....	31
Quadro 11 – Composição química de uma amostra de farinha de carne e ossos, semelhante à utilizada nos ensaios de co-combustão à escala industrial (COPOWER, 2007).....	33
Quadro 12 – Coeficientes de equivalência do potencial de efeito de estufa para diferentes gases.....	38
Quadro 13 – Coeficientes de equivalência do potencial acidificante.....	39
Quadro 14 – Coeficientes de equivalência do potencial de eutrofização dos compostos estudados	41
Quadro 15 – Quadro síntese dos indicadores ambientais e sócio-económicos e respectivas unidades	46
Quadro 16 – Indicadores positivos e negativos	50
Quadro 17 – Valores de referência dos indicadores na escala uniformizada	54
Quadro 18 – Consumos energéticos associados à maquinaria de extracção de carvão e calcário.....	59
Quadro 19 – Consumos energéticos anuais associados à extracção de carvão, calcário e resíduos produzidos	60
Quadro 20 – Emissões associadas ao gasóleo usado na maquinaria, no processo de extracção.....	60
Quadro 21 – Emissões associadas ao gasóleo usado na maquinaria, no processo de extracção.....	60
Quadro 22 – Coeficientes de emissão associados às operações de moagem e classificação de carvão e calcário.....	62
Quadro 23 – Emissões poluentes associadas às operações de moagem e classificação de carvão e calcário	62
Quadro 24 – Distâncias e altura de elevação nas operações de transporte e armazenamento de carvão, resíduos de solo e rocha, e calcário.....	62
Quadro 25 – Energia associada à distância de transporte de carvão, resíduos de solo e rocha, e calcário, nas minas	63
Quadro 26 – Energia associada à elevação de carvão, resíduos de solo e rocha, e calcário, nas minas.....	63

Quadro 27 – Energia total associada à distância e elevação de carvão, resíduos de solo e rocha, e calcário, nas minas	63
Quadro 28 – Coeficientes de emissão para o transporte e elevação de carvão, resíduos de solo e rocha e calcário, nas minas	64
Quadro 29 – Emissões totais do transporte elevação de carvão, resíduos de solo e rocha, e calcário, nas minas	64
Quadro 30 – Coeficientes de emissão associados à presença de funcionários na mina ..	65
Quadro 31 – Emissões associadas aos funcionários de El Cerrejón.....	65
Quadro 32 – Coeficientes de emissão para as necessidades de abastecimento de água de El Cerrejón.....	66
Quadro 33 – Emissões totais para as necessidades de abastecimento de água de El Cerrejón	66
Quadro 34 – Coeficientes de emissão para o transporte ferroviário entre El Cerrejón e Porto Bolivar	67
Quadro 35 – Emissões totais associadas ao transporte ferroviário entre El Cerrejón e Porto Bolivar	68
Quadro 36 – Coeficientes de emissão associados ao transporte marítimo de Porto Bolivar ao Porto de Roterdão	69
Quadro 37 – Emissões associadas ao transporte marítimo de Porto Bolivar ao Porto de Roterdão	69
Quadro 38 – Coeficientes de emissão associados ao transporte marítimo do Porto de Roterdão ao Porto de Duisburg	70
Quadro 39 – Emissões associadas ao transporte marítimo do Porto de Roterdão ao Porto de Duisburg	70
Quadro 40 – Coeficientes de emissão associados ao transporte por camião, do Porto de Duisburg até Duisburg.....	71
Quadro 41 – Emissões associadas ao transporte por camião, do Porto de Duisburg até à Central Termoeléctrica	72
Quadro 42 – Coeficientes de emissão associados às cargas e descargas de carvão	73
Quadro 43 – Emissões associadas às cargas e descargas de carvão no Porto Bolivar, Porto de Roterdão e Porto de Duisburg.....	73
Quadro 44 – Coeficientes de emissão associados ao transporte de calcário em camião a gasóleo.....	74
Quadro 45 – Emissões associadas ao transporte de calcário de Wülfrath até à Central Termoeléctrica.....	74
Quadro 46 – Coeficientes de emissão associados ao transporte por camião a gasóleo..	75
Quadro 47 – Emissões associadas ao transporte de lamas de ETAR	76
Quadro 48 – Coeficientes de emissão associados ao transporte por camião a gasóleo..	76
Quadro 49 – Emissões associadas ao transporte de farinha de carne e ossos na Irlanda	77
Quadro 50 – Coeficientes de emissão associados ao transporte em navio.....	77
Quadro 51 – Emissões associadas ao transporte de farinha de carne e ossos da Irlanda ao Porto de Duisburg.....	78
Quadro 52 – Coeficientes de emissão associados ao transporte rodoviário de farinha de carne e ossos do Porto de Duisburg à Central Termoeléctrica.....	78
Quadro 53 – Emissões geradas no transporte de farinha de carne e ossos do Porto de Duisburg até à Central Termoeléctrica.....	79
Quadro 54 – Coeficientes de emissão associados às cargas e descargas de farinha de carne e ossos	79
Quadro 55 – Emissões associadas às operações de carga e descarga em Dublin e Duisburg	80

Quadro 56 – Coeficientes de emissão associados à produção de madeira para <i>peletes</i> .	81
Quadro 57 – Emissões associadas à produção de madeira para <i>peletes</i>	81
Quadro 58 – Emissões associadas ao transporte rodoviário de madeira ao local de peletização	82
Quadro 59 – Coeficientes de emissão associados à operação de peletização	82
Quadro 60 – Emissões associadas à operação de peletização	82
Quadro 61 – Coeficientes de emissão associados ao transporte rodoviário de <i>peletes</i> de madeira até à Central Termoeléctrica.....	83
Quadro 62 – Emissões associadas ao transporte de <i>peletes</i> do local de peletização à Central Termoeléctrica	83
Quadro 63 – Emissões indirectas totais relativas aos combustíveis utilizados no presente trabalho	84
Quadro 64 – Emissões totais, directas e indirectas, por cenário	85
Quadro 65 – Energia consumida por combustível, por cenário	87
Quadro 66 – Custo de combustíveis assumido.....	90
Quadro 67 – Custo horário de produção de electricidade na Central Termoeléctrica, por cenário	91
Quadro 68 – Custo horário de produção de electricidade na Central Termoeléctrica, por cenário	91
Quadro 69 – Custo do abatimento de emissões de GEE na Central Termoeléctrica, por cenário	92
Quadro 70 – Rácio entre a energia consumida e a energia produzida por cenário.....	93
Quadro 71 – Emissões de GEE nos cenários.....	95
Quadro 72 – Potencial de gases com efeito acidificante dos cenários	97
Quadro 73 – Potencial de compostos que contribuem para eutrofização dos cenários..	99
Quadro 74 – Potencial de Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico dos cenários.....	101
Quadro 75 – Potencial de Emissão de gases que contribuem para a deplecção da camada de ozono dos cenários.....	103
Quadro 76 – Potencial de criação de emprego dos cenários	104
Quadro 77 – Custo de produção de electricidade dos cenários	105
Quadro 78 – Custo do abatimento das emissões de GEE, para cada um dos cenários.	105
Quadro 79 – Valores dos indicadores ambientais e sócio-económicos.....	106
Quadro 80 – Pontuação	107
Quadro 81 – Ponderação dos indicadores.....	109
Quadro 82 – Agregação dos indicadores	110
Quadro 83 – Ponderação dos indicadores para a hipótese 1.....	112
Quadro 84 – Agregação dos indicadores para a hipótese 1	113
Quadro 85 – Ponderação dos indicadores para a hipótese 2.....	115
Quadro 86 – Agregação dos indicadores para a hipótese 2.....	116
Quadro 87 – Ponderação dos indicadores para a hipótese 2.1.....	118
Quadro 88 – Agregação dos indicadores para a hipótese 2.1	118
Quadro 89 – Ponderação dos indicadores para a hipótese 3.....	121
Quadro 90 – Agregação dos indicadores para a hipótese 2.1	121
Quadro 91 – Ponderação dos indicadores.....	124
Quadro 92 – Agregação dos indicadores para a hipótese 4.....	125
Quadro 93 – Agregação dos indicadores para a hipótese 5.1	128
Quadro 94 – Agregação dos indicadores para a hipótese 5.1	130
Quadro 95 – Agregação dos indicadores para a hipótese 5.1	132
Quadro 96 – Agregação dos indicadores para a hipótese 5.1	134

LISTA DE ABREVIATURAS

AR – Água residual

AEE – Agência Europeia de Energia (em inglês, EEA)

b.s. – Base seca

CLF – Combustão em leito fluidizado

COPOWER – Projecto Europeu intitulado “Synergic Effects of Co-Processing of Biomass and Non-Toxic Wastes for Heat and Power Generation”

DEECA – Departamento de Engenharia Energética e Controlo Ambiental

ER – Energia renovável

ETAR – Estação de tratamento de águas residuais urbanas

Eq. – Equivalente

EUA – Estados Unidos da América

FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia

FER – Fontes de energia renovável

GEE – Gases com efeito de estufa

GDEH – Grupo de Disciplinas de Ecologia da Hidrosfera

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas

INE – Instituto Nacional de Estatística

INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

MBM – Farinha de carne e ossos (“Meat and Bone Meal”)

MP – Metais pesados

PCI – Poder calorífico inferior

RCM – Resolução do Conselho de Ministros

SS – Lama de ETAR (Sewage Sludge)

SWDU – Stadtwerke Duisburg AG

UNL – Universidade Nova de Lisboa

UE – União Europeia

WP – *Peletes* de madeira (Wood Pellets)

1 INTRODUÇÃO

A dependência energética externa da União Europeia é da ordem dos 50%, tendendo a chegar a 70% nos próximos 20 a 30 anos, o que acarreta sérios riscos económicos, sociais, ecológicos e físicos para a comunidade (CE, 2000). A problemática é agravada quando as fontes de energia externa são quase exclusivamente de origem fóssil – limitada e poluente, quando se têm em conta os objectivos de preservação da qualidade ambiental traduzidos no Protocolo de Quioto.

Nesse sentido, a Comissão Europeia tem incentivado os Estados-Membros a desenvolverem projectos de investigação e tecnologias de produção de energia, que permitam conciliar estas questões-chave.

O projecto Europeu “COPOWER” – “Synergy Effects of Co-Processing of Biomass and Non-Toxic Wastes for Heat and Power Generation (Contract SES6-CT-2004-503806)”, surgiu com o objectivo de estudar os efeitos sinérgicos da utilização de biomassa e resíduos não tóxicos na produção de energia eléctrica a partir da combustão do carvão.

O presente estudo insere-se na “Workpackage 4” do projecto – Avaliação ambiental e sócio-económica (WP4: “Environmental and Socio-Economic Assessment”).

A combustão de carvão foi comparada com a co-combustão de carvão com *peletes* de madeira, lamas de ETAR e farinha de carne e ossos em três cenários diferentes.

Os ensaios de combustão à escala industrial foram realizados na Central Termoeléctrica de Stadtwerke Duisburg AG (SWDU), situada em Duisburg, na Alemanha. A tecnologia utilizada foi a combustão em leito fluidizado.

O presente estudo desenvolve-se nas seguintes etapas:

- Enquadramento teórico – engloba os capítulos: “A Energia”, “Biomassa”, “Resíduos não perigosos” e “Sistemas de combustão em leito fluidizado”, onde

se referem informações de base, necessárias à contextualização do estudo, sobre os combustíveis carvão, *peletes* de madeira, lamas de ETAR e farinha de carne e ossos. Faz-se também uma breve exposição do projecto COPOWER e do seu âmbito de acção, bem como da tecnologia de combustão por leito fluidizado;

- Metodologia – engloba os capítulos: “Informação de base para a avaliação sócio-económica e ambiental”, “Indicadores sócio-económicos e ambientais utilizados no presente estudo” e “Sistema de Agregação dos indicadores”, onde se apresenta e justifica a metodologia adoptada no presente estudo;
- Resultados, discussão de resultados e conclusões, englobam os capítulos: “Balanço de massa e energia”, “Balanço sócio-económico”, “Avaliação geral dos cenários”, “Estudo de sensibilidade dos cenários estudados” e “Conclusões”.

2 A ENERGIA

2.1 Introdução

A energia é uma realidade física que pode ser mecânica, eléctrica ou electro-magnética, química ou térmica. A complexidade dos sistemas energéticos modernos está nas várias formas em que esta surge na natureza, chamada energia primária, e nas formas em que pode ser convertida, desde a energia hídrica ou da eólica para a mecânica; desde os combustíveis fósseis ou da biomassa para a química; desde a solar ou geotérmica para a térmica (Programa E4, RCM n.º 154/2001 de 19 de Outubro revogada pela RCM 63/2003 de 28 de Abril de 2003).

Os países desenvolvidos dependem de recursos energéticos primários não renováveis, como o petróleo, gás natural e carvão, cujas reservas estão a ser consumidas a uma velocidade muito superior ao seu processo de formação geológica. Além disso, a combustão destas matérias-primas gera emissões gasosas poluentes, como o dióxido de carbono, óxidos de azoto e poeiras, que têm consequências nefastas no ambiente e no homem (EEA, 2006a). Comparando com o ano de 2000 prevê-se que, associadas apenas ao ozono troposférico e partículas finas ocorram 311 000 mortes prematuras em 2030.

A urgência em alterar os comportamentos da sociedade moderna é evidente, face, não só ao aumento de temperatura global, na subida do nível do mar e nas alterações climáticas decorrentes da acumulação de GEE (Gases com efeito de estufa), como também ao facto das macroeconomias mundiais dependerem energeticamente de reservas de combustíveis fósseis que se prevê que venham a escassear, colocando em causa a segurança do aprovisionamento.

Só na União Europeia (UE), do ano de 2004 para 2005 o custo da electricidade aumentou em média 40%, consequência da dependência das flutuações de preços de mercado de combustíveis (CEC, 2006).

Assim se percebe que quando a palavra de ordem é *sustentabilidade*, a dependência energética dos países desenvolvidos torna-se um problema.

2.2 Breve cronologia da legislação energética

Grandes conferências internacionais têm captado a atenção do mundo para problemas ambientais e energéticos, nomeadamente o IPCC - Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas, em 1988, a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas, em 1992, o Protocolo de Quioto da Convenção Quadro das Nações Unidas, em 1997, a Conferência de Haia, em 2000, e, mais recentemente, a Conferência de Bali, em Dezembro de 2007.

A nível europeu, os primeiros passos legislativos concretos, ao nível das energias renováveis, surgiram no Livro Verde Europeu, de 20 de Novembro de 1996 e o Livro Branco, de 26 de Novembro de 1997, intitulado “Energia para o Futuro: Fontes de energia renováveis”. Com estes documentos deu-se início a um processo político, que dura até à actualidade, de delineamento de estratégias e planos de acção visando a melhoria do aproveitamento das fontes de energia renováveis endógenas na UE

Discutido em 1997 e assinado em 1999, o protocolo de Quioto entrou em vigor em 2005 e representou um marco na protecção ambiental a nível europeu e internacional. Com o objectivo do controlo da emissão de GEE, o protocolo é essencial para se alcançar o objectivo geral da Convenção Quadro das Nações Unidas, de 1992, de estabilização das concentrações de gases de efeito de estufa na atmosfera, a um nível que possa prevenir uma perigosa interferência antropogénica com o sistema climático.

Quioto propõe metas de redução de emissões de gases poluentes para os países que ratificaram o protocolo: pelo menos 5,2% de emissões devem ser reduzidas até 2012, comparativamente às emissões de 1990. Através da aplicação e monitorização de estratégias para reduzir emissões, estima-se que Quioto deva reduzir a temperatura global entre 1,4°C e 5,8°C até 2100, dependendo da eficácia dessas medidas no período 2008/2012 e pós 2012.

Perspectivando identificar e desenvolver um conjunto de políticas e medidas necessárias ao cumprimento do Protocolo de Quioto para a redução de emissões de GEE, a

Comissão Europeia lançou, em Março de 2000, o Programa Europeu para as Alterações Climáticas (ECCP). Com a visão de promover a eficiência energética e a promoção das energias renováveis, todos os sectores de actividade, bem como investigadores e políticos, estão a desenvolver ferramentas fiscais e monetárias que permitam rentabilizar bens económicos para o bem comum da humanidade e do ambiente (Quercus, 2007).

Posteriormente, a Directiva 2001/77/CE refere que, para assegurar a médio prazo uma maior penetração no mercado por parte da electricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis, é necessário exigir a todos os Estados-Membros que estabeleçam metas indicativas nacionais para o consumo de electricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis (FER). A Directiva 2001/77/CE propõe então que 21% da produção total de electricidade da UE seja de FER até 2010 (Quadro 1).

Quadro 1 – Objectivos de produção de electricidade por FER para a UE até 2010

País	FER em 1997 (%)	FER em 2010 (%)
Austria	70	78
Bélgica	1,1	6
Dinamarca	8,7	29
Finlândia	24,7	31,5
França	15	21
Alemanha	4,5	12,5
Grécia	8,6	20,1
Irlanda	3,6	13,2
Italia	16	25
Luxemburgo	2,1	5,7
Países Baixos	3,5	9
Portugal	38,5	39
Espanha	19,9	29,4

Quadro 1 – (Continuação)

País	FER em 1997 (%)	FER em 2010 (%)
Suécia	49,1	60
UK	1,7	10
Chipre	0,05	6,0
Republica Checa	3,8	8,0
Estonia	0,2	5,1
Hungria	0,7	3,6
Letónia	42,4	49,3
Lituânia	3,3	7,0
Malta	0,0	5,0
Polónia	1,6	7,5
Eslováquia	17,9	31,0
Eslovénia	29,9	33,6
EU 25	12,9	21,0

Como já mencionado, a Directiva 2001/77/CE define objectivos de produção de electricidade, mas define também objectivos de produção de energia: 12% de FER do total de produção até 2010.

Para além dos benefícios na protecção do ambiente e no desenvolvimento sustentável, a exploração de fontes de energia renováveis poderá criar postos de trabalho a nível local, ter um impacto positivo na coesão social, contribuir para a segurança do abastecimento e sobretudo, antecipar os objectivos estabelecidos em Quioto (Directiva 2001/77/CE).

Em Janeiro de 2007 foi publicada uma comunicação da UE: "Limiting Global Climate Change to 2° Celsius: The way ahead for 2020 and beyond" que refere o período pós 2010 como muito importante para perpetuar as políticas energéticas até aí estabelecidas. Adopta algumas posições ambiciosas para um posterior acordo internacional, nomeadamente uma meta de longo prazo de redução das emissões globais em 50%, até

2050, face a 1990, limites de emissões mais restritivos e compromissos económicos que são um desafio à capacidade técnica e financeira das empresas.

2.3 Perfil energético da UE

Actualmente a UE apresenta uma dependência energética de combustíveis fósseis na ordem dos 79%. Do total de 1725 MTEP (tonelada equivalente de petróleo) consumidos na UE-25 em 2003, o consumo de carvão e lenhite representava 18,20%, 23,65% para o gás natural e 37,45% para o petróleo (AEA, 2008). As ER (Energias Renováveis) representam apenas 5,97%, um valor muito baixo, apesar de ter sido progressivamente maior nos últimos anos (Figura 1).

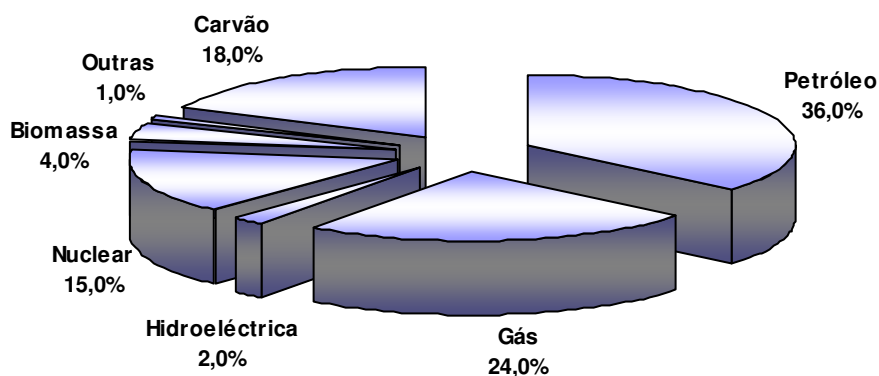


Figura 1 – Consumo de combustíveis na EU-25 em 2003

Os combustíveis fósseis continuam a dominar o consumo energético em todos os países integrantes da UE (Quadro 2).

Quadro 2 – Total de energia consumida na UE em 2004 (%) (Eurostat, 2006)

UE/País	Carvão e lenhite	Petróleo	Gás	Nuclear	ER	Resíduos Industriais
UE-25	17,9	37,2	23,9	14,6	6,3	0,2
UE-15	14,6	39,0	24,4	15,3	6,4	0,2
UE-10	41,5	24,7	20,1	9,3	5,2	0,3
Bélgica	11,1	36,6	26,6	22,3	2,1	0,1
República Checa	44,8	21,5	17,9	15,6	3,1	0,2

Quadro 2 - (Continuação)

Dinamarca	21,8	41,6	23,2	0,0	14,6	0,0
Alemanha	24,7	36,0	22,6	12,4	4,0	0,3
Estónia	59,1	19,1	13,7	0,0	10,8	0,0
Grécia	29,7	57,1	7,3	0,0	5,1	0,0
Espanha	15,0	49,1	17,9	11,7	6,4	0,0
França	5,1	33,9	14,3	42,2	6,3	0,0
Irlanda	14,7	59,1	23,2	0,0	2,1	0,0
Itália	9,0	46,0	35,7	0,0	6,8	0,4
Chipre	1,5	94,5	0,0	0,0	3,9	0,0
Letónia	1,5	29,6	29,0	0,0	35,9	0,2
Lituânia	2,0	28,2	25,9	42,6	8,0	0,0
Luxemburgo	2,0	64,6	25,6	0,0	1,6	0,0
Hungria	13,2	24,1	44,7	11,7	3,7	0,1
Malta	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Holanda	11,2	38,4	44,7	1,2	2,9	0,0
Áustria	12,1	42,2	23,3	0,0	20,7	0,9
Polónia	59,0	23,8	12,8	0,0	4,7	0,5
Portugal	12,9	57,5	12,6	0,0	14,9	0,0
Eslovénia	21,6	35,2	12,6	19,8	11,6	0,1
Eslováquia	24,9	19,3	30,3	24,2	2,2	0,1
Finlândia	19,9	29,0	10,5	15,5	23,4	0,6
Suécia	5,5	28,9	1,7	37,6	26,6	0,0
Reino Unido	16,5	35,1	37,6	8,9	1,6	0,0
Bulgária	38,4	22,7	13,2	23,0	5,2	0,2
Roménia	23,4	26,1	35,2	3,6	11,7	0,2
Turquia	27,1	36,9	22,9	0,0	13,2	0,0
Islândia	3,0	24,7	0,0	0,0	72,3	0,0
Noruega	3,3	38,3	16,1	0,0	38,7	0,1

Dos combustíveis fósseis, o petróleo continua a representar o maior valor de consumo energético da UE, contudo o seu crescimento tem sido relativamente estável nos últimos anos. Observa-se, no que respeita ao gás natural, que o seu consumo tem sofrido um aumento, em detrimento do consumo de carvão, cujo valor revela um decréscimo a nível europeu (Figura 2).

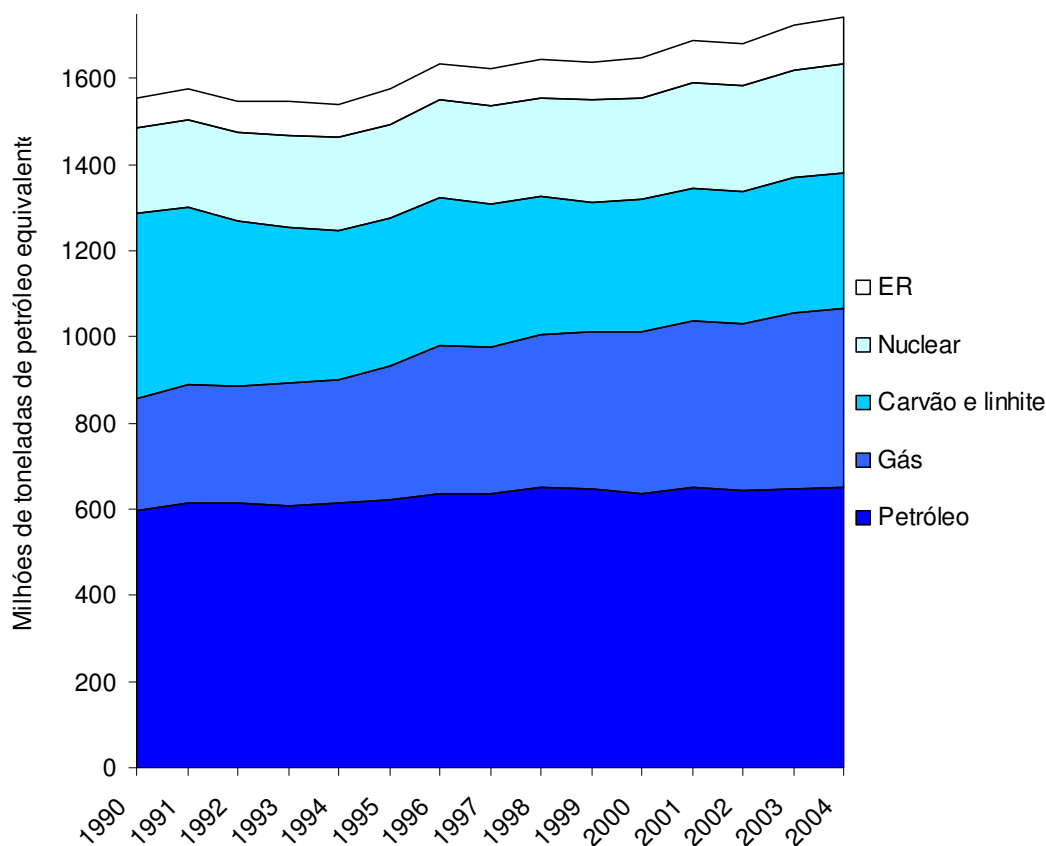


Figura 2 – Total de energia consumida, por combustível, na UE-25 de 1990 a 2004 (adaptado de EEA e Eurostat, 2006)

As alterações nos contributos de cada combustível têm sido ambientalmente favoráveis, na medida em que o gás natural tem aumentado como opção fóssil, tendo menos problemas ambientais associados ao seu uso, comparativamente ao petróleo e carvão (EEA, 2008)

No que respeita à produção de electricidade por FER, em 2005, a hídrica, seguida da biomassa, foi a fonte energética mais significativa (EEA, 2008) (Figura 3).

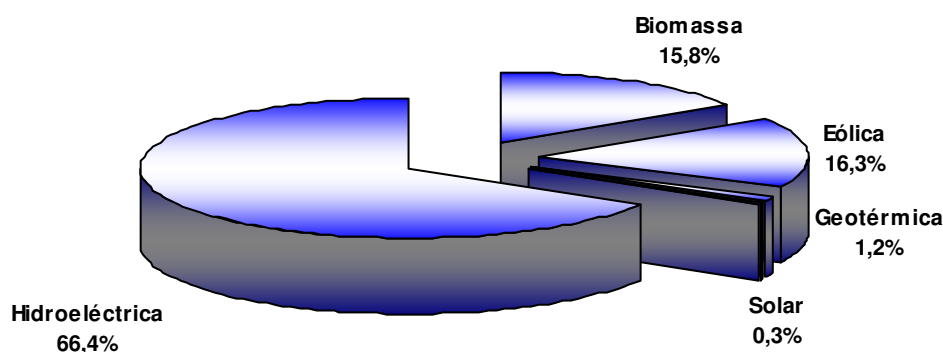


Figura 3 – Total de produção de electricidade por FER, em 2005, na UE

Em 2005, a produção total europeia de electricidade a partir de FER situava-se nos 13,97%, contudo, se a taxa de crescimento de 2004 se tivesse mantido, a produção poderia ter alcançado 14,60% (CEC, 2004). O peso da produção de energia de origem hidroeléctrica, no total de produção, torna-a dependente de factores climáticos, como se comprovou no ano de 2005, com fraca pluviosidade.

Os diferentes recursos naturais disponíveis em cada país e o desenvolvimento e investimento tecnológico nos mesmos provocam contrastes ao nível da produção de energia eléctrica. Salienta-se que os seis países europeus com maior quota de produção de ER, na produção primária nacional, partilham o facto de possuírem florestas vastas e bons potenciais hidráulicos.

A Resolução do Conselho de Ministros n.º 154/2001, que adopta o Programa E4 (Eficiência Energética e Energias Endógenas) para Portugal, afirma os recursos existentes, ainda que limitados, são possíveis de serem melhor aproveitados, tirando-se assim o máximo benefício da exploração das fontes de energia primária, limpa e endógena, de que o país dispõe e que os avanços tecnológicos e o novo enquadramento económico do sector energético permitem, salvaguardando o respeito pelas condicionantes ambientais.

Nem sempre é necessário criar novas e dispendiosas instalações, podendo adaptar-se as já existentes, como por exemplo a substituição do carvão por biomassa, nas centrais termoeléctricas.

Todos os tipos de ER têm prós e contras no seu uso. É importante estudar os recursos renováveis existentes, específicos de cada local de implantação do aproveitamento, e as causas e consequências da sua exploração, isto é, atingir as metas nacionais e comunitárias de produção energética renovável, mas de uma forma sustentável.

2.4 Combustíveis fósseis e emissões

A combustão de petróleo, gás natural e carvão aumentou em 27% a proporção de dióxido de carbono na atmosfera terrestre nos últimos 100 anos. São emitidas anualmente cerca de 24 biliões de toneladas de carbono, sendo 19 biliões devidos à combustão de matérias-primas fósseis, por acção humana (DGS, 2005).

A combustão fóssil lança para a atmosfera gases que a longo prazo, provocam um aumento da temperatura média terrestre, os chamados GEE, nomeadamente: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), e óxidos de azoto (N₂O). Para além destes gases, são emitidos na combustão de matérias fósseis, outros poluentes, sendo que, qualquer um deles, pode causar impactes ambientais, a nível local, regional ou global.

O carvão, combustível fóssil utilizado nos ensaios de combustão e co-combustão realizados em Duisburg, continua a ter um lugar de destaque no panorama energético europeu e mundial. Prevê-se que a sua utilização venha a aumentar, a nível internacional, nos próximos anos, devido a potências como a China e a Índia que estão agora a explorar massivamente este combustível. Ao nível dos países desenvolvidos, a tendência será de decréscimo na sua utilização (IEA, 2007).

Contudo, a par com o seu contributo energético, o carvão tem associado efeitos ambientais negativos. A extracção de carvão tem efeitos na destruição de flora e fauna, movimentos de terras, produção de resíduos e emissões de metano. Na combustão de carvão são emitidos, entre outros poluentes, óxidos de azoto, dióxido de enxofre e partículas (Spath, 1999).

3 CARACTERIZAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS EM ESTUDO

3.1 Biomassa

3.1.1 Introdução

Biomassa, segundo a Directiva 2001/77/CE, é a fracção biodegradável de produtos e resíduos provenientes da agricultura (incluindo substâncias vegetais e animais), da silvicultura e das indústrias conexas, bem como a fracção biodegradável de resíduos industriais e urbanos.

A biomassa foi, desde os tempos ancestrais, a primeira forma de energia a ser usada pelo homem: a madeira era usada para cozinhar, aquecimento e construção. Na Era da revolução industrial, a madeira deu lugar ao carvão, e recentemente, na década de 90, este foi substituído em grande parte pelo petróleo. Actualmente, devido à dependência energética das matérias-primas fósseis e da eminência do esgotamento dessas reservas, tornam a procurar-se novas fontes de energia a partir da biomassa.

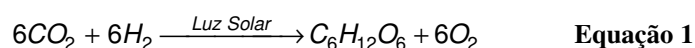
A bioenergia actual surge disponibilizada na forma de produtos transformados como *peletes* de palha ou madeira, biogás e biodiesel, abrangendo sectores tão variados como os transportes, indústria ou produção de calor e electricidade.

Devido às operações de transformação, tratamento industrial e transporte, a biomassa promove o desenvolvimento económico e criação de emprego em zonas rurais, e potencia o desenvolvimento sustentável nessas áreas (DGS, 2005). Ao promover a ocupação de áreas agrícolas em abandono (desertificação), reduz também o potencial de incêndios, enquanto contribui para a redução da dependência energética externa de um país.

Contudo, o aproveitamento de biomassa para produção energética pode competir com a produção para alimentação, já que a valorização desta matéria-prima tende a encarecer

os preços no geral, situação que ocorre actualmente em países como o Brasil. É importante que a opção de aproveitamento energético de biomassa seja feita de forma sustentável, enquadrada nas reservas de biomassa disponíveis.

A origem da biomassa remete à fotossíntese. As plantas usam a clorofila, que capta a luz solar, potenciando reacções que incorporam o dióxido de carbono do ar e o convertem em biomassa na forma de glúcidos, lenhina, celulose, hemi-celuloses, entre outras substâncias (DGS, 2005):



A fotossíntese é responsável pela produção primária na qual assentam todas as cadeias alimentares, e a partir da qual se liberta o oxigénio que mantém a actual atmosfera terrestre.

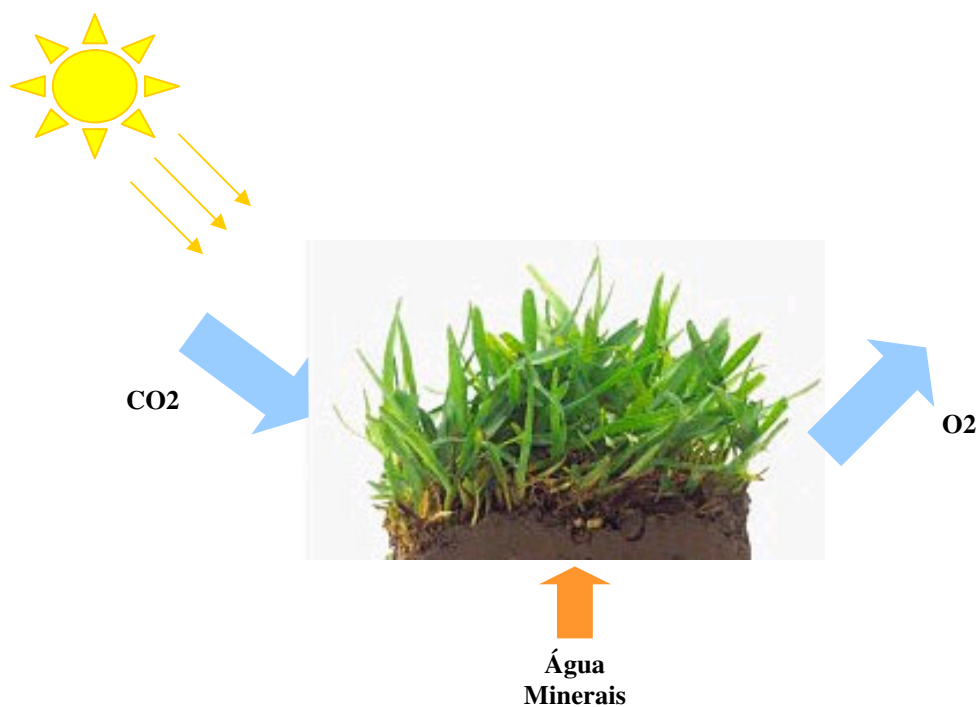


Figura 4 – Esquema simplificado da fotossíntese

A principal vantagem da combustão de biomassa face aos combustíveis fósseis reside no facto desta apresentar um balanço “nulo” no que diz respeito às emissões atmosféricas de CO₂. O CO₂ produzido no processo de combustão da biomassa

corresponde ao que foi anteriormente fixado pelas plantas no processo de fotossíntese (Lourenço, 2006).

Para além das vantagens já referidas, mencionam-se mais vantagens associadas ao uso de biomassa (EUBIA, 2008):

- Recurso disponível em todos os países comunitários;
- Potencial de disponibilidade a longo prazo para plantações sustentáveis e resíduos adequadamente aproveitados;
- Aproveitamento de resíduos, evitando custos de eliminação ou deposição;
- Facilidade de armazenamento;
- Oportunidades de negócio com novas indústrias;
- Em caso de ocorrência de derrame de biocombustíveis, estes são biodegradáveis e não tóxicos.

Contudo, a biomassa apresenta também alguns inconvenientes (EUBIA, 2008):

- Custo da tecnologia e recursos associados à produção de bioenergia;
- Competitividade depende fortemente do número de externalidades negativas incluídas nos custos e distribuição do recurso;
- Falta de logística de abastecimento de biocombustíveis;
- Barreiras locais de uso do solo e de espécies de cultivo;
- Falta de ferramentas legais e administrativas.

A electricidade produzida a partir de biomassa sólida, biogás e a fracção biodegradável dos RSU (Resíduos Sólidos Urbanos) representam 2% do consumo total de energia da UE. A contribuição da biomassa aumentou 18% em 2002, 13% em 2003, 19% em 2004 e 23% em 2005 (CCE, 2007) (Figura 5).

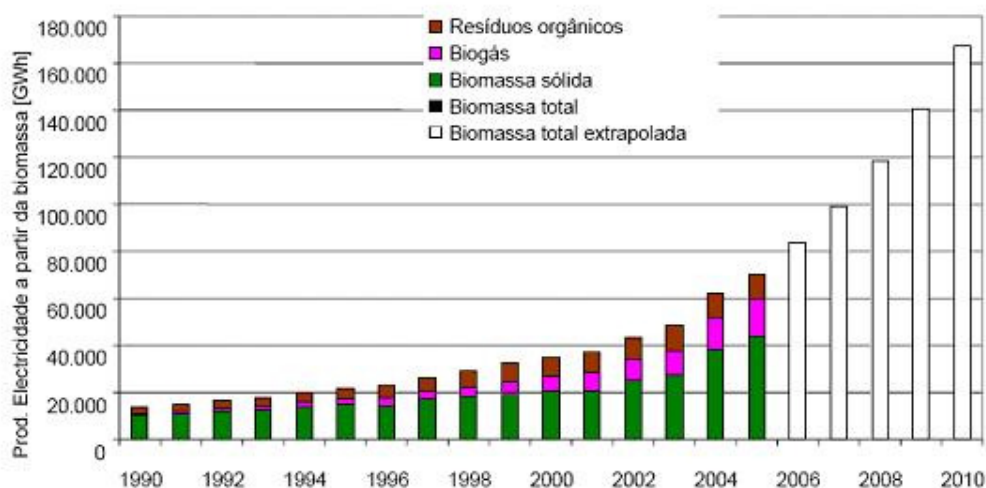


Figura 5 – Produção de electricidade a partir de biomassa sólida, biogás e RSU na UE de 1990 a 2004 e extrapolando para 2010, a uma taxa de crescimento anual de 19%

Se a taxa de crescimento de 2004 pudesse ser extrapolada para 2010, a contribuição total da biomassa atingiria cerca de 167000 GWh, o que corresponde à produção de energia necessária para atingir a meta de 21% de electricidade, a partir de energias renováveis, indicada na Directiva 2001/77/CE.

3.1.2 *Peletes de madeira*

Os resíduos de biomassa, em geral, caracterizam-se por ter uma baixa densidade, o que, numa perspectiva de aproveitamento energético, resulta numa baixa eficiência energética por unidade de volume de resíduo. O armazenamento de biomassa é dificultado pelas grandes áreas requeridas, os custos de transporte são consideráveis e a elevada percentagem de humidade pode resultar em degradação biológica do resíduo antes do seu destino final. Contudo, a densificação dos resíduos de biomassa é uma possível solução para estes problemas (Dias, 2002).

A densificação permite obter um produto de dimensão padronizada, elevada densidade e propriedades homogéneas, vantajoso para o uso doméstico ou industrial. Pode originar subprodutos com várias dimensões e matérias-primas, como as *peletes* ou briquetes, de palha ou madeira. Contudo, no âmbito deste estudo, importa aprofundar-se o conhecimento

teórico sobre as *peletes* de madeira, uma vez que foi este o tipo de combustível seleccionado para um dos cenários de co-combustão.

As *peletes* de madeira são produzidas a partir de resíduos de serragem ou aparas de madeira. De forma geralmente cilíndrica, o diâmetro das *peletes* oscila de 6 a 12 mm, numa proporção de comprimento de 1:4 ou 1:5. Apresenta uma estrutura rígida e consistente, com uma densidade mínima de 650 kg/m³ (EUBIA, 2008).



Figura 6 – Exemplo de *peletes* de madeira (NISP, 2008 - disponível em: www.nisp.org.uk)

Para a produção de *peletes*, a biomassa é seca, e posteriormente compactada. A percentagem máxima de água é cerca de 8%, o que aliado à elevada compactação, torna as *peletes* um material muito estável e pouco deformável, mesmo transportado a longas distâncias e sofrendo acções mecânicas devidas ao transporte. Numa operação de densificação, cerca de 6 a 8 m³ de matéria-prima são reduzidas a 1 m³ de *peletes*.

As *peletes* de madeira podem alcançar conteúdos caloríficos desde 4,9 a 5,4 kWh/kg (DGS, 2005).

Ainda que a produção de *peletes* envolva processos com consumos energéticos consideráveis, a energia necessária ao seu processamento equivale a 2% do teor de energia do produto final, enquanto nos combustíveis fósseis, varia de 10 a 12% (DGS, 2005).

3.1.3 Farinha de carne e ossos

A farinha de carne e ossos faz parte dos resíduos de biomassa passíveis de serem aproveitados energeticamente, e que têm em comum o facto da sua produção não ser destinada a produção energética (EEA, 2006b). São produzidos em consequência de actividades humanas, económicas e industriais, pelo que o seu aproveitamento não traz um aumento das pressões ambientais.

A farinha de carne e ossos é um combustível potencialmente útil em locais onde exista produção animal (White, 1981).

Este resíduo foi recentemente abolido como forma de alimentação de animais, pelo seu risco de transmissão de doenças. A eliminação deste resíduo tem problemas associados aos patogénicos eventualmente presentes, pelo que a co-combustão é uma alternativa viável que garante a eliminação dos mesmos, e permite a sua estabilização por tratamento térmico (Costa, 2007).

O uso de farinha de carne e ossos como potencial energético tem vantagens económicas, para produção de energia, sociais, devido à eliminação deste resíduo considerado perigoso (Directiva 2000/766/CE), e também ambientais, uma vez que evita a deposição em aterro sanitário, problemática devido ao elevado conteúdo em matéria orgânica perecível, de acordo com a Directiva 1999/31/CE.

3.2 Resíduos Não Perigosos

No âmbito deste estudo, os resíduos não perigosos a serem incluídos no presente capítulo, são as lamas de ETAR.

A Directiva 1991/271/EEC define águas residuais urbanas como as águas residuais domésticas ou a mistura destas com industriais e/ou pluviais. No mesmo documento,

define-se lamas de ETAR como as lamas residuais, tratadas ou não, originadas pelo funcionamento de estações de tratamento de águas residuais urbanas.

Devido à progressiva implementação da Directiva 1991/271/EEC que regula os tratamentos das águas residuais urbanas no espaço europeu, o volume de lamas produzidas aumentou, e permanecerá nessa tendência.

Segundo a Directiva 1999/31/EC, que regula a deposição de resíduos em aterro, é da maior importância encontrar formas de tratamento viáveis que permitam encaminhar as lamas de ETAR para um destino adequado.

A Directiva 1999/31/CE exige também aos Estados-membros, a aplicação das estratégias nacionais, de modo a reduzir progressivamente as quantidades de resíduos biodegradáveis depositados em aterros. Deste modo, a quantidade total (em peso) dos resíduos urbanos biodegradáveis depositados em aterros, em 1995, deverá diminuir para 50 %, em 2009, e 35 %, em 2016.

As lamas de ETAR não devem ser depositadas em aterro, devendo o seu potencial energético ser aproveitado em processos de valorização aplicáveis a resíduos biodegradáveis.

O alto teor de matéria orgânica presente nas lamas de ETAR torna-as atractivas em processos de combustão ou co-combustão para produção de energia (Lopes, 2002). É importante ter em conta que a humidade presente nas lamas é elevada, e que estas devem sofrer um processo de pré-tratamento (Lapa, 2007), à excepção de instalações dedicadas a lamas de ETAR com vários graus de humidade, como existem na Alemanha e EUA.

4 SISTEMAS DE COMBUSTÃO EM LEITO FLUIDIZADO

A biomassa pode ser convertida em energia térmica através de processos termoquímicos, para teores de humidade entre 60% e 70% (base húmida) (Lourenço, 2006).

Os processos termoquímicos usam o calor para proceder à decomposição de matéria orgânica por reacções químicas exotérmicas, em ambientes oxidantes ou redutores (Cabrita, 2006), e englobam a sua conversão em diferentes produtos ou formas de energia (Figura 7).

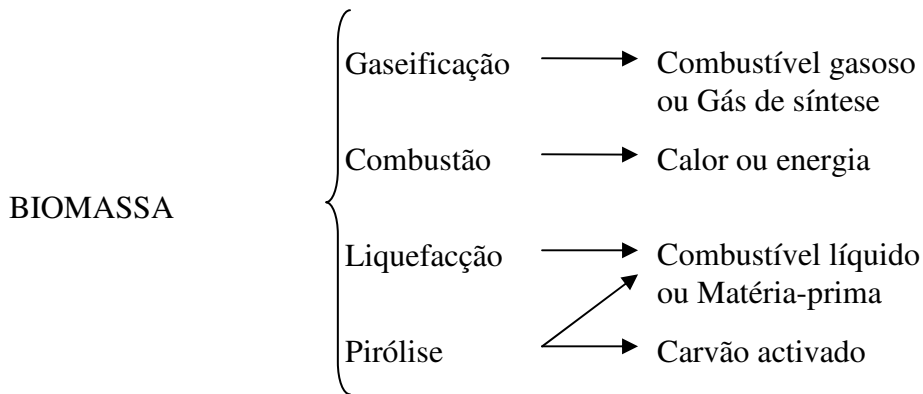


Figura 7 – Esquema de processos termoquímicos e principais produtos, de conversão energética de biomassa (Cabrita (2006), adaptado)

No âmbito deste estudo importa aprofundar o processo termoquímico da combustão, uma vez que foi este o processo utilizado nos ensaios industriais realizados em Duisburg. É o sistema mais elementar de recuperação energética de biomassa, tendo apenas como subprodutos a água, o dióxido de carbono, as cinzas volantes e de fundo e o calor (Lourenço, 2006). A combustão apresenta como características a utilização de um excesso de oxigénio, a temperaturas normalmente compreendidas entre 750°C a 1200°C, com rendimentos de produção de electricidade na ordem de 30% (Lourenço, 2006). Em sistemas de combustão genéricos, como sistemas de carvão pulverizado, as temperaturas podem atingir mais de 1500°C.

Uma das tecnologias de combustão usadas actualmente é a combustão em leito fluidizado (CLF). As vantagens desta tecnologia são várias, destacando-se a versatilidade de materiais combustíveis que podem ser usados, o facto de poder ocorrer de forma intermitente, bem como a possibilidade de redução de emissões *in situ* (Lopes, 2003).

O princípio da CLF é baseado na combustão de combustível com ar num leito fluidizado, por exemplo de areia, que ocorre numa câmara de combustão. Os formatos da câmara podem ser cilíndricos, paralelepípedicos ou cónicos, com dimensão variável (Barbosa, 2005).

Na Central Termoeléctrica de Duisburg (Alemanha), o sistema de combustão é constituído por silos de armazenagem de combustível e respectivo sistema de alimentação, por dois sistemas de injeção que fornecem o ar ao reactor (ar primário e ar secundário), um sistema de remoção de cinzas volantes com dois ciclones que serve também para se efectuar a recirculação das cinzas, uma caldeira de baixa entalpia para produzir vapor residual e reduzir a temperatura dos gases e um precipitador electrostático (Lopes, 2007) (Figura 8).

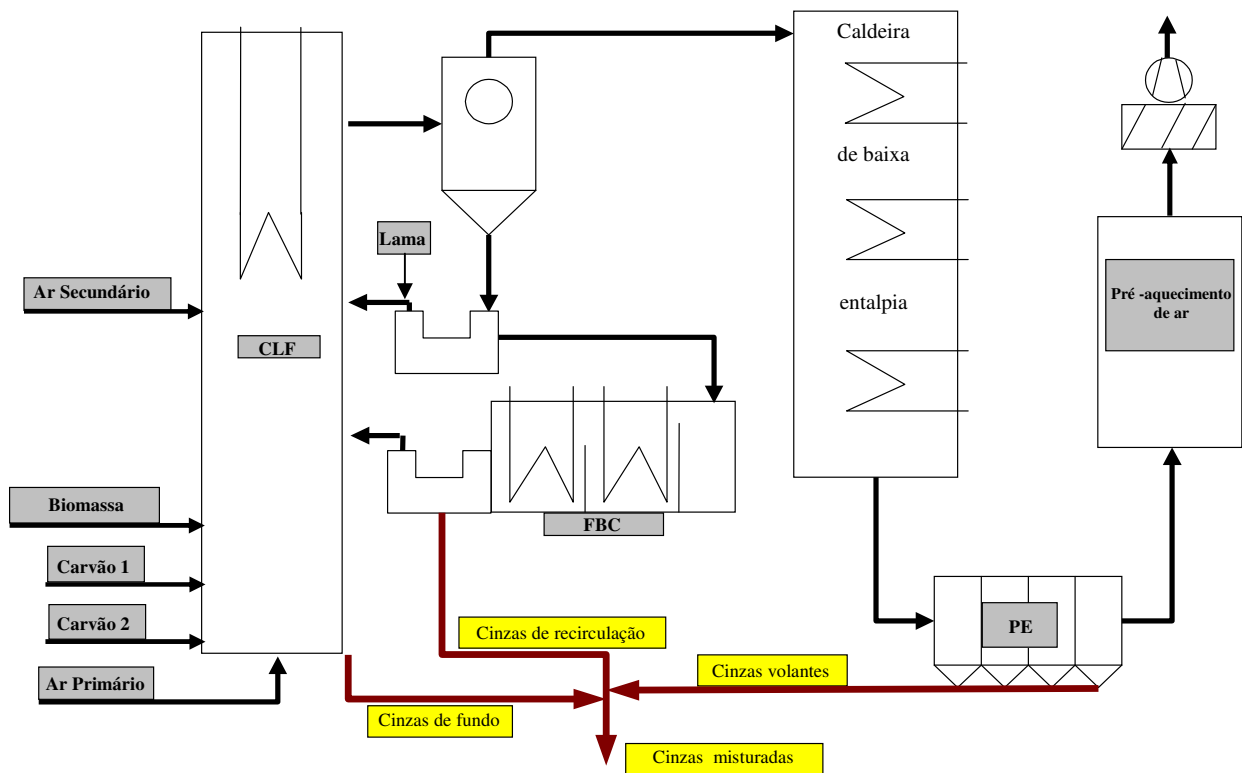


Figura 8 - Esquema representativo do sistema de CLF utilizado na unidade de co-combustão Stadtwerke Duisburg AG (COPOWER, 2005; adaptado de Lopes, 2007)

Num sistema de CLF, as temperaturas do leito de areia onde decorre a combustão oscilam entre os 800°C e 900°C, o que possibilita a recepção de materiais com PCI baixo, vários teores de humidade e granulometria, e teores de matéria mineral elevados, devido à elevada estabilidade térmica (Lopes, 2003). Estes sistemas possuem elevados tempos de residência dos materiais, o que favorece uma boa combustão. Na CLF ocorre ainda a combustão das fases mais voláteis ao longo do corpo dos reactores, melhorando a eficiência da queima.

No que respeita a poluentes, devido às temperaturas moderadas de funcionamento, e à alimentação do ar de combustão poder ocorrer de forma faseada, as emissões de óxidos de azoto são possíveis de ser controladas, diminuindo-se também a volatilização, responsável pela produção de partículas finas enriquecidas com metais pesados. Mediante a introdução de materiais adsorventes na zona de combustão, como calcário, é possível captar SO₂ na forma sólida (Lopes, 2003).

5 INFORMAÇÃO DE BASE PARA A AVALIAÇÃO SÓCIO-ECONÓMICA E AMBIENTAL

5.1 Descrição dos cenários estudados e dos fluxos médios de combustíveis

A análise sócio-económica e ambiental foi baseada em resultados obtidos em ensaios de combustão e co-combustão realizados à escala industrial, na Central Termoeléctrica de “Stadtwerke Duisburg AG” (SWDU), em Duisburg, na Alemanha. Neste trabalho foram estudados três cenários de combustão e co-combustão, onde foram utilizados combustíveis diferentes na alimentação da Central Termoeléctrica.

Os ensaios de combustão, à escala industrial, tiveram lugar em 2004 e 2005, na Central Termoeléctrica, com os seguintes combustíveis: carvão, farinha de carne e ossos, lamas de ETAR e *peletes* de madeira.

Os cenários estudados foram:

- Cenário 0 (Cenário de referência) – Corresponde ao consumo de um único combustível, o carvão, para alimentação da Central Termoeléctrica. Será a base de comparação com os restantes cenários, por representar a situação corrente de produção de energia eléctrica na Central;
- Cenário 1 – Corresponde à substituição parcial de carvão por lamas de ETAR e farinha de carne e ossos;
- Cenário 2 – Corresponde à substituição parcial de carvão por lamas de ETAR e *peletes* de madeira.

No Quadro 3 são apresentados os fluxos de utilização dos combustíveis, para cada um dos cenários.

Quadro 3 – Fluxos de combustíveis considerados na avaliação sócio-económica e ambiental de cada cenário

Combustível	Fluxos de combustíveis (t/h)		
	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
Carvão	35,00	29,40	30,00
Lamas de ETAR	-	3,93	4,95
Farinha de carne e ossos	-	9,46	-
Peletes de madeira	-	-	9,99
<i>Total</i>	35,00	42,79	44,95

No presente estudo foram consideradas algumas condições de funcionamento da Central Termoeléctrica (Quadro 4):

Quadro 4 – Características da Central Termoeléctrica de Stadtwerke Duisburg AG (SWDU)

Parâmetros de caracterização	Valores assumidos	Unidades
Potência instalada	240	MW _{térmicos}
Energia térmica produzida numa hora	240	MW _{térmicos}
Eficiência da conversão (térmica para eléctrica)	40%	-
Electricidade produzida	96	MWh _{eléctricos}
Consumo interno de energia	5% (da electricidade produzida)	-
Horas de trabalho diárias	24	h
Dias de trabalho por ano	335	d

5.2 Ensaio de combustão e co-combustão à escala industrial

5.2.1 Cenário 0

O cenário 0 foi estudado com base nos ensaios de combustão de carvão realizados entre as 4:00 h, de 21/08/2004, e as 2:00 h, de 24/08/2004, e entre as 6:00 h, de 21/10/2005, e as 8:00 h, de 24/10/2005.

A alimentação média de carvão situou-se entre os $33,5 \pm 3,3$ t/h, no primeiro ensaio, e os $35,9 \pm 3,3$ t/h, no segundo ensaio, com um coeficiente de variância de 9,85% e 9,19% respectivamente. Para efeitos de simplificação da análise sócio-económica e ambiental fixou-se o valor de alimentação em 35 t/h.

Relativamente ao fluxo médio de gases, considerou-se um caudal de $312000 \text{ m}^3/\text{h}$.

Na alimentação do leito fluidizado foi também adicionado calcário, com um fluxo de $0,066 \text{ t calcário/t carvão}$, tendo em vista o controlo das emissões de dióxido de enxofre (SO_2).

5.2.2 Cenário 1

O cenário 1 teve por base os ensaios de co-combustão de carvão, lamas de ETAR e farinha de carne e ossos que foram realizados entre as 3:30 h, de 24/08/2004, e as 21:15 h, de 24/08/2004.

Os fluxos médios de alimentação dos combustíveis são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Fluxos médios de alimentação de combustíveis no ensaio de co-combustão do cenário 1

Combustível	Alimentação (t/h)	Coefficiente de variação (%)
Carvão	$29,40 \pm 1,69$	5,7%
Lama de ETAR	$3,93 \pm 1,25$	31,8%
Farinha de carne e ossos	$9,46 \pm 2,23$	23,6%

Na alimentação do leito fluidizado foi também adicionado calcário, com um fluxo de $0,066 \text{ t calcário/t carvão}$, tendo em vista o controlo das emissões de dióxido de enxofre (SO_2).

5.2.3 Cenário 2

O cenário 2 foi estudado com base nos ensaios de co-combustão de carvão, lamas de ETAR e *peletes* de madeira que foram realizados entre as 9:00 h, de 27/10/2005, e as 6:00 h, de 28/10/2005, e entre as 16:45 h, de 03/11/2005, e as 11:00 h, de 05/11/2005.

Os fluxos médios de alimentação dos combustíveis são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Fluxos médios de alimentação de combustíveis no ensaio de co-combustão do cenário 2

Combustível	Alimentação (t/h)	Coefficiente de variação (%)
Carvão	30,00±1,89	6,3%
Lamas de ETAR	5,02±0,12	2,4%
<i>Peletes</i> de madeira	10,00±0,17	1,7%

Na alimentação do leito fluidizado foi também adicionado calcário, com um fluxo de 0,066 t calcário/t carvão, tendo em vista o controlo das emissões de dióxido de enxofre (SO₂).

5.3 Proveniência e caracterização dos combustíveis

Os combustíveis em estudo apresentam as seguintes características:

Quadro 7 – Características dos combustíveis em estudo

Combustível	Água (%)	PCI (GJ/t)	Carbono (% b.s.)
Carvão	13,0 (matéria húmida)	24,79 (matéria húmida)	66,4
Farinha de carne e ossos	2,9 (matéria húmida)	13,10 (matéria húmida)	56,4
Lamas de ETAR	74,6 (matéria húmida)	14,20 (matéria seca)	52,0
<i>Peletes</i> de madeira	7,6 (matéria húmida)	17,50 (matéria húmida)	49,6

Segundo uma amostra semelhante dos combustíveis em estudo (COPOWER, 2007), tem-se os valores do Quadro 8:

Quadro 8 – Caracterização aproximada de combustíveis ensaiados na Central Termoelectrica (COPOWER, 2007)

Combustível	Cinza (% b.s.)	Matéria volátil (% b.s.)
Carvão	12,6 (750°C)	37,0
Lamas de ETAR	44,9 (750°C)	49,6
Farinha de carne e ossos	38,5 (750°C)	55,9
Peletes de madeira	0,5 (550°C)	86,4

5.3.1 Carvão

O carvão utilizado nos ensaios industriais de combustão e co-combustão era proveniente da mina de El Cerrejón, localizada na Colômbia.

A mina de El Cerrejón localiza-se na América do Sul, na Colômbia, mais precisamente na localidade de La Guajira (Figura 9 e Figura 10).



Figura 9 – Localização da mina El Cerrejón (Cerrejón, 2008 - disponível em: www.cerrejoncoal.com)



Figura 10 – Vista parcial da mina El Cerrejón (El Colombiano, 2008 - disponível em: www.elcolombiano.com/proyectos/ReportajesGraficos/html/2004/Cerrejon.htm)

Ao longo dos 69000 hectares de depósitos de carvão, donde são extraídos, anualmente, 26 milhões de toneladas (Mt), processam-se as várias etapas que tornam o carvão passível de ser comercializado.

As operações de extracção iniciam-se com a abertura do poço, procedendo-se primeiro a uma limpeza da superfície, com a remoção do solo superficial. O solo é armazenado para operações posteriores de recuperação dos locais de extracção. Seguem-se a perfuração e a explosão de solo, que originam a fragmentação do carvão com os resíduos de solo e rocha.

Após a extracção, o carvão é transportado para a zona de empilhamento, seguindo posteriormente para a fase de moagem. Após a moagem, o carvão está em condições de ser comercializado, sendo por isso elevado para dois silos de armazenagem, onde aguarda o transporte ferroviário de 150 km até ao Porto de Bolivar.

As fases de extracção e tratamento do carvão encontram-se esquematizadas nas Figura 11 a 13.

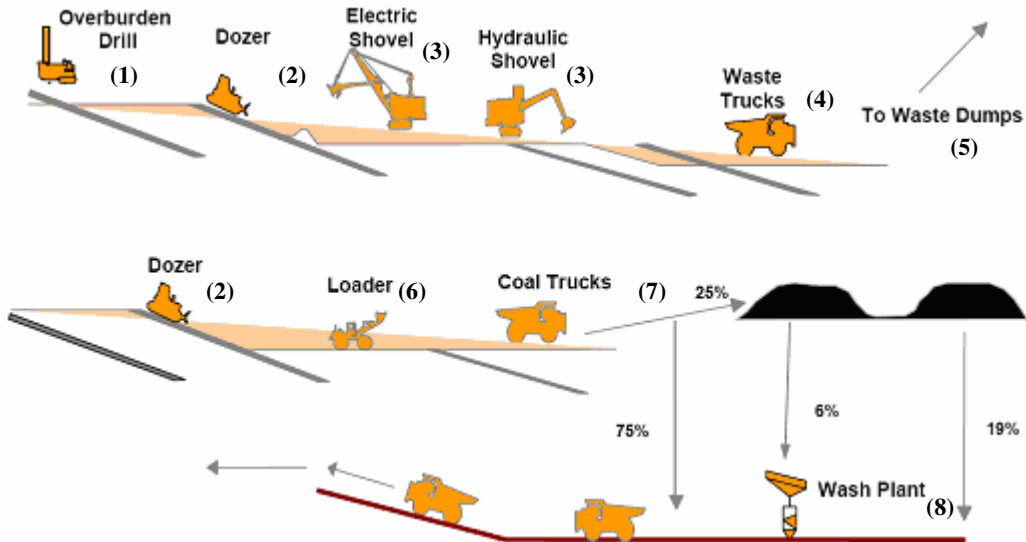


Figura 11 – Processo de extração do carvão na mina Cerrejon (Xstrata, 2006)

1 – Perfuradoras; 2 – Tratores de remoção de terras; 3 – Escavadoras; 4 – Transporte de desperdícios em camião; 5 – Vazão de desperdícios; 6 – Tractor de pá dianteira; 7 – Transporte de carvão em camião; 8 – Lavagem

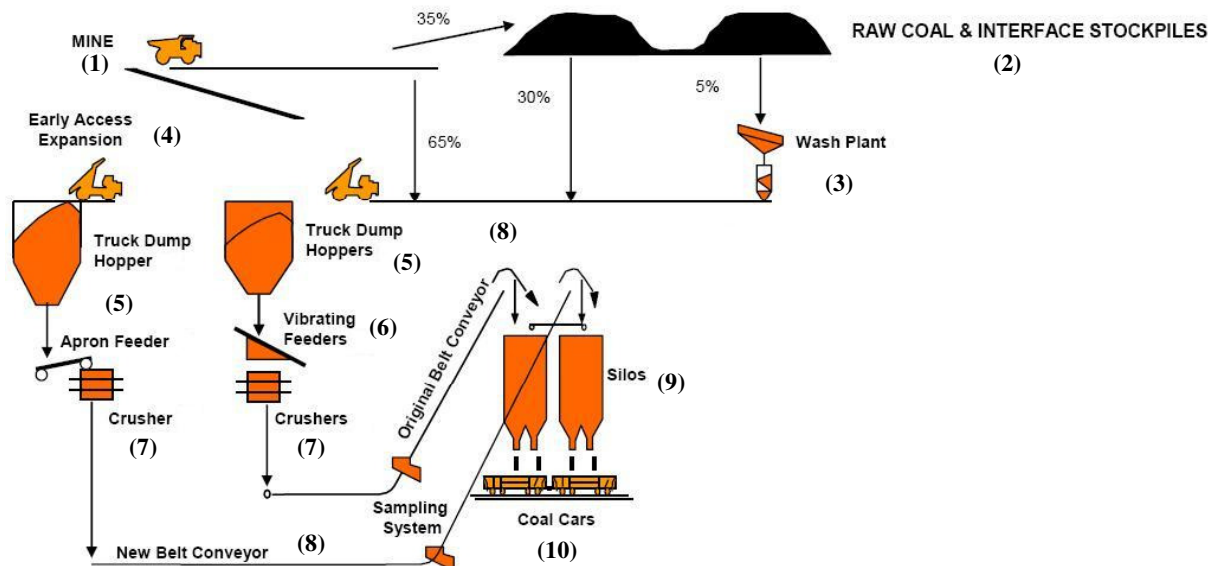


Figura 12 – Processo de tratamento do carvão na mina Cerrejon (Xstrata, 2006)

1 – Mina; 2 – Pilhas de carvão (zona de interface); 3 – Lavagem; 4 – Zona de acesso primária; 5 – Depósitos de carvão; 6 – Alimentador vibratório; 7 – Trituradores; 8 – Tapetes de transporte de carvão; 9 – Silos; 10 – Transporte de carvão em carros

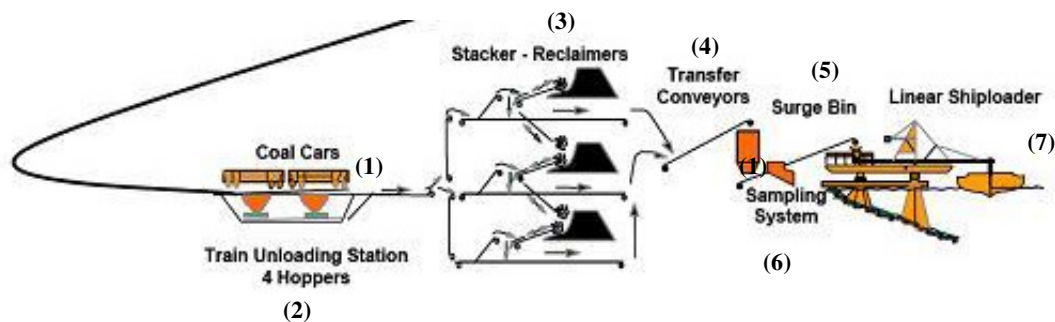


Figura 13 – Processo de armazenamento e transporte do carvão na mina Cerrejon (Xstrata, 2006)
1 – Carros de transporte de carvão; 2 – Estação ferroviária com quatro alimentadores; 3 – Empilhadores; 4 – Transportadores; 5 – Depósito; 6 – Sistema de amostragem; 7 – Carregamento de navio

Do Porto de Bolivar, o carvão é transportado por via marítima até ao Porto de Roterdão, na Holanda, percorrendo uma distância de cerca de 8100 km.

Do Porto de Roterdão, o carvão é transportado por via fluvial, até ao Porto de Duisburg, na Alemanha, e, finalmente, por camião para a Central Termoeléctrica de Stadtwerke Duisburg AG.

Na totalidade, desde a extracção do carvão até à sua chegada à Central Termoeléctrica de Duisburg, o custo da tonelada deste combustível era, na altura da realização dos ensaios à escala industrial, de cerca de 70 €, segundo a informação da Administração da Central Termoeléctrica.

De acordo com os dados do COPOWER (2007) que analisou uma amostra semelhante deste carvão, obtiveram-se as seguintes características (Quadro 9):

Quadro 9 – Composição química de uma amostra de carvão da mina de El Cerrejón, semelhante à utilizada nos ensaios de combustão e co-combustão à escala industrial (COPOWER, 2007)

Análise elementar (% b.s.)	
H	4,7
N	1,4
S	0,96
Cl	0,07
Ca	0,23
Fe	0,64
Al	1,29
K	0,24
Na	0,08
Mg	0,19
P	0,004
Metais pesados (b.s. mg/kg)	
As	LQ <10
Cd	<0,5
Cr	13,8
Cu	7,9
Mn	47,1
Ni	8,5
Pb	1,8
Zn	25,5
Hg	0,047

* LQ – Limite de quantificação

5.3.2 Calcário

O calcário utilizado nos ensaios de combustão e co-combustão foi extraído da mina de Rheinkalk, perto de Wülfrath, na Alemanha, localizada a 35 km da Central de Stadtwerke Duisburg AG.

Após a extracção, o calcário é processado industrialmente, elevado para armazenamento e posteriormente comercializado.

5.3.3 Lamas de ETAR

As lamas que foram usadas nos ensaios de combustão e co-combustão eram provenientes de uma Estação de Tratamento de Águas Residuais Urbanas próxima de Duisburg, sendo transportadas, por camião, até à Central Termoelétrica, numa distância de cerca de 20 km.

As características das lamas de ETAR (elementos constituintes, humidade, metais pesados, etc.) não são constantes e dependem de diversos factores, desde a sazonalidade das estações, ao período horário diário, ou à eficiência dos equipamentos da ETAR e tratamentos finais das lamas.

De acordo com dados do COPOWER (2007) que analisou uma amostra semelhante deste carvão, obtiveram-se as seguintes características indicadas no Quadro 10.

Quadro 10 – Composição química de uma amostra de lamas de ETAR, semelhante à utilizada nos ensaios de co-combustão à escala industrial (COPOWER, 2007)

Análise elementar (% b.s.)	
H	6,0
N	3,7
S	1,4
Cl	0,07
Ca	4,0
Fe	6,7
Al	2,5
K	0,43
Na	0,18
Mg	0,50
P	2,52
Metais pesados (b.s. mg/kg)	
As	LQ <10
Cd	LQ <5
Cr	101
Cu	695
Mn	736

Quadro 10 – (Continuação)

Metais pesados (b.s. mg/kg)	
Ni	46
Pb	323
Zn	145
Hg	1,251

* LQ – Limite de quantificação

A valorização térmica das lamas de ETAR's urbanas pode ser considerada um benefício social e ambiental, uma vez que estas têm associado um risco para a saúde pública, devido à sua reduzida estabilidade biológica e química. Segundo a Administração da Central Termoelétrica, são recebidos 5,00 €/t de lama de ETAR tratada, devido ao benefício social e ambiental associado a esta valorização térmica.

5.3.4 Farinha de carne e ossos

A farinha de carne e ossos (em inglês, “Meat and Bone Meal” - MBM) é produzida no sector de processamento de carnes e resulta do tratamento térmico dos resíduos gerados por este sector.

A farinha de carne e ossos utilizada nos ensaios de combustão e co-combustão foi transportada por camião no interior da Alemanha, percorrendo uma distância média de 200 km, segundo informação da Central Termoelétrica.

A farinha de carne e ossos pode ser considerada como um resíduo de oportunidade, uma vez que a sua produção não se realiza com fluxos tão constantes como a produção de lamas de ETAR. A sua utilização como um combustível de alimentação contínua não é, por isso, tão fácil como a das lamas de ETAR.

A valorização térmica deste resíduo pode também ser visto como um benefício social e ambiental, tendo em conta que este resíduo é química e biologicamente pouco estável. Segundo a Administração da Central Termoelétrica, são recebidos 5,00 €/t de farinha de carne e ossos eliminada, semelhantemente às lamas de ETAR.

As características da farinha de carne e ossos dependem de factores como o tipo de carnes processadas, a eficiência do sistema de processamento dos resíduos, entre outros.

No estudo do COPOWER (2007) foi feita uma avaliação de uma amostra da farinha de carne e ossos utilizada nos ensaios industriais de co-combustão. Os resultados são apresentados no Quadro 11.

Quadro 11 – Composição química de uma amostra de farinha de carne e ossos, semelhante à utilizada nos ensaios de co-combustão à escala industrial (COPOWER, 2007)

Análise elementar (% b.s.)	
H	4,8
N	8,5
S	0,43
Cl	0,29
Ca	13,4
Fe	0,02
Al	0,08
K	0,26
Na	0,63
Mg	0,24
P	5,00
Metais pesados (b.s. mg/kg)	
As	LQ <10
Cd	LQ <5
Cr	LQ <5
Cu	4,1
Mn	LQ <5
Ni	LQ <5
Pb	LQ <5
Zn	98
Hg	0,026

* LQ – Limite de quantificação

5.3.5 *Peletes de madeira*

Considerou-se que a origem das *peletes* de madeira foi uma cultura de rápido crescimento e curta rotação, destinada exclusivamente à produção de prensados de madeira. Considerou-se também que a distância média do local de produção de *peletes* à Central Termoeléctrica foi de 200 km.

Para a produção de *peletes* de madeira foram considerados necessários 1148 km² de área florestal, para uma produtividade de madeira de 7 t/(ha.ano).

Segundo informação da Administração da Central Termoeléctrica, o custo total de aquisição das *peletes* de madeira, incluindo os custos de transporte, foi de 154 €/t.

6 INDICADORES SÓCIO-ECONÓMICOS E AMBIENTAIS UTILIZADOS NO PRESENTE ESTUDO

A selecção dos indicadores utilizados no presente estudo teve por base o documento da Comissão Europeia desenvolvido no âmbito do IPCC, no qual se encontram identificados indicadores de referência (IPTTS, 2005). Os indicadores são aspectos ambientais e sócio-económicos passíveis de serem medidos e que estão associados aos impactes do processo que se pretende analisar: neste caso, a co-combustão de carvão com biomassa e resíduos não tóxicos.

No presente capítulo serão apresentados os indicadores ambientais e sócio-económicos que foram utilizados no presente estudo, num total de nove. Idealmente, seria um estudo tanto mais completo quanto mais indicadores nele fossem introduzidos. Contudo, existiram limitações relacionadas com a disponibilidade de informação de base, que impossibilitou a utilização de um número maior de indicadores. As razões da não inclusão de alguns indicadores, hipoteticamente importantes, será abordada no final do presente capítulo.

Devido ao maior número de indicadores ambientais disponíveis, foram seleccionados seis indicadores ambientais e apenas três sócio-económicos. Ainda assim, far-se-á um estudo de sensibilidade dos resultados da análise sócio-económica e ambiental em função da variação dos pesos atribuídos às duas categorias de indicadores.

6.1 Indicadores ambientais

Na selecção dos indicadores ambientais procurou-se abranger as consequências ambientais mais comuns que podem surgir associadas à co-combustão, quer seja na água, ar ou solo.

Na prática, um tipo de poluente pode estar incluído em mais do que um indicador, porque pode apresentar consequências a vários níveis. Por exemplo, o NO_x tanto pode

estar associado à acidez da chuva e da neve, como estar relacionado com a eutrofização de massas de água.

Nalguns casos, vários poluentes foram englobados num único indicador, uma vez que podem ser responsáveis por uma consequência comum, como por exemplo os gases que provocam o efeito de estufa. Esses poluentes individuais foram traduzidos em unidades equivalentes, isto é, foram comparados com base numa referência. Por exemplo, os gases com efeito de estufa foram traduzidos em unidades equivalentes de CO₂. Isto permite, não só, que poluentes distintos sejam comparados entre si, mas também perceber que poluentes possuem um efeito mais forte.

Os indicadores ambientais seleccionados foram os seguintes:

- a) Uso de combustíveis fósseis;
- b) Emissão evitada de gases com efeito de estufa (GEE);
- c) Emissão de gases com efeito acidificante;
- d) Emissão de compostos que contribuem para a eutrofização;
- e) Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico;
- f) Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono.

6.1.1 Uso de combustíveis fósseis

A escolha deste indicador está relacionada com a substituição de combustíveis de origem fóssil por outros de origem não fóssil, renováveis. Este é um assunto directamente relacionado com o âmbito deste estudo. A opção pela utilização de combustíveis fósseis (combustíveis não renováveis) conta como um factor negativo na avaliação ambiental.

O cálculo deste indicador resulta de um balanço entre os fluxos energéticos de entrada, directos e indirectos, de cada cenário, e os fluxos energéticos de saída, isto é, em grande parte, a energia total produzida pela Central Termoeléctrica de Duisburg. Este balanço pode ser expresso do seguinte modo:

$$\frac{\sum \text{input energético}}{\text{Energia Térmica}} (GJ_{\text{térmico}} \text{ consumido} / GJ_{\text{térmico}} \text{ produzido}) \quad (\text{Equação 2})$$

Quanto maior for este indicador, pior será o cenário em estudo, isto porque para a mesma produção de energia será necessário um maior fluxo de entrada de energia no sistema.

6.1.2 Emissão evitada de GEE

A emissão de GEE, em excesso, para a atmosfera terrestre provoca um aumento da retenção de radiações Infra-Vermelhas, que não deveriam ser absorvidas, e que consequentemente elevam a temperatura média do globo terrestre. Esta variação da temperatura global causa alterações climáticas que acabam por afectar todos os ecossistemas (Gore, 2006).

Políticas comunitárias e internacionais têm sido postas em prática para reduzir as emissões de gases que provocam esse efeito, tendo como objectivo atingir as metas definidas no Protocolo de Quioto. Como signatária do protocolo de Quioto, a UE tem a obrigatoriedade de reduzir as suas emissões de GEE de origem antropogénica, no período de 2008 a 2012, para que não ultrapasse em mais de 27% as emissões registadas em 1990.

As emissões indirectas associadas ao manuseamento e extracção do carvão estão associadas principalmente ao CH₄. O CO₂ e o N₂O resultam directamente da combustão do carvão, e indirectamente, do uso de combustíveis fósseis na extracção (maquinaria) e aplicação de fertilizantes nas actividades de gestão florestal.

Uma vez que cada um dos gases em estudo pode ter uma maior ou menor capacidade de provocar efeito de estufa, com base em Biewinga e van der Bijl (1996), Patyk (2000) e EEA (2006b), assumiram-se coeficientes de equivalência do potencial de efeito de estufa para os diferentes gases considerados. Os potenciais de efeito de estufa podem ser definidos como a relação entre o número de potenciais equivalentes por unidade de massa de uma substância, e o número de potenciais por unidade de massa de uma

substância de referência (Ferreira, 2004). Usou-se como padrão o CO₂, tendo-se traduzido os outros gases em equivalentes mássicos de CO₂ (Quadro 12).

Quadro 12 – Coeficientes de equivalência do potencial de efeito de estufa para diferentes gases

GEE	Potencial de efeito de estufa
CO ₂	1
CH ₄	21
N ₂ O	310

As emissões indirectas foram estimadas com base em Biewinga e van der Bijl (1996), Patyk (2000) e EEA (2006b). As emissões directas foram baseadas nos valores obtidos de emissões gasosas quantificadas por medições gasosas na Central Termoeléctrica ou estimadas pela percentagem de carbono presente em cada um dos combustíveis que foram utilizados.

Para cada um dos cenários estudados, foi avaliado o potencial de efeito de estufa, em função dos combustíveis utilizados. Em seguida, por comparação com o cenário de combustão de carvão, foi calculada a percentagem evitada de emissões de GEE, por unidade de energia térmica produzida:

$$\left[\sum \left(\left(\frac{kg \text{ CO}_2 \text{ eq.}}{G_{j \text{ térmico}} \text{ produzido}} \times Coef. \right) + (\dots) + \left(\frac{kg \text{ N}_2\text{O} \text{ eq.}}{G_{j \text{ térmico}} \text{ produzido}} \times Coef. \right) \right) \right]_{\text{Cenário 0}} - \left[\sum \left(\left(\frac{kg \text{ CO}_2 \text{ eq.}}{G_{j \text{ térmico}} \text{ produzido}} \times Coef. \right) + (\dots) + \left(\frac{kg \text{ N}_2\text{O} \text{ eq.}}{G_{j \text{ térmico}} \text{ produzido}} \times Coef. \right) \right) \right]_{\text{Cenário 1 ou 2}} \Big/ \left[\sum \left(\left(\frac{kg \text{ CO}_2 \text{ eq.}}{G_{j \text{ térmico}} \text{ produzido}} \times Coef. \right) + (\dots) + \left(\frac{kg \text{ N}_2\text{O} \text{ eq.}}{G_{j \text{ térmico}} \text{ produzido}} \times Coef. \right) \right) \right]_{\text{Cenário 0}} \times 100,$$

em % emissões fósseis de CO₂ eq. Evitadas (**Equação 3**)

O melhor cenário será o que apresentar um menor potencial de efeito de estufa, para uma mesma produção de energia na Central Termoeléctrica, isto é, o cenário que tiver uma maior percentagem de emissões evitadas de CO₂, comparativamente ao uso do carvão (cenário 0).

6.1.3 Emissão de gases com efeito acidificante

A emissão de compostos acidificantes tem uma grande variedade de impactos no solo, água subterrânea, águas superficiais, organismos biológicos, ecossistemas e materiais dos edifícios (Ferreira, 2004)

Para além das fontes naturais, a acidificação antropogénica provém da combustão de combustíveis fósseis e biomassa (EEA, 2000). A acidificação da atmosfera, litosfera e hidrosfera é um problema ambiental sério, uma vez que está associada a sectores de actividade importantes, com os transportes e a produção de energia, ou seja, sectores em crescimento nos países desenvolvidos e, em particular, nos países em desenvolvimento, como a China e a Índia (IEA, 2007).

Os gases que possuem um maior efeito acidificante são o dióxido de enxofre (SO_2), a amónia (NH_3) e os óxidos de azoto (NO_x) (IPTTS, 2005). O HCl e HF são dois ácidos, também emitidos em processos de combustão (Dias, 2006) que, pela sua forte acidez, podem afectar significativamente a acidificação dos compartimentos ambientais.

As emissões gasosas directas foram baseadas nos valores de medições de emissões gasosas na Central Termoeléctrica, durante os ensaios de combustão e co-combustão.

As emissões indirectas associadas à acidificação, foram estimadas com base em Biewinga e van der Bijl (1996) e Patyk (2000).

Os potenciais de acidificação considerados foram os apresentados no Quadro 13.

Quadro 13 – Coeficientes de equivalência do potencial acidificante

Compostos	Potencial de efeito acidificante
NO_x	0,71
HCl	0,88
SO_2	1,00
HF	1,61
NH_3	1,88

Para cada um dos cenários estudados, foi avaliado o potencial acidificante de cada composto, em função do fluxo de combustíveis utilizados, através das emissões de gases com potencial acidificante por unidade de energia térmica produzida:

$$\sum \left[\left(\frac{\text{kg } NO_x \text{ eq.}}{G_{j\text{térmico}} \text{ produzido}} \times \text{Coef.} \right) + (\dots) + \left(\frac{\text{kg } NH_3 \text{ eq.}}{G_{j\text{térmico}} \text{ produzido}} \times \text{Coef.} \right) \right],$$

em emissões de SO₂ eq.

(Equação 4)

O melhor cenário será o que apresentar um menor potencial de efeito acidificante, para uma mesma produção de energia na Central Termoelétrica, isto é, o cenário que tiver menos emissões.

6.1.4 Emissão de compostos que contribuem para eutrofização

A eutrofização é um processo que ocorre naturalmente, podendo evoluir em centenas de anos. Corresponde a um enriquecimento progressivo com nutrientes de massas de água com reduzida renovação de água, como lagos e albufeiras (Ferreira, 2004). Contudo, sob a acção antropogénica, este processo pode ser acelerado e desenvolver-se em poucas dezenas de anos.

O enriquecimento progressivo em nutrientes, nomeadamente azoto e fósforo, promove o desenvolvimento intenso de organismos produtores. Aquando da degradação da biomassa destas espécies de produtores, o consumo de oxigénio dissolvido é de tal modo intenso que pode provocar condições anóxicas, ou mesmo anaeróbias, num volume significativo destas massas de água. A alteração das condições de oxidação-redução junto aos sedimentos provocará a libertação de compostos fosforados para a massa de água (Ferreira, 2004). Quando a massa de água entra em circulação de Outono, este fósforo é redistribuído pela coluna de água, dando origem ao desenvolvimento da biomassa dos produtores primários. O processo desenvolve-se assim em ciclos, em que tendencialmente cada um representa um nível de disponibilidade de nutrientes superior ao anterior (ISA, 2000).

São vários os compostos responsáveis pela eutrofização de massas de água. Neste estudo foram considerados o NH_3 , o NO_x (como NO_2), NO_3^- e PO_4^{3-} , devido não só ao uso de fertilizantes nas actividades de gestão florestal para a produção de *peletes* de madeira, mas também às emissões resultantes da extracção e utilização de combustíveis fósseis e biomassa como combustíveis.

O potencial de eutrofização dos diferentes compostos foi padronizado com o ião NO_3^- , traduzindo-se os outros compostos em equivalentes mássicos de NO_3^- (Quadro 14).

Como nos casos anteriores, as emissões indirectas foram estimadas com base em Biewinga e van der Bijl (1996), Patyk (2000) e (2006b) e as emissões directas foram quantificadas por medição dos fluxos dos gases de exaustão da Central Termoeléctrica, durante os ensaios de combustão e co-combustão.

Quadro 14 – Coeficientes de equivalência do potencial de eutrofização dos compostos estudados

Compostos	Potencial de eutrofização
NO_3^-	1,00
NO_2	1,35
NH_3	3,64
PO_4^{3-}	10,45

De modo semelhante ao indicador anterior, para cada um dos cenários estudados foi avaliado o potencial eutrofizante de cada composto, em função do fluxo de combustíveis utilizados, através das emissões de compostos com potencial eutrofizante, por unidade de energia térmica produzida:

$$\sum \left[\left(\frac{\text{kg } \text{NO}_3^- \text{ eq.}}{\text{Gj}_{\text{térmico}} \text{ produzido}} \times \text{Coef.} \right) + (\dots) + \left(\frac{\text{kg } \text{PO}_4^{3-} \text{ eq.}}{\text{Gj}_{\text{térmico}} \text{ produzido}} \times \text{Coef.} \right) \right],$$

em emissões de NO_3^- eq.

(Equação 5)

O melhor cenário será o que apresentar um menor potencial de eutrofização, para uma dada produção de energia na Central Termoeléctrica, isto é, o cenário que tiver menos emissões de compostos eutrofizantes, comparativamente ao uso do carvão.

6.1.5 Emissão de compostos que contribuem para o nevoeiro fotoquímico

O nevoeiro fotoquímico, ou, na linguagem anglo-saxónica, “smog”, é um problema ambiental associado a áreas urbanas e industriais, em consequência da combustão industrial e automóvel.

Os principais responsáveis pelo nevoeiro fotoquímico, COV's e NO₂, são gases poluentes libertados pela combustão. Sob acção solar, estes reagem para produzir ozono que ao nível troposférico é considerado um poluente. Em concentrações elevadas pode, inclusive, colocar em risco a saúde humana (IPTS, 2005).

Não conhecendo bibliograficamente um termo de comparação dos gases mencionados em relação ao seu potencial de formação de nevoeiro fotoquímico, usaram-se as concentrações de NO₂, já referido nos indicadores anteriores.

À semelhança dos indicadores anteriormente referidos, as emissões indirectas de NO₂ foram estimadas com base em Biewinga e van der Bijl (1996), e Patyk (2000) e as emissões directas foram quantificadas nas medições dos fluxos dos gases de exaustão da Central Termoeléctrica, durante os ensaios de combustão e co-combustão. Foi calculada a percentagem evitada de emissões de NO₂, por unidade de energia térmica produzida, comparativamente ao cenário de referência:

$$\frac{kg\ NO_x\ eq.}{Gj_{térmico}\ produzido} \times Coef. \quad ,$$

em emissões de NO₂

(Equação 6)

O melhor cenário será o que apresentar um menor potencial de efeito de formação de nevoeiro fotoquímico, para uma dada produção de energia na Central Termoeléctrica.

6.1.6 Emissão de gases que contribuem para depleção da camada de ozono

A protecção da camada de ozono é fundamental para assegurar a vida na Terra, uma vez que o ozono estratosférico tem a capacidade de absorver grande parte da radiação ultravioleta B (UV-B), radiação solar que pode provocar efeitos nocivos (ou até mesmo letais) nos seres vivos, ameaçando assim a saúde humana e o ambiente (APA, 2008).

CFC's, COV's e N₂O estão entre os responsáveis pela destruição da camada de ozono (EEA, 2006a). Contudo, apenas o N₂O está associado aos cenários estudados, pelo que os restantes não serão considerados.

Este composto pode ter origem na produção de biomassa, pelo uso de fertilizantes, na extracção e transporte de matérias-primas fósseis (emissões indirectas) e na combustão de carvão e biomassa na Central Termoeléctrica (emissões directas).

O coeficiente de emissões indirectas estimado foi obtido de Biewinga e van der Bijl (1996), Patyk (2000) e as emissões directas foram quantificadas nas medições dos gases de exaustão da Central Termoeléctrica, no decurso dos ensaios de combustão de carvão e co-combustão de carvão, com biomassa e resíduos não tóxicos.

À semelhança do indicador anterior, foi calculada a emissão de NO₂, por unidade de energia térmica produzida:

$$\frac{\text{kg } N_2O \text{ emitido}}{Gj_{\text{térmico}} \text{ produzido}}, \text{ em emissões de NO}_2$$

(Equação 7)

O melhor cenário será o que apresentar uma menor emissão de N₂O, para uma dada produção de energia na Central Termoeléctrica.

6.2 Indicadores sócio-económicos

Consideraram-se os indicadores sócio-económicos seguintes como sendo os mais importantes no contexto do presente estudo:

- a) Potencial de criação de emprego;
- b) Custo de produção de electricidade;
- c) Custa da redução das emissões de CO₂.

6.2.1 Potencial de criação de emprego

A substituição de carvão por outro tipo de combustíveis acarreta, logicamente, uma alteração nos processos industriais associados à produção de energia, e, conseqüentemente, no número de empregos disponíveis e criados em cada processo.

Este indicador pretende avaliar se a perda de emprego num sector na Colômbia é colmatada pela criação de emprego na Europa, isto é, avalia o balanço de perdas e ganhos de emprego nos vários cenários.

O indicador foi medido com base no esforço de trabalho, expresso na unidade trabalhador-hora, relativamente a uma dada unidade de produção de energia na Central Termoeléctrica:

$$\frac{\text{trabalhador.hora}}{GWh_{\text{eléctrico}} \text{ produzido}} \quad (\text{Equação 8})$$

O melhor cenário será o que apresentar maior emprego criado no balanço perdas/ganhos.

6.2.2 Custo de produção de electricidade

O custo de produção de electricidade fornece uma estimativa do custo associado à obtenção de electricidade para cada cenário de combustão e co-combustão em estudo.

Com base no preço actual dos combustíveis e estimando o seu preço no futuro, no preço das licenças de emissão de CO₂, na taxa de carbono e nos custos de investimento e operação, foi possível estimar um custo de produção de electricidade para cada cenário.

O indicador foi calculado através do custo de produção, expresso em Euros de 1 kWh de energia eléctrica produzida:

$$\frac{\left(\frac{\text{€}}{\text{kWh produzido}}\right)_{\text{cenário 0}}}{\left(\frac{\text{€}}{\text{kWh produzido}}\right)_{\text{cenário 1 ou 2}}} \times 100 \quad (\text{Equação 9})$$

Para cada cenário, o valor deste indicador é apresentado como percentagem, em que 100% corresponde ao valor do custo de produção da energia eléctrica usando apenas carvão (cenário 0). O melhor cenário será o que apresentar uma menor percentagem dos custos relativos.

6.2.3 Custo da redução das emissões de CO₂

Com a substituição do carvão por combustíveis não fósseis, como biomassa, farinha de carne e ossos e lamas de ETAR, as emissões de CO₂ de origem fóssil deverão decrescer, dado que estes combustíveis são de origem florestal ou são sub-produtos de actividades de processamento de carnes e tratamento de águas residuais urbanas.

Este indicador pretende aferir a diferença dos custos de redução das emissões de CO₂ de origem fóssil dos cenários 1 e 2 comparativamente ao cenário 0:

$$\frac{\text{Custo Cenário 0 (€ / h)} - \text{Custo Cenário 1 ou 2 (€ / h)}}{t \text{ CO}_2 \text{ fossil evitada (t / h)}} \quad (\text{Equação 10})$$

O melhor cenário será o que apresentar um menor custo de produção da energia eléctrica, por cada tonelada de CO₂ fóssil reduzido.

6.3 Síntese dos indicadores sócio-económicos e ambientais utilizados no presente estudo

No Quadro 15 sintetizam-se os indicadores sócio-económicos e ambientais analisados no presente estudo, bem como as unidades em que se expressam.

Quadro 15 – Quadro síntese dos indicadores ambientais e sócio-económicos e respectivas unidades

	Indicadores	Unidades
Ambientais	1. Uso de combustíveis fósseis	GJ _{térmico} usado/GJ _{térmico} produzido
	2. Emissão evitada de GEE	CO ₂ eq.
	3. Emissão gases com efeito acidificante	kg SO ₂ eq. emitido/GJ _{térmico} produzido
	4. Emissão compostos que contribuem para Eutrofização	kg NO ₃ ⁻ eq. emitido/GJ _{térmico} produzido
	5. Emissão de gases que contribuem para Nevoeiro fotoquímico	kg NO _x (as NO ₂) emitido /GJ _{térmico} produzido
	6. Emissão gases que contribuem para depleção da camada de ozono	kg N ₂ O emitido /GJ _{térmico} produzido
Sócio-económicos	7. Potencial de criação de emprego	emprego (homem.hora) /GWh _{eléctrico} produzido
	8. Custo de produção de electricidade	Custo relativo kWh _{eléctrico} (%)
	9. Custa da redução das emissões de CO ₂	€/t CO ₂ eq. abatido

6.4 Indicadores não incluídos neste estudo

A selecção dos indicadores é discutível, como já foi referido. Após expor a motivação para os indicadores usados no presente estudo, apresentam-se possibilidades de indicadores não usados, e a razão pela qual não o foram.

a) Poluição da água

Uma vez que os indicadores acidificação e eutrofização englobam os poluentes mais comuns passíveis de danificar os cursos de água, incluindo poluição gerada por pesticidas, considerou-se que este indicador estava já subentendido noutros incluídos no estudo.

b) Produção e reutilização de resíduos

A escolha deste indicador não faria sentido, na medida em que são produzidos resíduos na extracção do carvão, calcário e produção de *peletes* de madeira, mas são também resíduos que vão alimentar a combustão em dos dois cenários: a farinha de carne e ossos e a lama de ETAR.

c) Desertificação

Considerando que as alterações climáticas e poluição são as principais causadoras de consequências que levam à desertificação, este indicador está incluído nos indicadores ambientais de uma maneira geral.

d) Erosão

Associada à desertificação, a erosão do solo partilha também algumas das suas causas, estando por isso também incluída nos indicadores ambientais. Seria interessante, num cenário em que a substituição de carvão por biomassa assumisse uma percentagem mais significativa, incluir este aspecto, devido à protecção que o coberto vegetal confere ao solo.

e) Perda de habitat

O nível de destruição de um habitat, bem como a possibilidade e tempo de recuperação do mesmo são factores que devem ser alvo de um estudo moroso e aprofundado, que se considera sair fora do âmbito do presente trabalho. Ainda assim, é um facto que a exploração da mina de carvão, mina de calcário, e da agricultura intensiva para a produção de *peletes* de madeira mereciam ser alvo de um estudo dessa magnitude, bem como uma avaliação da sustentabilidade usada no método de trabalho nas minas/floresta.

f) Saúde ambiental

Este é um indicador generalista, o qual depende de variáveis desde as emissões produzidas, ao local de trabalho de um profissional, pelo que se considerou, abrangido pela globalidade de indicadores presentes neste estudo.

g) Paisagismo

Não existe um grau de importância a atribuir a um aspecto visual, é relativo e depende do observador. Se hipoteticamente fosse incluído, não encaixaria num indicador ambiental, por se tratar de um critério estético, nem num indicador sócio-económico.

7 SISTEMA DE AGREGAÇÃO DOS INDICADORES

Por observação dos valores de um indicador, facilmente se conclui qual dos cenários apresenta um melhor comportamento. Contudo, tal observação não permite comparar indicadores com unidades diferentes, não evidencia as diferenças entre os mesmos e não permite decidir sobre o cenário global mais favorável. Para poderem ser feitas estas comparações é necessária uma agregação dos indicadores.

Optou-se por aplicar a metodologia de Biewinga e van der Bijl (1996), que permite converter os indicadores numa escala uniformizada, sendo depois agregados. Foram também atribuídos pesos a cada indicador, de forma a se poder atribuir uma importância relativa variável às componentes ambiental e sócio-económico.

No presente capítulo apresenta-se a metodologia de uniformização da escala de valores e de agregação dos indicadores.

7.1 *Sistema matemático de agregação*

Na metodologia de Biewinga e van der Bijl (1996), para cada indicador, é atribuída uma escala cujos valores variam entre 0 e 10. O valor 0 corresponde ao valor mínimo aceitável para o indicador, o valor 5 é o valor de referência e o 10 corresponde ao limite acima do qual o valor é totalmente satisfatório. Poder-se-á designar como sendo uma escala positiva crescente: quanto maior o valor, tanto melhor é o estado do indicador ambiental ou sócio-económico.

Para converter os valores de cada indicador da sua unidade para a escala de uniformização recorreu-se a uma função linear, tendo sido definido primeiramente a que valores correspondem o valor mínimo, o valor máximo e o de referência da escala uniformizada.

Ao avaliar-se um indicador, este pode ser considerado “positivo” ou “negativo” na sua categoria, na medida em que as suas consequências são positivas ou negativas. Por

exemplo, o indicador ambiental designado por “nevoeiro fotoquímico” é negativo, enquanto o indicador sócio-económico denominado por “potencial de criação de emprego” é considerado como sendo positivo (Quadro 16).

Quadro 16 – Indicadores positivos e negativos

	INDICADORES	
	Positivo	Negativo
Ambientais	Emissão evitada de GEE	Uso de combustíveis fósseis
		Emissão gases com efeito Acidificante
		Emissão compostos que contribuem para Eutrofização
		Emissão gases que contribuem para Nevoeiro fotoquímico
		Emissão gases que contribuem para Depleção do ozono
Sócio-económicos	Potencial de criação de emprego	Custo de produção de electricidade
		Custo do abatimento das emissões de CO ₂

Quanto maior for o valor de um indicador “negativo” na sua escala, menor será o seu valor na escala uniformizada. No caso de um indicador “positivo”, quanto maior for o seu valor na sua escala, tanto maior será o seu valor (Figura 14 e Figura 15).

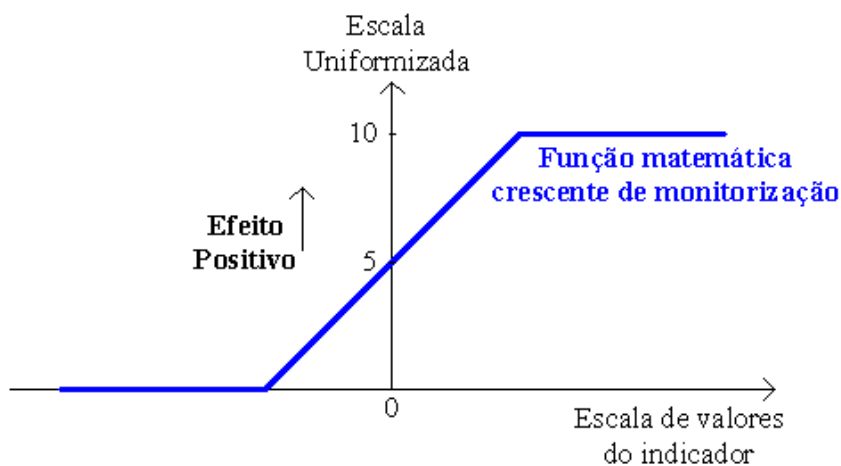


Figura 14- Exemplo de uma escala uniformizada para um indicador positivo

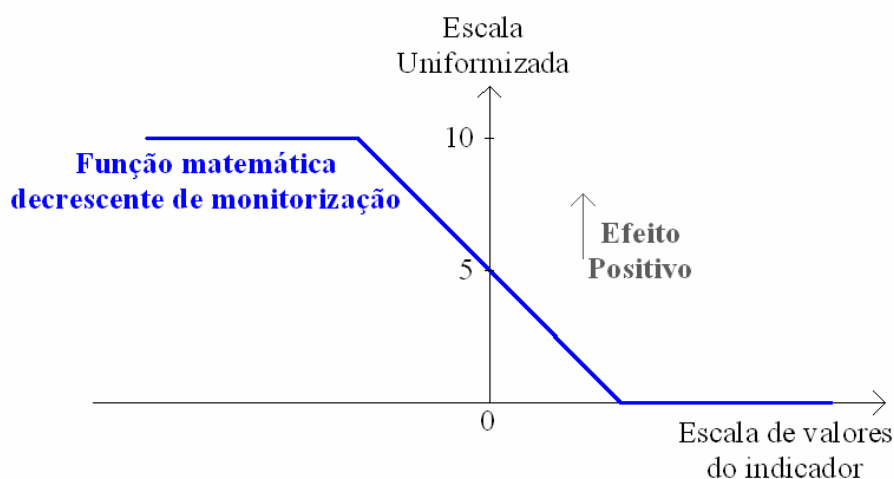


Figura 15 – Exemplo de uma escala uniformizada para um indicador negativo

7.2 Valores de referência

Os valores da escala uniformizada 0, 5 e 10, definidos para cada um dos indicadores, são justificados seguidamente.

7.2.1 Uso de combustíveis fósseis

O valor de referência 5 foi atribuído ao cenário hipotético em que todo o consumo de energia fóssil resulta em energia térmica. O valor inicial 0 na escala uniformizada, corresponde a um incremento de 50% na utilização de energia fóssil, e o valor 10 para uma redução de 50%, para a mesma produção de energia.

7.2.2 Emissões evitadas de GEE

O valor 10 na escala uniformizada corresponde ao limite máximo acordado no Conselho Europeu, em Março de 2007, de reduzir as emissões de GEE em 20%. O valor 0 corresponde à não redução de emissões e o valor de referência 5, a 10% de emissões reduzidas.

7.2.3 Emissão de gases com efeito acidificante

O valor 10, na escala uniformizada, foi considerado como sendo correspondente ao nível zero de emissões de gases acidificantes. O valor 0 corresponde a 0,4 kg SO₂ eq./GJ_{térmico}, calculado com base no valor de Biewinga e van der Bijl (1996) de 50 kg SO₂ eq./ha para os cenários que utilizam biomassa. Para efeito de cálculos deste valor, a produtividade de madeira foi considerada de 7 t/ha e o índice energético da madeira em 17,5 GJ/t, para um teor de água de 7,5 %, segundo a metodologia já mencionada. O valor de referência 5 definido para a escala uniformizada, foi de 0,2 kg SO₂ eq./GJ_{térmico}.

7.2.4 Emissão de compostos que contribuem para eutrofização

O valor 10 na escala uniformizada foi considerado correspondente ao nível zero de emissões de gases com efeito eutrofizante. O valor 0 corresponde a 1,6 kg NO₃⁻ eq./GJ_{térmico}, calculado com base no valor de Biewinga e van der Bijl (1996) de 200 kg NO₃⁻ eq./ha para os cenários que utilizam biomassa. De forma semelhante ao indicador anterior, para efeito de cálculos, a produtividade de madeira foi considerada de 7 t/ha e o índice energético da madeira em 17,5 GJ/t, para um teor de água de 7,5 %. O valor de referência 5 definido para a escala uniformizada foi de 0.8 kg NO₃⁻ eq./GJ_{térmico}.

7.2.5 Emissão de gases que contribuem para nevoeiro fotoquímico

O valor 10 na escala uniformizada foi considerado correspondente ao nível zero de emissões de compostos capazes de gerarem nevoeiro fotoquímico. O valor 0 corresponde a 0,3 kg NO₂ eq./GJ_{térmico}, com base no indicador acidificação e supondo que NO_x corresponde a cerca de metade das emissões de acidificação, com um potencial de acidificação de 0,71. O valor de referência 5 definido para a escala uniformizada foi de 0,15 kg NO₂ eq./GJ_{térmico}.

7.2.6 Emissão de gases que contribuem para potencial de depleção da camada de ozono

O valor 10 na escala uniformizada foi considerado correspondente ao nível zero de emissões de compostos com capacidade de causarem depleção da camada de ozono. O valor 0 corresponde a $0,06 \text{ kg N}_2\text{O/GJ}_{\text{térmico}}$ calculado com base no valor de Biewinga e van der Bijl (1996) de $7 \text{ kg N}_2\text{O/ha}$ para os cenários que utilizam biomassa. A produtividade de madeira foi considerada de 7 t/ha e o índice energético da madeira em $17,5 \text{ GJ/t}$, para um teor de água de $7,5 \%$. O valor de referência 5 definido para a escala uniformizada foi de $0,03 \text{ kg NO}_3^- \text{ eq./GJ}_{\text{térmico}}$.

7.2.7 Criação de emprego

A situação de referência, ou seja, o valor 5 da escala uniformizada corresponde ao cenário em que não há perda nem criação de emprego, isto é, a situação descrita no cenário 0. O valor 10 da escala uniformizada corresponde a $176 \text{ homens-hora/GWh}_{\text{elétrico}}$ produzidos na central e o valor 0 a $-176 \text{ homens-hora/GWh}_{\text{elétrico}}$. Este valor corresponde a um mês de trabalho por cada $\text{GWh}_{\text{elétrico}}$ produzido, com uma média de 6 homens-hora para produzir 7 t/ha , segundo Biewinga e van der Bijl (1996).

7.2.8 Custo de produção de electricidade

A condição de referência (valor 5 da escala uniformizada) corresponde ao cenário em que se usa apenas o carvão como combustível (cenário 0), onde o custo relativo de produção de electricidade é de 100. O valor 10 da escala uniformizada corresponderá a 50% do custo de produção de electricidade do cenário 0, e o valor 0 corresponderá a um aumento dos custos para 150%.

7.2.9 Custo da redução da emissão de CO₂

A condição de referência (valor 5 da escala uniformizada) corresponde ao cenário hipotético em que o custo de produção de electricidade corresponde a 100%, ou seja, o custo de redução de emissões é nulo.

O valor 10 da escala uniformizada corresponderá a uma poupança de -100 €/t CO₂ eq. reduzido, e o valor 0 a um custo de +100 €/t CO₂ eq. reduzido.

No Quadro 17 apresenta-se o resumo dos valores da escala uniformizada, para cada indicador avaliado no presente estudo.

Quadro 17 – Valores de referência dos indicadores na escala uniformizada

Indicadores	Unidades	Correspondência de valores com a escala uniformizada		
		0	5	10
1. Uso de combustíveis fósseis	GJ _{térmico} usado/GJ _{térmico} produzido	≥1,5	1,0	≤0,5
2. Emissão evitada de GEE	% CO ₂ eq.	≤0	10	≥20
3. Emissão de Gases com efeito Acidificante	kg SO ₂ eq. emitido/GJ _{térmico} produzido	≥0,4	0,2	≤0,0
4. Emissões de compostos que contribuem para Eutrofização	kg NO ₃ ⁻ eq. emitido/GJ _{térmico} produzido	≥1,6	0,8	≤0,0
5. Emissão de Gases que contribuem para Nevoeiro fotoquímico	kg NO _x (as NO ₂) emitido /GJ _{térmico} produzido	≥0,30	0,15	≤0,00
6. Emissão de Gases que contribuem para Depleção do ozono	kg N ₂ O emitido /GJ _{térmico} produzido	≥0,050	0,025	≤0,000
7. Potencial de criação de emprego	emprego (homem.hora) /GWh _{eléctrico} produzido	≤-176	0,00	≥176
8. Custo de produção de electricidade	% Custo relativo kWh _{eléctrico}	≥150	100	≤50
9. Custo da redução das emissões de CO ₂	€/t CO ₂ eq. reduzido	≥100	0,00	≤-100

7.3 Atribuição de pesos

Tendo por base o trabalho de Biewinga e van der Bijl (1996), usou-se a metodologia descrita seguidamente, tendo por objectivo o cálculo de uma pontuação final, S_j , para cada cenário, com base no conjunto de indicadores ambientais e sócio-económicos estudados.

As pontuações de S_j foram obtidas com a seguinte função média ponderada:

$$S_j = \frac{\sum_{i=1}^N w_i S_{ij}}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad \text{(Equação 11)}$$

Onde:

S_j – Pontuação de agregação para cada cenário;

w_i – Peso para o indicador i ;

S_{ij} – Pontuação de cada indicador i para cada cenário j ;

i – Indicador ambiental ou sócio-económico i ;

N – Número de indicadores estudados;

Esta metodologia permite também a comparação de grupos de indicadores. As pontuações podem ser obtidas separadamente no caso dos indicadores ambientais ou sócio-económicos, pelas seguintes funções:

$$S_{j,amb} = \frac{\sum_{i,amb=1}^{N,amb} w_i S_{ij}}{\sum_{i,amb=1}^{N,amb} w_i} \quad \text{(Equação 12)}$$

$$S_{j,soc} = \frac{\sum_{i,soc=1}^{N,soc} w_i S_{ij}}{\sum_{i,soc=1}^{N,soc} w_i} \quad \text{(Equação 13)}$$

Onde as variáveis têm os mesmos significados que foram indicados para a equação anterior e:

amb – Indicador ambiental;

soc – Indicador sócio-económico.

Para o cálculo dos pesos dos indicadores foi assumido que a soma total dos pesos é igual ao número total dos indicadores, isto é:

$$\sum_{i=1}^N w_i = \sum_{i,amb=1}^{N,amb} w_i + \sum_{i,soc=1}^{N,soc} w_i = N = 9 \quad (\text{Equação 14})$$

Numa das abordagens do presente estudo, estudar-se-á o caso em que a soma dos pesos dos indicadores ambientais é igual à soma dos pesos dos indicadores sócio-económicos, ou seja:

$$\sum_{i,amb=1}^{N,amb} w_i = \sum_{i,soc}^{N,soc} w_i = \frac{N}{2} = 4,5 \quad (\text{Equação 15})$$

Como os indicadores são nove no total, seis ambientais e três sócio-económicos, e as categorias terão um peso igual a 4,5, cada indicador ambiental terá um peso inferior a cada um dos indicadores sócio-económicos.

Numa outra abordagem, serão testados pesos diferentes de indicadores. No caso de ser testado um indicador ambiental, cujo peso seja favorecido relativamente aos restantes, tem-se a seguinte fórmula:

$$\sum_{i=1}^N w_i = w_{I,amb} + \sum_{i,amb=1}^{N-1,amb} w_i + \sum_{i,soc=1}^{N,soc} w_i = 9 \quad (\text{Equação 16})$$

em que $w_{I,amb} > w_{i,amb}$

No estudo que pretende incrementar o peso de um indicador sócio-económico, a formula a aplicar será:

$$\sum_{i=1}^N w_i = w_{I,soc} + \sum_{i,amb=1}^{N,amb} w_i + \sum_{i,soc=1}^{N-1,soc} w_i = 9 \quad \text{(Equação 17)}$$

em que $w_{I,soc} > w_{i,soc}$

8 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA

Para completar o objectivo deste trabalho, é necessário proceder-se a uma quantificação das emissões directas e indirectas, e da energia, associadas a cada um dos combustíveis usados.

Determinaram-se os fluxos energéticos desde a produção/extracção dos combustíveis até à sua chegada à Central Termoeléctrica. Tentou abranger-se o maior número de operações donde pudessem resultar emissões e onde estava implícito um consumo de energia significativo. Contudo, na prática, ressalva-se que existirão sempre possibilidades não abrangidas por estes cálculos.

Os fluxos energéticos a calcular são baseados em emissões directas, obtidas de medições de gases na Central Termoeléctrica de Stadtwerke Duisburg AG, e emissões indirectas baseadas em dados bibliográficos.

8.1 Emissões e energia associadas ao combustível carvão e calcário

8.1.1 Extracção do carvão e calcário

Considerando o cenário 0, em que o abastecimento da Central Termoeléctrica é feito unicamente com carvão, ou seja, o cenário em que é consumida a maior quantidade de carvão, o consumo anual de carvão na central de Duisburg seria o seguinte:

$$35 \text{ t/h} \times 24 \text{ h/d} \times 335 \text{ d/ano} = 289440 \text{ t/ano} \quad \text{(Equação 18)}$$

O consumo de calcário, relativamente ao consumo de carvão, seria o seguinte:

$$0,066 \text{ t/t} \times 289440 \text{ t/ano} = 19103,04 \text{ t/ano} \quad \text{(Equação 19)}$$

Em 2005, a produção de carvão na mina de El Cerrejón foi de 26 Mt, sendo, pelos valores acima calculados, 1,1% destinados à Central Termoeléctrica de Duisburg.

Para extracção de 1 t de carvão são produzidas 16,2 t de resíduos de solo e rocha (Xstrata, 2006). Tendo por base esta informação, o total de resíduos de solo e rocha a serem manuseados seria, em 2005, de 421,1 Mt.

O manuseamento de materiais no processo de extracção implica maquinaria e, conseqüentemente, consumos energéticos, que foram incluídos neste estudo. Para tal, foram retirados de bibliografia os coeficientes de emissão e factores energéticos associados.

Os factores energéticos têm em consideração a intensidade do uso de cada máquina, bem como se está associada ao uso de carvão ou dos resíduos de solo e rocha.

Na extracção de carvão e calcário considerou-se que o tipo de maquinaria a usar era idêntica. Para cada tonelada de carvão ou calcário a extrair, os fluxos energéticos associados, por máquina em obra, seriam os apresentados no Quadro 18.

Quadro 18 – Consumos energéticos associados à maquinaria de extracção de carvão e calcário

Maquinaria	Energia (kJ/t)	Combustível
Perfuradora	1192,2	Gasóleo
Tractores de remoção de terras	7585,9	Gasóleo
Niveladora	36,9	Gasóleo
Tractor de pá dianteira	5391,3	Gasóleo
Escavadora eléctrica	2627,1	Gasóleo
Escavadora hidráulica	4072,5	Gasóleo
<i>Total</i>	20905,9	-

Anualmente, os consumos energéticos associados à extracção de materiais, para funcionamento da Central Termoeléctrica de Duisburg, são os apresentados no Quadro 19.

Quadro 19 – Consumos energéticos anuais associados à extracção de carvão, calcário e resíduos produzidos

Materiais	Quantidade (t/ano)	Energia (GJ/ano)
Carvão	289440	6051,0
Resíduos de solo e rocha	4688928	98026,2
Calcário	19103	399,4
<i>Total</i>	<i>4997471</i>	<i>104476,6</i>

Observando o Quadro 19, constata-se que 94% da energia total é consumida pelas operações associadas aos resíduos de solo e rocha.

O consumo energético total por tonelada de carvão, isto é, tendo em conta o carvão, o calcário e os resíduos de solo e rocha, foi o seguinte:

$$\frac{104476,6}{289440} = 0,361 \text{ GJ} / t \quad (\text{Equação 20})$$

Os coeficientes de emissão associados ao gasóleo usado na maquinaria (Patyk, 2000; e EIA, 2006) são os apresentados no Quadro 20.

Quadro 20 – Emissões associadas ao gasóleo usado na maquinaria, no processo de extracção

Poluente	Coefficientes de emissão (kg/GJ)
CO ₂	85,2
NO _x	1,24
SO ₂	0,153

Com base nos coeficientes de emissão e no consumo energético, as emissões totais das máquinas de extracção a gasóleo, por tonelada de carvão usada na Central Termoeléctrica, são as apresentadas no Quadro 21.

Quadro 21 – Emissões associadas ao gasóleo usado na maquinaria, no processo de extracção

Poluente	Emissões (kg/t)
CO ₂	30,760
NO _x	0,448
SO ₂	0,055

Importa relembrar que as determinações de consumo de energia e das emissões associadas, neste subcapítulo, têm por base o pior caso possível, aquele em que é necessária uma maior quantidade de carvão para alimentar a Central Termoeléctrica.

8.1.2 Moagem e classificação de carvão e calcário

Após extracção, o carvão e o calcário são sujeitos a um processo de moagem e classificação.

As quantidades de combustível sujeitos a moagem e classificação são as seguintes:

$$289440 \text{ t / ano (carvão)} + 19103 \text{ t / ano (calcário)} = 308543 \text{ t / ano} \quad \text{(Equação 21)}$$

As operações necessárias a estes processos são realizadas por equipamentos electromecânicos específicos, com consumos energéticos associados. A energia primária consumida, para esse efeito, por tonelada de combustível moído, é 1856 kJ/t (Xstrata, 2006). Assim, o consumo total de energia primária foi o seguinte:

$$308543 \text{ t / ano} \times 1856 \text{ kJ / t} = 572,7 \text{ GJ} \quad \text{(Equação 22)}$$

Por tonelada, o consumo total de energia, foi o seguinte:

$$\frac{572,7}{289440} = 0,002 \text{ GJ / t} \quad \text{(Equação 23)}$$

No que respeita às emissões, os coeficientes de emissão associados à energia usada na moagem e classificação de carvão e calcário são os apresentados no Quadro 22.

Quadro 22 – Coeficientes de emissão associados às operações de moagem e classificação de carvão e calcário

Poluente	Coefficiente de emissões (kg/GJ)
CO ₂	95,500
NO _x	0,168
SO ₂	0,108

Com os coeficientes do Quadro 22 e o total de energia por tonelada, determinaram-se as emissões associadas à moagem e classificação do carvão e calcário (Quadro 23).

Quadro 23 – Emissões poluentes associadas às operações de moagem e classificação de carvão e calcário

Poluente	Emissões (kg/t)
CO ₂	0,1910
NO _x	0,0003
SO ₂	0,0002

8.1.3 Transporte e elevação de carvão, resíduos de solo e rocha, e calcário, nas minas

Do local de extracção, nas minas, até ao local de processamento e armazenamento, o carvão, resíduos de solo e rocha (produzidos na extracção), e calcário, são transportados por camiões a gasóleo.

Foram assumidas as distâncias e altura de elevação apresentadas no Quadro 24, para cada um dos materiais.

Quadro 24 – Distâncias e altura de elevação nas operações de transporte e armazenamento de carvão, resíduos de solo e rocha, e calcário

Materiais	Quantidade (t/ano)	Distância (km)	Elevação (m)
Carvão	289440	15	50
Resíduos de solo e rocha	4688928	5	30
Calcário	19103	1	30

Usando as quantidades e as distâncias apresentadas no Quadro 24 e um factor de energia para o transporte de material em camião de 859 kJ/(t.km) (Xstrata, 2006; EIA, 2006), foi possível calcular os consumos energéticos associados ao transporte (Quadro 25).

Quadro 25 – Energia associada à distância de transporte de carvão, resíduos de solo e rocha, e calcário, nas minas

Materiais	Transporte (t.km/ano)	Energia (GJ/ano)
Carvão	4341600	3729,4
Resíduos de solo e rocha	23444640	20138,9
Calcário	19103	16,4

Considerando 80% de eficiência do camião, as toneladas anuais e a elevação definidas no Quadro 24, calcularam-se os valores de energia associados à elevação dos materiais (Quadro 26), de acordo com a seguinte equação:

$$\frac{m (t / ano) \times h (m) \times 9,82 m.s^{-2}}{0,8} \quad \text{(Equação 24)}$$

Quadro 26 – Energia associada à elevação de carvão, resíduos de solo e rocha, e calcário, nas minas

Materiais	Energia (GJ/ano)
Carvão	177,6
Resíduos de solo e rocha	1726,7
Calcário	7,0

Incluindo a distância e a elevação, o consumo total de energia devido a transporte, nas minas, foi o apresentado no Quadro 27.

Quadro 27 – Energia total associada à distância e elevação de carvão, resíduos de solo e rocha, e calcário, nas minas

Materiais	Energia (GJ/ano)
Carvão	3907,0
Resíduos de solo e rocha	21865,6
Calcário	23,4
<i>Total</i>	25796,0

Pelo Quadro 24 e Quadro 27, o consumo total de energia nas operações de transporte e elevação de materiais, por tonelada de carvão a exportar para a Central Termoelétrica de Duisburg, foi o seguinte:

$$\frac{25796}{289440} = 0,089 \text{ GJ} / t \quad (\text{Equação 25})$$

Relativamente ao consumo de gasóleo usado nas operações de transporte e elevação, os coeficientes de emissão retirados de bibliografia, foram os apresentados no Quadro 28.

Quadro 28 – Coeficientes de emissão para o transporte e elevação de carvão, resíduos de solo e rocha e calcário, nas minas

Poluente	Coeficientes de emissão (kg/GJ)
CO ₂	85,200
NO _x	0,966
SO ₂	0,141

As emissões associadas ao transporte e elevação, por tonelada de material, são os apresentados no Quadro 29.

Quadro 29 – Emissões totais do transporte elevação de carvão, resíduos de solo e rocha, e calcário, nas minas

Poluente	Emissões (kg/t)
CO ₂	7,583
NO _x	0,086
SO ₂	0,013

8.1.4 Consumo energético devido aos funcionários de El Cerrejón

Segundo informações de El Cerrejón, o número total de trabalhadores na mina ascende a 8776, sendo responsáveis por um consumo energético de 8,56 GJ/(funcionário.ano). O consumo energético anual associado aos funcionários foi o seguinte:

$$8776 \times 8,56 = 75123 \text{ GJ / ano} \quad (\text{Equação 26})$$

Considerando as 26 Mt anuais de carvão extraídas da mina, a energia consumida pelos funcionários, por tonelada de carvão, foi a seguinte:

$$\frac{75123}{26000000} = 0,0029 \text{ GJ / t} \quad (\text{Equação 27})$$

Os coeficientes de emissão associados à presença de funcionários na mina, segundo a bibliografia, são os apresentados no Quadro 30.

Quadro 30 – Coeficientes de emissão associados à presença de funcionários na mina

Poluente	Coefficientes de emissão (kg/GJ)
CO ₂	95,500
NO _x	0,168
SO ₂	0,108

As emissões devidas à presença dos trabalhadores de El Cerrejón, por tonelada de carvão, foram as apresentadas no Quadro 31.

Quadro 31 – Emissões associadas aos funcionários de El Cerrejón

Poluente	Emissões (kg/t)
CO ₂	0,2770
NO _x	0,0005
SO ₂	0,0003

8.1.5 Consumo de água em El Cerrejón

Cerca de 5000000 m³ de água são consumidos anualmente em El Cerrejón, segundo informações da mina, para fins industriais, domésticos e ambientais (Xstrata, 2006).

Assumiu-se que este recurso necessita ser elevado cerca em 100 m e que a bombagem eléctrica tem um rendimento de 80%, para uma produção e distribuição de electricidade

com 35% de eficiência. Assim, a energia necessária para a produção e distribuição de água, foi a apresentada na equação 28:

$$\frac{5 \times 10^9 \text{ kg / ano} \times 100 \text{ m} \times 9,82 \text{ m.s}^{-2}}{(0,8 \times 0,35)} = 17536 \times 10^9 \text{ J / ano} = 17536 \text{ GJ / ano}$$

(Equação 28)

A energia necessária, por tonelada de carvão extraído da mina El Cerrejón, para a mesma produção e distribuição de água, foi a seguinte:

$$\frac{17536}{26000000} = 0,00067 \text{ GJ / t} \quad \text{(Equação 29)}$$

No que respeita a emissões, os coeficientes retirados de bibliografia, associados ao abastecimento de água na mina, são os apresentados no Quadro 32.

Quadro 32 – Coeficientes de emissão para as necessidades de abastecimento de água de El Cerrejón

Poluente	Coeficientes de emissão (kg/GJ)
CO ₂	95,500
NO _x	0,168
SO ₂	0,108

Com os coeficientes de emissão foram calculadas as emissões totais associadas ao abastecimento de água, por tonelada de carvão (Quadro 33).

Quadro 33 – Emissões totais para as necessidades de abastecimento de água de El Cerrejón

Poluente	Emissões (kg/t)
CO ₂	0,064
NO _x	0,0001
SO ₂	0,00007

Emissões de metano na mina

As emissões de metano (CH₄), na mina El Cerrejón, foram consideradas como atingindo um valor de 1,91 kg por tonelada de carvão extraído (EIA, 2006)

8.1.6 Transporte de carvão por comboio desde El Cerrejón até ao Porto de Bolívar

O carvão destinado à Central Termoeléctrica de Duisburg necessita ser transportado por comboio, de El Cerrejón até ao Porto de Bolívar, a 150 km de distância.

Considerando a quantidade de carvão exportado para Duisburg, o total de t.km foi:

$$289440 \text{ t / ano} \times 150 \text{ km} = 43416000 \text{ t.km / ano} \quad \text{(Equação 30)}$$

O factor de energia associado ao transporte de carvão por comboio a gasóleo é de 50,4 kJ/(t.km) (EIA, 2006). A necessidade energética associada a este meio de transporte foi a seguinte:

$$50,4 \text{ kJ / (t.km)} \times 43416000 \text{ t.km / ano} = 2188166400 \text{ kJ / ano} \quad \text{(Equação 31)}$$

Por tonelada de carvão transportada, a necessidade energética foi a apresentada na equação 32:

$$\frac{2188166400 \text{ kJ / ano}}{289440 \text{ t / ano}} = 7560 \text{ kJ / t} = 0,0076 \text{ GJ / t} \quad \text{(Equação 32)}$$

O transporte ferroviário, movido a gasóleo, tem associados, segundo EEA (2006), os seguintes coeficientes de emissões indicados no Quadro 34.

Quadro 34 – Coeficientes de emissão para o transporte ferroviário entre El Cerrejón e Porto Bolívar

Poluente	Coeficientes de emissão (g/(t.km))
CO ₂	3,719000
NO _x	0,066000
SO ₂	0,000079

As emissões, por tonelada de carvão transportado entre El Cerrejón e o Porto Bolivar, foram as apresentadas no Quadro 35.

Quadro 35 – Emissões totais associadas ao transporte ferroviário entre El Cerrejón e Porto Bolivar

Poluente	Emissões (kg/t)
CO ₂	0,55800
NO _x	0,00990
SO ₂	0,00001

8.1.7 Transporte de carvão por navio de carga desde Porto Bolivar até ao Porto de Roterdão

Desde o Porto Bolivar até ao Porto de Roterdão o carvão percorre uma distância de 8062 km, por navio a fuel-óleo marítimo.

A quantidade total de carvão exportada para a Central Termoeléctrica, expressa em em t.km/ano será a seguinte:

$$289440 \text{ t / ano} \times 8062 \text{ km} = 2333465280 \text{ t.km / ano} \quad \text{(Equação 33)}$$

O factor de energia associado ao navio de carga movido a fuelóleo marítimo é 148,6 kJ/(t.km) (EIA, 2006). Assim, a necessidade de energia associada ao navio de carga foi a seguinte:

$$148,6 \text{ kJ / (t.km)} \times 2333465280 \text{ t.km / ano} = 3467529 \text{ GJ / ano} \quad \text{(Equação 34)}$$

A necessidade de energia, por tonelada de carvão transportada, foi a seguinte:

$$\frac{346752940608 \text{ kJ / ano}}{289440 \text{ t / ano}} = 1198013,2 \text{ kJ / t} = 1,198 \text{ GJ / t} \quad \text{(Equação 35)}$$

No que respeita às emissões, os coeficientes para o transporte marítimo em questão são os apresentados no Quadro 36.

Quadro 36 – Coeficientes de emissão associados ao transporte marítimo de Porto Bolivar ao Porto de Roterdão

Poluente	Coeficientes de emissão (kg/GJ)
CO ₂	11,307
NO _x	0,298
SO ₂	0,284

Com base nos coeficientes indicados no Quadro 36, foi possível calcular as emissões do navio de carga movido a fuel-óleo marítimo, entre o Porto Bolivar e o Porto de Roterdão, por tonelada de carvão (Quadro 37).

Quadro 37 – Emissões associadas ao transporte marítimo de Porto Bolivar ao Porto de Roterdão

Poluente	Emissões (kg/t)
CO ₂	91,2
NO _x	2,4
SO ₂	2,3

8.1.8 Transporte do carvão, por navio, desde o Porto de Roterdão até ao Porto de Duisburg

Desde o Porto de Roterdão até ao Porto de Duisburg, o carvão percorre uma distância de 243 km, sendo transportado por navio a gasóleo.

Considerando a quantidade total de carvão exportada para a Central Termoelétrica, as toneladas-quilometro percorridas serão então as seguintes:

$$289440 \text{ t / ano} \times 243 \text{ km} = 70333920 \text{ t.km} \quad (\text{Equação 36})$$

O factor de energia associado ao transporte de carvão em navio entre o Porto de Duisburg e o Porto de Roterdão, utilizando como combustível o gasóleo, é de 280,5

$\text{kJ}/(\text{t.km})$ (EIA, 2006). Assim, a necessidade de energia, para a distância correspondente a este transporte, foi a seguinte:

$$280,5 \text{ kJ } /(\text{t.km}) \times 70333920 \text{ t.km } / \text{ ano } = 19728 \text{ GJ } / \text{ ano } \quad (\text{Equação 37})$$

A necessidade de energia, por tonelada de carvão transportada, foi a apresentada na equação 38:

$$\frac{19728664560 \text{ kJ } / \text{ ano }}{289440 \text{ t } / \text{ ano }} = 68161,5 \text{ kJ } / \text{ t } = 0,0682 \text{ GJ } / \text{ t } \quad (\text{Equação 38})$$

No que respeita às emissões de gases, os coeficientes associados ao transporte de carvão por navio, utilizando gasóleo como combustível, são os apresentados no Quadro 38.

Quadro 38 – Coeficientes de emissão associados ao transporte marítimo do Porto de Roterdão ao Porto de Duisburg

Poluente	Coeficientes de emissão (kg/GJ)
CO ₂	22,82400
NO _x	0,39600
SO ₂	0,00072

As emissões no transporte do carvão por navio, entre Roterdão e Duisburg, por tonelada de carvão, foram então as apresentadas no Quadro 39.

Quadro 39 – Emissões associadas ao transporte marítimo do Porto de Roterdão ao Porto de Duisburg

Poluente	Emissões (kg/t)
CO ₂	5,54600
NO _x	0,09600
SO ₂	0,00017

8.1.9 Transporte de carvão do Porto de Duisburg até à Central Termoeléctrica, em Duisburg

Do Porto de Duisburg até à Central Termoeléctrica dista 1 km. O transporte de carvão é efectuado recorrendo a camiões a gasóleo.

Considerando a quantidade total de carvão exportada para a Central Termoeléctrica, as toneladas-quilometro percorridas serão as seguintes:

$$289440 \text{ t / ano} \times 1 \text{ km} = 289440 \text{ t.km} \quad (\text{Equação 39})$$

O factor de energia associado ao transporte rodoviário no camião movido a gasóleo é de 859 kJ/(t.km) (EIA, 2006). Assim, a necessidade energética associada ao transporte rodoviário de carvão, foi a seguinte:

$$859 \text{ kJ / (t.km)} \times 289440 \text{ t.km / ano} = 248 \text{ GJ / ano} \quad (\text{Equação 40})$$

A necessidade energética, por tonelada de carvão transportada, foi e então a seguinte:

$$859 \text{ kJ / t} = 0,00086 \text{ GJ / t} \quad (\text{Equação 41})$$

Os factores das emissões gasosas associadas ao transporte rodoviário de carvão utilizando gasóleo como combustível, são os apresentados no Quadro 40.

Quadro 40 – Coeficientes de emissão associados ao transporte por camião, do Porto de Duisburg até Duisburg

Poluente	Coeficientes de emissão (g/(t.km))
CO ₂	63,250
NO _x	0,511
SO ₂	0,121

As emissões resultantes do transporte de carvão no percurso rodoviário entre Duisburg e a Central Termoeléctrica SWDU em Duisburg, por tonelada de carvão, foram os apresentados no Quadro 41.

Quadro 41 – Emissões associadas ao transporte por camião, do Porto de Duisburg até à Central Termoeléctrica

Poluente	Emissões (kg/t)
CO ₂	0,063
NO _x	0,00051
SO ₂	0,00012

8.1.10 Operações de carga e descarga de carvão no Porto de Bolivar, Porto de Roterdão e Porto de Duisburg

No Porto Bolivar, no Porto de Roterdão e no Porto de Duisburg, estima-se que, nas operações de carga e descarga, o carvão necessite ser elevado num total de 80 metros.

Considerou-se que a maquinaria envolvida utiliza electricidade a uma taxa de eficiência de 80%, e a eficiência na produção e distribuição de electricidade é de 35%. Assim, a energia primária necessária para produzir a electricidade a esta elevação do carvão, foi a seguinte:

$$\frac{289440000 \text{ kg / ano} \times 80 \text{ m} \times 9,82 \text{ m.s}^{-2}}{(0,8 \times 0,35)} = 812 \text{ GJ / ano} \quad \text{(Equação 42)}$$

O consumo de energia primária nas operações de cargas e descargas, por tonelada de carvão enviada para Duisburg, foi então a seguinte:

$$\frac{812}{289440} = 0,0028 \text{ GJ / t} \quad \text{Equação 43}$$

No que respeita às emissões de gases associadas a estas operações, os coeficientes retirados de bibliografia (EIA, 2006), foram os indicados no Quadro 42.

Quadro 42 – Coeficientes de emissão associados às cargas e descargas de carvão

Poluente	Coeficientes de emissão (g/(t.km))
CO ₂	95,500
NO _x	0,168
SO ₂	0,108

As emissões gasosas associadas à energia primária utilizada na produção térmica de electricidade, nas operações de cargas e descargas de carvão, por tonelada de combustível fóssil, foram os indicados no Quadro 43.

Quadro 43 – Emissões associadas às cargas e descargas de carvão no Porto Bolivar, Porto de Roterdão e Porto de Duisburg

Poluente	Emissões (kg/t)
CO ₂	0,26740
NO _x	0,00047
SO ₂	0,00300

8.1.11 Transporte de calcário da mina de Wülfrath até à Central Termoeléctrica por camiã

Entre Wülfrath (mina de produção de calcário) e a Central Termoeléctrica de Duisburg distam 35 km. Nesse percurso, o transporte de calcário é feito por camiã movido a gasóleo rodoviário.

O transporte anual de calcário para a Central é de 19103 t. Em t.km este valor é o seguinte:

$$19103t / ano \times 35 km = 668605 t.km \quad \text{Equação 44}$$

O factor de energia do transporte rodoviário de calcário, no camiã movido a gasóleo é 859 kJ/(t.km) (EIA, 2006). Assim, a necessidade de energia associada a este transporte rodoviário foi o seguinte:

$$859 \text{ kJ} / (\text{t.km}) \times 668605 \text{ t.km} / \text{ano} = 574 \text{ kJ} / \text{ano} \quad (\text{Equação 45})$$

A necessidade de energia para o transporte de calcário, por tonelada de carvão utilizada em Duisburg, foi então o seguinte:

$$\frac{574331695 \text{ kJ} / \text{ano}}{289440 \text{ t} / \text{ano}} = 1984,3 \text{ kJ} / \text{t} = 0,0020 \text{ GJ} / \text{t} \quad \text{Equação 46}$$

No que respeita às emissões associadas ao transporte rodoviário de calcário, em camião a gasóleo, os coeficientes utilizados foram os indicados no Quadro 44.

Quadro 44 – Coeficientes de emissão associados ao transporte de calcário em camião a gasóleo

Poluente	Coeficientes de emissão (g/(t.km))
CO ₂	63,250
NO _x	0,511
SO ₂	0,121

As emissões associadas ao transporte de calcário entre Wülfrath e Duisburg, por tonelada de carvão, foram as apresentadas no Quadro 45.

Quadro 45 – Emissões associadas ao transporte de calcário de Wülfrath até à Central Termoelectrica

Poluente	Emissões (kg/t)
CO ₂	0,14600
NO _x	0,00120
SO ₂	0,00028

8.1.12 Consumo e perdas internas de energia na Central Termoelectrica

O poder calorífico médio do carvão utilizado nos ensaios de combustão e co-combustão era de 24,79 GJ/t. Do total dessa energia, 40% é transformada em electricidade (eficiência da Central Termoelectrica) e 5% estima-se que seja consumida internamente e esteja associada a perdas. Assim, estima-se que as perdas e o consumo internos representem um valor total de energia:

$$24,79 \text{ GJ} / t \times 0,4 \times 0,05 = 0,4958 \text{ GJ} / t \quad (\text{Equação 47})$$

8.2 Emissões e energia associadas ao combustível Lamas de ETAR

8.2.1 Transporte de Lamas de ETAR

As lamas de ETAR são transportadas por camião movido a gasóleo, desde o seu local de produção até à Central Termoeléctrica de Duisburg. Cerca de 70% da lama usada na Central Termoeléctrica provém de uma ETAR a 7 km, e os restantes 30% de uma outra ETAR a 27 km. A média ponderada destas distâncias é de 13 km, pelo que se admite que, 1 t de lama de ETAR equivale a 13 t.km.

O factor de energia associado ao transporte rodoviário, a gasóleo, é 859 kJ/(t.km) (EIA 2006). Assim, a necessidade de energia associada ao transporte das lamas do seu local de produção até à Central Termoeléctrica de Duisburg, por tonelada de lama consumida na Central Termoeléctrica, foi a seguinte:

$$859 \text{ kJ} / (t.km) \times 13 t.km / t = 11167 \text{ kJ} / t = 0,0112 \text{ GJ} / t \quad \text{Equação 48}$$

No que respeita às emissões gasosas associadas ao transporte das lamas de ETAR, em camião a gasóleo, foram utilizados os coeficientes apresentados no Quadro 46.

Quadro 46 – Coeficientes de emissão associados ao transporte por camião a gasóleo

Poluente	Coeficientes de emissão (g/(t.km))
CO ₂	63,250
NO _x	0,511
SO ₂	0,121

Com base nos coeficientes indicados no Quadro 46, as emissões associadas ao transporte de lamas de ETAR, por tonelada, foram as apresentadas no Quadro 47.

Quadro 47 – Emissões associadas ao transporte de lamas de ETAR

Poluente	Emissões (kg/t)
CO ₂	0,8220
NO _x	0,0066
SO ₂	0,0016

8.3 Emissões e energia associadas ao combustível Farinha de carne e ossos

8.3.1 Transporte rodoviário na Irlanda (Dublin)

A farinha de carne e ossos usada no presente estudo proveio de Dublin e foi transportada em camião a gasóleo até ao Porto de Dublin, numa distância assumida de 10 km. Considera-se então 10 t.km por tonelada de farinha de carne e ossos destinada à Central Termoelétrica.

O factor de energia associado ao transporte rodoviário é 859 kJ/(t.km) (EIA, 2006). Assim, necessidade de energia associada ao transporte de farinha de carne e ossos na Irlanda foi a seguinte:

$$859 \text{ kJ} / (\text{t.km}) \times 10 \text{ t.km} / \text{t} = 8590 \text{ kJ} / \text{t} = 0,00859 \text{ GJ} / \text{t} \quad (\text{Equação 49})$$

No que respeita às emissões gasosas associadas ao transporte rodoviário, os coeficientes utilizados foram os apresentados no Quadro 48.

Quadro 48 – Coeficientes de emissão associados ao transporte por camião a gasóleo

Poluente	Coeficientes de emissão (g/(t.km))
CO ₂	63,250
NO _x	0,511
SO ₂	0,121

Com base nos coeficientes de emissão, as emissões totais geradas pelo transporte rodoviário de farinha de carne e ossos na Irlanda, por tonelada, foram as apresentadas no Quadro 49.

Quadro 49 – Emissões associadas ao transporte de farinha de carne e ossos na Irlanda

Poluente	Emissões (kg/t)
CO ₂	0,633
NO _x	0,0051
SO ₂	0,0012

8.3.2 Transporte de navio da Irlanda até ao Porto de Duisburg

A distância de transporte de farinha de carne e ossos entre a Irlanda e o Porto de Duisburg é de 1387 km, percorrida num navio de carga de pequena dimensão. Isto equivale a 1387 t.km, por tonelada de farinha de carne e ossos, utilizando fuelóleo marítimo.

O fluxo energético associado ao transporte de farinha de carne e ossos da Irlanda para o Porto de Duisburg foi de 148,6 kJ/(t.km) (EIA, 2006). Assim, o fluxo energético associado a este transporte marítimo, por tonelada, foi o seguinte:

$$148,6 \text{ kJ} / (\text{t.km}) \times 1387 \text{ t.km} / \text{t} = 206108,2 \text{ kJ} / \text{t} = 0,2061 \text{ GJ} / \text{t} \quad \text{(Equação 50)}$$

Os coeficientes de emissão de gases utilizados neste trabalho foram os indicados no Quadro 50.

Quadro 50 – Coeficientes de emissão associados ao transporte em navio

Poluente	Coeficientes de emissão (g/(t.km))
CO ₂	11,296
NO _x	0,298
SO ₂	0,284

Com base nos coeficientes de emissão indicados no Quadro 50, as emissões geradas no transporte de navio entre a Irlanda e Porto de Duisburg, foram as apresentadas no Quadro 51.

Quadro 51 – Emissões associadas ao transporte de farinha de carne e ossos da Irlanda ao Porto de Duisburg

Poluente	Emissões (kg/t)
CO ₂	15,6800
NO _x	0,4136
SO ₂	0,3939

8.3.3 Transporte rodoviário do Porto de Duisburg para a Central Termoeléctrica

Entre o Porto de Duisburg e a Central Termoeléctrica, assumiu-se uma distância de 1 km, percorrida em camião a gasóleo, o que equivale a 1 t.km por tonelada de farinha de carne e ossos.

O factor de energia associado ao transporte rodoviário é 859 kJ/(t.km) (EIA, 2006). Assim, o fluxo energético associado ao transporte de farinha de carne e ossos do porto de Duisburg à Central Termoeléctrica foi o seguinte:

$$859 \text{ kJ } / (t.km) \times 1 \text{ t.km } / t = 859 \text{ kJ } / t = 0,0859 \text{ GJ } / t \quad \text{Equação 51}$$

Os coeficientes de emissão, retirados de bibliografia (EIA, 2006), foram:

Quadro 52 – Coeficientes de emissão associados ao transporte rodoviário de farinha de carne e ossos do Porto de Duisburg à Central Termoeléctrica

Poluente	Coeficientes de emissão (g/(t.km))
CO ₂	63,25
NO _x	0,511
SO ₂	0,121

Com base nos coeficientes de emissão mencionados, as emissões geradas no transporte rodoviário foram:

Quadro 53 – Emissões geradas no transporte de farinha de carne e ossos do Porto de Duisburg até à Central Termoelétrica

Poluente	Emissões (kg/t)
CO ₂	0,0633
NO _x	0,00051
SO ₂	0,00012

8.3.4 Operações de carga e descarga em Dublin e Duisburg

Assumiu-se que as operações de carga e descarga de farinha de carne e ossos, em Dublin e Duisburg perfaziam um total de 40 metros de elevação.

Assumiu-se também que a maquinaria envolvida nas operações mencionadas possui uma eficiência de 80%, e a produção e distribuição de electricidade conta com uma eficiência de 35%. Assim, a energia necessária para produzir electricidade, por tonelada, foi:

$$\frac{1t/t \times 40m \times 9,82m.s^{-2}}{(0,8 \times 0,35)} = 1402857 J/t = 0,0014 GJ/t \quad \text{Equação 52}$$

Os coeficientes de emissão, retirados de bibliografia (EIA, 2006), foram:

Quadro 54 – Coeficientes de emissão associados às cargas e descargas de farinha de carne e ossos

Poluente	Coeficientes de emissão (g/(t.km))
CO ₂	95,500
NO _x	0,168
SO ₂	0,108

A totalidade de emissões associadas às operações de carga e descarga de farinha de carne e ossos, por tonelada, foram (Quadro 55):

Quadro 55 – Emissões associadas às operações de carga e descarga em Dublin e Duisburg

Poluente	Emissões (kg/t)
CO ₂	0,1337
NO _x	0,00024
SO ₂	0,00015

8.4 Emissões e energia associadas ao combustível peletes de madeira

8.4.1 Produção de madeira numa cultura de curta rotação

Os cálculos associados à produção de *peletes* de madeira têm como base valores de Biewinga e Van der Bijl (1996) para as culturas de curta rotação.

Foi assumida uma produtividade de 7 t/(ha.ano). Segundo o mesmo autor, o fluxo energético associado a esta produção de madeira, em todo o ciclo de produção, é de 10,12 GJ/ha. Assim, por tonelada de madeira produzida, tem-se o seguinte fluxo energético:

$$\frac{10,12 \text{ GJ} / \text{ha}}{7 \text{ t} / \text{ha.ano}} = 1,446 \text{ GJ} / \text{t} \quad \text{(Equação 53)}$$

Os coeficientes de emissão utilizados neste trabalho, associados à produção de madeira, foram os indicados no Quadro 55.

Quadro 56 – Coeficientes de emissão associados à produção de madeira para *peletes*

Poluente	Coefficientes de emissão (t/ha)
CO ₂	0,70
NO _x	13,13
SO ₂	1,20
N ₂ O	1,29
NH ₃	0,43
NO ₃ ⁻	123,97
PO ₄ ³⁻	7,70

Com base nos coeficientes supra citados, as emissões totais, por tonelada de madeira produzida, foram as indicadas no Quadro 57.

Quadro 57 – Emissões associadas à produção de madeira para *peletes*

Poluente	Emissões (kg/t)
CO ₂	100
NO _x	1,88
SO ₂	0,17
N ₂ O	0,18
NH ₃	0,062
NO ₃ ⁻	17,71
PO ₄ ³⁻	1,10

8.4.2 Transporte de madeira até ao local de peletização

Foi assumida uma distância de 20 km em camião movido a gasóleo desde o local de produção de madeira, até ao local de fabricação de *peletes*, o que equivale a 20 t.km por tonelada de madeira.

O fluxo energético associado ao transporte rodoviário de madeira, a gasóleo, desde a produção ao tratamento da madeira, foi 17180 kJ/t.

No que respeita às emissões geradas pelo transporte rodoviário em questão, tem-se (Quadro 58):

Quadro 58 – Emissões associadas ao transporte rodoviário de madeira ao local de peletização

Poluente	Emissões kg/t
CO ₂	1,265
NO _x	0,0102
SO ₂	0,0024

8.4.3 Produção de *peletes*

A produção de *peletes* implica o uso de maquinaria adequada para as várias fases de tratamento da madeira, com os consequentes consumos energéticos associados, e a produção de emissões.

Segundo Lamnet (2001), a energia total necessária à produção de *peletes* é 0,72 GJ/t.

No que respeita às emissões, os coeficientes associados à produção de *peletes* de madeira, são, segundo o mesmo autor, os apresentados no Quadro 59.

Quadro 59 – Coeficientes de emissão associados à operação de peletização

Poluente	Coeficientes de emissão (kg/GJ)
CO ₂	95,500
NO _x	0,168
SO ₂	0,108

Com base nos coeficientes citados, as emissões associadas à produção de *peletes* de madeira, foram as apresentadas no Quadro 60.

Quadro 60 – Emissões associadas à operação de peletização

Poluente	Emissões (kg/t)
CO ₂	68,76
NO _x	0,121
SO ₂	0,078

8.4.4 Transporte de *peletes* até à Central Termoeléctrica de Duisburg

Do local de produção de *peletes* à Central Termoeléctrica, assumiu-se uma distância de 146 km, o que equivale a 146 t.km por tonelada de *peletes* de madeira. As *peletes* são transportadas em camião movido a gasóleo.

O fluxo energético associado ao transporte rodoviário de *peletes* é 125414 kJ/t.

Os coeficientes de emissão, retirados de bibliografia (EIA, 2006), foram:

Quadro 61 – Coeficientes de emissão associados ao transporte rodoviário de *peletes* de madeira até à Central Termoeléctrica

Poluente	Coeficientes de emissão (g/(t.km))
CO ₂	63,25
NO _x	0,511
SO ₂	0,121

As emissões associadas ao transporte rodoviário de *peletes* foram as apresentadas no Quadro 62.

Quadro 62 – Emissões associadas ao transporte de *peletes* do local de peletização à Central Termoeléctrica

Poluente	Emissões (kg/t)
CO ₂	9,235
NO _x	0,075
SO ₂	0,018

8.5 Emissões indirectas por tipo de combustível

No Quadro 63 tem-se um resumo dos valores calculados para as emissões totais indirectas relativas aos combustíveis utilizados neste trabalho.

Quadro 63 – Emissões indirectas totais relativas aos combustíveis utilizados no presente trabalho

Combustível	Emissões indirectas (kg/t)							
	CH ₄	CO ₂	NH ₃	N ₂ O	NO ₂	SO ₂	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻
Carvão	1,91	135,66	0,00	0,00	3,02	2,36	0,00	0,00
Lamas de ETAR	0,00	0,82	0,00	0,00	0,007	0,002	0,00	0,00
Farinha de carne e ossos	0,00	16,51	0,00	0,00	0,42	0,40	0,00	0,00
Peletes de madeira	0,00	179,26	0,06	0,18	2,08	0,27	17,71	1,10

De todos os combustíveis estudados, as *peletes* de madeira são o que apresenta as únicas emissões indirectas de NH₃, N₂O, NO₃⁻ e PO₄³⁻. Apresenta também o maior valor de CO₂ emitido, por tonelada, inclusivamente superior ao valor emitido pelo carvão.

O carvão apresenta as únicas emissões indirectas de CH₄, e apresenta o valor mais elevado de emissão de SO₂ e NO₂.

Os combustíveis lama de ETAR e farinha de carne e ossos emitem apenas três gases: CO₂, NO₂ e SO₂. Contudo, a farinha de carne e ossos apresenta valores de emissão claramente superiores às lamas de ETAR.

Ao nível das emissões indirectas, pode afirmar-se que o combustível lamas de ETAR é claramente o que menos emissões tem associadas.

8.6 Emissões totais por cenário

No Quadro 64 apresenta-se um sumário do total de emissões para cada um dos cenários em estudo.

Quadro 64 – Emissões totais, directas e indirectas, por cenário

Parâmetro	Emissões directas (kg/GJ _{térmico})			Emissões indirectas (kg/GJ _{térmico})			Emissões totais (kg/GJ _{térmico})		
	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
CH ₄	0,000	0,000	0,000	0,077	0,065	0,066	0,077	0,065	0,066
CO ₂ Fóssil	88,30	72,12	73,60	5,49	4,76	6,70	91,40	76,90	80,30
NH ₃	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00071	0,00000	0,00000	0,00071
N ₂ O	0,0160	0,0110	0,0150	0,0000	0,0000	0,0021	0,0160	0,0110	0,0170
NO ₂	0,042	0,043	0,048	0,122	0,104	0,128	0,164	0,146	0,177
SO ₂	0,067	0,035	0,045	0,096	0,081	0,085	0,163	0,116	0,130
NO ₃ ⁻	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,205	0,000	0,000	0,205
PO ₄ ³⁻	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,013	0,000	0,000	0,013
HF	0,00034	0,00057	0,00011	0,00000	0,00000	0,00000	0,00034	0,00057	0,00011
HCl	0,0140	0,0360	0,0086	0,0000	0,0000	0,0000	0,0140	0,0360	0,0086

O cenário 0 apresenta as emissões mais elevadas de CH₄, CO₂ fóssil e SO₂. O cenário 1 apresenta o valor mais elevado de emissão do HF e HCl, apresentando, em todas as outras emissões gasosas, os valores mais baixos determinados.

O cenário 2 apresenta as únicas emissões de NH₃, NO₃⁻ e PO₄³⁻, e as emissões mais elevadas de NO₂ e N₂O o que torna este cenário problemático do ponto de vista de emissões gasosas. Estes valores de emissões são justificáveis pela co-combustão de *peletes* de madeira.

Numa análise das emissões totais, parece que o cenário 1 apresenta um melhor comportamento do que os restantes.

8.7 Energia consumida por combustível e por cenário

No Quadro 65 tem-se, em resumo dos cálculos do presente capítulo, a energia consumida por cenário e por combustível.

Quadro 65 – Energia consumida por combustível, por cenário

Combustível	Energia (GJ/t combust.)	Fluxo de combustíveis (t/h)			Energia (GJ/h)		
		Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
Carvão	2,230	35,00	29,40	30,00	78,06	65,57	66,91
Lama de ETAR	0,017	0,00	3,93	4,95	0,00	0,07	0,09
Farinha de carne e ossos	0,172	0,00	9,46	0,00	0,00	1,63	0,00
Peletes de madeira	2,502	0,00	0,00	9,99	0,00	0,00	25,00
Total	4,921	35,00	42,79	44,94	78,06	67,27	92,00

Por observação do Quadro 62 constata-se que o combustível com maior consumo energético associado é as *peletes* de madeira. O processo de produção de madeira e posterior produção das *peletes* exige maquinaria pesada e longos transportes associados que utilizam gasóleo.

Na avaliação do consumo energético por cenário, constata-se que o cenário 2, que inclui na co-combustão as *peletes* de madeira, é o que apresenta um maior consumo de energético.

9 BALANÇO SÓCIO-ECONÓMICO

9.1 Potencial de criação de emprego

Da mina El Cerrejón são extraídas anualmente 26 Mt de carvão, empregando 8776 funcionários. Na unidade homem.hora, tem-se, anualmente:

$$8779 H \times 11 \text{ meses} \times 22 \text{ dias / mês} \times 8h / d = 16990336 \text{ H.hora} \quad (\text{Equação 54})$$

Expresso por homem.hora, o montante de carvão extraído é o seguinte:

$$\frac{26000000}{16990336} = 1,53 \text{ t / (H.h)} \quad (\text{Equação 55})$$

Invertendo a equação anterior, tem-se a necessidade de mão-de-obra, por tonelada de carvão extraído:

$$\frac{16990336}{26000000} = 0,6535 \text{ (H.h) / t} \quad (\text{Equação 56})$$

Então, por cada tonelada de carvão extraído, são necessários 0,6535 homem.hora.

O único combustível não fóssil que apresenta uma produção dedicada, e conseqüente criação de empregos, são as *peletes* de madeira. Assim, para as *peletes* de madeira, e segundo Biewinga e van der Bijl (1996), admite-se que a produtividade da madeira é 7 t/(ha.ano), e que a necessidade de mão-de-obra é 6 homem.h/(ha.ano). Com base nestes valores, a mão-de obra necessária, por tonelada de madeira produzida, foi a seguinte:

$$\frac{6 \text{ H.h}}{7 \text{ t}} = 0,8571 \text{ (H.h) / t} \quad (\text{Equação 57})$$

Por observação da necessidade de mão-de-obra associada à produção de carvão e à produção de *peletes* de madeira, constata-se que as *peletes* têm um maior consumo de mão-de-obra associado, por tonelada de combustível.

9.2 *Custo de produção de electricidade*

Considerou-se que a potência instalada da Central Termoeléctrica era de 240 MW_{térmicos}, com uma eficiência de conversão de 40%, e um tempo de vida de 40 anos.

Com base em Moore (2006) e EIA (2006) assumiu-se um custo de investimento de 1200 €/kW_{térmicos}, e um custo de operação e manutenção de 1000 €/h. Foi também assumido um limite de emissão de CO₂ com um custo de 1,15 €/t, e considerou-se que não era aplicada nenhuma taxa de carbono.

Relativamente aos preços de combustíveis, foram também assumidos os custos apresentados no Quadro 66.

Quadro 66 – Custo de combustíveis assumido

Combustível	Preço (€/t)
Carvão	70*
Lamas de ETAR	-5*
Farinha de carne e ossos	-5*
<i>Peletes</i> de madeira	154*

* Valores positivos representam custos e valores negativos representam ganhos

Com base nos dados acima mencionados, foi possível estimar-se o custo horário de produção de electricidade na Central, associado a cada um dos cenários (Quadro 67).

Quadro 67 – Custo horário de produção de electricidade na Central Termoeléctrica, por cenário

Custos associados	Preço (€/h)		
	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
Combustível	2520,00	1991,14	3614,59
Licenças de emissão	87,74	71,66	73,13
Taxa de carbono	0,00	0,00	0,00
Investimento	895,52	895,52	895,52
Operação e manutenção	1000,00	1000,00	1000,00
<i>Total</i>	4503,27	3958,32	5583,24

Considerando a produção média horária de electricidade 96 MWh, os custos médios de produção de electricidade, por cenário, foram os apresentados no Quadro 68.

Quadro 68 – Custo horário de produção de electricidade na Central Termoeléctrica, por cenário

Preço (€/kWh)		
Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
0,0469	0,0412	0,0582

Em termos de custo relativo, o cenário 0 corresponde a 100%, o cenário 1 apresenta um custo relativo de 88%, e o cenário 2, de 124%.

9.3 *Custo do abatimento de emissões de GEE*

Com base nos cálculos já efectuados, determinou-se o custo de abatimento de emissões, por cenário (Quadro 69).

Quadro 69 – Custo do abatimento de emissões de GEE na Central Termoelétrica, por cenário

	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
Emissões fósseis totais de CO ₂ eq (kg/GJ _{térmico})	99,51	81,71	87,00
Emissões fósseis totais de CO ₂ eq reduzidas(kg/GJ _{térmico})	0,00	17,80	12,51
Energia produzida (GJ _{térmico} /h)	864	864	864
Emissões fósseis totais de CO ₂ eq reduzidas (t/h)	0,00	15,38	10,81
Custos de produção horários (€/h)	4503,27	3958,32	5583,24
Diferença de custos (€/h)	0,00	-544,94	1079,97
<i>Custo total das emissões fósseis reduzidas (€/t CO₂ eq)</i>	-	-35,43	99,88

Observando o quadro anterior constata-se que o cenário 2, por tonelada equivalente de CO₂ reduzido, apresenta um custo de cerca de 100 €. Ao invés, o cenário 1, por representar a co-combustão de lamas de ETAR e farinha de carne e ossos, combustíveis cujo processamento na Central é remunerado, apresenta-se como uma fonte financeira para a Central Termoelétrica.

10 AVALIAÇÃO GERAL DOS CENÁRIOS

10.1 Emissões obtidas por indicador ambiental

10.1.1 Uso de combustíveis fósseis

Para este indicador, o balanço do Quadro 70 resulta das entradas de energia indirecta e das entradas de energia dos combustíveis.

Quadro 70 – Rácio entre a energia consumida e a energia produzida por cenário

	<i>Cenários</i>		
	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>
Indicador de energia	<i>Total de energia consumido [GJ/h]</i>		
Energia fóssil (GJ fóssil)	1,095	0,921	0,967
Total de energia (GJ total)	1,095	1,081	1,190
	<i>Total de energia produzido [GJ/h]</i>		
Energia produzida (GJ _{térmico})	864	864	864
	<i>Balanço de energia [GJ/GJ]</i>		
Energia fóssil (GJ _{in} fóssil/GJ _{térmico})	1,126	0,922	0,965

O cenário 0 foi o que necessitou de uma maior entrada de energia de origem fóssil, já que a totalidade do fluxo de combustível deste cenário se deve ao carvão.

O cenário 2 apresenta uma maior substituição de combustíveis fósseis por não fósseis, numa taxa de 20,6% comparativamente aos 15,9% do cenário 1.

Englobando os combustíveis fósseis e não fósseis, o cenário 2 foi o que necessitou de uma maior entrada de energia com 1029 GJ/h, e também o que tem maior rácio entre a energia consumida e a produzida, ou seja, é o cenário energeticamente menos eficiente.

10.1.2 Emissão evitada de GEE

O objectivo deste indicador é avaliar as emissões evitadas de GEE dos cenários 1 e 2 comparativamente ao cenário 0, ou seja, àquele em que se utilizou o carvão como combustível.

Relativamente a este indicador, tem-se no Quadro 71 os valores resultantes das emissões totais associadas a cada cenário, cujos cálculos foram baseados em coeficientes de potencial de emissão de gases de efeito de estufa e no balanço de emissões.

Quadro 71 – Emissões de GEE nos cenários

Emissões	Emissões totais (kg/GJ _{térmicos} produzido)			Coeficientes	Emissões totais (kg/GJ _{térmicos} produzido)		
	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2		Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
CH ₄	0,077	0,065	0,066	21	1,62	1,36	1,39
CO ₂ Fóssil	91,35	76,88	80,43	1	91,35	76,88	80,43
N ₂ O	0,016	0,011	0,017	310	5,04	3,42	5,22
<i>Total</i>					<i>98,01</i>	<i>81,67</i>	<i>87,04</i>
<i>Emissões evitadas</i>					-	<i>16,34</i>	<i>10,98</i>
<i>Emissões evitadas (%)</i>					-	<i>16,7%</i>	<i>11,2%</i>

O cenário 0 é o que apresenta o maior valor de emissões de CH₄ e CO₂ de origem fóssil. As emissões de NO₂ são mais elevadas no cenário 2.

Com os cálculos baseados nos coeficientes de potencial de efeito de estufa, o cenário 2 apresenta o maior potencial associado ao N₂O. O cenário 1 é o que apresenta o menor potencial das emissões de gases CH₄, CO₂ fóssil e N₂O, e a maior redução de emissões, menos 16,7% comparativamente ao cenário 0, tornando-o o cenário mais favorável.

10.1.3 Emissão de gases com efeito acidificante

Tem-se no Quadro 72 os valores resultantes das emissões de gases com efeito acidificante associadas a cada cenário, cujos cálculos foram baseados em coeficientes de potencial de acidificação e no balanço de emissões.

Quadro 72 – Potencial de gases com efeito acidificante dos cenários

Emissões	Emissões totais (kg/GJ _{térmicos} produzido)			Coeficientes	Emissões totais (kg/GJ _{térmicos} produzido)		
	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2		Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
NH ₃	0,000	0,000	0,00071	1,88	0,00	0,00	0,0013
NO ₂	0,164	0,146	0,178	0,71	0,117	0,104	0,126
SO ₂	0,163	0,116	0,130	1	0,163	0,116	0,130
HF	0,00034	0,00057	0,00011	1,61	0,00054	0,00092	0,00018
HCl	0,014	0,036	0,0086	0,88	0,012	0,032	0,0076
Total					0,292	0,252	0,266
<i>Emissões evitadas</i>					-	0,04	0,026
<i>Emissões evitadas (%)</i>					-	13,70%	8,90%

Das emissões acidificantes em estudo, o cenário 0 é o que apresenta as emissões mais elevadas de SO₂, o cenário 1 as emissões mais elevadas de HF e HCl, e o cenário 2 as emissões mais elevadas de NO₂ e NH₃ (este é o único cenário onde elas surgem).

O cenário 0 mantém o maior potencial acidificante nas emissões de SO₂, o cenário 1 mantém as emissões mais elevadas de HF mas o cenário 2 apresenta o maior potencial relativamente ao NH₃, NO₂ e HCl.

Numa perspectiva global, a maior percentagem de emissões evitadas surge no cenário 1, com cerca de 14% menos de emissões relativamente ao cenário 0, enquanto o cenário 2 apenas evitou cerca de 9%. O cenário 1 é o cenário ambientalmente favorável segundo o indicador emissão de gases com efeito acidificante.

10.1.4 Emissão de compostos que contribuem para eutrofização

Para o indicador de compostos que contribuem para eutrofização, no Quadro 73 tem-se os valores resultantes das emissões associadas a cada cenário, cujos cálculos foram baseados em coeficientes de equivalência do potencial de eutrofização e no balanço de emissões.

Quadro 73 – Potencial de compostos que contribuem para eutrofização dos cenários

Emissões	Emissões totais (kg/GJ _{térmicos} produzido)			Coeficientes	Emissões totais (kg/GJ _{térmicos} produzido)		
	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2		Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
NH ₃	0,000	0,000	0,00071	3,64	0,00	0,00	0,0026
NO ₂	0,164	0,146	0,178	1,35	0,222	0,197	0,240
NO ₃ ⁻	0,000	0,000	0,205	1	0,000	0,000	0,205
PO ₄ ³⁻	0,000	0,000	0,013	10,45	0,00000	0,00000	0,13297
				Total	0,222	0,197	0,580
				<i>Emissões evitadas</i>	-	0,025	-0,358
				<i>Emissões evitadas (%)</i>	-	11,26%	-161,26%

Das emissões analisadas neste estudo, os cenários 0 e 1 apresentam apenas emissões de NO_2 . O cenário 2 apresenta as emissões mais elevadas de NO_2 , e as únicas emissões de NH_3 , NO_3^- e PO_4^{3-} .

Considerando os cálculos com os coeficientes de potencial de eutrofização, o cenário 2 apresenta um potencial de emissão de compostos que contribuem para eutrofização muito superior ao dos cenários 0 e 1, produzindo mais 61,26% de emissões do que o cenário 0. O cenário 2 é, segundo este indicador, o cenário claramente mais desfavorável. O mais favorável será o cenário 1 com 11,26% de emissões evitadas relativamente ao cenário 0.

10.1.5 Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico

Através de cálculos baseados nos coeficientes de potencial de formação de emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico e nas emissões totais de NO_2 , tem-se os resultados do Quadro 74.

Quadro 74 – Potencial de Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico dos cenários

Emissões	Emissões totais (kg/GJ _{térmicos} produzido)			Coeficientes	Emissões totais (kg/GJ _{térmicos} produzido)		
	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2		Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
NO ₂	0,164	0,146	0,178	1	0,164	0,146	0,178

Para este indicador, o melhor cenário foi o 1, que apresenta apenas 0,146 kg NO₂ eq emitidos/GJ_{térmico} produzido.

10.1.6 Potencial de Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono

No Quadro 75 apresenta-se o potencial de emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono, para cada cenário estudado.

Quadro 75 – Potencial de Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono dos cenários

Emissões	Emissões totais (kg/GJ _{térmicos} produzido)			Coeficientes	Emissões totais (kg/GJ _{térmicos} produzido)		
	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2		Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
N ₂ O	0,016	0,011	0,017	1	0,016	0,011	0,017

O cenário 1 é o que apresenta menores emissões de gases com potencial de depleção da camada de ozono, para uma mesma produção de energia da central termoelétrica, com 0,011 kg N₂O eq emitido/GJ_{térmico} produzido.

10.2 Valores obtidos por indicador sócio-económico

10.2.1 Criação de emprego

Os cálculos para o indicador sócio-económico criação de emprego baseiam-se numa estimativa do ganho/perda de emprego de cada cenário.

O resultado final é expresso em homem-hora por GWh eléctrico produzido. Se o valor indicado no Quadro 76 for positivo representa ganho de emprego, se negativo, representa perda de emprego.

Quadro 76 – Potencial de criação de emprego dos cenários

	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
Emprego criado na UE (homem.ano)	0,0	0,0	35,6
Emprego perdido na Colômbia (homem.ano)	0,0	15,8	14,1
<i>Potencial de criação de emprego (homem.ano)</i>	0,0	-15,80	21,47
<i>Potencial de criação de emprego (homem.hora)</i>	0	-30593,8	41568,5
<i>Energia produzida anualmente (GWh_{eléctrico})</i>	771,84	771,84	771,84
<i>Potencial de criação de emprego (homem.hora/GWh_{eléctrico})</i>	0,0	-39,64	53,86

O cenário 1 tem associadas perdas de emprego na Colômbia, mais precisamente 16 trabalhadores, devido à redução da exportação de carvão, sem que haja criação de emprego na UE.

O cenário 2 implica perda de emprego na Colômbia mas também criação de emprego na UE, num balanço positivo de 22 empregos criados na UE. O cenário 2 apresenta estes valores devido à empregabilidade associada à produção das *peletes* de madeira, que implica um investimento de mão-de-obra considerável.

O cenário 2 tem vantagens ao nível de criação de emprego, com 54 homem.hora/GWh_{eléctrico}, contra o cenário 1 que regista perdas globais de emprego.

10.2.2 Custo de produção de electricidade

Os resultados para este indicador baseiam-se nos custos dos combustíveis, nos custos das licenças de emissão, nas taxas de carbono, no investimento, e nos custos de operação e manutenção da central termoeléctrica (Quadro 77).

Quadro 77 – Custo de produção de electricidade dos cenários

	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
Custo de produção de electricidade (€/kWh)	0,0396	0,0364	0,0472
<i>Custo relativo</i>	<i>100,0%</i>	<i>92,0%</i>	<i>119,1%</i>

Comparativamente ao cenário 0, o custo de produção de electricidade do cenário 1 é o cenário mais vantajoso. O cenário 2 apresentou um custo cerca de 20% superior ao do cenário 0.

10.2.3 Custo do abatimento das emissões de GEE

No Quadro 78 tem-se os resultados dos cálculos efectuados para este indicador, com base na redução de emissões fósseis e custos associados, expressos em €/t CO₂ equivalente.

Quadro 78 – Custo do abatimento das emissões de GEE, para cada um dos cenários

	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
Emissões CO ₂ fóssil directas (t/h)	74,2	62,3	63,6
<i>Emissões directas evitadas (t/h)</i>	-	11,9	10,6
<i>Emissões directas evitadas (%)</i>	-	<i>16,0%</i>	<i>14,3%</i>
Custos de produção horários (€/h)	3800,83	3496,03	4528,23
<i>Diferença de custos (€/h)</i>	-	-304,80	727,40
<i>Custo de redução de emissões directas (€/t CO₂)</i>	-	<i>-25,68</i>	<i>68,67</i>

Quadro 78 – (Continuação)

Redução de emissões fósseis totais de CO ₂ (kg/GJ _{térmico})	-	16,34	10,98
Energia produzida (GJ _{térmico} /h)	864	864	864
Redução de emissões fósseis totais de CO ₂ (t/h)	-	14,12	9,48
Custo de redução de emissões fósseis totais (€/t CO ₂ eq)	-	-21,58	76,69

Os custos de produção horários do cenário 2 são superiores aos outros cenários. O cenário 1, comparativamente ao 0, apresenta uma redução de custos de produção de 305 €/h.

O custo de redução de emissões directas é de 69 €/t CO₂ no cenário 2, enquanto no cenário 1 esse custo de redução tem um valor de 26 €/t mais barato que no cenário 0.

Contudo, este indicador visa encontrar qual o cenário que apresenta um menor custo por cada tonelada de CO₂ reduzido. Assim, o cenário 2 apresenta o custo de redução de emissões de 77 €/t CO₂ equivalente. O cenário 1 não tem custos de redução e apresenta um ganho de 22 €/t CO₂ comparativamente ao cenário 0, sendo por isso o melhor cenário para este indicador.

10.3 Resultado global

No Quadro 79 tem-se um sumário dos valores calculados para cada um dos indicadores.

Quadro 79 – Valores dos indicadores ambientais e sócio-económicos

	Indicadores	Unidades	Valores		
			Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
Ambientais	1. Uso de combustíveis fósseis	GJ _{térmico} usado/GJ _{térmico} produzido	1,09	0,92	0,97
	2. Emissão evitada de GEE	CO ₂ eq. (em %)	-	16,7%	11,2%
	3. Emissão de gases com efeito acidificante	kg SO ₂ eq. emitido/GJ _{térmico} produzido	0,292	0,252	0,266

Quadro 79 – (Continuação)

	4. Emissão de compostos que contribuem para eutrofização	kg NO ₃ ⁻ eq. emitido/GJ _{térmico} produzido	0,222	0,197	0,580
	5. Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico	kg NO _x (as NO ₂) emitido /GJ _{térmico} produzido	0,164	0,146	0,178
	6. Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono	kg N ₂ O emitido /GJ _{térmico} produzido	0,016	0,011	0,017
Sócio-económicos	7. Potencial de criação de emprego	emprego (homem.hora) /GWh _{eléctrico} produzido	-	-39,64	53,86
	8. Custo de produção de electricidade	Custo relativo kWh _{eléctrico} (%)	100%	92%	119,1%
	9. Custo do abatimento das emissões de CO ₂	€/t CO ₂ eq. abatido	-	-21,58	76,69

Usando os valores de referência já definidos na metodologia e os valores do Quadro 79, obtêm-se os valores na escala normalizada que são apresentados no Quadro 80.

Quadro 80 – Pontuação

	Indicadores	Cenários		
		0	1	2
Ambientais	1. Uso de combustíveis fósseis	4,05	5,79	5,33
	2. Emissão evitada de GEE	0,00	7,94	5,33
	3. Emissão de gases com efeito acidificante	2,71	3,70	3,36
	4. Emissão de compostos que contribuem para eutrofização	8,62	8,77	6,37
	5. Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico	4,53	5,12	4,08
	6. Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono	6,75	7,79	6,63
Sócio-económicos	7. Potencial de criação de emprego	5,00	3,87	6,53
	8. Custo de produção de electricidade	5,00	5,80	3,09
	9. Custo do abatimento das emissões de CO ₂	0,00	6,08	1,17

Representando estes valores graficamente, obtêm-se a Figura 16.

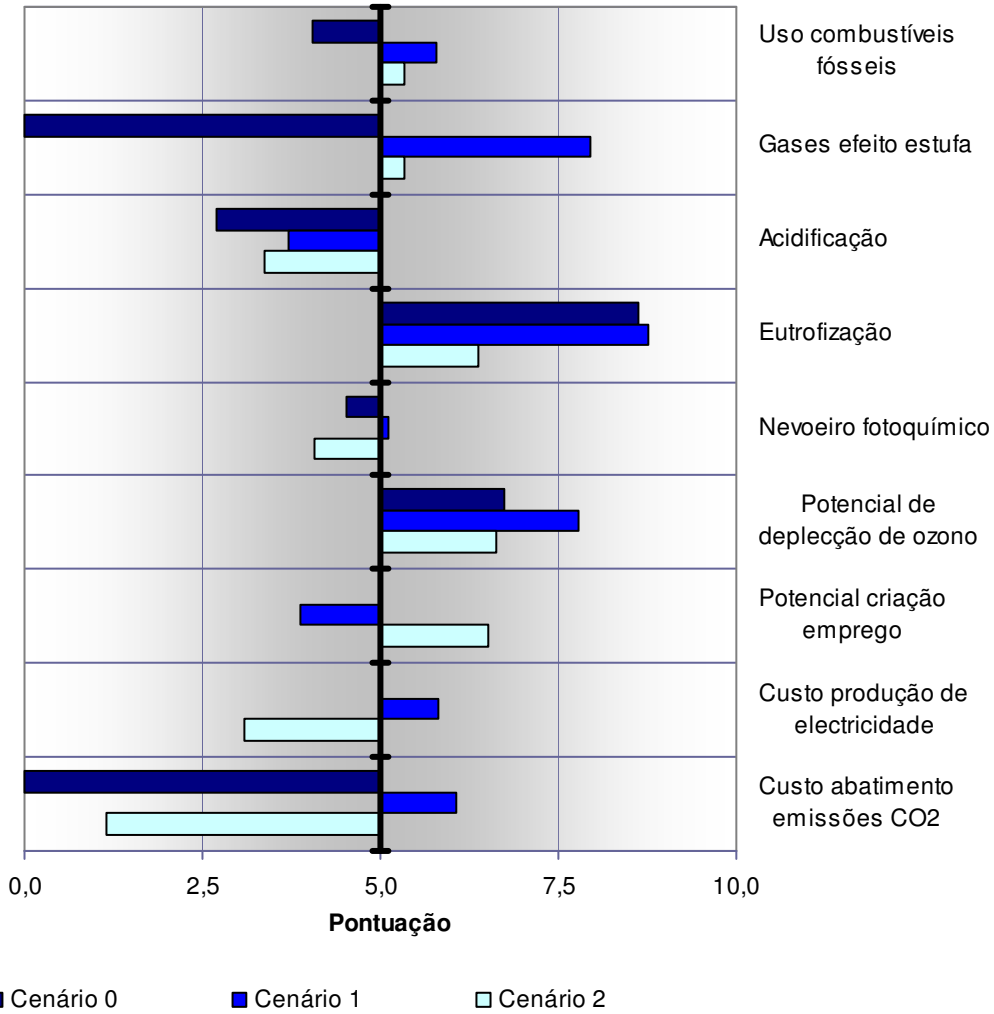


Figura 16 – Pontuação por indicador por cenário

Através do gráfico da Figura 16 consegue-se identificar-se, para cada indicador, qual o cenário mais favorável, ainda que seja uma perspectiva simplista e não permita considerar qual o cenário, na globalidade ambiental e sócio-económica, que seja mais favorável. Importa lembrar que esta escala permite que os indicadores, sejam eles considerados “positivos” ou “negativos”, o seu valor é tanto melhor quanto maior for o seu valor na escala normalizada.

O cenário 1 é o mais favorável em todos os indicadores excepto o de potencial de criação de emprego, indicador no qual o cenário 2 é claramente melhor por trazer maior empregabilidade.

Ambientalmente, pela análise até agora realizada, o cenário 1 é claramente o mais favorável.

Sob o ponto de vista sócio-económico, neste ponto do trabalho não foi possível determinar qual o melhor cenário. No indicador potencial de criação de emprego, o cenário 2 apresenta melhor desempenho, mas nos indicadores “custo de produção de electricidade” e “custo de abatimento de emissões de CO₂” o cenário 1 é o mais adequado.

10.3.1 Agregação de indicadores

Com a agregação dos indicadores pretende-se alcançar uma conclusão global sobre o melhor cenário, englobando a perspectiva ambiental e sócio-económica. A ponderação considerada para cada categoria foi de 4,5, num peso total de 9 (Quadro 81).

Quadro 81 – Ponderação dos indicadores

	Indicadores	Ponderação	Total
Ambientais	1. Uso de combustíveis fósseis	0,75	4,5
	2. Emissão evitada de GEE	0,75	
	3. Emissão de gases com efeito acidificante	0,75	
	4. Emissão de compostos que contribuem para eutrofização	0,75	
	5. Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico	0,75	
	6. Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono	0,75	
Sócio-económicos	7. Potencial de criação de emprego	1,5	4,5
	8. Custo de produção de electricidade	1,5	
	9. Custo do abatimento das emissões de CO ₂	1,5	

Com base nestes pesos e nos dados obtidos de cada indicador na escala uniformizada, obtém-se a seguinte agregação.

Quadro 82 – Agregação dos indicadores

	Indicadores	Agregação		
		Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
Ambientais	1. Uso de combustíveis fósseis	3,04	4,34	4,00
	2. Emissão evitada de GEE	0,00	5,96	4,00
	3. Emissão de gases com efeito acidificante	2,03	2,77	2,52
	4. Emissão de compostos que contribuem para eutrofização	6,46	6,57	4,78
	5. Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico	3,40	3,84	3,06
	6. Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono	5,06	5,84	4,98
	<i>TOTAL</i>	<i>4,44</i>	<i>6,52</i>	<i>5,18</i>
Sócio-económicos	7. Potencial de criação de emprego	7,50	5,81	9,80
	8. Custo de produção de electricidade	7,50	9,10	3,60
	9. Custo do abatimento das emissões de CO ₂	0,00	10,01	-1,61
	<i>TOTAL</i>	<i>3,33</i>	<i>5,54</i>	<i>2,62</i>
	<i>TOTAL DAS CATEGORIAS</i>	<i>3,89</i>	<i>6,03</i>	<i>3,90</i>

Na Figura 17 observam-se graficamente os resultados.

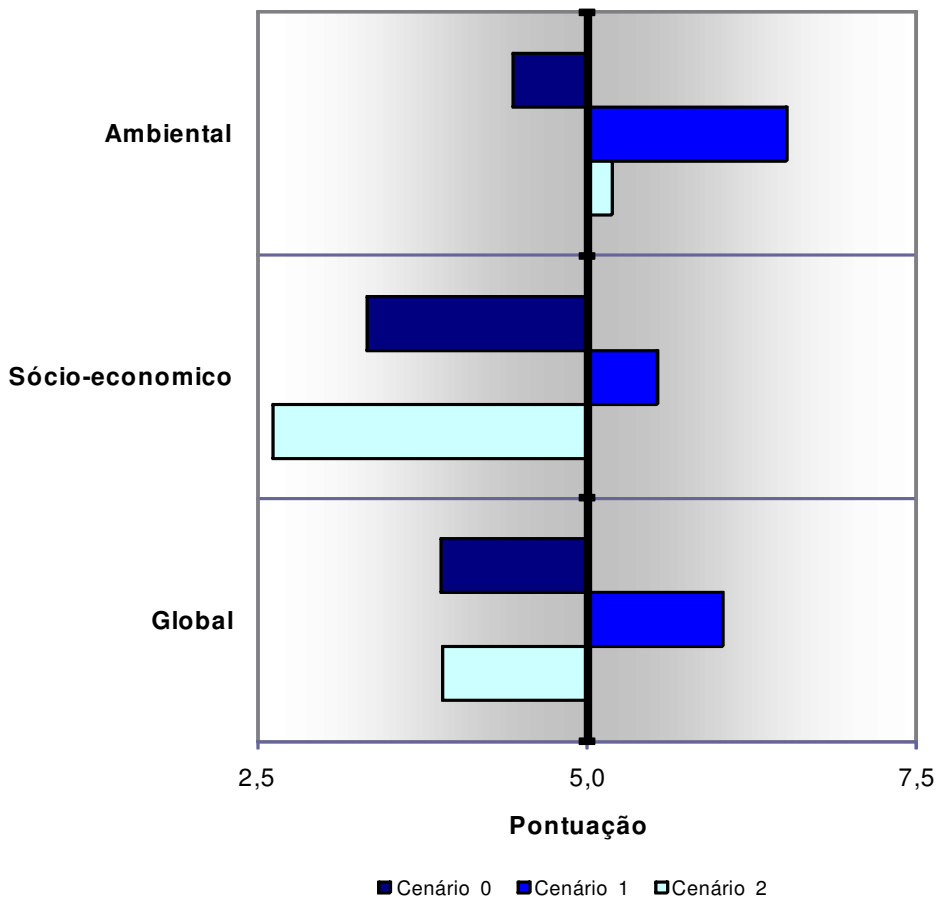


Figura 17 – Pontuação por cenário e pontuação global

Com base na agregação, podem tirar-se conclusões dos resultados da Figura 17. Ambientalmente, o cenário 0 apresentou o pior comportamento enquanto o cenário 1 foi o mais favorável, com um comportamento notoriamente positivo. Sócio-económicamente, o cenário 2 foi o pior, devido ao preço elevado das *peletes* de madeira, e, destacadamente, o cenário 1 apresentou o comportamento mais favorável. Então, sob os pontos de vista ambiental, sócio-económico e global, o cenário mais favorável foi o 1, correspondendo à co-combustão de carvão, lama de ETAR e farinha de carne e ossos.

11 ESTUDO DE SENSIBILIDADE DOS CENÁRIOS ESTUDADOS

11.1 Estudo de sensibilidade aos pesos de indicadores

Na *Avaliação Geral* considerou-se que, quer na categoria ambiental quer na sócio-económica, a distribuição de pesos era análoga. Procurou-se analisar a sensibilidade dos cenários ao aumento de peso de um indicador ou indicadores específicos, em três hipóteses.

11.1.1 Hipótese 1: Posição Ambientalista

Na hipótese 1 procurou-se observar qual o cenário com o comportamento mais favorável numa situação em que todos os indicadores têm o mesmo peso, mas em que o grupo dos indicadores ambientais tem um peso de cerca do dobro dos indicadores sócio-económicos. Num total de nove indicadores, com seis ambientais e três sócio-económicos, obviamente o peso da primeira categoria será superior, pelo que se considerou que esta poderia ser categorizada como uma análise de um ponto de vista ambiental.

A ponderação considerada para cada categoria foi a indicada no Quadro 83.

Quadro 83 – Ponderação dos indicadores para a hipótese 1

	Indicadores	Ponderação	Total
Ambientais	1. Uso de combustíveis fósseis	1,00	6,00
	2. Emissão evitada de GEE	1,00	
	3. Emissão de gases com efeito acidificante	1,00	
	4. Emissão de compostos que contribuem para eutrofização	1,00	

Quadro 82 – (Continuação)

	5. Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico	1,00	
	6. Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono	1,00	
Sócio-económicos	7. Potencial de criação de emprego	1,00	3,00
	8. Custo de produção de electricidade	1,00	
	9. Custo do abatimento das emissões de CO ₂	1,00	

Com base nestes pesos e nos dados obtidos de cada indicador na escala uniformizada, obtém-se a seguinte agregação indicada no Quadro 84.

Quadro 84 – Agregação dos indicadores para a hipótese 1

	Indicadores	Agregação		
		Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
Ambientais	1. Uso de combustíveis fósseis	3,04	4,34	4,00
	2. Emissão evitada de GEE	0,00	5,96	4,00
	3. Emissão de gases com efeito acidificante	2,03	2,77	2,52
	4. Emissão de compostos que contribuem para eutrofização	6,46	6,57	4,78
	5. Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico	3,40	3,84	3,06
	6. Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono	5,06	5,84	4,98
	<i>TOTAL</i>	<i>4,44</i>	<i>6,52</i>	<i>5,18</i>
Sócio-económicos	7. Potencial de criação de emprego	7,50	5,81	9,80
	8. Custo de produção de electricidade	7,50	9,10	3,60
	9. Custo do abatimento das emissões de CO ₂	0,00	10,01	-1,61
	<i>TOTAL</i>	<i>3,33</i>	<i>5,54</i>	<i>2,62</i>
	<i>TOTAL DAS CATEGORIAS</i>	<i>4,07</i>	<i>6,19</i>	<i>4,33</i>

Na Figura 18 observam-se graficamente os resultados.

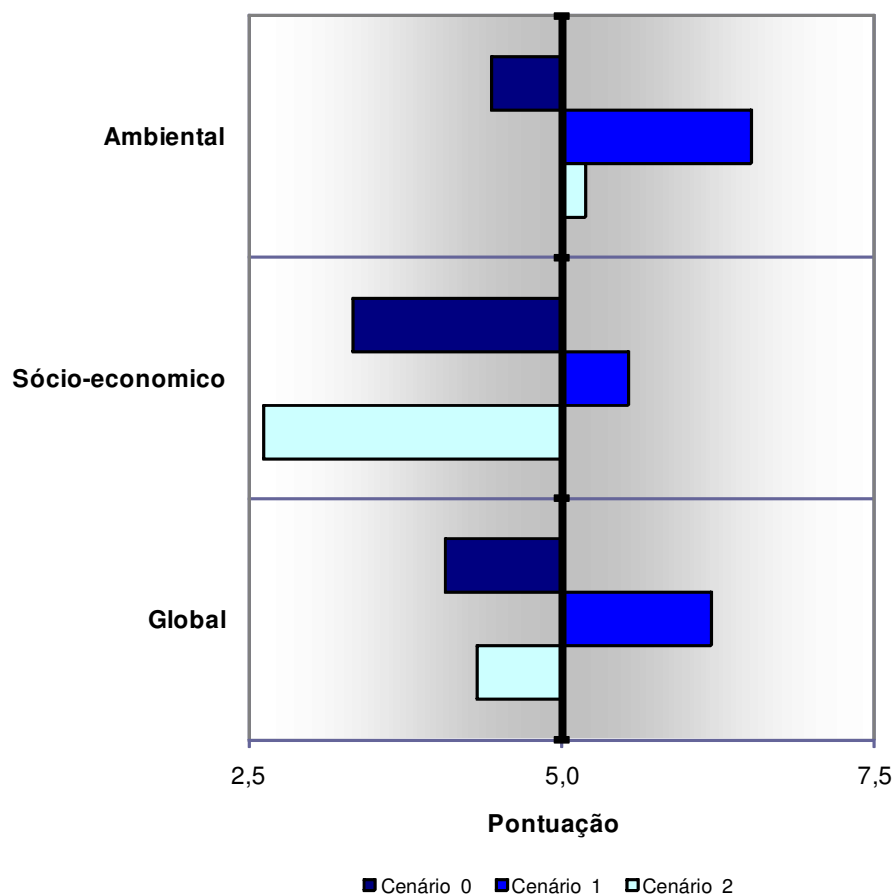


Figura 18 – Pontuação global da hipótese 1

Observando a Figura 18, as conclusões individuais dentro da perspectiva ambiental e sócio-económica não foram alteradas relativamente à situação de referência. Contudo, a nível global, apesar dos cenários terem incrementado ligeiramente a sua pontuação, as conclusões mantêm-se, o cenário 1 continua a apresentar o melhor comportamento.

Será interessante reflectir que, ambientalmente, o melhor cenário usa como substituição de combustível fóssil um combustível totalmente reutilizado, isto é, lamas de ETAR e farinha de carne e ossos. Este cenário parece indicar que a reutilização de resíduos para combustão, como a lama de ETAR, é preferível à produção de biomassa destinada a combustível, como no caso do cenário 2 (*peletes* de madeira).

11.1.2 Hipótese 2: Posição Social

Na hipótese 2 procurou-se explorar uma vertente social dos cenários. Sendo o indicador potencial de criação de emprego, o único adequado a esta hipótese 2, foi-lhe atribuída uma maior ponderação.

A ponderação considerada para cada categoria foi a apresentada no Quadro 85.

Quadro 85 – Ponderação dos indicadores para a hipótese 2

	Indicadores	Ponderação	Total
Ambientais	1. Uso de combustíveis fósseis	0,75	4,50
	2. Emissão evitada de GEE	0,75	
	3. Emissão de gases com efeito acidificante	0,75	
	4. Emissão de compostos que contribuem para eutrofização	0,75	
	5. Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico	0,75	
	6. Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono	0,75	
Sócio-económicos	7. Potencial de criação de emprego	3,00	4,50
	8. Custo de produção de electricidade	0,75	
	9. Custo do abatimento das emissões de CO ₂	0,75	

Com base nos pesos do Quadro 85 e nos dados obtidos de cada indicador na escala uniformizada, obtém-se a seguinte agregação:

Quadro 86 – Agregação dos indicadores para a hipótese 2

	Indicadores	Agregação		
		Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
Ambientais	1. Uso de combustíveis fósseis	3,04	4,34	4,00
	2. Emissão evitada de GEE	0,00	5,96	4,00
	3. Emissão de gases com efeito acidificante	2,03	2,77	2,52
	4. Emissão de compostos que contribuem para eutrofização	6,46	6,57	4,78
	5. Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico	3,40	3,84	3,06
	6. Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono	5,06	5,84	4,98
	<i>TOTAL</i>	<i>4,44</i>	<i>6,52</i>	<i>5,18</i>
Sócio-económicos	7. Potencial de criação de emprego	15,00	11,62	19,59
	8. Custo de produção de electricidade	3,75	4,35	2,31
	9. Custo do abatimento das emissões de CO ₂	0,00	4,56	0,87
	<i>TOTAL</i>	<i>4,17</i>	<i>4,56</i>	<i>5,06</i>
	<i>TOTAL DAS CATEGORIAS</i>	<i>4,30</i>	<i>5,54</i>	<i>5,12</i>

Na Figura 19 observam-se graficamente os resultados.

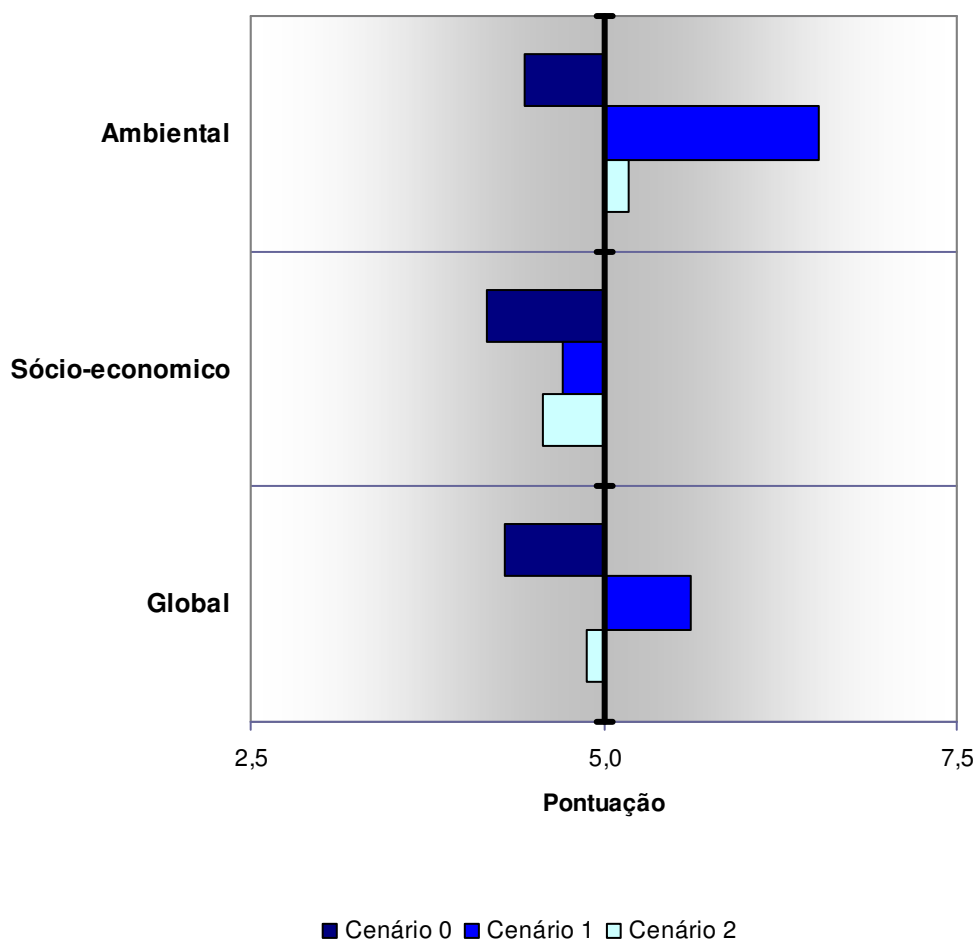


Figura 19 – Pontuação global da hipótese 2

Analisando a Figura 19 constata-se que, mesmo incrementando a ponderação do indicador potencial de criação de emprego para o quádruplo dos restantes, o cenário globalmente mais favorável é o cenário 1. O desempenho ambiental do cenário 1 é tão notoriamente positivo que, na globalidade da análise, consegue sobrepor-se ao cenário que apresenta o melhor desempenho sócio-económico, o cenário 2.

Salienta-se que, sob o ponto de vista sócio-económico, os três cenários apresentaram um comportamento abaixo do valor satisfatório de referência.

11.1.2.1 Hipótese 2.1

Para se perceber a partir de que ponderação a categoria sócio-económica indicaria o mesmo resultado que a análise global, incrementou-se novamente a ponderação do indicador potencial de criação de emprego. Após diversos testes, a ponderação é a indicada:

Quadro 87 – Ponderação dos indicadores para a hipótese 2.1

	Indicadores	Ponderação	Total
Ambientais	1. Uso de combustíveis fósseis	0,50	3,00
	2. Emissão evitada de GEE	0,50	
	3. Emissão de gases com efeito acidificante	0,50	
	4. Emissão de compostos que contribuem para eutrofização	0,50	
	5. Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico	0,50	
	6. Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono	0,50	
Sócio-económicos	7. Potencial de criação de emprego	5,00	6,00
	8. Custo de produção de electricidade	0,50	
	9. Custo do abatimento das emissões de CO ₂	0,50	

Com base nos pesos e nos dados obtidos de cada indicador na escala uniformizada, obtém-se a seguinte agregação:

Quadro 88 – Agregação dos indicadores para a hipótese 2.1

	Indicadores	Agregação		
		Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
Ambientais	1. Uso de combustíveis fósseis	2,03	2,89	2,66
	2. Emissão evitada de GEE	0,00	3,97	2,67
	3. Emissão de gases com efeito acidificante	1,35	1,85	1,68

Quadro 87 – (Continuação)

	4. Emissão de compostos que contribuem para eutrofização	4,31	4,38	3,19
	5. Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico	2,27	2,56	2,04
	6. Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono	3,38	3,90	3,32
	<i>TOTAL</i>	<i>4,44</i>	<i>6,52</i>	<i>5,18</i>
Sócio-económicos	7. Potencial de criação de emprego	25,00	19,37	32,65
	8. Custo de produção de electricidade	2,50	2,90	1,54
	9. Custo do abatimento das emissões de CO ₂	0,00	3,04	0,58
	<i>TOTAL</i>	<i>4,58</i>	<i>4,22</i>	<i>5,80</i>
	<i>TOTAL DAS CATEGORIAS</i>	<i>4,54</i>	<i>4,98</i>	<i>5,59</i>

Na Figura 20 observam-se graficamente os resultados.

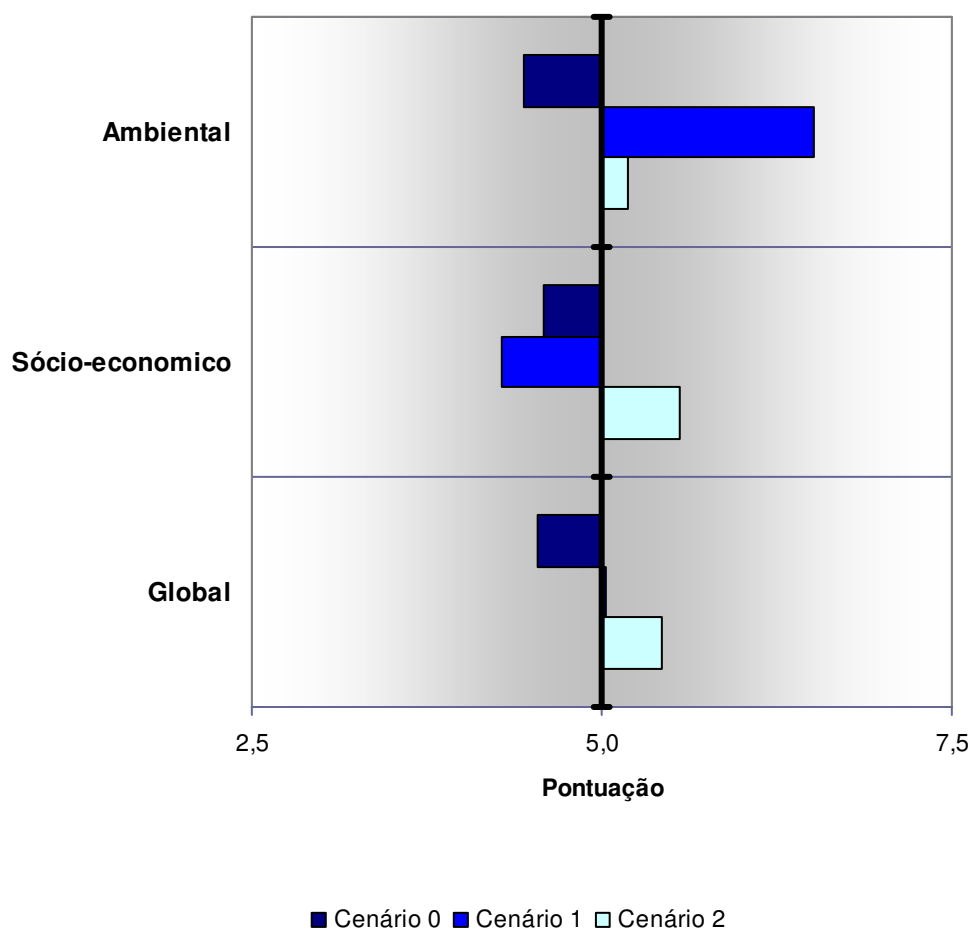


Figura 20 – Pontuação global da hipótese 2.1

Pela Figura 20 se percebe que o cenário 2 é o mais favorável. Ambientalmente, o cenário 1 mantém o melhor desempenho.

11.1.3 Hipótese 3: Posição Economista

Os indicadores económicos para base da presente hipótese são *Custo de produção de electricidade* e *Custo de abatimento de emissões de CO₂*.

As ponderações consideradas para cada indicador foram as indicadas no Quadro 89.

Quadro 89 – Ponderação dos indicadores para a hipótese 3

	Indicadores	Ponderação	Total
Ambientais	1. Uso de combustíveis fósseis	0,50	3,00
	2. Emissão evitada de GEE	0,50	
	3. Emissão de gases com efeito acidificante	0,50	
	4. Emissão de compostos que contribuem para eutrofização	0,50	
	5. Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico	0,50	
	6. Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono	0,50	
Sócio-económicos	7. Potencial de criação de emprego	0,50	6,00
	8. Custo de produção de electricidade	2,75	
	9. Custo do abatimento das emissões de CO ₂	2,75	

Com base nos pesos do Quadro 89 e nos dados obtidos de cada indicador na escala uniformizada, obtém-se a seguinte agregação:

Quadro 90 – Agregação dos indicadores para a hipótese 2.1

	Indicadores	Agregação		
		Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
Ambientais	1. Uso de combustíveis fósseis	2,03	2,89	2,66
	2. Emissão evitada de GEE	0,00	3,97	2,67
	3. Emissão de gases com efeito acidificante	1,35	1,85	1,68
	4. Emissão de compostos que contribuem para eutrofização	4,31	4,38	3,19
	5. Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico	2,27	2,56	2,04
	6. Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono	3,38	3,90	3,32
	<i>TOTAL</i>	<i>4,44</i>	<i>6,52</i>	<i>5,18</i>

Quadro 89 – (Continuação)

Sócio-económicos	7. Potencial de criação de emprego	2,50	1,94	3,27
	8. Custo de produção de electricidade	13,75	15,96	8,49
	9. Custo do abatimento das emissões de CO ₂	0,00	16,72	3,20
	<i>TOTAL</i>	<i>2,71</i>	<i>5,77</i>	<i>2,49</i>
<i>TOTAL DAS CATEGORIAS</i>		<i>3,29</i>	<i>6,02</i>	<i>3,39</i>

Na Figura 21 observam-se graficamente os resultados.

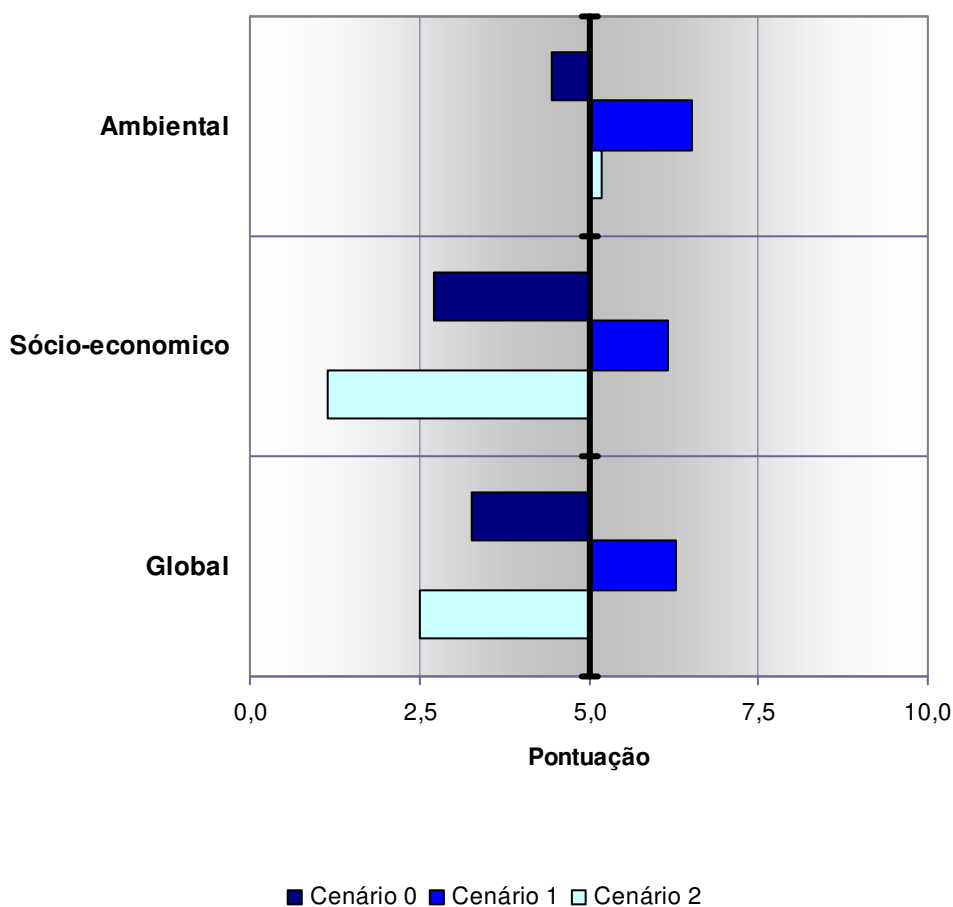


Figura 21 – Pontuação global da hipótese 3

Observando a Figura 21 se constata que, economicamente, o cenário 1 é o cenário mais vantajoso, nas categorias individuais e na globalidade. O cenário 2 é desvantajoso na

componente económica, o que se relaciona com o preço elevado de *peletes* de madeira, comparativamente aos restantes combustíveis.

11.2 Estudo de sensibilidade a custos de licenças de emissão de carbono, taxa de carbono e preço do carvão

Nesta análise de sensibilidade foi estudada a alteração de variáveis de preço estabelecidas na *Avaliação Geral*. Considerou-se este estudo imprescindível uma vez que a flutuação dos preços pode eventualmente afectar a competitividade dos cenários.

As variáveis em estudo são: inclusão de uma taxa de carbono, inclusão de licenças de emissão de CO₂ e preço do carvão.

A dependência do carvão como matéria-prima energética faz com que o seu preço intervenha profundamente na economia. O preço das taxas de carbono e licenças de emissão de CO₂ são mercados em ascensão, ainda pouco significativos e influentes, mas que se prevêem num futuro próximo assumirem grande importância. A estimativa de custos foi efectuada com base em pesquisa de referência, contudo não deixa de ser apenas uma previsão, e deve ser encarada como tal.

As variáveis já mencionadas serão estudadas em três hipóteses, mantendo fixos os preços de lama de ETAR, farinha de carne e ossos e *peletes* de madeira.

A ponderação considerada nas hipóteses foi a mesma que no capítulo *Avaliação Geral*: cada categoria possui uma ponderação de 4,5, num total de 9 (Quadro 91).

Quadro 91 – Ponderação dos indicadores

	Indicadores	Ponderação	Total
Ambientais	1. Uso de combustíveis fósseis	0,75	4,5
	2. Emissão evitada de GEE	0,75	
	3. Emissão de gases com efeito acidificante	0,75	
	4. Emissão de compostos que contribuem para eutrofização	0,75	
	5. Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico	0,75	
	6. Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono	0,75	
Sócio-económicos	7. Potencial de criação de emprego	1,5	4,5
	8. Custo de produção de electricidade	1,5	
	9. Custo do abatimento das emissões de CO ₂	1,5	

11.2.1 Hipótese 4

Nesta hipótese procurou-se estudar como os cenários reagem à alteração de preço de licenças de emissão de carbono. É importante estudar este indicador uma vez que o comércio de licenças de emissão é uma das medidas propostas por Quioto para o cumprimento das metas de emissão de CO₂, já em uso por alguns países comunitários, e com implantação prevista noutros, como Portugal.

As licenças de emissão de carbono são comerciáveis, e existem várias plataformas de transacção de licenças de emissão, internacionais ou europeias, cada uma com preços de tonelada de carbono diferentes. Por serem mercados recentes, o valor de transacção é imprevisível, e dependerá de factores políticos, climáticos e de outros preços como o petróleo e carvão (Powernext, 2008).

O valor médio de transacção de licenças de emissão de carbono em Janeiro de 2008, no mercado Powernext, foi de 0,02 €/t. O cenário base descrito no capítulo *Avaliação Geral* usou 1,50 €/t de licença de emissão, contudo, após testes verificou-se que a

diferença de valor não era significativa, não sendo relevante apresentar os resultados uma vez que não diferem do capítulo mencionado.

Segundo a Powernext (2008), os valores monetários de licenças de emissão para 2009 prevêem-se na ordem dos 22 €/t (futuros), pelo que se usará esse valor na presente hipótese.

Com base nos pesos definidos e nos dados obtidos de cada indicador na escala uniformizada, obtém-se a seguinte agregação:

Quadro 92 – Agregação dos indicadores para a hipótese 4

	Indicadores	Agregação		
		Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
Ambientais	1. Uso de combustíveis fósseis	3,04	4,34	4,00
	2. Emissão evitada de GEE	0,00	5,96	4,00
	3. Emissão de gases com efeito acidificante	2,03	2,77	2,52
	4. Emissão de compostos que contribuem para eutrofização	6,46	6,57	4,78
	5. Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico	3,40	3,84	3,06
	6. Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono	5,06	5,84	4,98
	<i>TOTAL</i>	<i>4,44</i>	<i>6,52</i>	<i>5,18</i>
Sócio-económicos	7. Potencial de criação de emprego	7,50	5,81	9,80
	8. Custo de produção de electricidade	7,50	9,31	5,16
	9. Custo do abatimento das emissões de CO ₂	0,00	11,32	0,13
	<i>TOTAL</i>	<i>3,33</i>	<i>5,88</i>	<i>3,35</i>
	<i>TOTAL DAS CATEGORIAS</i>	<i>3,89</i>	<i>6,20</i>	<i>4,27</i>

Numa representação gráfica da agregação, tem-se:

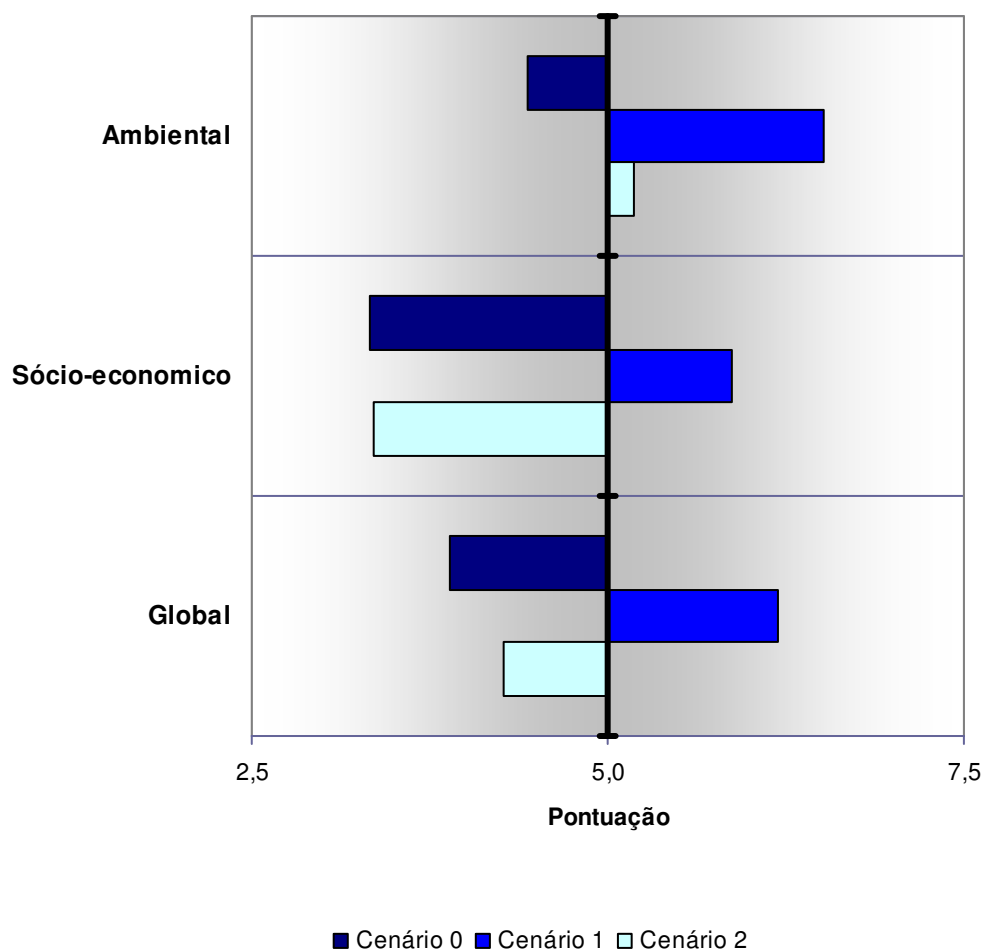


Figura 22 – Pontuação global da hipótese 4

Pela análise da Figura 22, observa-se que em ambas as categorias ambiental e sócio-económica, e também na avaliação global, o cenário 1 apresenta uma pontuação mais elevada que os restantes, sendo o cenário mais favorável para o limite de emissão assumido de 22/t €.

Comparativamente ao resultado da *Avaliação Geral*, constata-se que o aumento do preço das licenças de emissão de CO₂ provoca uma melhoria da pontuação do cenário 1, tendência que se inverte no caso do cenário 2, uma vez que tem mais emissões fósseis, e é, por isso, mais penalizado no custo das licenças de emissão associados.

Conclui-se então que na hipótese de aplicação de um limite de emissão de carbono na ordem dos 22 €/t, o cenário 1 é uma opção claramente mais vantajosa na co-combustão da Central Termoeléctrica.

11.2.2 Hipótese 5

Nesta hipótese pretende-se estudar como os cenários 0, 1 e 2 reagem à aplicação de uma taxa de carbono. É importante estudar a eventualidade de aplicação de taxas de carbono uma vez que, este indicador, tal como a hipótese anterior, é um dos mecanismos propostos por Quioto para alcançar as metas de emissões de CO₂.

Não existe actualmente uma taxa de carbono definida para a UE. Contudo, estão a ser realizados estudos, nomeadamente no que respeita à aplicação de taxas associadas aos transportes, uma vez que é onde se verificam os maiores consumos energéticos de origem fóssil (EEA, 2007)

Segundo McGlade's (2007) deve haver uma taxa de carbono mínima de 30 € para surtir efeito na economia. Esta afirmação tem como base estudos do autor na Noruega, onde actualmente se praticam taxas de 50 €/t.

Assim, neste cenário serão testados dois valores de taxa de carbono, 30 €/t e 50 €/t.

11.2.2.1 Hipótese 5.1

Estudando a hipótese de um valor de taxa de carbono de 30 €/t , tem-se a seguinte agregação dos valores obtidos, por cenário:

Quadro 93 – Agregação dos indicadores para a hipótese 5.1

	Indicadores	Agregação		
		Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
Ambientais	1. Uso de combustíveis fósseis	3,04	4,34	4,00
	2. Emissão evitada de GEE	0,00	5,96	4,00
	3. Emissão de gases com efeito acidificante	2,03	2,77	2,52
	4. Emissão de compostos que contribuem para eutrofização	6,46	6,57	4,78
	5. Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico	3,40	3,84	3,06
	6. Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono	5,06	5,84	4,98
	<i>TOTAL</i>	<i>4,44</i>	<i>6,52</i>	<i>5,18</i>
Sócio-económicos	7. Potencial de criação de emprego	7,50	5,81	9,80
	8. Custo de produção de electricidade	7,50	9,37	5,63
	9. Custo do abatimento das emissões de CO ₂	0,00	11,92	0,93
	<i>TOTAL</i>	<i>3,33</i>	<i>6,02</i>	<i>3,64</i>
	<i>TOTAL DAS CATEGORIAS</i>	<i>3,89</i>	<i>6,27</i>	<i>4,41</i>

Representando graficamente a agregação, tem -se:

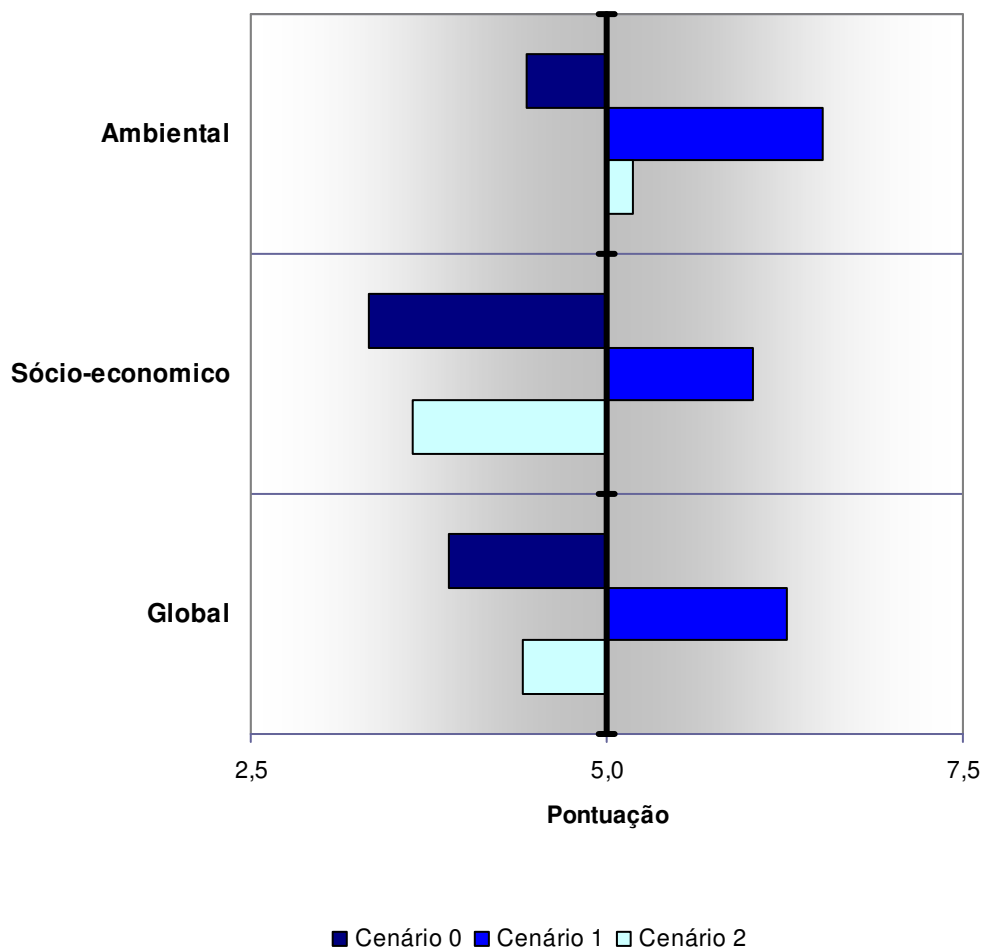


Figura 23 – Pontuação global da hipótese 5.1

Com a aplicação de 30 €/t de taxa de carbono, globalmente, o cenário 1 será o mais competitivo, notoriamente distanciado do comportamento dos cenários 0 e 2.

O cenário 2 apresenta valores de agregação, sob o ponto de vista ambiental, acima do valor de referência satisfatório. Contudo, ao nível sócio-económico, tem um desempenho menos bom.

11.2.2.2 Hipótese 5.2

Estudando a hipótese de um valor de taxa de carbono de 50 €/t , tem-se a seguinte agregação dos valores obtidos, por cenário:

Quadro 94 – Agregação dos indicadores para a hipótese 5.1

	Indicadores	Agregação		
		Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
Ambientais	1. Uso de combustíveis fósseis	3,04	4,34	4,00
	2. Emissão evitada de GEE	0,00	5,96	4,00
	3. Emissão de gases com efeito acidificante	2,03	2,77	2,52
	4. Emissão de compostos que contribuem para eutrofização	6,46	6,57	4,78
	5. Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico	3,40	3,84	3,06
	6. Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono	5,06	5,84	4,98
	<i>TOTAL</i>	<i>4,44</i>	<i>6,52</i>	<i>5,18</i>
Sócio-económicos	7. Potencial de criação de emprego	7,50	5,81	9,80
	8. Custo de produção de electricidade	7,50	9,47	6,36
	9. Custo do abatimento das emissões de CO ₂	0,00	13,18	2,60
	<i>TOTAL</i>	<i>3,33</i>	<i>6,32</i>	<i>4,17</i>
	<i>TOTAL DAS CATEGORIAS</i>	<i>3,89</i>	<i>6,42</i>	<i>4,68</i>

Com base na agregação, graficamente, tem-se:

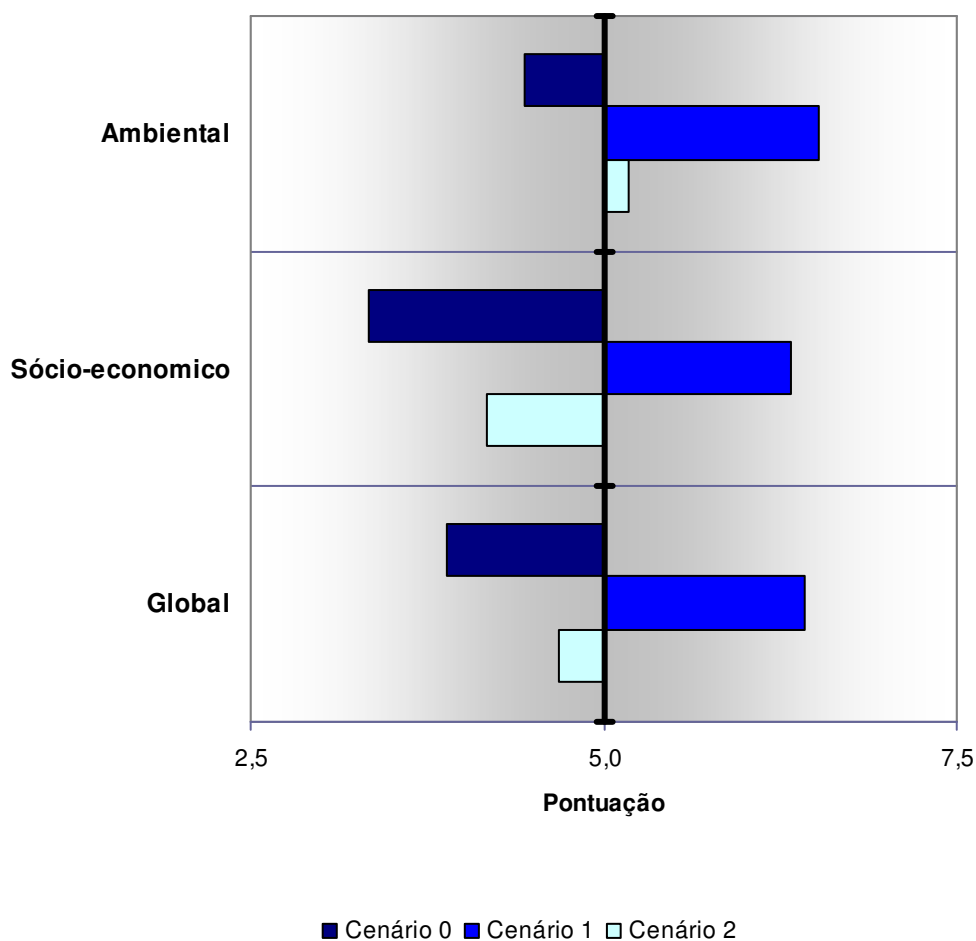


Figura 24 – Pontuação global da hipótese 5.2

Semelhantemente à hipótese anterior, o cenário mais competitivo persiste como sendo o cenário 1. Contudo, os valores de agregação ambientais e sócio-económicos são, nesta hipótese, próximos, o que a torna equilibrada e consistente. O comportamento sócio-económico do cenário 2 melhorou, enquanto o do cenário 0, apesar de melhorar ligeiramente, foi o pior de todos os cenários.

|

11.2.3 Hipótese 6

A hipótese 6 pretende estudar como os cenários 0, 1 e 2 reagem à variação do preço do carvão. O preço da tonelada de carvão oscila e depende de factores como a qualidade do carvão, local de produção, procura e oferta de mercado. O preço usado no estudo do capítulo *Avaliação Geral* foi 70 €/t.

Assim, estimaram-se valores de carvão superiores a 70 €/t já que o preço tende a subir devido à procura de países com economias em crescimento, como a Índia e a China, cujas macroeconomias estão a começar a importá-lo em grandes quantidades (EEA, 2006).

11.2.3.1 Hipótese 6.1

Na presente hipótese admitiu-se um valor de 150 €/t carvão, para testar o comportamento dos cenários. Obteve-se a seguinte agregação de valores dos indicadores:

Quadro 95 – Agregação dos indicadores para a hipótese 5.1

	Indicadores	Agregação		
		Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
Ambientais	1. Uso de combustíveis fósseis	3,04	4,34	4,00
	2. Emissão evitada de GEE	0,00	5,96	4,00
	3. Emissão de gases com efeito acidificante	2,03	2,77	2,52
	4. Emissão de compostos que contribuem para eutrofização	6,46	6,57	4,78
	5. Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico	3,40	3,84	3,06

Quadro 94 – (Continuação)

	6. Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono	5,06	5,84	4,98
	<i>TOTAL</i>	<i>4,44</i>	<i>6,52</i>	<i>5,18</i>
Sócio-económicos	7. Potencial de criação de emprego	7,50	5,81	9,80
	8. Custo de produção de electricidade	7,50	9,41	5,94
	9. Custo do abatimento das emissões de CO ₂	0,00	12,39	1,55
	<i>TOTAL</i>	<i>3,33</i>	<i>6,14</i>	<i>3,84</i>
	<i>TOTAL DAS CATEGORIAS</i>	<i>3,89</i>	<i>6,33</i>	<i>4,51</i>

Com base na agregação, graficamente, tem-se:

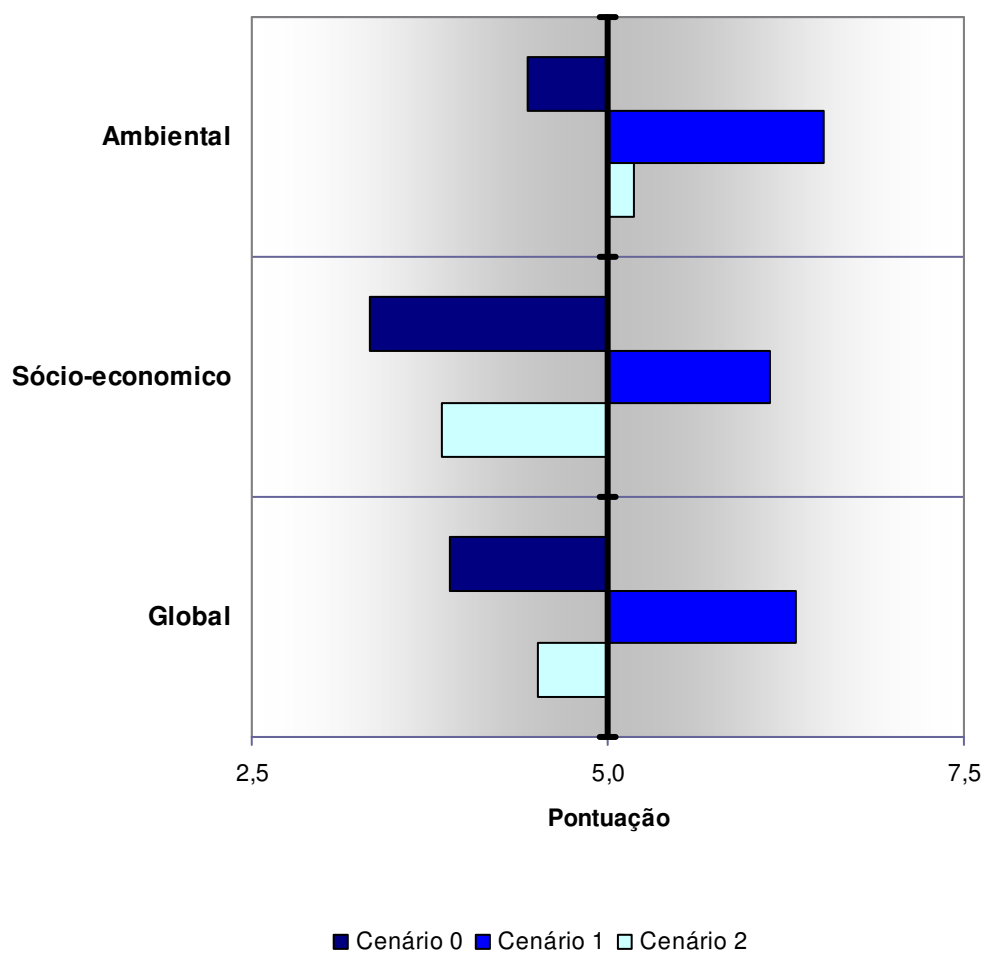


Figura 25 – Pontuação global da hipótese 6.1

Ao estabelecer o preço do carvão nos 150 €/t verifica-se que o cenário 1 apresenta o melhor comportamento ambiental e sócio-económico de todos os cenários. A pontuação é equilibrada, o que torna o cenário 1 um cenário consistente para esta hipótese.

O cenário 2 apresenta um comportamento melhor que o 0, mas inferior ao 1.

11.2.3.2 Hipótese 6.2

Na presente hipótese admitiu-se um valor de 300 €/t carvão, obtendo-se a seguinte agregação de valores dos indicadores:

Quadro 96 – Agregação dos indicadores para a hipótese 5.1

	Indicadores	Agregação		
		Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
Ambientais	1. Uso de combustíveis fósseis	3,04	4,34	4,00
	2. Emissão evitada de GEE	0,00	5,96	4,00
	3. Emissão de gases com efeito acidificante	2,03	2,77	2,52
	4. Emissão de compostos que contribuem para eutrofização	6,46	6,57	4,78
	5. Emissão de gases que contribuem para o nevoeiro fotoquímico	3,40	3,84	3,06
	6. Emissão de gases que contribuem para a depleção da camada de ozono	5,06	5,84	4,98
	<i>TOTAL</i>	<i>4,44</i>	<i>6,52</i>	<i>5,18</i>
Sócio-económicos	7. Potencial de criação de emprego	7,50	5,81	9,80
	8. Custo de produção de electricidade	7,50	9,62	7,50
	9. Custo do abatimento das emissões de CO ₂	0,00	16,85	7,48
	<i>TOTAL</i>	<i>3,33</i>	<i>7,17</i>	<i>5,50</i>
	<i>TOTAL DAS CATEGORIAS</i>	<i>3,89</i>	<i>6,84</i>	<i>5,34</i>

Com base na agregação, graficamente, tem-se:

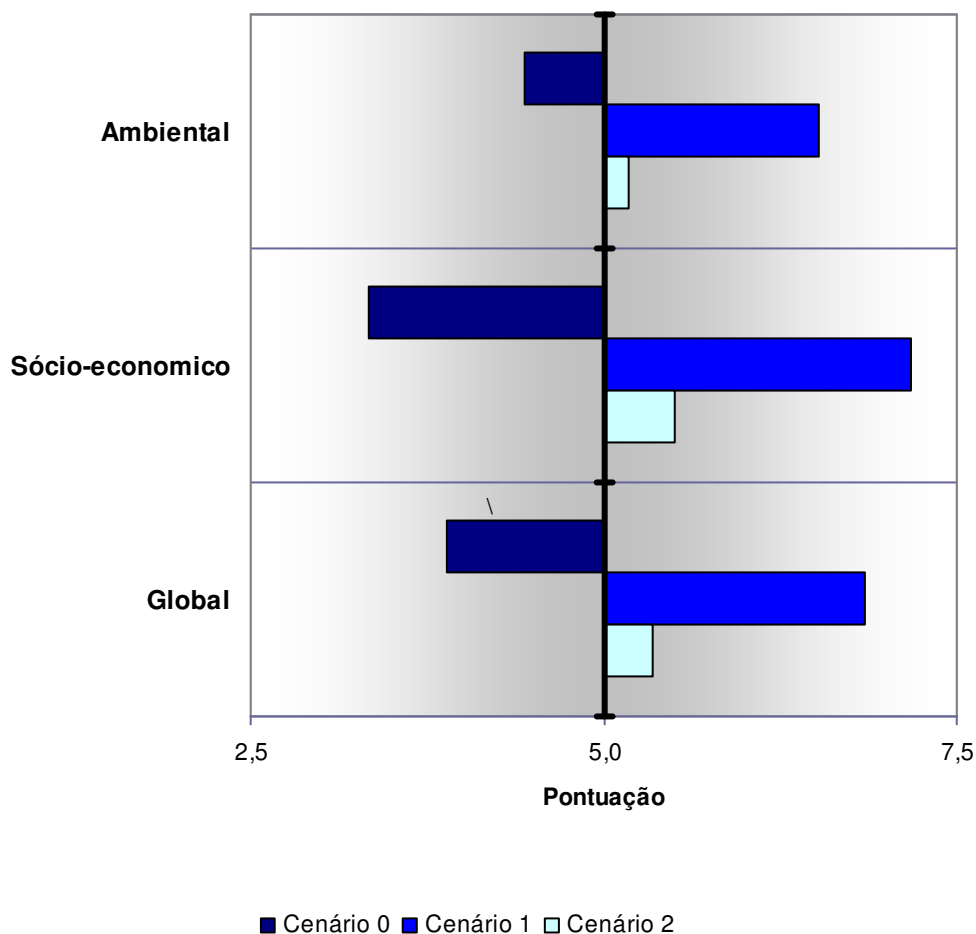


Figura 26 – Pontuação global da hipótese 6.2

O cenário 0 é o pior cenário, nesta hipótese. Comparativamente com a hipótese anterior, o desempenho sócio-económico do cenário 2 melhora com o aumento do preço do carvão, para valores acima do de referência. O cenário 1 melhora também com o aumento do preço do carvão, particularmente no que respeita ao aspecto sócio-económico. Para esta hipótese, o cenário 1 é o mais favorável para combustão na Central Termoelétrica.

12 CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu observar o comportamento dos cenários 0, 1, e 2 correspondendo, respectivamente, à combustão de carvão na Central Termoeléctrica de Stadtwerke Duisburg AG, co-combustão de Lamas de ETAR e farinha de carne e ossos, e co-combustão de Lamas de ETAR e *peletes* de madeira, numa perspectiva ambiental e sócio-económica.

Na avaliação geral, o cenário 1 apresenta o melhor comportamento ambiental e sócio-económico. Em todos os indicadores o cenário 1 apresentou valores normalizados mais elevados, excepto no indicador criação de emprego, onde o cenário 2 apresentou um melhor comportamento, devido à necessidade de mão-de-obra para a produção de madeira e de *peletes*.

Considerando a análise de sensibilidade realizada aos pesos de indicadores, puderam observar-se diferentes comportamentos dos cenários em função de alterações de variáveis. Enfatizando a ponderação dos indicadores ambientais, do indicador potencial de criação de emprego, do indicador custos de produção de electricidade e do indicador abatimento de emissões fósseis, o cenário 1 denota o melhor comportamento, com valores mais elevados da escala agregada. Este cenário parece indicar que a reutilização de resíduos é preferível à produção de biomassa destinada a combustível, como no caso do cenário 2 (*peletes* de madeira).

Uma vez que a competitividade dos cenários depende do factor “custo” associado a um factor tempo, realizou-se uma análise de sensibilidade onde se estudou a aplicação de uma licença de carbono, taxa de emissão de carbono e preço do carvão, permitindo observar o comportamento dos cenários em função dessas variáveis. Nas três hipóteses de variações de custo estudadas, o cenário 1 apresentou, globalmente, o melhor comportamento.

De uma forma geral pode afirmar-se que, de um ponto de vista ambiental e sócio-económico, a co-combustão de carvão, lamas de ETAR e farinha de carne e ossos é uma

alternativa mais interessante para a Central Termoelétrica de Stadtwerke Duisburg AG, em detrimento da combustão de carvão.

13 BIBLIOGRAFIA

Barbosa, R. (2005) *Caracterização química e ecotoxicológica de escórias e cinzas resultantes da co-combustão de lamas e carvão*, Dissertação de Mestrado, UNL, FCT, Lisboa, pp. 23 e 24

Biewinga, E. E. e G. van der Bijl, (1996), *Sustainability of energy crops in Europe – A methodology developed and applied*, Centre for Agriculture and Environment (CLM), Utrecht, Holanda

Cabrita, I.; Gulyurtlu, I. (2006) *Desafios tecnológicos perante a substituição do petróleo por biomassa*, Apresentação oral na UNL, INETI, pp. 23-25

CE – Comissão Europeia (2000), *Livro Verde – Para uma estratégia europeia de segurança do aprovisionamento energético [COM (2000) 769 final]*, Comunicação da Comissão ao Conselho e ao Parlamento Europeu, Bruxelas

CEC – Commission of the European Communities (2006), *Green paper: A European strategy for sustainable, competitive and secure energy*, Commission Report, Brussels

CEC - Commission of the European Communities (2004), *The share of renewable energy in the EU, COM(2004)366 final*, Commission Report, Brussels

CCE - Comissão das Comunidades Europeias (2007) *Acção de acompanhamento do Livro Verde - Relatório sobre os progressos em electricidade renovável*, Comunicação da Comissão ao Conselho e ao Parlamento Europeu, Bruxelas

Conesa, J.; Fullana, A; Font, R. (2003) *Thermal decomposition of meat and bone meal*, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 70, pp. 619-630

COPOWER (2003) *Synergy effects of co-processing of biomass with coal and non-toxic wastes for heat and power generation*, Proposal of specific targeted research project submitted to European Commission, Brussels

COPOWER (2007) *Synergy effects of co-processing of biomass with coal and non-toxic wastes for heat and power generation*, Final Report of Workpackage 2, Task 2.1 Fuel Characterization, Lisboa

Costa, F. (2007) *Caracterização de resíduos resultantes da co-combustão de biomassa e carvão*, Dissertação de Mestrado, UNL, FCT, Lisboa, pp. 66 e 67

Dias, J. (2002) *Utilização da biomassa: avaliação dos resíduos e utilização de pellets em caldeiras domésticas*, Dissertação de Mestrado, UTL, IST, Lisboa, pp. 9-11

Dias, M. (2006) *Formação de NH₃, H₂S e HCl durante a co-gasificação de carvão com C.D.R.*, Dissertação de Mestrado, UNL, FCT, Lisboa, pp. 17, 43-48

Decisão da Comissão n.º 2000/766/CE, de 27 de Fevereiro de 2001 que altera, relativamente às proteínas hidrolisadas, a Decisão 2001/9/CE relativa a medidas de controlo exigidas para a execução da Decisão 2000/766/CE do Conselho, relativa a determinadas medidas de protecção relativas às encefalopatias espongiformes transmissíveis e à utilização de proteínas animais na alimentação animal, Jornal Oficial L 58/43 de 28.02.01

Decisão do Parlamento Europeu e do Conselho n.º 1230/2003/CE, de 26 de Junho de 2003 que aprova o programa plurianual de acções no domínio da energia: Programa «Energia Inteligente - Europa» (2003-2006), Jornal Oficial L 176/29 de 15.07.03

Decreto-Lei n.º 538/99, de 3 de Dezembro de 1999 publicado no Diário da República n.º 288 Série I-A, Produção de Energia Eléctrica: Regime Especial – Cogeração a 13.12.99

DGS - The German Solar Energy Society, Ecofys (2005) *Planning and installing bioenergy systems: a guide for installers, architects and engineers*, Earthscan, London

Directiva do Parlamento Europeu e do Conselho n.º 2001/77/CE, de 27 de Setembro de 2001 relativa à promoção da electricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis no mercado interno da electricidade, Jornal Oficial L 283/33 de 27.10.01

Directiva do Conselho 1999/31/CE de 26 de Abril de 1999 relativa à deposição de resíduos em aterro, Jornal Oficial L 182/1 de 16.07.99

Directiva do Conselho 1991/271/CE de 21 de Maio de 1991 relativa ao tratamento das águas residuais urbanas, Jornal Oficial L 135 de 30.05.91

EEA - European Environment Agency (2000), *Environmental issue series - Down to earth: Soil degradation and sustainable development in Europe*, Office for official publications of the European Communities, Copenhagen

EEA - European Environment Agency (2005) *Climate change and a European low-carbon energy system*, Office for official publications of the European Communities, Copenhagen

EEA - European Environment Agency (2006a) *Air quality and ancillary benefits of climate change policies*, Office for official publications of the European Communities, Copenhagen

EEA - European Environment Agency (2006b) *How much bioenergy can Europe produce without harming the environment?*, Office for official publications of the European Communities, Copenhagen

EEA - European Environment Agency (2007) *Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2007 - Tracking progress towards Kyoto targets*, Office for official publications of the European Communities, Copenhagen

EIA (2006), *International Energy Outlook – 2006*, Energy Information Administration, U.S. Department of Energy, United States of America

EUROSTAT (2007) *Statistical Books - Panorama of energy 2007 edition*, Report, Luxembourg

Ferreira, J. (2004) *Análise de ciclo de vida dos produtos*, Relatório de Investigação, Instituto Politécnico de Viseu

Gore, A. (2007) *Uma verdade inconveniente*, Editora Esfera do Caos, Lisboa

IEA – International Energy Agency (2007) *World energy outlook 2007 - Executive Summary*, France

IPTS - Institute for prospective technological studies (2005) *Integrated pollution prevention and control. Reference document on economics and cross-media effects*, European Commission, Directorate-General, Joint Reserch Centre, Seville

Lapa, N. *et al.* (2007) *Chemical and ecotoxicological characterization of ashes obtained form sewage sludge combustion in a fluidised-bed reactor*, Journal of Hazardous Materials, pp. 1-3

Lopes, L. (2007) *Avaliação ambiental e sócio-económica da produção de energia eléctrica através da co-combustão de carvão, biomassa e resíduos não tóxicos*, Relatório de Estágio, ULHT, Lisboa

Lopes, M. (2002) *Estudo do comportamento de metais pesados na combustão de lamas residuais urbanas em leito fluidizado*, Dissertação de Doutoramento, UNL, FCT, Lisboa

Lopes, M.; Abelha, P.; Cabrita, I.; Gulyurtlu, I. (2003) *Aspectos Ambientais da valorização energética de lamas de ETAR's. Redução da libertação de metais pesados*, Relatório de investigação, INETI, Lisboa

Lourenço, R. (2006) *Produção de energia eléctrica através do processo de Gasificação de Biomassa*, Dissertação de Mestrado, UNL, FCT, pp. 28-32, 55-59

McGlade, J. (2007) *Eco-innovations and climate change: The role of fiscal instruments*, Speech at the 8th Global Conference on Environmental Taxation, Munich

Patyk, A., Reinhardt, G. A. (coords) et al., (2000), *Bioenergy for Europe: which ones fit best? A comparative analysis for the Community - Final Report*, EU

Powernext Futures, S.A. (2008) *Report: Monthly Statistics*, January 2008

Powernext Futures, S.A. (2006) *Report: Activity assessment first-half 2006*, 2006

Reis, E. (2002) *Estatística descritiva*, Edições Sílabo, Lisboa pp. 97-123

Spath, P.; Mann, M.; Kerr, D. (1999) *Life cycle assessment of coal-fired power production*, National Technical Information Service, Springfield, pp. 48-59

White, L. P.; Plaskett, L. G. (1981) *Biomass as fuel*, Academic Press, New York

Xstrata (2006) *Cerrejón Overview – Xstrata business analysts site visit*, Company Report, November 2006, Colombia

Recursos on-line:

AEA – Agência Europeia do Ambiente, <http://local.pt.eea.europa.eu/> (Janeiro 2008)

Agência Para a Energia, <http://www.adene.pt/ADENE.Portal> (Fevereiro 2008)

Agência Portuguesa do Ambiente, <http://www.apambiente.pt/> (Fevereiro 2008)

EEA – European Environment Agency, <http://www.eea.europa.eu/> (Março 2008)

Europe's Energy Portal, <http://www.energy.eu/> (Janeiro 2007)

EUBIA - European Biomass Industry Association, <http://www.eubia.org/> (Janeiro 2008)

European Pellet Centre, <http://www.pelletcentre.info> (Dezembro 2007)

El Colombiano, <http://www.elcolombiano.com> (Janeiro 2008)

EUROSTAT, <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/> (Dezembro 2007)

ISA/UTL – *Ecologia de albufeiras e das suas comunidades biológicas. Fundamentos teóricos para a sua gestão*, <http://www.isa.utl.pt/> (Março 2008)

Mining Technology - *El Cerrejón coal mine*, <http://www.mining-technology.com>
(Fevereiro 2008)

NISP, <http://www.nisp.org.uk> (Fevereiro 2008)

Port of Rotterdam, <http://www.portofrotterdam.com> (Fevereiro 2008)

Quercus, <http://www.quercus.pt/> (Janeiro 2008)