



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Tobias de Jesus Prudêncio Pereira

**AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DA GERAÇÃO
DE ELETRICIDADE NUMA CENTRAL
TERMOELÉTRICA A CARVÃO CONVERTIDA
PARA BIOMASSA FLORESTAL**

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, Área de Especialização em Tecnologia e Gestão do Ambiente orientada pela Doutora Rita Pinheiro Garcia e coorientada pelo Professor Doutor Fausto Miguel Cereja Seixas Freire e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.

Setembro de 2019

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Avaliação de ciclo de vida da geração de eletricidade numa central termoelétrica a carvão convertida para biomassa florestal

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente

Life cycle assessment of electricity generation in a coal fired power plant converted to forest biomass

Autor

Tobias de Jesus Prudêncio Pereira

Orientadores

Rita Pinheiro Garcia

Fausto Miguel Cereja Seixas Freire

Júri

Presidente Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor Fausto Miguel Cereja Seixas Freire
Professor Associado da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da
Silva Ribeiro
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, setembro, 2019

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer à Doutora Rita Garcia por toda a disponibilidade, ajuda e transmissão de conhecimentos. Ao professor Doutor Fausto Freire, o meu coorientador, agradeço a oportunidade de realizar esta dissertação, trabalhar nesta área e por toda a ajuda concedida.

À minha família por todo o apoio que me deram e por todo o esforço e sacrifício que fizeram para me ajudar a alcançar os meus objetivos. Um agradecimento especial à minha avó por toda a ajuda que me tem dado ao longo da minha vida e por ter estado sempre ao meu lado independentemente das circunstâncias.

Aos meus amigos por todos os momentos passados, por toda a ajuda e amizade que me deram.

Aos amigos que fiz em Coimbra por todas estas vivências que partilhámos ao longo destes cinco anos.

“A presente dissertação enquadrou-se na investigação relacionada com os projetos: SUSTAINFOR - Avaliação da sustentabilidade de estratégias de gestão do setor florestal no contexto da bioeconomia (PTDC/AGR-FOR/1510/2014 / POCI-01-0145-FEDER-016764) e SABIOS - Avaliação da sustentabilidade de sistemas de bioenergia: uma abordagem ciclo de vida multi-critério para apoio à decisão, incluindo alterações do uso dos solos (PTDC/AAG-MAA/6234/2014 / POCI-01-0145-FEDER-016765), financiados pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) e Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).”

Resumo

Devido à necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito de estufa, em linha com o cumprimento das metas estabelecidas pela União Europeia, é necessário explorar opções para a geração de eletricidade com base em fontes renováveis. Em Portugal, está previsto que as duas centrais termoelétricas de geração de eletricidade a partir de carvão sejam descomissionadas até 2030. Em particular, a conversão da central do Pego para operar a biomassa está a ser equacionada. Esta dissertação tem como objetivo principal avaliar os impactes ambientais de ciclo de vida (CV) associados à geração de eletricidade na central termoelétrica do Pego após a sua conversão para operar exclusivamente com biomassa florestal. A análise foi feita considerando a geração média anual prevista para a central, de 10 % da capacidade atual, e máxima de 25 %. Foram desenvolvidos modelos e inventários de ciclo de vida para cada um dos cenários de geração. Para a geração anual média da central, o modelo inclui os processos de extração e recolha, transporte, destroçamento, secagem e torrefação, arrefecimento, moagem e combustão de biomassa e geração de eletricidade para a unidade funcional de 1 kWh de energia gerada. Foi considerado o abastecimento a partir de biomassa endógena e foram analisadas diferentes condições de torrefação, diferentes consumos energéticos no processo de secagem e diferentes fontes de energia para estes processos. Para o funcionamento da central na sua capacidade máxima foram analisados diversos cenários de importação de biomassa: importação de biomassa do Uruguai, importação de biomassa do Canadá, importação de péletes de biomassa do Canadá e importação de péletes torreficadas do Canadá. Através dos métodos ReCiPe e *Cumulative Energy Demand* foram avaliados os impactes nas categorias alterações climáticas, depleção da camada de ozono, acidificação terrestre, eutrofização de água doce e requisitos de energia fóssil primária.

Os resultados mostram que os processos que apresentam maiores impactes ambientais são o transporte (até 55 %), a secagem e torrefação (até 33 %) e a combustão e geração de eletricidade (até 48 %). Verificou-se que com a utilização de biomassa como fonte de abastecimento para os processos de secagem e torrefação, as condições de torrefação de 250 °C; 30 minutos se apresentam como as mais favoráveis. No caso da utilização de gás de torrefação, juntamente com biomassa, para o fornecimento de energia para a secagem e a torrefação, verificou-se que as condições de 300 °C; 30 minutos são as que apresentam menores impactes ambientais. Verificou-se que aumentando as distâncias de transporte para

recolha de biomassa para o abastecimento da central em 46 % resultou num aumento de impactes ambientais entre 2 e 29 %.

No cenário de geração anual máxima verificou-se que a importação de biomassa do Uruguai e a importação de péletes do Canadá são os cenários de importação de biomassa que apresentam os menores impactes ambientais. No entanto, o transporte é responsável por 55 a 91 % dos impactes ambientais. Os diferentes cenários de geração máxima anual de eletricidade (utilização de biomassa endógena e importada) foram comparados com o cenário de geração média anual (utilização de biomassa endógena) e com outros sistemas de geração de eletricidade em Portugal (carvão e gás natural). Concluiu-se que um aumento da geração de eletricidade na central superior ao valor médio (10 % de capacidade) que necessite de biomassa importada, resulta em impactes ambientais superiores à utilização de carvão ou gás natural na maioria das categorias de impacte. A possível conversão da central para operar a biomassa florestal deve, por isso, ter em conta a disponibilidade de biomassa endógena de modo a minimizar os impactes ambientais.

Palavras-chave: Avaliação de Ciclo de Vida, Biomassa Florestal, Geração de Eletricidade, Torrefação.

Abstract

Due to the need to reduce greenhouse gas emissions in line with meeting the targets set by the European Union, options for renewable sources for electricity generation need to be explored. In Portugal, the two coal-fired thermoelectric power plants are expected to be decommissioned by 2030. In particular, the conversion of the Pego power plant to operate with biomass is being equated. The main objective of this dissertation is to evaluate the life cycle (LC) environmental impacts associated with electricity generation in the Pego thermoelectric power station after its conversion to operate exclusively with forest biomass, based on the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. The analysis was made considering the expected annual average generation for the plant of 10% of the current capacity and maximum of 25%. Life cycle models and inventories were developed for each of the generation scenarios. For the average annual generation of the plant, the model includes the processes of extraction and collection, transport, shredding, drying and torrefaction, cooling, milling and combustion of biomass and electricity generation for the 1 kWh functional unit of energy generated. It was considered the supply from endogenous biomass and different torrefaction conditions, different energy consumption in the drying process and different energy sources for these processes were analyzed. In order to operate the plant at its maximum capacity, several scenarios for biomass importation were analyzed: biomass importation from Uruguay, biomass importation from Canada, importation of biomass pellets from Canada, and importation of torrefied pellets from Canada. Using the ReCiPe and Cumulative Energy Demand methods the impacts on climate change, ozone depletion, terrestrial acidification, freshwater eutrophication and primary fossil energy requirements were assessed.

The results show that the processes with the greatest environmental impacts are transportation (up to 55%), drying and torrefaction (up to 33%) and combustion and electricity generation (up to 48%). It was verified that with the use of biomass as a source of supply for the drying and torrefaction processes, the torrefaction conditions of 250 °C; 30 minutes are presented as the most favorable. In the case of torrefaction gas, together with biomass, for the supply of energy for drying and torrefaction, the conditions of 300 °C were found to be; 30 minutes are the ones with the lowest environmental impacts. Increasing the

transport distances for biomass collection to power plant supply by 46% resulted in an increase in environmental impacts ranging from 2 to 29%.

In the scenario of maximum annual generation it was found that the importation of biomass from Uruguay and the importation of pellets from Canada are the biomass import scenarios with the lowest environmental impacts. However, transportation is responsible for 55 to 91 % of the environmental impacts. The different scenarios of maximum annual electricity generation (use of endogenous and imported biomass) were compared with the scenario of average annual generation (use of endogenous biomass) and other electricity generation systems in Portugal (coal and natural gas). It was concluded that an increase in power generation at the plant higher than the average value (10% capacity) requiring the use of imported biomass results in higher environmental impacts than the use of coal or natural gas in most impact categories. The possible conversion of the plant to operate forest biomass should therefore take into account the availability of endogenous biomass in order to minimize environmental impacts.

Keywords Life Cycle Assessment, Forest Biomass, Electricity Generation, Torrefaction.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	1
Simbologia.....	1
Siglas	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento e motivação.....	1
1.2. Estado da Arte.....	3
1.3. Objetivos.....	7
1.4. Estrutura da dissertação	9
2. Modelos e Inventários de Ciclo de Vida	10
2.1. Metodologia: Avaliação de Ciclo de Vida.....	10
2.2. Modelo e inventário de ciclo de vida: geração anual média.....	10
2.2.1. Objetivo e Âmbito	10
2.2.2. Inventário de ciclo de vida e caracterização dos processos.....	13
2.3. Modelo e inventário de ciclo de vida: geração anual máxima.....	28
2.3.1. Objetivo e âmbito	28
2.3.2. Inventário de ciclo de vida e caracterização dos processos.....	30
3. Avaliação Ambiental de Ciclo de vida	38
3.1. Impactes ambientais de ciclo de vida: geração média anual.....	38
3.2. Impactes ambientais de ciclo de vida: geração anual máxima	42
4. Conclusões.....	48
4.1. Principais limitações e trabalhos futuros	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
ANEXO A	56
APÊNDICE A	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Sistema analisado	11
Figura 2.2. Diferentes cenários considerados na análise de sensibilidade	11
Figura 2.3. Variação das propriedades de biomassa com o processo de torrefação (Baseado em Chen et al. (2015)).....	21
Figura 2.4. Sistemas analisados.....	30
Figura 3.1. Resultados obtidos para a análise da geração média anual para as categorias de a) Alterações climáticas; b) Depleção da camada de ozono; c) Acidificação terrestre; d) Eutrofização de água doce; e) Requisitos de energia primária fóssil	41
Figura 3.2. Resultados da análise para a geração anual máxima para a categoria de alterações climáticas.....	42
Figura 3.3. Resultados da análise para a geração anual máxima para a categoria de depleção da camada de ozono	43
Figura 3.4. Resultados da análise para a geração anual máxima para a categoria de acidificação terrestre.....	44
Figura 3.5. Resultados da análise para a geração anual máxima para a categoria de eutrofização de água doce	45
Figura 3.6. Resultados da análise para a geração anual máxima para a categoria de requisitos de energia primária fóssil.....	45
Figura 3.7. Comparação dos impactes ambientais estudados (por kWh) para os diferentes cenários de funcionamento estudados e para outros sistemas de geração de eletricidade em Portugal (carvão e gás natural)	47
Figura 0.1. Resultados da análise para a geração anual média para a categoria de alterações climáticas.....	61
Figura 0.2. Resultados da análise para a geração anual média para a categoria de depleção da camada de ozono	61
Figura 0.3. Resultados da análise para a geração anual média para a categoria de acidificação terrestre.....	62
Figura 0.4. Resultados da análise para a geração anual média para a categoria de eutrofização de água doce	62
Figura 0.5. Resultados da análise para a geração anual média para a categoria de requisitos de energia fóssil primária	63
Figura 0.6. Resultados obtidos para a análise da geração média anual para uma disponibilidade de 50 % de biomassa.....	64

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Inventário para os processos de extração e recolha (1 t de biomassa) (Baseado em Dias (2014)).....	13
Tabela 2.2. Inventário para o processo de carregamento/descarregamento (1 t de biomassa) (Baseado em Dias (2014)).....	14
Tabela 2.3. Inventário para os processos de destroçamento (1 t de biomassa)	15
Tabela 2.4. Área ocupada por cada espécie florestal, para os concelhos em análise (Baseado em IFN5 e IFN6)	17
Tabela 2.5. Área projetada de povoamentos florestais para as espécies analisadas.....	17
Tabela 2.6. Produção anual de biomassa para abastecimento da central (Baseado em Lourinho et al. (2014))	18
Tabela 2.7. Modelação do processo de transporte rodoviário	19
Tabela 2.8. Inventário para o processo de transporte (1 t de biomassa).....	19
Tabela 2.9. Inventário para o processo de transporte considerando 50 % de disponibilidade de biomassa (1 t biomassa).....	20
Tabela 2.10. PCI das espécies analisadas no início do processo de torrefação (baseado em Lourinho et al. (2014))	22
Tabela 2.11. Efeito das diferentes condições de torrefação nas espécies estudadas	23
Tabela 2.12. Consumos energéticos para diferentes condições de torrefação.....	23
Tabela 2.13. Biomassa disponível e energia gerada por ano, após secagem e torrefação... 24	
Tabela 2.14. Composição de uma tonelada de biomassa torrificada.....	24
Tabela 2.15. Inventário para os processos de secagem e torrefação (1 t de biomassa torrificada).....	25
Tabela 2.16. Inventário da infraestrutura de torrefação (baseado em Kabir e Kumar (2012))	25
Tabela 2.17. Inventário para o processo de arrefecimento (1 t de biomassa torrificada) (Baseado em Adams et al. (2015))	26
Tabela 2.18. Inventário para o processo de moagem (1 t de biomassa torrificada)	27
Tabela 2.19. Inventário para o processo de combustão e produção de eletricidade (1 kWh) (Baseado em da Costa et al. (2018)).....	27
Tabela 2.20. Inventário para o transporte de biomassa de eucalipto em estilha (1 t de biomassa).....	31
Tabela 2.21. Modelação do processo de transporte rodoviário	31
Tabela 2.22. Inventário para os processos de secagem e torrefação (1 t de biomassa torrificada).....	32

Tabela 2.23. Inventário para o processo de combustão e geração de eletricidade (1 kWh de eletricidade) (baseado em da Costa et al. (2018))	32
Tabela 2.24. Inventário para a extração de 1 t de biomassa (baseado em Tsalidis et al. (2014)).....	33
Tabela 2.25. Inventário para o processo de peletização biomassa (1 t) (baseado em Tsalidis et al. (2014)).....	33
Tabela 2.26. Inventário para o transporte de 1 t de biomassa (baseado em Tsalidis et al. (2014)).....	34
Tabela 2.27. Inventário para a moagem de 1 t de péletes de biomassa (baseado em Adams et al. (2015)).....	34
Tabela 2.28. Inventário para o processo de combustão e geração de eletricidade (1 kWh de eletricidade) (baseado em da Costa et al. (2018))	35
Tabela 2.29. Inventário para o transporte de 1 t de biomassa (baseado em Tsalidis et al. (2014)).....	35
Tabela 2.30. Inventário para o processo de torrefação e peletização biomassa (1 t) (baseado em Tsalidis et al. (2014))	36
Tabela 2.31. Inventário para o transporte de 1 t de biomassa (baseado em Tsalidis et al. (2014)).....	37
Tabela 2.32. Inventário para o processo de combustão e geração de eletricidade (1 kWh de eletricidade) (baseado em da Costa et al. (2018))	37
Tabela 0.1. Fatores de emissão de ciclo de vida para geração de energia para diversas tecnologias (kg/MWh de energia gerada) (Turconi et al. (2013))	56
Tabela 0.1. Restantes cenários analisados.....	58
Tabela 0.2. Produção anual de biomassa para abastecimento da central para cada cenário analisado.....	58
Tabela 0.3. Distâncias percorridas para cada cenário analisado	59
Tabela 0.4. Consumos de biomassa nos processos de secagem e torrefação.....	59
Tabela 0.5. Inventário para a infraestrutura de torrefação (baseado em Kabir e Kumar (2012)).....	60

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

% - Percentagem

°C – Graus Celsius

g – Gramas

GWh – Gigawatt-hora

L – Litros

h - Hora

ha – Hectare

kg - Kilograma

km – Quilómetro

kWh - Quilowatt-hora

m³ – Metro Cúbico

MJ – Megajoule

MW – Megawatt

t – Tonelada

TJ – Terajoule

tkm – Tonelada-quilómetro

Siglas

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida

CFC-11 – Tricloromonofluormetano

CO₂ – Dióxido de carbono

DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia

eq. - Equivalente

GEE – Gases de efeito de estufa

IFN5 – Inventário Florestal Nacional 5

IFN6 – Inventário Florestal Nacional 6

INE – Instituto Nacional de Estatística

NMVOG - Non-methane volatile organic compound

P – Fósforo

PCI – Poder calorífico inferior

PM_{2.5} – Particulate matter 2.5

PM₁₀ – Particulate matter 10

RMSASEN 2019-2040 – Relatório de Monitorização da Segurança de Abastecimento do Sistema Elétrico Nacional 2019-2040

SO₂ – Dióxido de enxofre

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento e motivação

O Programa Nacional para as Alterações Climáticas 2020/2030 (PNAC 2020/2030) refere a necessidade de reduzir as emissões de Gases de Efeito de Estufa (GEE), de 18 a 23 % até 2020 e de 30 a 40 % até 2030, em relação aos valores de 2005 (Associação Portuguesa do Ambiente). Tendo em conta que a combustão do carvão apresenta elevadas emissões de GEE e a sua utilização para a geração de eletricidade resulta em elevados impactes ambientais, foi declarado pelo governo português o fim do consumo de carvão para produção de eletricidade até 2030 (Portugal está incluído em programas como a PPCA – Powering Past Coal Alliance). Através de dados obtidos pela Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN) verificou-se que, entre março de 2017 e março de 2019, cerca de 22 % da eletricidade produzida em Portugal foi gerada com recurso a carvão. Atualmente, em Portugal, existem em funcionamento duas centrais de geração de eletricidade a partir de carvão, as centrais termoelétricas do Pego e de Sines. Segundo o Relatório de Monitorização da Segurança de Abastecimento do Sistema Elétrico Nacional 2019-2040 (Direção Geral de Energia e Geologia), as licenças ambientais das centrais expiram em 2019 e 2021, para Sines e Pego, respetivamente. No entanto, o descomissionamento de ambas as centrais está apenas previsto para o final de 2029 (cenário esperado) ou final de 2025 (cenário mais ambicioso).

Uma solução para o aproveitamento destas centrais pode passar pela substituição do combustível utilizado (carvão) por biomassa (sob a forma de resíduos florestais). A substituição pode ser total, ou parcial (*co-firing*). Esta solução permite a redução das emissões de GEE fósseis (Tabela 0.1 - Anexo A), o aproveitamento da infraestrutura já existente e o fornecimento de parte da eletricidade necessária após o descomissionamento das centrais a carvão. Em Portugal, a conversão das centrais termoelétricas a carvão para operarem a biomassa está a ser equacionada, nomeadamente para a central do Pego (Ferreira, J., 2019).

As centrais a carvão são despacháveis, isto é, têm a capacidade de responder a variações na procura de energia elétrica. Com o descomissionamento destas centrais, a que se soma o descomissionamento da central a gás natural da Tapada do Outeiro prevista para 2040 (cenário esperado) ou 2029 (cenário mais ambicioso), o sistema elétrico deixará de contar com 1756 MW de potência despachável (RMSASEN 2019-2040 (DGEG)). A conversão de uma dessas centrais para operar a biomassa constitui uma oportunidade de compensar essa perda e garantir a segurança no abastecimento de energia elétrica num sistema que integra cada vez mais energias renováveis não despacháveis.

Apesar das vantagens da substituição de carvão por biomassa, na geração de eletricidade, o que é ótimo para o carvão não é o ideal para a biomassa. A alteração do combustível para biomassa poderá provocar problemas no funcionamento de equipamentos, nomeadamente, da caldeira (corrosão, erosão, deposição de cinza) e afetar a eficiência da central (Pronobis e Wojnar, 2013 e Baxter, 2005). Estes problemas resultam das diferenças entre os dois combustíveis, quer na sua composição, quer nas suas características. Quando em estado natural, a biomassa apresenta alguns problemas para a sua utilização na produção de energia, relacionados com a sua variabilidade (elevada heterogeneidade), maior dimensão das partículas, elevada humidade, baixo poder calorífico (baixa densidade energética), a sua natureza hidrofílica, e a forma como varia com as mudanças de clima e origem. A sua variabilidade causa dificuldades no transporte, armazenamento e no funcionamento dos equipamentos da central, enquanto que a maior dimensão das partículas da biomassa causa uma maior erosão na caldeira (Adams et al., 2015; Tsalidis et al., 2014 e Baxter, 2005). O seu baixo poder calorífico, quando em comparação com o carvão, leva a um consumo de quantidades superiores de combustível, o que é problemático em termos de armazenamento, transporte, mas também porque implica uma elevada exploração da matéria-prima. O seu elevado conteúdo de humidade leva a uma redução da eficiência de processos, aumento dos consumos e custos associados à utilização de combustível e decomposição natural, o que resulta numa diminuição da qualidade da biomassa e aumento das emissões gasosas. Processos como o destroçamento, secagem e torrefação permitem alterar as características da biomassa, de modo a torná-la num combustível de melhor qualidade, mais semelhante ao carvão (Adams et al., 2015 e Tsalidis et al., 2014).

1.2. Estado da Arte

A análise dos impactes ambientais associados à geração de energia a partir de uma fonte renovável deve ser feita tendo em conta o seu ciclo de vida. A ferramenta mais utilizada para a análise dos impactes ambientais ao longo do ciclo de vida é a Avaliação de Ciclo de Vida. (ACV). Foram então selecionados como artigos relevantes para o estado de arte estudos de ACV relativos a *co-firing* com biomassa florestal, ACV relativos à geração de eletricidade em Portugal, ACV de geração de eletricidade a partir de biomassa em Portugal e estudos que abordem a possibilidade de utilização de biomassa em centrais a carvão para produção de energia, no contexto português. Até ao momento, não foram encontrados estudos que tenham feito a análise dos impactes ambientais associados à produção de energia numa central termoelétrica a carvão totalmente convertida para biomassa, através da metodologia de avaliação de ciclo de vida. Os trabalhos encontrados nesta área restringem-se a *co-firing* de biomassa com carvão.

No estudo Tsalidis et al. (2014) é usada a ACV para analisar os benefícios ambientais da geração de eletricidade na Holanda através de *co-firing* comparada com a geração de eletricidade a partir de carvão. É considerado o *co-firing* de 80 % de carvão com 20 % de biomassa florestal torrificada e/ou peletizada. Foram também analisados os impactes ambientais associados à utilização de biomassa endógena, em comparação com importação de biomassa proveniente do Canadá. O estudo foi feito numa base *cradle-to-gate*, a unidade funcional selecionada foi de 1 kWh de eletricidade gerada na central e foram analisadas as categorias de impacto de aquecimento global, acidificação e oxidação fotoquímica. Os resultados obtidos revelam que a melhor opção é a de *co-firing* de biomassa torrificada, com utilização de biomassa proveniente da Holanda.

No artigo Schakel et al. (2014) é analisado o impacto de *co-firing* de biomassa (péletes de madeira e péletes de palha) no perfil de emissão de centrais com captura e armazenamento de carbono para diferentes tipos de centrais a carvão. Foi analisado o *co-firing* de 70 % de carvão com 30 % de biomassa, comparando a utilização ou não de armazenamento de carbono. A unidade funcional selecionada foi 1 kWh de eletricidade transmitida para a rede. Resultados revelam que através de *co-firing* com captura e armazenamento de carbono é possível obter emissões líquidas negativas de dióxido de carbono, tendo sido verificado um aumento nas restantes categorias de impacto. Através de análises de sensibilidade foi concluído que os resultados são principalmente influenciados

por parâmetros que afetam a quantidade de combustível necessário, como a eficiência da central e a proveniência de carvão e biomassa.

Em Agbor et al. (2016) é realizada uma análise tecno-económica e ambiental de sessenta cenários de *co-firing* de biomassa com carvão e gás natural. Foram considerados diversos tipos de biomassa (estilha de madeira, palha e resíduos florestais) tendo sido determinados os benefícios ambientais e os potenciais custos técnicos. Os resultados revelam que a opção mais vantajosa é a de *co-firing* de carvão com resíduos florestais.

No estudo Royo et al. (2012) é utilizada a metodologia de ACV para realizar uma análise das reduções nos GEE obtida através de *co-firing* com biomassa, para o caso de estudo de Espanha. Neste estudo foi desenvolvida uma metodologia para a obtenção da redução das emissões de GEE, através de *co-firing* de biomassa, em grandes territórios, tendo sido aplicada à Espanha. A unidade funcional selecionada foi de 1 TJ de energia gerada. Foi concluído que através da utilização da biomassa residual agrícola e florestal, disponíveis a 100 km das centrais a carvão e de biomassa proveniente de culturas energéticas é possível obter até 7.7 % da energia gerada em centrais a carvão, a partir de biomassa. Os resultados mostram uma redução de quase 1 % das emissões de GEE totais, através da utilização de *co-firing* de biomassa nas centrais a carvão.

Em Morrison e Golden (2017) é realizada uma ACV do *co-firing* de carvão com péletes de madeira para o caso do Sudeste dos Estados Unidos. A unidade funcional considerada neste estudo foi de 1 kWh de eletricidade gerada, tendo sido analisadas as categorias de impacto de aquecimento global, acidificação, toxicidade humana cancerígena e não cancerígena, efeitos respiratórios, ecotoxicidade, eutrofização, depleção da camada de ozono e oxidação fotoquímica. Com exceção da categoria de depleção da camada de ozono, verificou-se uma redução das emissões associadas às restantes categorias de impacto.

Tabata et al. (2011) realiza uma ACV do *co-firing* com um combustível semi-carbonizado produzido a partir de biomassa lenhosa e carvão, para o caso de estudo do Japão. Os resultados mostram uma redução das emissões de GEE e nas categorias de alterações climáticas, acidificação e o uso terrestre.

O estudo Arteaga-Pérez et al. (2015) faz a análise dos impactos ambientais associados ao *co-firing* de carvão com biomassa florestal, tendo como principal objetivo a comparação da utilização de biomassa natural e de biomassa torrificada. Este estudo utiliza a metodologia de ACV para comparar diferentes processos de produção de energia no Chile

analisando dois cenários de *co-firing*: carvão com péletes de madeira não tratadas e carvão com péletes de madeira torrificadas. Para ambos os cenários de *co-firing* foi considerada a utilização de 80 % de carvão e 20 % de biomassa. O estudo foi feito numa base *cradle-to-gate*, tendo sido definidas duas unidades funcionais: 1 MJ de energia contida no combustível (usado para comparar os perfis de carvão e de biomassa torrificada) e 1 kWh de eletricidade gerada na central. Os resultados revelam que ambos os cenários de *co-firing* apresentam reduções significativas nos seus impactos ambientais, em comparação com a geração de eletricidade através de carvão.

No estudo Roni et al. (2017) é feita uma revisão global do estado das tecnologias, políticas, oportunidades e desafios associados ao *co-firing* de biomassa. Através desta análise é concluído que apesar de recente, o *co-firing* de biomassa é uma tecnologia que (principalmente quando aplicada ao carvão) permite uma redução das emissões, sem apresentar elevados aumentos nos custos operacionais ou de investimento. A nível europeu países como o Reino Unido, Alemanha, Finlândia e Dinamarca já utilizam *co-firing* de biomassa, no entanto, países como a Dinamarca, que não possuem grande riqueza de recursos de biomassa, podem sofrer em termos económicos devido à necessidade de importação desse recurso. Quer nos Estados Unidos como no Canadá esta tecnologia já é utilizada e apresenta potencial de crescimento. Apesar do elevado potencial para exploração de recursos de biomassa apresentado pelos países da América do Sul, o *co-firing* de biomassa é praticamente inexistente. Quer o Japão, quer a Coreia do Sul também apresentam potencial e interesse em explorar esta opção.

No contexto Português o estudo Nunes et al. (2014) analisa a redução de emissões de dióxido de carbono (CO₂), resultantes do *co-firing* de carvão com resíduos de biomassa, considerando a geração de energia elétrica na central termoelétrica de Sines. Foi considerado um rácio de *co-firing* de 85 % de carvão e 15 % de biomassa e um valor anual de produção de eletricidade de 7210 GWh, tendo sido verificada uma redução de mais de 1000 000 t/ano de emissões de CO₂ (fóssil). Foi também analisada a viabilidade económica desta alternativa, e foi concluído que devido às elevadas necessidades de biomassa, os custos de transporte rodoviário tornar-se-iam demasiado elevados para permitir a exequibilidade económica do processo de *co-firing* na central de Sines, uma vez que seria necessário o transporte de biomassa abrangendo um raio de 200 km.

Em termos avaliação de ciclo de vida da geração de eletricidade em Portugal através de biomassa florestal em centrais dedicadas, o estudo da Costa et al. (2018) analisa as seguintes etapas do processo: gestão florestal, recolha e processamento, transporte e produção de energia, fazendo a comparação dos impactes ambientais dos dois tipos de centrais instalados em Portugal: forno de grelha e forno de leito fluidizado. Para além da comparação de tecnologias de conversão de energia, são também analisados diferentes cenários de recolha, processamento e transporte de biomassa: destroçamento de resíduos soltos no local de recolha, destroçamento de resíduos soltos em parque e enfardamento de resíduos seguido do seu destroçamento em parque. A unidade funcional considerada neste estudo foi de 1 kWh de eletricidade gerada a partir da combustão de resíduos de eucalipto e injetada na rede. Foi concluído que a tecnologia de conversão de energia que apresenta menores impactes ambientais é a de leito fluidizado, mesmo quando a sua eficiência é diminuída e a eficiência do forno de grelha aumentada. Foi também verificado que no geral as operações de recolha, processamento e transporte têm uma contribuição reduzida nos impactes ambientais, sendo o cenário mais favorável o destroçamento de resíduos soltos no local de recolha. Este resultado deve-se ao menor consumo de combustível associado às operações de transporte e de carregamento/descarregamento. Foi, no entanto, referido que esta opção nem sempre é viável devido à dificuldade de colocar um destroçador no local, complicadas condições de trabalho e pouca quantidade de biomassa recolhida, favorecendo assim a utilização de um parque de destroçamento. Em relação aos outros dois cenários analisados, o enfardamento de resíduos seguido do seu destroçamento em parque apresenta menores impactes, apesar da diferença em relação ao cenário de destroçamento de resíduos soltos em parque ser reduzida.

Os estudos Garcia et al. (2014), Marques et al. (2018) e Kabayo et al. (2019) realizam ACVs relativos à geração de eletricidade em Portugal. Em Garcia et al. (2014) são avaliados os impactes ambientais de geração e fornecimento de eletricidade em Portugal. É realizada a modelação dos principais sistemas de geração, da infraestrutura da rede de transmissão e distribuição, é feita a caracterização do setor elétrico e analisado a influência das alterações tecnológicas desta área no desempenho ambiental da eletricidade gerada e fornecida, entre 2003 e 2012. Verificou-se uma diminuição dos impactes ambientais devido à instalação de sistemas de dessulfuração e desnitrificação nas centrais a carvão e à eliminação gradual de utilização de centrais de fuelóleo. Apesar do aumento da geração de

eletricidade a partir de fontes renováveis, verificou-se que a geração de eletricidade se apresenta muito dependente do carvão. O estudo também concluiu que através da maior utilização do ciclo combinado de gás natural, que é subutilizado, existe potencial para a redução dos impactes ambientais. Em Marques et al. (2018) é apresentada uma ACV dos principais sistemas de geração de eletricidade em Portugal: carvão, gás natural, hídrica de reservatório e a fio de água, eólica e solar fotovoltaico. Foi concluído que, para a maioria das categorias de impactes, os sistemas fósseis apresentam impactes ambientais superiores aos renováveis, tendo-se verificado que a hídrica a fio de água é a que menores impactes apresenta. Em Kabayo et al. (2019) é realizada, através da metodologia de ACV, uma análise dos impactes ambientais e socioeconómicos para os seguintes sistemas de geração de eletricidade em Portugal: carvão, gás natural, hidro (grande e pequeno), eólico e fotovoltaico. O estudo concluiu que, a nível ambiental, o carvão apresenta os maiores impactes para a maioria das categorias analisadas. Em termos das categorias socioeconómicas verificou-se uma maior variabilidade. No geral, foi concluído que as pequenas hidroelétricas são o sistema mais ambiental e socioeconomicamente sustentável.

Os estudos analisados consideram a opção de utilização de *co-firing* de biomassa para redução dos impactes ambientais associados à geração de eletricidade em centrais a carvão, mas nenhum estudo analisou os impactes ambientais da conversão de uma central a carvão para operar exclusivamente a biomassa. No contexto português, apesar de ter sido analisada a possibilidade de realização de *co-firing* de biomassa com carvão para o caso da central de Sines, a proveniência da biomassa foi estudada de uma forma superficial, não tendo sido considerada a possibilidade de utilização de transporte ferroviário para recolha de biomassa a distâncias mais longas. Também não foi estudada, para o caso português, a utilização de tecnologias como torrefação como forma de tratamento de biomassa.

1.3. Objetivos

Estando a ser ponderada a conversão da central termelétrica do Pego para operar a biomassa florestal (Ferreira, J., 2019), os objetivos principais desta dissertação são:

1. Avaliar os impactes ambientais de ciclo de vida (CV) associados à geração de eletricidade na central termoelétrica do Pego após a sua conversão para operar

exclusivamente a biomassa florestal considerando o funcionamento normal da central;

2. Avaliar os impactes ambientais de um aumento da geração de energia elétrica na central;

Em primeiro lugar, são avaliados os impactes ambientais associados ao ciclo de vida da geração de eletricidade na central reconvertida considerando uma geração anual média (10 % da capacidade atual). A análise tem em conta o provisionamento de biomassa à central, o processamento da biomassa, incluindo os processos de secagem e torrefação, e a geração de eletricidade. O primeiro objetivo pode ser dividido nos seguintes objetivos específicos:

— Tendo como base a metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV), construir um modelo e inventário de CV da geração de eletricidade na central reconvertida e avaliar os seus impactes ambientais;

— Avaliar os efeitos de diferentes condições de torrefação da biomassa, diferentes valores de consumo de energia na secagem de biomassa e diferentes fontes de energia para os processos de secagem e torrefação nos impactes de ciclo de vida da geração de eletricidade;

— Identificar quais os processos que mais contribuem para os impactes ambientais.

Por último, são avaliados os impactes ambientais da operação da central a uma capacidade superior às condições normais de funcionamento (25 % da capacidade atual). A análise tem em conta os processos que são alterados em resultado do aumento do output de energia, comparando diversos cenários de proveniência de biomassa para a central. Em particular, são objetivos específicos:

— Avaliar de que forma os impactes ambientais são alterados com o aumento da capacidade da central de 10 % para 25 %;

— Avaliar diferentes cenários de abastecimento de biomassa: importação de biomassa em estilha do Uruguai e do Canadá, importação de péletes e importação de péletes torrificadas do Canadá.

Com a análise dos impactes ambientais associados à geração de eletricidade numa central a carvão convertida para biomassa florestal pretende-se auxiliar na tomada de decisão quanto a futuras opções para a geração de energia em Portugal.

1.4. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em quatro capítulos. No capítulo 1 é apresentado o enquadramento do estudo, a revisão da literatura e os objetivos. No capítulo 2 encontram-se apresentados os modelos e inventários de ciclo de vida desenvolvidos para cada um dos cenários de geração: a geração média anual da central (10 % da capacidade atual) – secção 2.2 - e geração máxima anual da central (25 % da capacidade atual) – secção 2.3. No capítulo 3 são apresentados os resultados da avaliação dos impactes ambientais para ambos os cenários de geração. Por fim, no capítulo 4 apresentam-se as conclusões do estudo.

2. MODELOS E INVENTÁRIOS DE CICLO DE VIDA

2.1. Metodologia: Avaliação de Ciclo de Vida

Nesta dissertação utilizou-se a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para avaliar os impactos ambientais da geração de eletricidade numa central a carvão convertida para operar a biomassa florestal. A ACV é uma ferramenta que permite avaliar o desempenho ambiental de um produto ou serviço ao longo do seu ciclo de vida, desde a extração das matérias primas até à sua deposição final (“*from cradle to grave*”). Numa ACV são compilados todos os fluxos de entrada e saída (massa e energia) associados a um sistema de produto, ao longo do seu ciclo de vida e avaliados os potenciais impactos ambientais associados a esses fluxos. Existem 4 fases num estudo de ACV: definição do objetivo e âmbito, inventário de ciclo de vida (ICV), avaliação de impactos de ciclo de vida (AICV) e a interpretação de ciclo de vida (ISO 14040 e ISO 14044). A ACV permite: a identificar oportunidades para melhorar a performance ambiental dos produtos nas várias fases do seu ciclo de vida; informar a tomada de decisão relativa ao planeamento de estratégias e à definição de prioridades; selecionar indicadores relevantes de performance ambiental; comunicar a performance ambiental de produtos, por exemplo no âmbito de uma declaração ambiental do produto (ISO 14044).

2.2. Modelo e inventário de ciclo de vida: geração anual média

2.2.1. Objetivo e Âmbito

Nesta secção, o objetivo do estudo é a análise dos impactos ambientais associados à geração de eletricidade na central termoelétrica do Pego, convertida para operar a biomassa florestal, considerando o seu funcionamento normal, isto é, a 10 % da capacidade atual. As fronteiras do sistema são apresentadas na Figura 2.1. e incluem os processos de extração e recolha, transporte, destroçamento, secagem e torrefação, arrefecimento, moagem e combustão de biomassa e geração de eletricidade para a unidade funcional de 1 kWh de

energia gerada. As etapas posteriores (transmissão, distribuição e uso de eletricidade) não são relevantes para este estudo pois apenas se pretende estudar os impactos associados à geração de energia.

A biomassa considerada neste estudo para produção de energia consiste em resíduos florestais provenientes de povoamentos de eucalipto, pinheiro, sobreiro, azinheira e carvalho, que geram biomassa através das operações de poda, desbaste e, nos casos em que é aplicável, cortes finais ou de regeneração. São aproveitados resíduos como ramos, cascas, cepos e troncos. Os impactos ambientais associados aos processos que ocorrem antes da extração de biomassa (preparação do solo, plantação, manutenção, fertilização e limpeza) foram alocados à rolaria (produto principal) e não foram considerados nesta análise.

Como é possível verificar na representação do sistema o abastecimento da central será feito com biomassa já destrozada e biomassa por destroçar. Os processos de destroçamento e transporte estão relacionados e foi considerado que para distâncias de transporte mais longas será mais eficiente o transporte ocorrer após os destroçamentos da biomassa. Para a área envolvente da central a biomassa, após recolhida, é transportada e só depois destrozada.

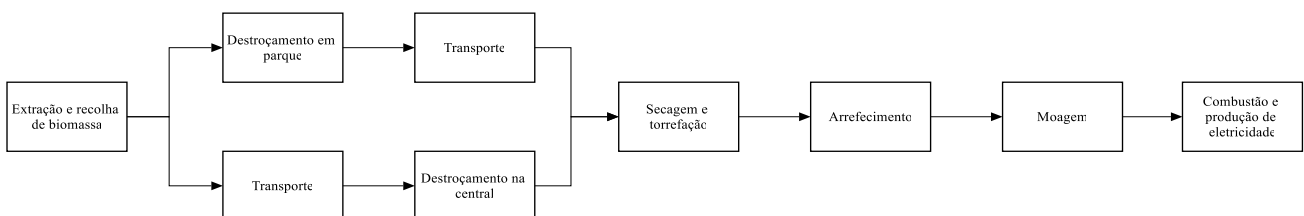


Figura 2.1. Sistema analisado

Foram realizadas análises de sensibilidade para diferentes condições de torrefação, quantidade de energia consumida no processo de secagem e quanto à fonte da energia consumida nos processos de secagem e torrefação. Na Figura 2.2. encontram-se os diferentes cenários considerados para cada uma destas análises. Foi considerado como cenário base a torrefação a 250 °C, durante 30 min, o consumo de 6 MJ/kg de água removida

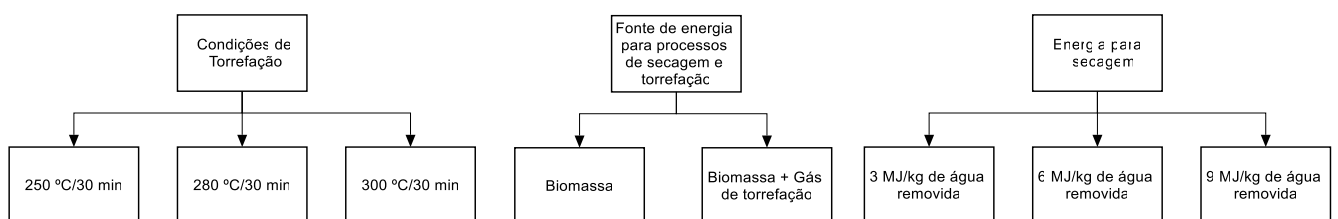


Figura 2.2. Diferentes cenários considerados na análise de sensibilidade

na secagem e a utilização de biomassa como fonte de energia para estes processos. Os restantes cenários encontram-se apresentados na Tabela 0.1 da secção A.2 do Apêndice A.

Quanto ao funcionamento da central, esta possui dois grupos com uma potência de 314 MW, cada um, sendo que ambos serão convertidos para operar a biomassa (resíduos florestais). Com base em informação de especialistas, considerou-se que a central convertida mantém, no essencial, as características de desempenho elétrico da central a carvão original, mas com um fator de capacidade inferior. Estima-se que a central irá operar a 10 % do tempo total, à potência elétrica nominal. As principais características previstas são:

- Potência elétrica mínima por grupo: 100 MW;
- Potência elétrica nominal por grupo: 290 MW.

Nesta fase do estudo será considerada a produção anual de 10 % da capacidade atual, que representa o cenário exetável em condições normais de funcionamento: $365 \text{ dias} \times 24 \text{ horas} \times 10 \% \times 290 \text{ MW} \times 2 \text{ grupos} = 508 \text{ GWh}$.

Segundo Ko e Lautala (2018), Miedema et al. (2017) e Pronobis e Wojnar (2013) ocorre uma diminuição na eficiência da caldeira de cerca de 1 % por cada aumento de 10 % de massa de biomassa utilizada, no caso de co-firing. A diminuição da eficiência da central é semelhante à redução que ocorre na eficiência da caldeira (Miedema et al., 2017). Tal ocorre, pois, a queima de biomassa em caldeiras de centrais a carvão causa problemas de corrosão e erosão (Pronobis e Wojnar, 2013), podendo também ocorrer problemas nos restantes equipamentos da central, devido a estarem preparados para funcionar com carvão e não com biomassa. Considerando uma redução de 1 % na eficiência da central por cada aumento de 10 % da quantidade de biomassa utilizada para a produção de energia, foi determinado que para uma conversão a 100 % de biomassa florestal, a central irá sofrer uma redução de 10 % na sua eficiência. A eficiência da central de carvão original, segundo Garcia et al. (2013) é de 36 %, o que resulta numa diminuição para 26 % na eficiência da central após a sua conversão para biomassa.

Relativamente aos equipamentos que constituem a central, considerou-se que os componentes principais, como a caldeira, turbinas e geradores, mantém as características da central a carvão original. Por outro lado, a manutenção das características da central pressupõe alterações sobretudo nos sistemas de alimentação e processamento de combustível, tendo-se considerado que a biomassa utilizada na central é submetida ao

processo de torrefação de modo a reduzir a sua heterogeneidade, o seu comportamento higroscópico e a sua natureza fibrosa e aumentar a sua densidade energética, tornando-a num combustível com maior qualidade e mais compatível com o carvão (Arteaga-Pérez et al., 2015). Os sistemas de desempoeiramento/tratamento de gases deverão ser também adaptados às características do novo combustível, mas essas alterações não foram tidas em conta por falta de dados.

As categorias de impacte analisadas foram: alterações climáticas, depleção da camada de ozono, acidificação terrestre e eutrofização de água doce. O método selecionado para a avaliação de impactes de ciclo de vida foi ReCiPe (*Midpoint*) (H). A seleção das categorias de impacte e do método de avaliação de impactes foi baseada no estudo Kabayo et al. (2019), onde é feita uma ACV aos principais sistemas de geração de eletricidade em Portugal. Foram também analisados os requisitos de energia primária fóssil através do método *Cumulative Energy Demand*.

2.2.2. Inventário de ciclo de vida e caracterização dos processos

2.2.2.1. Extração e Recolha

Considerou-se a realização dos processos de extração e recolha de biomassa de forma mecanizada, com recurso a uma processadora florestal e ao equipamento de recolha “*forwarder*” florestal. Segue-se a deposição da biomassa em locais acessíveis para sua posterior transformação ou transporte. Para o inventário destas operações, apresentado na Tabela 2.1, foi considerado o estudo de Dias (2014), e adaptados esses valores para uma tonelada de resíduos florestais.

Tabela 2.1. Inventário para os processos de extração e recolha (1 t de biomassa) (Baseado em Dias (2014))

	Extração	Recolha
Inputs		
Diesel (L)	3.64	1.92
Petróleo (L)	0.07	-
Lubrificante (L)	0.18	0.096
Outputs		
Biomassa (t)	1	1
Dióxido de carbono (g)	9944	5150
Metano (g)	0.215	0.0538
Dióxido de enxofre (g)	6.19	3.26

Monóxido de carbono (g)	56.25	12.8
Óxidos de nitrogénio (g)	90.36	47.4

Nota: Foi considerada uma densidade de 0.748 kg/l para o petróleo; 0.837 kg/l para o diesel e 0.885 kg/l para o Lubrificante

2.2.2.2. Carregamento/Descarregamento

Após os processos de extração e recolha a biomassa é carregada para ser transportada e depois descarregada para ser destroçada. O inventário das operações de carregamento/descarregamento para uma tonelada de resíduos é apresentado na Tabela 2.2 e baseia-se no estudo de Dias (2014).

Tabela 2.2. Inventário para o processo de carregamento/descarregamento (1 t de biomassa) (Baseado em Dias (2014))

Carregamento/Descarregamento	
Inputs	
Diesel (L)	0.924
Lubrificante (L)	0.046
Outputs	
Biomassa (t)	1
Dióxido de carbono (g)	2 480
Metano (g)	0.026
Dióxido de enxofre (g)	1.57
Monóxido de carbono (g)	6.14
Óxidos de nitrogénio (g)	22.8

2.2.2.3. Destroçamento

O destroçamento consiste na transformação da biomassa em estilha e permite obter uma biomassa mais uniforme em tamanho e forma, transformando-a num combustível mais homogéneo. Isto permite que os restantes processos sejam feitos de forma mais eficiente (Netto, 2008). Quando feito antes do transporte, o destroçamento permite que maiores quantidades de biomassa possam ser transportadas por carga, o que é vantajoso dos pontos de vista logístico e económico (Sousa, 2009). De modo a tornar o processo de transporte mais eficiente foi considerado que apenas a biomassa proveniente da área envolvente à central será recolhida e transportada diretamente até à central, onde será destrocada por meio de um equipamento de destroçamento instalado na central. No caso de localidades mais distantes, a biomassa, após recolhida, será transportada até parques de

processamento, onde será destrozada, e posteriormente encaminhada para a central. Nos parques de processamento o destroçamento será feito com recurso a destrozadores móveis. A forma como estes parques foram organizados encontra-se apresentada na secção 2.2.2.4. juntamente com a análise dos locais de recolha de biomassa. O inventário para o funcionamento dos destrozadores móveis distribuídos pelos parques de processamento foi baseado em Dias (2014). O destrozador fixo e o seu funcionamento foram baseados no estudo de Adams et al. (2015). Este destrozador terá um tempo de vida de 5 anos, funcionará 7200 horas por ano, uma massa total de 48 t de aço e terá uma capacidade de 20 t/h, que foi definida com base na biomassa produzida anualmente na área envolvente da central e cujos detalhes estão apresentados no Apêndice A, secção A.1. Na Tabela 2.3. encontra-se o inventário de ambos os processos para o destroçamento de uma tonelada da biomassa.

Tabela 2.3. Inventário para os processos de destroçamento (1 t de biomassa)

	Destroçamento em parque	Destroçamento na central	Referências
Inputs			
Diesel (L)	3.94	-	Dias (2014)
Lubrificante (L)	0.197	-	
Eletricidade (kWh)	-	1	Adams et al. (2015)
Outputs			
Biomassa destrozada (t)	1	1	-
Dióxido de carbono (g)	10 620	-	Dias (2014)
Metano (g)	0.111	-	
Dióxido de enxofre (g)	6.72	-	
Monóxido de carbono (g)	26.3	-	
Óxidos de nitrogénio (g)	97.7	-	

2.2.2.4. Transporte

Nesta secção é analisado o processo de abastecimento de biomassa para a central necessária para a produção anual de 508 GWh, nomeadamente a sua proveniência, as distâncias de recolha e o modo de transporte. A central do Pego está situada no concelho de Abrantes e possui acesso rodoviário e ferroviário, a partir da linha da Beira Baixa, através de um caminho ferroviário construído para esse fim, o qual serve para o abastecimento de carvão à central, a partir do porto de Sines. O transporte ferroviário apresenta vantagens económicas e ambientais em relação ao rodoviário, como o transporte de maiores

quantidades de bens, possibilidade de aceder a locais mais distantes e a utilização de eletricidade em vez de diesel. A produção anual de energia esperada da central do Pego será elevada, em comparação com outras centrais que utilizam biomassa em Portugal, o que significa uma maior quantidade de biomassa consumida. Assim, as distâncias de recolha normalmente consideradas no abastecimento de centrais a biomassa não se aplicam neste caso. A utilização do transporte ferroviário será a solução considerada para permitir um aumento das distâncias de recolha e assim obter biomassa suficiente para o abastecimento da central.

Inicialmente foram analisados os locais situados a uma distância rodoviária máxima de 35 km, que é referida em da Costa et al. (2018) como a distância ótima do ponto de vista económico. Foi considerada a área abrangida por esta distância como a área envolvente à central. Verificou-se que a biomassa proveniente da área envolvente à central permite suprir apenas cerca de 17 % da biomassa necessária anualmente. Para distâncias superiores a 35 km definiu-se que o transporte é feito por via ferroviária. Foram consideradas as estações ferroviárias localizadas a uma distância máxima de 175 km da central. A partir destas estações ferroviárias foram analisadas todas as localidades cuja distância até a uma das estações não excedesse os 35 km. Foram depois agrupados esses locais de modo a serem utilizadas o menor número de estações ferroviárias. Para estes locais considerou-se que após recolhida, a biomassa é transportada até a um parque de processamento, situado na proximidade de uma estação. Neste local, a biomassa é destroçada e de seguida é carregada para o comboio, de modo a ser transportada até à central. Através da metodologia indicada de seguida verificou-se que, para estas distâncias de recolha, é possível obter a biomassa necessária para o abastecimento anual da central.

A disponibilidade de biomassa nas áreas florestais dos concelhos abrangidos pelos parâmetros de recolha definidos acima foi analisada por meio dos Inventários Florestais Nacionais (IFN). Através do software FloreStat do IFN5, (realizado em 2005/2006) obtiveram-se as áreas dos povoamentos florestais por espécie de árvore dominante, por concelho, para as espécies referidas na secção 2.2.1. O IFN6 permite obter a evolução das áreas ocupadas por cada espécie florestal a nível nacional, entre o período de 2005 e 2015, o que permitiu estimar qual a área ocupada por estes povoamentos florestais em 2015, como apresentado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4. Área ocupada por cada espécie florestal, para os concelhos em análise (Baseado em IFN5 e IFN6)

Espécie	Área em 2005 (ha)	Varição entre 2005 e 2015 (%)	Área em 2015 (ha)
Eucalipto	285 742	7	305 744
Pinheiro-Bravo	254 272	-12	223 759
Pinheiro-Manso	28 571	10	31 428
Sobreiro	258 510	-2	253 340
Azinheira	77 410	4	80 506
Carvalho	17 090	20	20 508

Tendo em conta que a informação obtida quanto às áreas florestais é para o ano 2015 é necessário analisar fatores que possam ter levado a uma alteração significativa destes valores nos anos seguintes. Em Portugal, o mais significativo e que afeta todas as espécies em análise é a problemática dos incêndios florestais. Através do Instituto Nacional da Estatística (INE) é possível obter, por concelho, as áreas florestais ardidas, entre 2001 e 2018. Removendo as áreas ardidas nos anos de 2016, 2017 e 2018, por concelho, é possível obter uma estimativa das áreas dos povoamentos florestais existentes em 2019, apresentada na Tabela 2.5. Esta é uma estimativa conservadora visto que não tem em conta a replantação florestal, o desenvolvimento de povoamentos já plantados ou outro meio de crescimento da área florestal já existente.

Tabela 2.5. Área projetada de povoamentos florestais para as espécies analisadas

Espécie	Área em 2015 (ha)	Área em 2019 (ha)
Eucalipto	305 744	282 283
Pinheiro-Bravo	223 759	198 604
Pinheiro-Manso	31 428	30 848
Sobreiro	253 340	246 372
Azinheira	80 506	77 778
Carvalho	20 508	17 200

Para o cálculo da biomassa produzida por estes povoamentos florestais foi considerado o estudo Lourinho et al. (2014). Este estudo foi realizado para a região do Alto Alentejo e considera as espécies analisadas nesta dissertação, utilizando uma metodologia que permite calcular a produção de biomassa de cada espécie, em base seca, por hectare. Os valores de biomassa disponível apresentados na Tabela 2.6. têm em conta o conteúdo de humidade que se considerou ser de 40 % (informação fornecida pela central de Mortágua). Uma limitação presente nos valores de biomassa disponíveis apresentados é o facto de não

terem em conta o consumo de biomassa por outras indústrias e a proveniência dessa biomassa.

Tabela 2.6. Produção anual de biomassa para abastecimento da central (Baseado em Lourinho et al. (2014))

Espécie	Área em 2019 (ha)	Produção anual (t secas/ha)	Biomassa disponível (t/ano)
Eucalipto	282 283	0.88	347 773
Pinheiro-Bravo	198 604	1.00*	278 046
Pinheiro- Manso	30 848		43 187
Sobreiro	246 372	1.00	344 921
Azinhreira	77 778	0.48	52 267
Carvalho	17 200	0.50	12 040

* - Visto apenas ser referido um valor para a espécie pinheiro, foi considerado esse valor para pinheiro-bravo e manso

Nota: Nesta tabela encontram-se apresentados os valores de necessidade de biomassa para o cenário base referido na secção 2.2.1. Na Tabela 0.2 da secção A.2 Apêndice A encontram-se os valores de biomassa necessários para os restantes cenários estudados. A quantidade de biomassa necessária para operar a central depende das características da biomassa e dos processos de secagem e torrefação que antecedem a combustão, os quais influenciam o poder calorífico da biomassa. Essa análise é realizada na secção 2.2.2.5. Estes valores têm também em conta a biomassa necessária para fornecer energia aos processos de secagem e torrefação. Os valores reportados nesta tabela têm em conta essa análise e resultam de um processo iterativo.

Como foi referido anteriormente, o destroçamento assume um papel importante na eficiência do processo de transporte de biomassa. Segundo especialistas no caso de biomassa destrocada um camião com semirreboque transporta cerca de 18 t, no caso de biomassa por destroçar, o mesmo camião transporta entre 8 a 10 t. As diferenças entre o transporte de biomassa destrocada e por destroçar ocorrem não só em termos da carga transportada, mas também no consumo de combustível e nas emissões do veículo. Para a modelação do transporte rodoviário foi considerado um camião de transporte de mercadorias (EURO 4, 16-32 t) de 10 t com uma carga média de 5.79 t, ou seja, 15.79 t no total, com base em Spielmann et al. (2007)¹. Este processo foi adaptado para corresponder a um camião

¹ Processo “Transport, freight, lorry 16-32 metric t, EURO4 {RER}| transport, freight, lorry 16-32 metric-t, EURO4 | Alloc Def, U”

com o mesmo peso, mas que faz duas viagens, uma sem carga e outra onde transporta 4.5 t, para o caso do transporte de biomassa não destrozada (ver Tabela 2.7). O cálculo do consumo de combustível em função da carga foi baseado em Keller (2010). No caso do transporte ferroviário, foi considerado o processo de transporte de mercadorias em comboio elétrico com base em Spielmann et al. (2007)².

Tabela 2.7. Modelação do processo de transporte rodoviário

	Peso do veículo (t)	Carga média (t)	Consumo (kg/tkm)	Tempo de vida (tkm)
Transporte de biomassa por destroçar	10	4.5	0.036	2 430 000

Os concelhos situados na área envolvente à central são Abrantes, Constância, Gavião, Mação, Ponte de Sor, Sardoal e Vila Nova da Barquinha, sendo que a distância média percorrida entre estes locais e a central para o transporte de biomassa não destrozada é de 25 km (50 km ida e volta). No caso dos restantes concelhos analisados, a distância média de transporte rodoviário de biomassa não destrozada a partir de cada um deles até a uma estação ferroviária é de 20 km (40 km ida e volta). Foi considerado que o parque de processamento, onde a biomassa é destrozada antes de ser carregada para comboio se encontra na periferia da estação. A distância média percorrida desde as estações ferroviárias até à central é de 105 km (210 km ida e volta). Para todos os concelhos foi definida uma distância de recolha de biomassa dentro do próprio concelho de 7.5 km (15 km ida e volta). O inventário para o transporte de 1 t de biomassa baseado nestas distâncias encontra-se na Tabela 2.8. Na Tabela 0.3 da secção A.2 Apêndice A encontram-se as distâncias percorridas para os restantes cenários estudados.

Tabela 2.8. Inventário para o processo de transporte (1 t de biomassa)

Transporte rodoviário de biomassa não destrozada (tkm)	58
Transporte ferroviário de biomassa destrozada (tkm)	210

Como foi referido anteriormente, este inventário apresenta a limitação de considerar a disponibilidade total da biomassa proveniente das áreas analisadas para o abastecimento da central. De modo a analisar o efeito da potencial concorrência com outras

² Processo “Transport, freight train {Europe without Switzerland}| electricity | Alloc Def, U”

indústrias de base florestal foi analisado um cenário alternativo, onde é considerada uma disponibilidade de 50 % de biomassa, tendo-se verificado para este cenário as distâncias de transporte apresentadas na Tabela 2.9.

Tabela 2.9. Inventário para o processo de transporte considerando 50 % de disponibilidade de biomassa (1 t biomassa)

Transporte rodoviário de biomassa não destruída (tkm)	54
Transporte ferroviário de biomassa destruída (tkm)	386

2.2.2.5. Secagem e torrefação

O processo de secagem é um processo importante para permitir a utilização da biomassa na produção de energia. Permite a remoção de humidade, melhorando a eficiência de processos, como a torrefação, e a qualidade da biomassa enquanto combustível. É também benéfico para o transporte e armazenamento, visto que a humidade elevada aumenta os custos destes processos e leva a uma decomposição mais acelerada da biomassa (Adams et al., 2015). Durante a secagem ocorre uma perda de massa correspondente à água removida, sendo o produto final deste processo biomassa com um conteúdo de humidade reduzido.

A torrefação é um tratamento térmico que ocorre numa extensão de temperaturas entre os 200-300 °C numa atmosfera pouco oxigenada, à pressão atmosférica e que melhora significativamente as propriedades da biomassa. Tem como principais parâmetros a temperatura, o tempo de residência e a humidade inicial (Adams et al., 2015). A evolução nas características da biomassa com a torrefação encontra-se apresentada na Figura 2.3. Os principais produtos do processo são o sólido torreficado, outros sólidos como cinzas e compostos voláteis que podem ser condensáveis, líquidos ou não condensáveis. Geralmente 70-90% são produtos sólidos, 6-35 % líquidos e 1-10 % gases (Batidzirai et al., 2013). A composição e a quantidade destes produtos variam principalmente com o tipo de biomassa utilizada, as condições de torrefação e a humidade inicial. Para além da biomassa torreficada o produto de maior interesse é o gás libertado durante o processo de torrefação. O gás de torrefação é composto maioritariamente por dióxido de carbono, água e gases combustíveis (como monóxido de carbono, ácido acético, metanol). Os gases combustíveis podem ser utilizados para gerar energia que pode ser consumida nos processos de secagem e torrefação, de modo a aumentar a eficiência dos processos e diminuir o uso de combustível auxiliar. Com o aumento da temperatura de torrefação ocorre maior formação de condensáveis.

Segundo Tumuluru et al. (2011) estes produtos combustíveis, apesar do elevado conteúdo em água, podem apresentar um poder calorífico entre os 5.3 e os 16.2 MJ/Nm³ (Adams et al., 2015, Batidzirai et al., 2013).



Figura 2.3. Variação das propriedades de biomassa com o processo de torrefação (Baseado em Chen et al. (2015))

Os estudos analisados acerca do processo de torrefação ofereceram informação limitada sobre algumas fases do processo, nomeadamente emissões, e sobre o efeito da torrefação em algumas das espécies estudadas (sobreiro, azinheira e carvalho). A informação encontrada nestes estudos nem sempre coincidiu e as condições de torrefação (temperatura, tempo de residência) variam entre eles não havendo um conjunto de parâmetros que tenha sido referido como o ideal (Chen et al., 2015; Arteaga-Pérez et al., 2015; Thành et al., 2015; McNamee et al., 2016). Por esses motivos foi feita uma análise de sensibilidade, de modo a estudar três condições de torrefação diferentes: 250, 280 e 300 °C, considerando um tempo de residência de 30 minutos. Estas condições de torrefação foram as mais encontradas na bibliografia estudada e permitem analisar diferentes efeitos do processo. A 250 °C ocorre uma torrefação moderada e a biomassa mantém algumas das suas características, não ocorrendo perdas de massa ou perdas energéticas muito elevadas. A 300 °C ocorre uma torrefação severa que destrói a estrutura fibrosa da biomassa e obtém-se um produto com maior densidade energética, mas ocorrem perdas de massa elevadas. A 280 °C temos um cenário intermédio. Diferentes condições resultarão em diferentes produtos, quer em termos das características e propriedades da biomassa torrificada, quer em termos de emissões resultantes do processo (Chen et al., 2015; Álvarez et al., 2018; Arteaga-Pérez et al., 2015; Thành et al., 2015 e McNamee et al., 2016).

Durante o processo de secagem foi considerada uma redução no conteúdo de humidade da biomassa de 40 para 5 %. Segundo Ciolkosz e Wallace (2011) a energia consumida no processo de secagem pode variar entre os 3 e 9 MJ/kg de água removida. Foi realizada uma análise de sensibilidade para os valores de 3, 6 e 9 MJ/kg de água removida, de modo a poder analisar diversos cenários de consumo.

Os valores considerados para o poder calorífico da biomassa antes do processo de torrefação foram obtidos a partir do estudo Lourinho et al. (2014) e encontram-se expostos na Tabela 2.10. Apesar deste estudo considerar o PCI das espécies estudadas em base seca, foi assumido o mesmo valor para um conteúdo de humidade de 5 %.

Tabela 2.10. PCI das espécies analisadas no início do processo de torrefação (baseado em Lourinho et al. (2014))

Espécie	PCI (MJ/kg)
Eucalipto	15
Pinheiro*	17
Sobreiro	14
Azinheira	14
Carvalho	15

* - Considerou-se este valor para as espécies de pinheiro-bravo e manso

As perdas de massa e a evolução do poder calorífico da biomassa obtidas com torrefação encontram-se apresentadas na Tabela 2.11. Como foi referido anteriormente, o gás de torrefação tem propriedades que podem permitir a sua utilização para a geração de energia a ser utilizada nos processos de secagem e torrefação. No entanto, os estudos que consideram a sua utilização são de natureza experimental, (McNamee et al., 2016; Adams et al., 2015; Arteaga-Pérez et al., 2015; Cardona et al., 2019), não havendo garantias que numa escala industrial a sua utilização seja viável (elevado conteúdo em água, baixo poder calorífico). Foi realizada uma análise de sensibilidade onde se compara a combustão de biomassa e a combustão de gás de torrefação para a geração de energia para os processos de secagem e torrefação. Foi considerada que a biomassa utilizada é a rececionada na central em estado natural com uma humidade de 40 %, tendo sido considerado um poder calorífico de 10.5 MJ/kg (Adams et al., 2015). Nesta secção apenas serão apresentados os dados relativos ao cenário base (referido na secção 2.2.1).

Tabela 2.11. Efeito das diferentes condições de torrefação nas espécies estudadas

Condições de torrefação: 250 °C; 30 min			
Espécie	Perda de massa (%)	PCI (MJ/kg)	Referências
Eucalipto	22.1	17	Álvarez et al. (2018) Cardona et al. (2019)
Pinheiro*	14.4	19	Álvarez et al. (2018) McNamee et al. (2016)
Sobreiro	32.1	17	Carrasco et al. (2013) Álvarez et al. (2018)
Azinhiera	32.1	17	
Carvalho	32.1	18	
Condições de torrefação: 280 °C; 30 min			
Espécie	Perda de massa (%)	PCI (MJ/kg)	Referências
Eucalipto	35.1	19	Álvarez et al. (2018) Cardona et al. (2019)
Pinheiro*	24.9	19	Álvarez et al. (2018) McNamee et al. (2016)
Sobreiro	46.98	18	Carrasco et al. (2013)
Azinhiera	46.98	18	
Carvalho	46.98	19	
Condições de torrefação: 300 °C; 30 min			
Espécie	Perda de massa (%)	PCI (MJ/kg)	Referências
Eucalipto	45.7	21	Álvarez et al. (2018) Cardona et al. (2019)
Pinheiro*	34.1	21	Álvarez et al. (2018) McNamee et al. (2016)
Sobreiro	57.9	19	Carrasco et al. (2013) Martinez et al. (2019)
Azinhiera	57.9	19	
Carvalho	57.9	20	

* - Considera ambas as espécies de pinheiro-bravo e manso

O consumo energético no processo de torrefação, para as diferentes condições de torrefação, foi calculado com base nos estudos Batidzirai et al. (2013) e Cardona et al. (2019). Foram obtidos, para cada temperatura de torrefação, a quantidade de energia necessária por tonelada de biomassa torrificada apresentados na Tabela 2.12.

Tabela 2.12. Consumos energéticos para diferentes condições de torrefação

Condição de torrefação	Consumo energético (MJ/t de biomassa torrificada)
250 °C, 30 min	1612.5
280 °C, 30 min	1677.5
300 °C, 30 min	1720.8

A Tabela 2.13 apresenta, a energia gerada a partir da biomassa obtida na Tabela 2.6. (secção 2.2.2.4.). Estes valores foram obtidos tendo em conta o efeito da secagem, o PCI e as perdas de massa resultantes da torrefação, apresentados na Tabela 2.11 e a biomassa utilizada para o abastecimento dos processos de secagem e torrefação. Foi considerada uma eficiência de 80 % na queima de biomassa para a geração de energia para o abastecimento da secagem e torrefação, baseado em (BASIS, 2015). Na Tabela 0.4 da secção A.3 do Apêndice A encontram-se apresentados os consumos de biomassa para os restantes cenários resultantes das análises de sensibilidade realizadas.

Tabela 2.13. Biomassa disponível e energia gerada por ano, após secagem e torrefação

Biomassa recolhida (t/ano)	1 078 233
Biomassa utilizada para gerar energia para a secagem e torrefação (t/ano)	276 696
Biomassa disponível após secagem e torrefação (t/ano)	397 897
Energia gerada (GWh/ano)	508

Dado que este processo será modelado tendo como unidade uma tonelada de biomassa torrificada a composição dessa tonelada, tendo em conta qual a quantidade de cada espécie que a compõe, encontra-se apresentada na Tabela 2.14.

Tabela 2.14. Composição de uma tonelada de biomassa torrificada

Espécie	Quantidade (t)
Eucalipto	0.329
Pinheiro-bravo	0.289
Pinheiro-manso	0.045
Sobreiro	0.284
Azinheira	0.043
Carvalho	0.010
Total	1

Na Tabela 2.15 encontra-se apresentado o inventário para o processo de secagem e torrefação, tendo como unidade 1 t de biomassa torrificada. Estão incluídas no inventário as emissões resultantes da combustão de biomassa para a geração de energia para os processos de secagem e torrefação, que foram baseadas no estudo da Costa et al. (2018).

Quanto às emissões derivadas da torrefação de biomassa e da combustão de gás de torrefação, estas foram baseadas no estudo Cardona et al. (2019).

Tabela 2.15. Inventário para os processos de secagem e torrefação (1 t de biomassa torrificada)

	Secagem e Torrefação	Referência
Inputs		
Biomassa (t)	2.71	-
Gás natural (m ³)	11	da Costa et al. (2018)
Água (L)	1277	
Outputs		
Dióxido de carbono de origem fóssil (g)	23 643	da Costa et al. (2018)
Dióxido de enxofre (g)	364	
Metano (g)	816	
Óxido nítrico (g)	38	
Óxidos de nitrogénio (g)	2 036	
NMVOG (g)	89	
PM ₁₀ (g)	304	
PM _{2,5} (g)	252	
Cinzas (g)	7 080	Cardona et al. (2019); da Costa et al. (2018)
Monóxido de carbono (g)	21 827	
Água (L)	838	Cardona et al. (2019)
Dióxido de carbono biogénico (g)*	68 251	
Ácido acético (g)	34 485	
Tolueno (g)	39 513	
Furfural (g)	15 805	
Hidroxiacetona (g)	62 503	

* - Considerou-se que as emissões de dióxido de carbono biogénico, resultantes da combustão de biomassa, são neutras, isto é, resultam de dióxido de carbono previamente sequestrado ao longo do ciclo de vida da biomassa.

A infraestrutura de torrefação foi modelada com base no estudo de Kabir e Kumar (2012), para suprir as necessidades equivalentes à geração de 508 GWh/ano. A Tabela 2.16. possui o inventário para a central de torrefação. Foi considerado que esta infraestrutura contempla equipamentos de secagem, torrefação, arrefecimento e uma caldeira para a combustão de gás natural. Foi considerada uma produção de biomassa torrificada de 400 000 t/ano, um tempo de vida de 20 anos e um fator de operação de 0.85.

Tabela 2.16. Inventário da infraestrutura de torrefação (baseado em Kabir e Kumar (2012))

Input	Central de torrefação (400 000 t/ano)
Aço (t)	1 607
Cimento (t)	4 979
Alumínio (t)	14

2.2.2.6. Arrefecimento

Após o processo de torrefação, a biomassa encontra-se a elevadas temperaturas e dado que, antes da combustão ocorre a moagem ou o armazenamento da biomassa, e há risco de combustão, é necessário o arrefecimento da biomassa. Considerou-se que a biomassa torrificada antes do processo de arrefecimento se encontra à temperatura a que ocorre a torrefação. O inventário para este processo foi baseado em Adams et al. (2015), onde a biomassa é arrefecida de 250 para 25 °C, considerando um consumo de 0.69 kWh/t de biomassa torrificada. Tendo em conta este valor foi calculada a energia necessária para o arrefecimento da biomassa das temperaturas de 250, 280 e 300 °C para 25 °C, estando os resultados apresentados na Tabela 2.17.

Tabela 2.17. Inventário para o processo de arrefecimento (1 t de biomassa torrificada) (Baseado em Adams et al. (2015))

Arrefecimento	250 °C	280 °C	300 °C
Input			
Eletricidade (kWh)	0.69	0.78	0.84
Output			
Biomassa (t)	1	1	1

2.2.2.7. Moagem

O elevado tamanho das partículas de biomassa é uma das causas para a erosão que pode ocorrer com a utilização de biomassa em caldeiras a carvão. Uma forma de reduzir o tamanho destas partículas consiste na moagem da biomassa, antes da sua combustão (Pronobis e Wojnar, 2013; Miedema et al., 2017). Quando comparada com a biomassa natural, a biomassa torrificada tem maior facilidade em ser moída. Segundo Batidzirai et al. (2013), a resistência da biomassa ao processo de moagem está relacionada com a severidade do processo, sendo que com maiores temperaturas de torrefação verificam-se menores consumos de energia na moagem. O consumo energético para a moagem da biomassa torrificada teve como base os estudos Adams et al. (2015), onde este processo foi realizado para biomassa torrificada a 250 °C, e Batidzirai et al. (2013), onde foi moída biomassa torrificada a 300 °C. A partir destes valores foi calculada a energia consumida para a moagem de biomassa torrificada a 280 °C. Os valores obtidos encontram-se apresentados na

Tabela 2.18. A central já possui instalados moinhos de carvão e foi assumido que este equipamento fará a moagem da biomassa torrificada.

Tabela 2.18. Inventário para o processo de moagem (1 t de biomassa torrificada)

Moagem	250°C	280°C	300°C	Referência
Input				
Eletricidade (kWh)	77	45	24	Adams et al. (2015); Batidzirai et al. (2013)
Output				
Biomassa (t)	1	1	1	-

2.2.2.8. Combustão e produção de eletricidade

O inventário deste processo foi baseado em da Costa et al. (2018), que realizou uma avaliação de ciclo de vida das centrais de biomassa dedicadas em Portugal. Este estudo considera a combustão de biomassa de eucalipto, num forno de grelha, para a produção de energia elétrica numa central de biomassa com uma eficiência de combustão de 94-97 %, utilizando principalmente arrefecimento com água (“*boiler tubes*”), utilizando gás natural como combustível de arranque. As caldeiras existentes na central termoeleétrica do Pego apresentam uma eficiência de 87.8 %. Tanto a central considerada em da Costa et al. (2018) como a central do Pego estão equipadas com precipitadores eletrostáticos. Como foi verificado na secção 2.2.2.5. o poder calorífico da biomassa torrificada varia com as condições a que foi tratada, logo a quantidade de biomassa necessária para a produção de 1 kWh de energia varia também, o que se pode verificar na Tabela 2.19

Tabela 2.19. Inventário para o processo de combustão e produção de eletricidade (1 kWh) (Baseado em da Costa et al. (2018))

Combustão e produção de eletricidade	
Inputs	
Biomassa (kg)	0.78
Gás natural (m ³)	0.01
Água (L)	1.44
Outputs	
Eletricidade (kWh)	1
Dióxido de carbono (g)	26.63
Dióxido de enxofre (g)	0.41
Metano (g)	0.92
Monóxido de carbono (g)	3.55
Óxido nitroso (g)	0.04
Óxidos de nitrogénio (g)	2.29
NMVOC (g)	0.1

PM ₁₀ (g)	0.34
PM _{2.5} (g)	0.28
Água (L)	0.07
Cinza (g)	7.98

Uma limitação do estudo referido é que considera a combustão de biomassa não torrificada. Segundo Ndibe et al. (2015) a principal diferença, relevante para a combustão, entre a biomassa torrificada e a biomassa não tratada do ponto de vista da combustão é o menor conteúdo em voláteis da primeira. O aumento do conteúdo volátil do combustível geralmente resulta numa diminuição das emissões de óxidos de nitrogénio. Devido ao menor conteúdo de matéria volátil da biomassa torrificada é expetável uma menor quantidade de emissões gasosas provenientes da sua combustão quando comparada com a combustão de biomassa não tratada no estudo de Costa et al. (2018).

2.3. Modelo e inventário de ciclo de vida: geração anual máxima

2.3.1. Objetivo e âmbito

A central termoelétrica do Pego é despachável, ou seja, possui a capacidade de aumentar o seu output energético de forma a responder a variações na procura de energia. Considerando que após a sua conversão para biomassa florestal, a central mantém este modo de funcionamento, é objetivo desta secção a análise dos impactes ambientais associados ao aumento na geração anual de eletricidade da central relativamente à operação média analisada na secção 2.2. Em particular, foram analisados diferentes cenários de proveniência de biomassa para o abastecimento da central. Segundo especialistas, após a conversão para biomassa, a central terá um fator de capacidade máximo de 25 %, correspondendo a $365 \text{ dias} \times 24 \text{ horas} \times 25\% \times 290 \text{ MW} \times 2 \text{ grupos} = 1270 \text{ GWh}$, que constitui o cenário máximo de produção. Isto resulta num aumento de 762 GWh, em relação ao seu funcionamento normal (geração de 508 GWh/ano). Foi considerado que a eficiência da central se mantém igual à referida na secção 2.2.1 (26 %). Dados os elevados consumos de biomassa verificados para a geração de eletricidade analisada na secção 2.2 (508 GWh/ano), considerou-se que a biomassa necessária para suprir um aumento da geração de eletricidade teria que ser importada.

Segundo o INE, 79 % da madeira em estilha importada no ano de 2018 foi proveniente do Uruguai, consistindo em madeira de espécies não coníferas, pelo que a importação de estilha proveniente do Uruguai foi considerada como um dos cenários de abastecimento de biomassa para a central. Foi considerado que a biomassa importada é de eucalipto. Para além de estilha, considerou-se a utilização de péletes de madeira, tal como acontece na central de Drax, em Inglaterra, convertida de carvão para operar a péletes de biomassa. Segundo Sikkema et al. (2011), os principais fornecedores de péletes para a Europa são o Canadá e os Estados Unidos da América. Considerou-se como um possível cenário de abastecimento a importação de péletes de biomassa natural ou torrificada do Canadá. De modo a permitir uma melhor comparação entre os dois tipos de combustível (estilha e péletes) foi considerado um cenário de importação de biomassa de eucalipto em estilha proveniente do Canadá, semelhante ao analisado para o Uruguai. Foi também considerado um cenário de importação de péletes de biomassa torrificada provenientes do Canadá, que consiste num combustível com melhores propriedades, do ponto de vista energético, que as péletes de biomassa natural. Na Figura 2.4. encontram-se apresentados os diferentes cenários considerados para o abastecimento de biomassa para a central, devido ao aumento da geração de eletricidade anual. A análise tem em conta os processos que são alterados em relação ao estudado na secção 2.2.1, resultado do aumento do output de energia. A análise dos processos será feita para a unidade funcional de 1 kWh de energia gerada e para as categorias de impacto referidas na secção 2.2.1. Os impactes ambientais resultantes dos diferentes cenários de geração máxima de eletricidade foram ainda comparados com os impactes considerando a geração média de eletricidade, bem como outros dois sistemas de geração de eletricidade em Portugal que operam em regime despachável: carvão, gás natural obtidos de Kabayo et al. (2019).

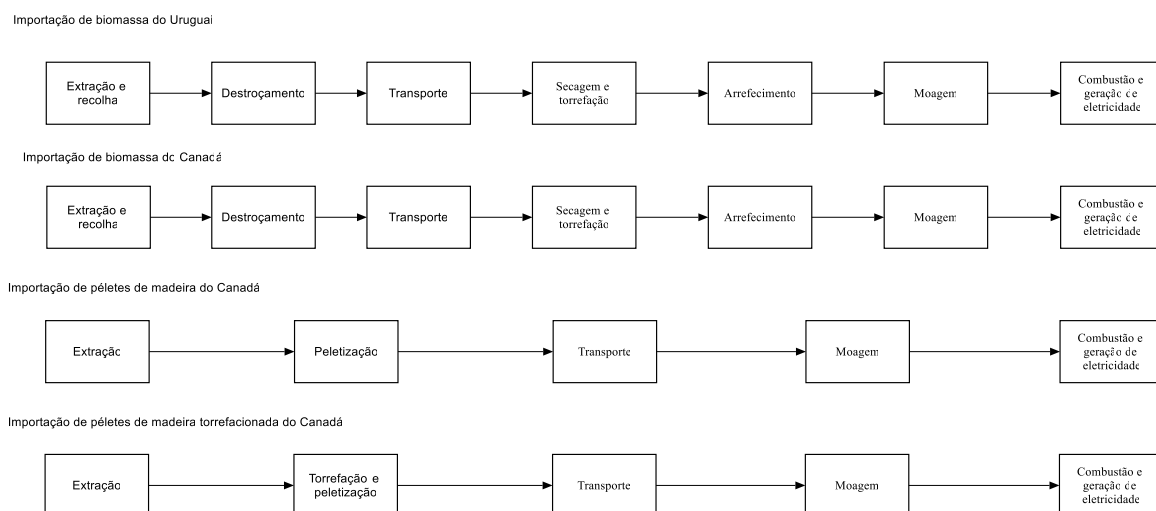


Figura 2.4. Sistemas analisados

2.3.2. Inventário de ciclo de vida e caracterização dos processos

2.3.2.1. Importação de biomassa do Uruguai

Neste cenário foi considerado que os processos de extração, recolha, carregamento/descarregamento e destroçamento são semelhantes aos descritos nas secções 2.2.2.1., 2.2.2.2. e 2.2.2.3. No caso do destroçamento foi considerado que este processo é realizado a partir de destroçadores móveis.

Quanto ao transporte, foi considerado que a biomassa é extraída e, de seguida, transportada por via rodoviária até um porto onde é carregada para um navio que a transportará para Portugal. Considerou-se que a biomassa é rececionada no porto de Sines e transportada por via ferroviária até à central do Pego. Foi assumida uma distância de recolha de biomassa no Uruguai de 150 km, por via rodoviária. A distância percorrida por navio, entre o porto de Sines e o porto de Montevideo (Uruguai), foi obtida a partir de www.searoutes.com, tendo sido obtido o valor de 9 590 km. A distância ferroviária percorrida desde o porto de Sines até à central do Pego é de 369 km. O inventário para o transporte de uma tonelada de biomassa desde o Uruguai até à central do Pego encontra-se apresentado na Tabela 2.20.

Tabela 2.20. Inventário para o transporte de biomassa de eucalipto em estilha (1 t de biomassa)

	Importação de biomassa do Uruguai
Transporte rodoviário (km)	150
Transporte ferroviário (km)	369
Transporte marítimo (km)	9 590

Tal como foi feito na Tabela 2.7 da secção 2.2.2.4, foi efetuada a modelação do transporte rodoviário, mas para o transporte de biomassa destrocada. Segundo especialistas no caso de biomassa destrocada um camião com semirreboque transporta cerca de 18 t, no caso de biomassa por destroçar, o mesmo camião transporta entre 8 a 10 t. Para a modelação do transporte rodoviário foi considerado o mesmo processo que na secção 2.2.2.4. Este processo foi adaptado para corresponder a um camião com o mesmo peso, mas que faz duas viagens, uma sem carga e outra onde transporta 9 t, para o caso do transporte de biomassa destrocada (ver Tabela 2.21). O cálculo do consumo de combustível em função da carga foi baseado em Keller (2010). No caso do transporte ferroviário foi considerado o mesmo processo que na secção 2.2.2.4.

Tabela 2.21. Modelação do processo de transporte rodoviário

	Peso do veículo (t)	Carga média (t)	Consumo (kg/tkm)	Tempo de vida (tkm)
Transporte de biomassa por destroçar	10	9	0.04	4 860 000

Foi considerado que a biomassa é sujeita aos processos de secagem e torrefação, semelhantes aos analisados na secção 2.2.2.5. Neste caso a única espécie tratada é eucalipto. Foi considerado o cenário base de condições de torrefação (250 °C; 30 min), consumo de energia na secagem (6 MJ/kg de água removida) e fonte de energia para a secagem e torrefação (biomassa). Na Tabela 0.5 da secção A.4 do Apêndice A está apresentado o inventário para uma infraestrutura de torrefação de maior capacidade necessária devido ao aumento da geração de eletricidade. O inventário para uma tonelada de biomassa torrificada encontra-se apresentado na Tabela 2.22.

Tabela 2.22. Inventário para os processos de secagem e torrefação (1 t de biomassa torrificada)

	Secagem e Torrefação	Referência
Inputs		
Biomassa (t)	2.66	-
Gás natural (m ³)	11	da Costa et al. (2018)
Água (L)	1259	
Outputs		
Dióxido de carbono de origem fóssil (g)	23 314	da Costa et al. (2018)
Dióxido de enxofre (g)	359	
Metano (g)	804	
Óxido nítrico (g)	38	
Óxidos de nitrogénio (g)	2 007	
NMVOC (g)	88	
PM ₁₀ (g)	300	
PM _{2.5} (g)	249	
Cinzas (g)	6 982	
Monóxido de carbono (g)	20 258	Cardona et al. (2019); da Costa et al. (2018)
Água (L)	818	
Dióxido de carbono biogénico (g)*	62 677	Cardona et al. (2019)
Ácido acético (g)	31 669	
Tolueno (g)	36 287	
Furfural (g)	14 515	
Hidroxiacetona (g)	57 399	

* - Considerou-se que as emissões de dióxido de carbono biogénico, resultantes da combustão de biomassa, são neutras, isto é, resultam de dióxido de carbono previamente sequestrado ao longo do ciclo de vida da biomassa.

Os processos de arrefecimento e moagem são semelhantes aos representados nas secções 2.2.2.6 e 2.2.2.7. Na Tabela 2.23 encontra-se o inventário do processo de combustão e geração de eletricidade, para 1 kWh. A modelação deste processo foi feita da mesma forma que na secção 2.2.2.8.

Tabela 2.23. Inventário para o processo de combustão e geração de eletricidade (1 kWh de eletricidade) (baseado em da Costa et al. (2018))

Combustão e produção de eletricidade	
Inputs	
Biomassa (kg)	0.81
Gás natural (m ³)	0.01
Água (L)	1.50
Outputs	
Eletricidade (kWh)	1
Dióxido de carbono (g)	27.69

Dióxido de enxofre (g)	0.43
Metano (g)	0.96
Monóxido de carbono (g)	3.69
Óxido nitroso (g)	0.05
Óxidos de nitrogénio (g)	2.38
NMVOOC (g)	0.10
PM ₁₀ (g)	0.36
PM _{2,5} (g)	0.30
Água (L)	0.08
Cinza (g)	8.29

2.3.2.2. Importação de péletes do Canadá

A modelação deste cenário foi baseada no estudo Tsalidis et al. (2014), onde, através de uma ACV, são analisados os impactes ambientais do *co-firing* de péletes de biomassa e péletes de biomassa torrificada com carvão. Na Tabela 2.24 encontra-se apresentado o inventário para o processo de extração biomassa. Na Tabela 2.25 encontra-se o inventário para o processo de peletização de uma tonelada de biomassa.

Tabela 2.24. Inventário para a extração de 1 t de biomassa (baseado em Tsalidis et al. (2014))

Extração	
Inputs	
Diesel (kg)	0.425
Outputs	
Metano (kg)	1.4
Óxidos de nitrogénio (kg)	0.03
Biomassa (t)	1

Tabela 2.25. Inventário para o processo de peletização biomassa (1 t) (baseado em Tsalidis et al. (2014))

Peletização de biomassa	
Input	
Biomassa (t)	1.801
Eletricidade (kWh)	111.71
Gás natural (m ³)	74.97
Diesel (kg)	4.75
Outputs	
Péletes (t)	1

Após extraída a biomassa é transportada por camião até à central de peletização e, após a sua transformação em péletes, é feito o seu transporte por via ferroviária para o

porto de Vancouver na costa Oeste do Canadá. Aí é carregada para navio e transportada até ao porto de Sines, a partir do qual é transportada por via ferroviária até à central do Pego. As distâncias de transporte rodoviário e ferroviário percorridas no Canadá foram baseadas no estudo Tsalidis et al. (2014). Os valores de transporte marítimo foram obtidos a partir de www.searoutes.com. Na Tabela 2.26 encontra-se o inventário para o processo de transporte, para uma tonelada de péletes de biomassa.

Tabela 2.26. Inventário para o transporte de 1 t de biomassa (baseado em Tsalidis et al. (2014))

	Importação de péletes do Canadá
Transporte rodoviário (km)	140
Transporte ferroviário (km)	1 119
Transporte marítimo (km)	15 394

Antes da combustão as péletes são moídas, sendo que a energia consumida para a moagem deste combustível é superior à necessária para biomassa natural. As péletes consistem em biomassa compactada, o que torna a sua moagem mais difícil. O inventário para o processo de moagem de péletes de biomassa encontra-se apresentado na Tabela 2.27. Na Tabela 2.28 encontra-se o inventário do processo de combustão e geração de eletricidade, para a geração de 1 kWh de eletricidade. A modelação deste processo foi feita da mesma forma que na secção 2.2.2.8. Foi considerado um PCI de 16 MJ/kg para as péletes de biomassa. (Tsalidis et al., 2014)

Tabela 2.27. Inventário para a moagem de 1 t de péletes de biomassa (baseado em Adams et al. (2015))

Moagem de péletes de biomassa natural	
Inputs	
Biomassa (t)	1
Eletricidade (kWh)	237
Outputs	
Biomassa (t)	1

Tabela 2.28. Inventário para o processo de combustão e geração de eletricidade (1 kWh de eletricidade) (baseado em da Costa et al. (2018))

Combustão e produção de eletricidade	
Inputs	
Péletes (kg)	0.87
Gás natural (m ³)	0.01
Água (L)	1.59
Outputs	
Eletricidade (kWh)	1
Dióxido de carbono (g)	29.41
Dióxido de enxofre (g)	0.45
Metano (g)	1.01
Monóxido de carbono (g)	3.92
Óxido nítrico (g)	0.05
Óxidos de nitrogénio (g)	2.53
NMVOG (g)	0.11
PM ₁₀ (g)	0.38
PM _{2.5} (g)	0.31
Água (L)	0.08
Cinza (g)	8.81

2.3.2.3. Importação de biomassa do Canadá

A modelação deste cenário foi baseada no estudo Tsalidis et al. (2014), tendo sido considerado que a biomassa importada é de eucalipto. O processo de extração corresponde ao apresentado na Tabela 2.24 da secção 2.3.2.2. Após extraída a biomassa é transportada por camião até ao porto de Vancouver. Aí é carregada para navio e transportada até ao porto de Sines, a partir do qual é transportada por via ferroviária até à central do Pego. As distâncias de transporte rodoviário percorridas no Canadá foram baseadas no estudo Tsalidis et al. (2014). Os valores de transporte marítimo foram obtidos a partir de www.searoutes.com. Na Tabela 2.29 encontra-se o inventário para o processo de transporte, para uma tonelada de biomassa.

Tabela 2.29. Inventário para o transporte de 1 t de biomassa (baseado em Tsalidis et al. (2014))

Importação de biomassa do Canadá	
Transporte rodoviário (km)	140
Transporte ferroviário (km)	369
Transporte marítimo (km)	15 394

Foi considerado que a biomassa é sujeita aos processos de secagem e torrefação, semelhantes aos analisados na secção 2.2.2.5. Neste caso a única espécie tratada é eucalipto. Foi considerado o cenário base de condições de torrefação (250 °C; 30 min), consumo de energia na secagem (6 MJ/kg de água removida) e fonte de energia para a secagem e torrefação (biomassa). O inventário para uma tonelada de biomassa torrificada corresponde ao apresentado na Tabela 2.22 da secção 2.3.2.1. Os processos de arrefecimento e moagem são semelhantes aos representados nas secções 2.2.2.6 e 2.2.2.7. Na Tabela 2.23 da secção 2.3.2.1 encontra-se o inventário do processo de combustão e geração de eletricidade, para a geração de 1 kWh de eletricidade.

2.3.2.4. Importação de péletes torrificadas do Canadá

O cenário de importação de biomassa em forma de péletes torrificadas foi baseado no estudo Tsalidis et al. (2014). Na Tabela 2.30 encontra-se o inventário para o processo de peletização de uma tonelada de biomassa.

Tabela 2.30. Inventário para o processo de torrefação e peletização biomassa (1 t) (baseado em Tsalidis et al. (2014))

Torrefação e peletização de biomassa	
Input	
Biomassa (t)	2.433
Eletricidade (kWh)	233.58
Gás natural (m ³)	113.20
Diesel (kg)	0.96
Outputs	
Péletes (t)	1
Dióxido de carbono biogénico (kg)	94.89

Na Tabela 2.24 da secção 2.3.2.2 encontra-se o inventário para o processo de extração da biomassa. Após extraída a biomassa é transportada por camião até à central de torrefação e peletização e, após a sua transformação em péletes torrificadas, é feito o seu transporte por via ferroviária para um porto. Aí é carregada para navio e transportada até ao porto de Sines, a partir do qual é transportada por via ferroviária até à central do Pego. As distâncias de transporte rodoviário e ferroviário percorridas no Canadá foram baseadas no estudo Tsalidis et al. (2014). Os valores de transporte marítimo foram obtidos a partir de www.searoutes.com. Na Tabela 2.31 encontra-se o inventário para o processo de transporte, para uma tonelada de péletes de biomassa torrificada.

Tabela 2.31. Inventário para o transporte de 1 t de biomassa (baseado em Tsalidis et al. (2014))

	Importação de péletes torrificadas do Canadá
Transporte rodoviário (km)	575
Transporte ferroviário (km)	1 064
Transporte marítimo (km)	15 394

Considerou-se que a energia necessária para a moagem de péletes de biomassa torrificada é semelhante à energia necessária para a moagem de biomassa torrificada referida na secção 2.2.2.7 (Adams et al. 2015). Foi considerado o valor para a moagem de biomassa torrificada a 250 °C, durante 30 min. Na Tabela 2.32 encontra-se o inventário do processo de combustão e geração de eletricidade, para a geração de 1 kWh de eletricidade. A modelação deste processo foi feita da mesma forma que na secção 2.2.2.8. Considerou-se o das péletes torrificadas tendo um PCI de 20.5 MJ/kg (Tsalidis et al., 2014).

Tabela 2.32. Inventário para o processo de combustão e geração de eletricidade (1 kWh de eletricidade) (baseado em da Costa et al. (2018))

Combustão e produção de eletricidade	
Inputs	
Péletes torrificadas (kg)	0.68
Gás natural (m ³)	0.01
Água (L)	1.24
Outputs	
Eletricidade (kWh)	1
Dióxido de carbono (g)	22.95
Dióxido de enxofre (g)	0.35
Metano (g)	0.79
Monóxido de carbono (g)	3.06
Óxido nitroso (g)	0.04
Óxidos de nitrogénio (g)	1.98
NMVOG (g)	0.09
PM ₁₀ (g)	0.30
PM _{2.5} (g)	0.25
Água (L)	0.06
Cinza (g)	6.87

3. AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE CICLO DE VIDA

Nesta secção apresentam-se os resultados da avaliação de impactes de ciclo de vida dos modelos e inventários apresentados nas secções 2.2 e 2.3, os quais foram calculados a partir do método ReCiPe (*Midpoint*) (H) (Huijbregts et al., 2017) para as categorias de impacte de alterações climáticas, depleção da camada de ozono, acidificação terrestre, eutrofização de água doce e do método Cumulative Energy Demand (Frischknecht et al., 2003) para a categoria: requisitos de energia primária fóssil.

3.1. Impactes ambientais de ciclo de vida: geração média anual

Na Figura 3.1 apresentam-se os resultados obtidos a partir da análise realizada na secção 2.2 (geração média anual de eletricidade), para cada uma das categorias de impacte. Na Figura 3.1 encontram-se apresentados os resultados para o cenário base, ou seja, temperatura de torrefação de 250 °C e utilização de biomassa como fonte de energia para os processos de secagem e torrefação. Encontra-se também apresentado, através de barras de erro, o resultado da análise de sensibilidade ao consumo de energia no processo de secagem (3, 6 e 9 MJ/kg de água removida). Os resultados para as restantes análises de sensibilidade, para diferentes temperaturas de torrefação (280 °C e 300 °C) e fontes de energia para os processos de secagem e torrefação (biomassa e gás de torrefação), encontram-se apresentados na secção A.5 do Apêndice A.

No geral, os processos que apresentam maiores impactes ambientais são o transporte, a secagem e torrefação e a combustão e geração de eletricidade. No caso do transporte os impactes ambientais estão relacionados com as elevadas distâncias de transporte percorridas para a recolha de biomassa. Nos processos de secagem e torrefação e combustão e geração de eletricidade, os impactes ambientais devem-se às emissões resultantes da combustão de biomassa e às emissões de gás de torrefação.

Para a categoria de alterações climáticas (Figura 3.1 a), verificou-se que os processos de combustão e geração de eletricidade (25 %), transporte (19 %) e secagem e

torrefação (18 %) apresentam os maiores impactes. Foi obtido o valor de 0.249 kg CO₂ eq. kWh⁻¹ para o cenário base analisado. Para a categoria de depleção da camada de ozono (Figura 3.1 b), os resultados obtidos mostram que os processos de transporte (32 %), extração (23 %) e destorroamento (20 %) são os que mais contribuem para os impactes. Foi obtido o valor de 2.18 E-08 kg CFC-11 eq. kWh⁻¹ para o cenário base analisado. Para a categoria de acidificação terrestre (Figura 3.1 c), os resultados revelam que os processos de combustão e geração de eletricidade (48 %) e secagem e torrefação (33 %) apresentam os maiores impactes. Foi obtido o valor de 0.0036 kg SO₂ eq. kWh⁻¹ para o cenário base analisado. Para a categoria de eutrofização de água doce (Figura 3.1 d), verificou-se que os processos de transporte (55 %) e moagem (28 %) apresentam os maiores impactes ambientais, tendo sido obtido o valor de 2.51 E-05 kg P eq. kWh⁻¹ para o cenário base analisado. Relativamente aos requisitos de energia primária fóssil (Figura 3.1 e) os resultados obtidos mostram que os processos de transporte (25 %), extração (15 %), destorroamento (14 %), secagem e torrefação (13 %) e combustão e geração de eletricidade (11 %) apresentam os maiores impactes ambientais para esta categoria. Foi obtido o valor de 2.71 MJ para o cenário base analisado.

Se apenas 50 % da biomassa das áreas abrangidas estiver disponível para abastecer a central, resultando num raio de recolha superior, verifica-se um aumento nos impactes para todas as categorias de impacte analisadas. Os resultados desta análise encontram-se apresentados na Figura.0.6. da secção.A.5. do Apêndice A. Este aumento foi de 29 % para eutrofização de água doce e inferior a 10 % para as categorias de alterações climáticas, depleção da camada de ozono, acidificação terrestre e requisitos de energia primária fóssil. Quanto à análise de sensibilidade realizada à energia consumida no processo de secagem (barras de erro na Figura 3.1), verificou-se que com o aumento do consumo energético ocorre também um aumento nos impactes ambientais, devido ao maior consumo de biomassa para o abastecimento deste processo.

Os resultados das restantes análises de sensibilidade (apresentados nas Figura 0.1 a 0.5 da secção A.5 do Apêndice A) mostram para todas as categorias de impacte analisadas, que as condições de 250 °C; 30 min, considerando apenas biomassa como fonte de energia para os processos de secagem e torrefação, se apresentam como as mais favoráveis. Isto deve-se ao menor consumo de energia nos processos de secagem e torrefação por tonelada de biomassa torrificada, o que resulta num menor consumo de biomassa. Por

sua vez, o menor consumo de biomassa resulta em menores impactes nos processos de extração e recolha, carregamento/descarregamento, transporte, destroçamento e secagem e torrefação. Também as emissões resultantes da combustão de biomassa são menores resultando em menores impactes ambientais. Por outro lado, quando se considera o aproveitamento de gás de torrefação para o fornecimento de energia nos processos de secagem e torrefação, verifica-se que a torrefação a 300 °C; 30 min apresenta os menores impactes em todas as categorias analisadas, com exceção da depleção da camada de ozono. Tal ocorre devido à produção de uma maior quantidade de gás de torrefação e do maior potencial para geração de energia que este apresenta para temperaturas de torrefação superiores. Visto que, para as condições de 300 °C; 30 min é obtido um produto com maior poder calorífico, a quantidade de biomassa necessária para gerar 1 kWh de eletricidade é menor, em relação às restantes condições de torrefação. Desta forma, os impactes associados à combustão de biomassa no processo de geração de eletricidade são menores, em comparação com as condições de 250 e 280 °C; 30 min. Para a temperatura de torrefação de 300 °C verificam-se também menores impactes no processo de moagem, visto que, com o aumento de temperatura de torrefação, se obtém um produto mais frágil. No geral, verificou-se que, numa perspetiva de ciclo de vida, a alteração das condições de torrefação, da energia consumida na secagem e a utilização de gás de torrefação para a geração de energia usada na secagem e torrefação resultam em variações inferiores a 10 % na maioria das categorias de impacto. No entanto verificou-se uma diminuição de 21 %, em relação ao cenário base, na categoria de acidificação terrestre, no cenário de temperatura de torrefação de 300 °C, com utilização de gás de torrefação para geração de energia, e um aumento de 15 %, na categoria depleção da camada de ozono para o cenário de temperatura de torrefação de 300 °C, com utilização de apenas biomassa para geração de energia na secagem e torrefação.

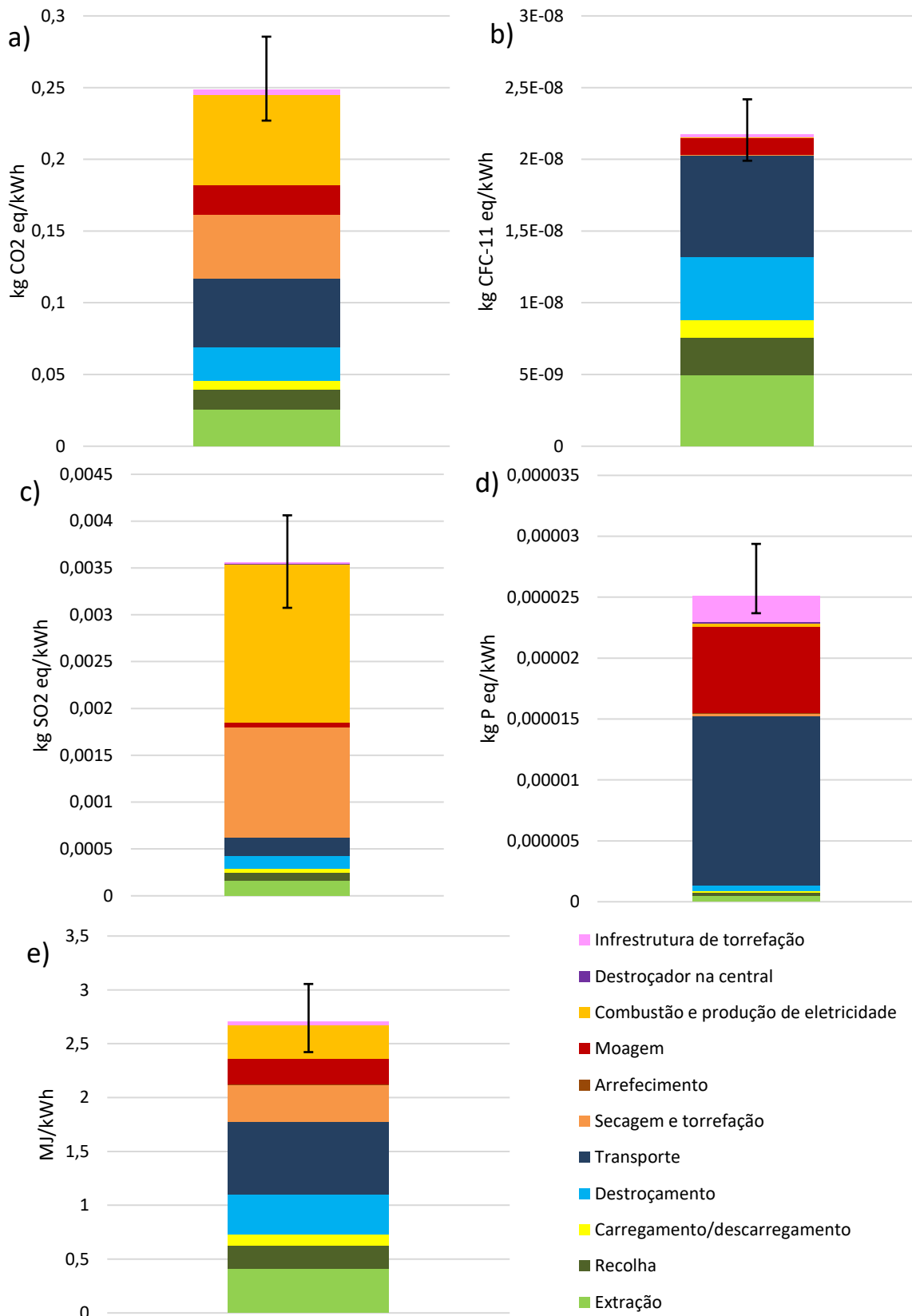


Figura 3.1. Resultados obtidos para a análise da geração média anual para as categorias de a) Alterações climáticas; b) Depleção da camada de ozono; c) Acidificação terrestre; d) Eutrofização de água doce; e) Requisitos de energia primária fóssil

3.2. Impactes ambientais de ciclo de vida: geração anual máxima

Nas Figuras 3.2-3.6 apresentam-se os resultados obtidos a partir da análise realizada na secção 2.3 (geração máxima anual de eletricidade) para as categorias de impacte de alterações climáticas, depleção da camada de ozono, acidificação terrestre, eutrofização de água doce e requisitos de energia primária fóssil. Foram analisados para cada um dos cenários de importação, quais os processos que apresentam maiores impactes ambientais. No geral, os resultados mostram que o processo que apresenta maiores impactes em todos os cenários e categorias de impacte é o transporte devido às longas distâncias percorridas na cadeia de abastecimento de biomassa.

Na Figura 3.2 encontram-se apresentados os resultados obtidos para a categoria de alterações climáticas a partir dos quais se verificou que os processos que apresentam maiores impactes nesta categoria são o transporte (58 a 71 %), a torrefação e peletização (25 %, para o cenário importação de péletes torreficadas do Canadá) e a peletização (19 %, importação de péletes do Canadá). O cenário que apresenta menores impactes é a importação de estilha de eucalipto proveniente do Uruguai ($0.62 \text{ kg CO}_2 \text{ eq. kWh}^{-1}$), seguido da

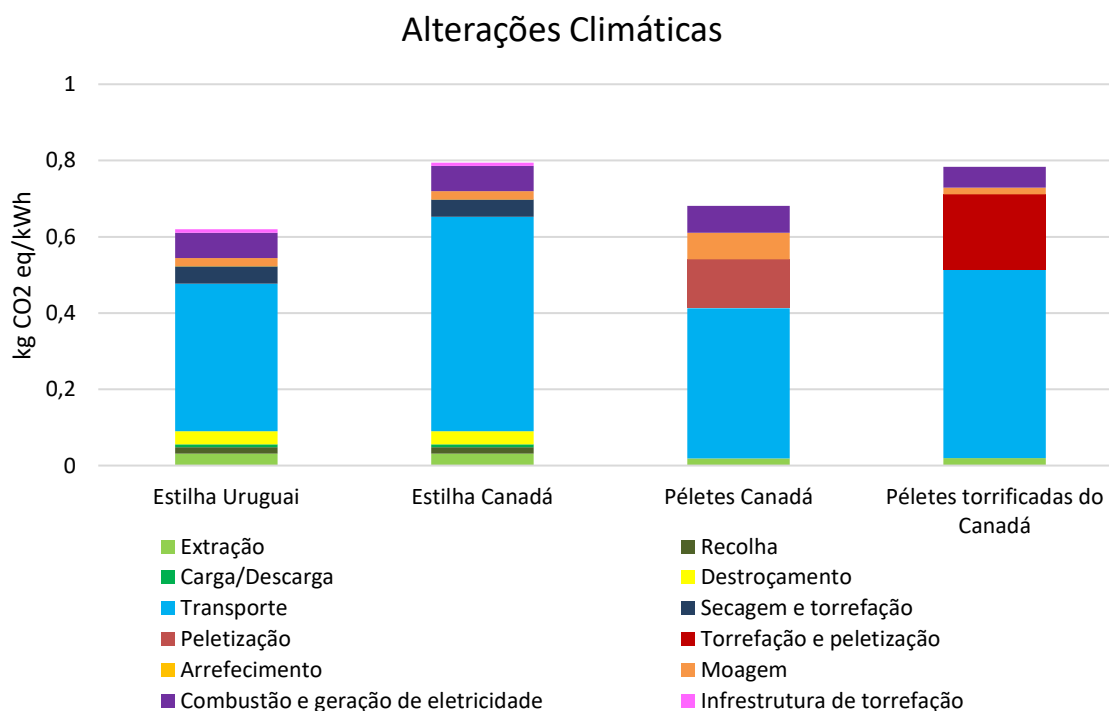


Figura 3.2. Resultados da análise para a geração anual máxima para a categoria de alterações climáticas

importação de péletes (0.68 kg CO₂ eq. kWh⁻¹), péletes torrificadas (0.78 kg CO₂ eq. kWh⁻¹) e estilha de biomassa de eucalipto do Canadá (0.80 kg CO₂ eq. kWh⁻¹).

Na Figura 3.3 estão expostos os resultados obtidos para a categoria de impacto depleção da camada de ozono, tendo-se verificado que o processo que apresenta maiores impactos nesta categoria é o transporte (76 a 91 %). Nesta categoria, o cenário mais favorável é o de importação de péletes do Canadá (6.6 E-08 kg CFC-11 eq. kWh⁻¹), seguido da importação de estilha do Uruguai e péletes torrificadas do Canadá (8.0 E-08 kg CFC-11 eq. kWh⁻¹) e estilha do Canadá (1.08 E-07 kg CFC-11 eq. kWh⁻¹).

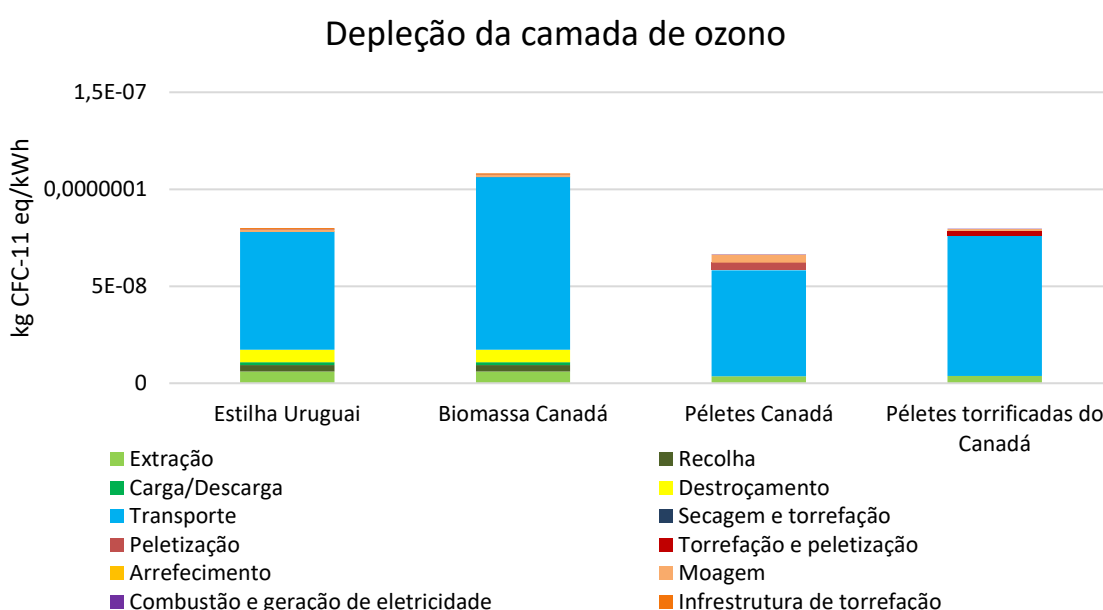


Figura 3.3. Resultados da análise para a geração anual máxima para a categoria de depleção da camada de ozono

Para a categoria de acidificação terrestre, Figura 3.4, verificou-se que os processos com maior impacto nesta categoria são o transporte (62 a 72 %), a torrefação e peletização de biomassa (22 %, para o cenário de importação de péletes torrificadas do Canadá), a peletização (16 %, importação de péletes do Canadá) e a secagem e torrefação (12 %, importação de estilha do Uruguai e Canadá). Nesta categoria os cenários que apresentam os menores impactos ambientais foram a importação de estilha do Uruguai e péletes e péletes torrificadas do Canadá (0.01 kg SO₂ eq. kWh⁻¹)

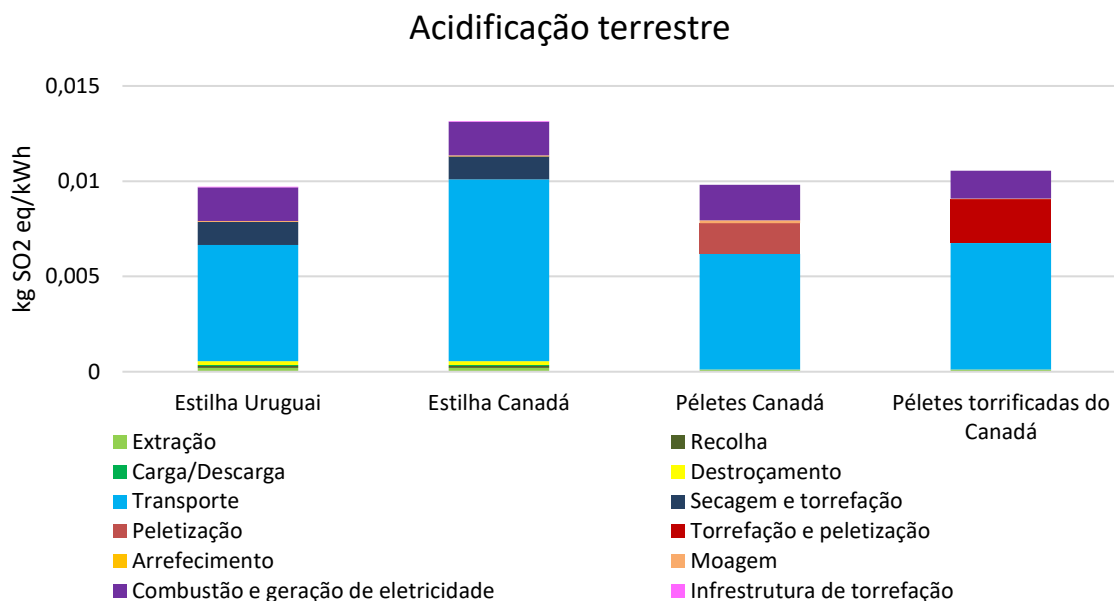


Figura 3.4. Resultados da análise para a geração anual máxima para a categoria de acidificação terrestre

Na Figura 3.5 encontram-se os resultados obtidos para a categoria requisitos de energia fóssil primária. Verificou-se que os processos com maior impacto nesta categoria são o transporte (55 a 73 %), a peletização (37 %, importação de péletes do Canadá) e a torrefação e peletização de biomassa (32 %, importação de péletes torreficadas do Canadá). Os cenários com menores requisitos de energia primária fóssil são a importação de estilha do Uruguai (9.3 MJ. kWh^{-1}) e de péletes do Canadá ($10.4 \text{ MJ. kWh}^{-1}$). No entanto, em ambos os cenários, ao longo do ciclo de vida é consumida mais do dobro da energia fóssil do que a energia gerada.

Na Figura 3.6 encontram-se os resultados obtidos para a categoria eutrofização de água doce. Verificou-se que os processos com maior impacto nesta categoria são o transporte (62 a 84 %), a torrefação e peletização de biomassa (25 %, importação de péletes torreficadas do Canadá) a moagem (21 %, importação de péletes do Canadá) e a peletização (16 %, importação de péletes do Canadá). O cenário mais favorável é a importação de estilha do Uruguai ($7.48 \text{ E-05 kg P eq. kWh}^{-1}$), tendo os restantes cenários impactes semelhantes, variando entre 9.33 E-05 e $9.83 \text{ E-05 kg P eq. kWh}^{-1}$.

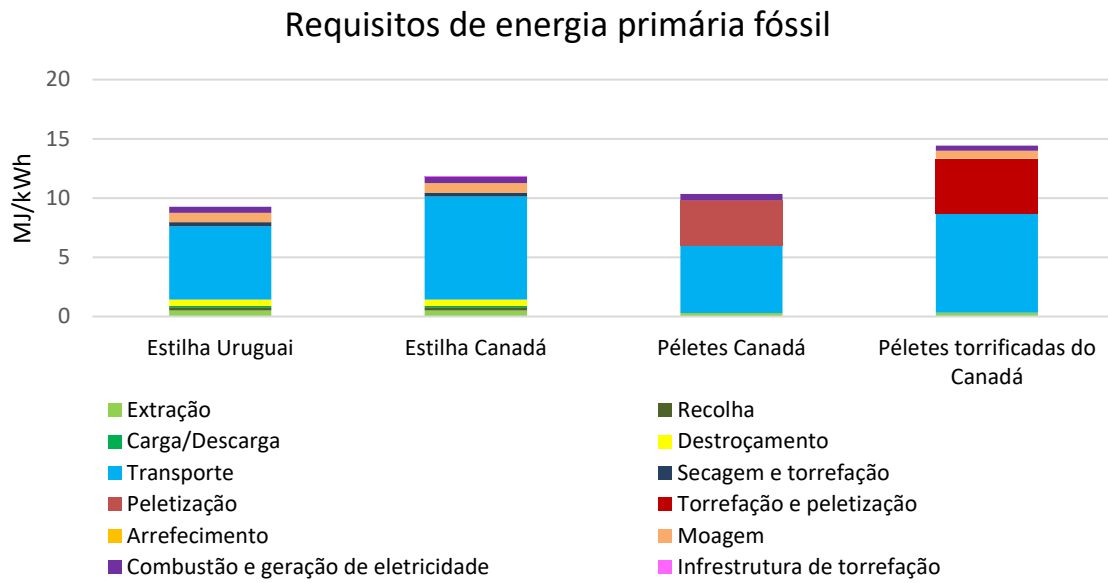


Figura 3.6. Resultados da análise para a geração anual máxima para a categoria de requisitos de energia primária fóssil

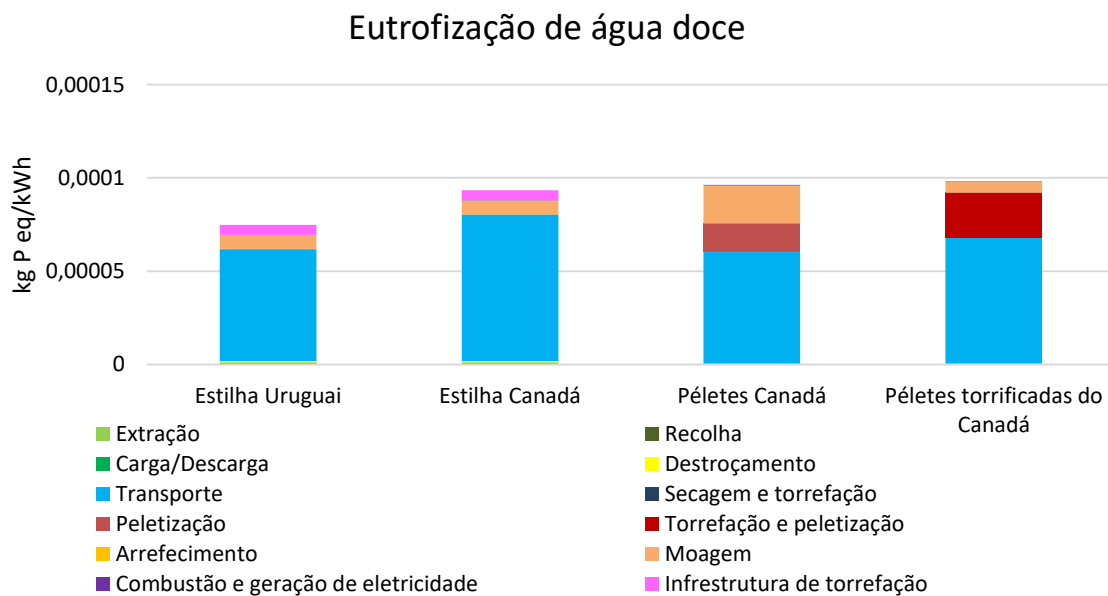


Figura 3.5. Resultados da análise para a geração anual máxima para a categoria de eutrofização de água doce

Em geral, o cenário de importação de estilha do Uruguai é o que apresenta menores impactes ambientais para alterações climáticas e eutrofização de água doce e a importação de péletes do Canadá para depleção da camada de ozono. Para a categoria de acidificação terrestre a importação de estilha do Uruguai e de péletes do Canadá apresentam impactes semelhantes. As diferenças entre cenários de importação devem-se principalmente

às distâncias de transporte (mais elevadas para o Canadá), mas também aos impactes dos diferentes processos de transformação. É possível comparar os diferentes processos de transformação através dos cenários de importação do Canadá, através dos quais é possível verificar que a secagem e torrefação apresentam os menores impactes ambientais, seguida da peletização, enquanto que a torrefação e peletização apresenta os maiores impactes ambientais.

Na Figura 3.7 apresenta-se a comparação dos resultados obtidos considerando a geração média anual de eletricidade (508 GWh/ano) e a geração máxima de eletricidade (1270 GWh/ano) para as categorias de impacte de alterações climáticas, depleção da camada de ozono, acidificação terrestre, eutrofização de água doce e requisitos de energia primária fóssil. Os impactes ambientais estão apresentados para 1 kWh de eletricidade gerada sendo que para o cenário de geração máxima, 40 % (508 GWh) da eletricidade é gerada a partir de biomassa de origem endógena enquanto que os restantes 60 % (762 GWh) são gerados a partir de biomassa importada. Encontram-se também apresentados os impactes, para todas as categorias exceto requisitos de energia primária fóssil (por não estarem disponíveis), para dois dos sistemas de geração de eletricidade em Portugal: carvão e gás natural (baseados em Kabayo et al., 2019).

Comparando apenas os cenários de geração de eletricidade a partir de biomassa verificou-se que a geração de eletricidade utilizando apenas biomassa endógena (geração média anual) apresentou os menores impactes ambientais. Aumentar a geração anual de eletricidade, assumindo que a central funciona à sua capacidade máxima, levou a um aumento dos impactes ambientais face ao cenário médio de 47 a 62 % para o cenário de importação de estilha do Uruguai, 57 a 70 % para o cenário de importação de estilha do Canadá, 51 a 63 % para a importação de péletes do Canadá e 54 a 72 % na importação de péletes torrificadas do Canadá.

Através da análise da Figura 3.7 é possível verificar que, para as categorias de alterações climáticas e eutrofização de água doce, todos cenários de geração de eletricidade a partir de biomassa apresentam menores impactes que a geração de eletricidade a partir de carvão. No entanto, para as categorias de depleção da camada de ozono e acidificação terrestre o carvão apresenta menores impactes ambientais. Os cenários de geração máxima anual de eletricidade (importação de biomassa) apresentam impactes superiores, à geração de eletricidade a partir de gás natural na maioria das categorias de impacte. Para as categorias

de acidificação terrestre e eutrofização de água doce verificam-se impactes 12 vezes superiores para a geração de eletricidade utilizando apenas biomassa endógena (geração media anual), em relação à geração de eletricidade a partir de gás natural.

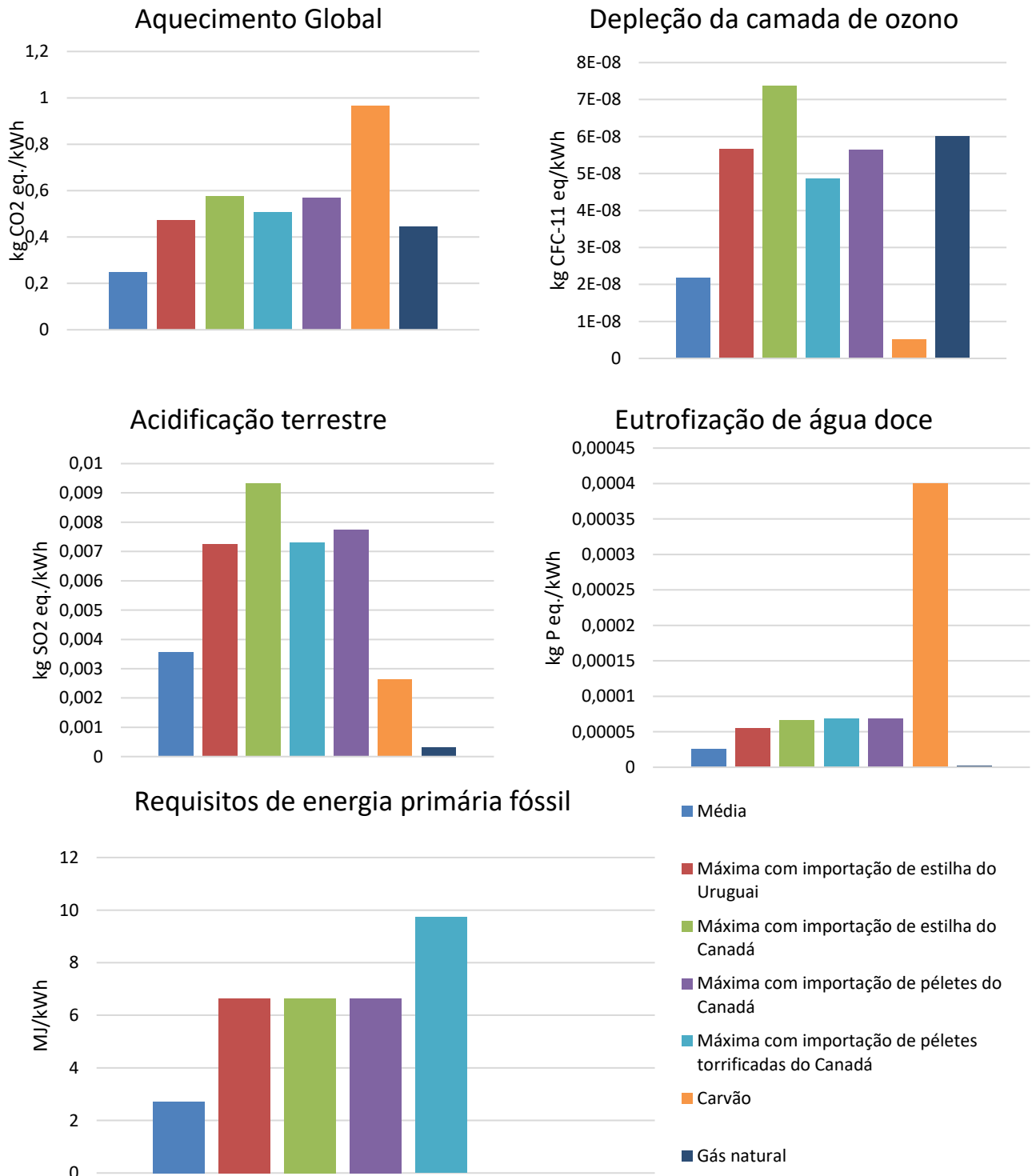


Figura 3.7. Comparação dos impactes ambientais estudados (por kWh) para os diferentes cenários de funcionamento estudados e para outros sistemas de geração de eletricidade em Portugal (carvão e gás natural)

4. CONCLUSÕES

Esta dissertação apresenta uma avaliação de ciclo de vida da geração de eletricidade na central termoelétrica do Pego após a sua conversão para operar exclusivamente com biomassa florestal. Foi desenvolvido um modelo e inventário de ciclo de vida para a geração de eletricidade na central reconvertida utilizando a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e foram avaliados os seus impactes ambientais com base no método ReCiPe e *Cumulative Energy Demand*. Primeiramente foi feita uma análise para a geração média anual prevista, considerando o seu abastecimento a partir de biomassa endógena. Foram realizadas análises de sensibilidade para diferentes consumos de energia no processo de secagem e para diferentes condições de torrefação. Foi também analisada a possibilidade de utilização de gás de torrefação e biomassa como fontes de energia para os processos de secagem e torrefação. Em segundo lugar foi analisado o cenário de geração máxima anual de eletricidade, tendo sido considerados diversos cenários de abastecimento resultantes da importação de diferentes tipos de combustível de biomassa: biomassa em estilha proveniente do Uruguai, biomassa em estilha proveniente do Canadá, péletes de biomassa provenientes do Canadá e péletes de biomassa torrificada provenientes do Canadá.

Em condições médias de operação, a central irá gerar cerca de 508 GWh por ano, correspondendo a um consumo de 1 078 233 t de biomassa. Isto implica elevadas distâncias de transporte para recolha de biomassa. Foram comparados os impactes ambientais considerando a disponibilidade total de biomassa nos locais selecionados para recolha e considerando que apenas 50 % dessa biomassa estaria disponível para o abastecimento da central, aumentando o raio de recolha em 46 %. Para as categorias de impacto analisadas, o aumento das distâncias de recolha resultou num aumento dos impactes ambientais que variou entre 2 e 29 % (para as categorias acidificação terrestre e eutrofização de água doce, respetivamente). No geral, os processos que apresentaram maiores impactes foram ambientais o transporte (até 55 %), a secagem e torrefação (até 33 %) e a combustão e geração de eletricidade (até 48 %). Através da análise de sensibilidade realizada para as diferentes condições de torrefação verificou-se que, apesar do produto obtido ter

características mais semelhantes ao carvão, para temperaturas de torrefação maiores, ocorre um maior consumo de energia. Esse consumo de energia leva a um maior consumo de biomassa, resultando em maiores impactos ambientais. Quando é utilizada apenas biomassa como fonte de energia a temperatura de 250 °C apresenta-se como a mais favorável. A utilização de gás de torrefação como fonte de energia para os processos de secagem e torrefação permite uma redução dos impactos ambientais, para todas as condições de torrefação. Para a maioria das categorias de impacto, a temperatura de torrefação de 300 °C apresenta os menores impactos ambientais, pois é gerada uma maior quantidade de gás de torrefação, com maior potencial para a produção de energia. Enquanto a combustão de gás de torrefação para a produção de energia for teórica, esta opção não é viável, ou seja, as condições de 250 °C; 30 min são as condições mais favoráveis, em termos ambientais. Através da análise de sensibilidade ao consumo de energia no processo de secagem, verificou-se que esta variável é importante do ponto de vista do consumo de biomassa, o que influencia todos os outros processos. Apesar destes resultados constatou-se que, em termos de ciclo de vida, os diferentes cenários estudados através das análises de sensibilidade resultaram em diferenças inferiores a 21 % nos impactos ambientais apresentados.

Para o cenário de geração máxima, correspondendo a 1270 GWh anuais, a central irá consumir cerca de 60 % mais de biomassa. Tendo em conta as potenciais limitações em termos de disponibilidade de biomassa no país, foram considerados diferentes cenários de importação de biomassa. O cenário de funcionamento a capacidade máxima apresenta impactos mais elevados, por kWh, em comparação com o cenário de geração média anual. Verificou-se que, para a maioria das categorias de impacto analisadas, o cenário de importação que apresenta menores impactos ambientais é a importação de eucalipto em estilha proveniente do Uruguai. Isto deve-se principalmente às distâncias de transporte, que são superiores para a importação de biomassa do Canadá, em comparação com o Uruguai, mas também devido à menor complexidade do processo de torrefação, em comparação com a peletização e a torrefação. Comparando a importação de diferentes tipos de combustível de biomassa provenientes do Canadá (estilha, péletes e péletes torrificadas) verificou-se que a importação de péletes de biomassa se apresenta como o cenário mais favorável. Quando comparados com outros sistemas de geração de eletricidade em Portugal (carvão e gás natural) verificou-se que, para a maioria das categorias analisadas, os cenários de geração máxima anual de eletricidade (utilizando biomassa importada) apresentam

maiores impactes ambientais. O cenário de geração média anual de eletricidade (utilização de biomassa endógena) apresenta menores impactes que estes sistemas de geração de eletricidade em mais que uma categoria de impacte. Conclui-se que, não havendo disponibilidade de biomassa endógena, um aumento da geração de eletricidade na central acima do valor médio anual (10 % de capacidade) pode resultar em impactes superiores à utilização de combustíveis fósseis como o carvão e o gás natural. A conversão da central para operar a biomassa florestal deve ter em conta a disponibilidade de biomassa endógena de modo a minimizar os impactes ambientais.

4.1. Principais limitações e trabalhos futuros

A análise da disponibilidade de biomassa endógena necessária para o abastecimento da central e respetiva proveniência estava fora do âmbito desta dissertação, pelo que se considerou que a biomassa (resíduos florestais) disponível nos locais selecionados para recolha estava totalmente disponível para abastecer a central, não tendo sido analisados os consumos de outras indústrias que utilizam esta matéria-prima. De modo a avaliar a influencia desta simplificação nos resultados foi considerado um cenário em que apenas 50 % da biomassa estaria disponível para a central, tendo resultado numa variação inferior a 27 %. O estudo do consumo de biomassa e das indústrias onde esta é utilizada em Portugal, tal como da disponibilidade da mesma apresenta-se como um possível tema para futuros trabalhos. A escassez de informação relativa às emissões resultantes dos processos de secagem e torrefação e de combustão e geração de eletricidade levou a que fosse necessário proceder a algumas simplificações. No caso das emissões resultantes da torrefação, foi considerada a emissão dos mesmos componentes para todas as diferentes espécies e condições de torrefação analisadas. Relativamente às emissões derivadas da combustão de biomassa para a geração de energia foram consideradas as emissões da combustão de biomassa natural para todos os tipos de combustíveis analisados (biomassa torrificada, péletes de biomassa). O estudo da variação das emissões associadas à combustão de diferentes tipos de combustíveis de biomassa (natural, torrificada, péletes) é algo a ser analisado em futuros trabalhos. Também a constituição do gás de torrefação e a forma como esta varia com diferentes condições de torrefação e com diferentes espécies de biomassa pode apresentar-se como tema de trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, P., Shirley, J. e McManus, M. (2015). “Comparative cradle-to-gate life cycle assessment of wood pellet production with torrefaction”, *Applied Energy*, 138, 367–380.
- Agbor, E., Oyedun, A. O., Zhang, X. e Kumar, A. (2016), “Integrated techno-economic and environmental assessments of sixty scenarios for co-firing biomass with coal and natural gas”, *Applied Energy*, 169, 433–449.
- Agência Portuguesa do Ambiente (2019) “Quadro Estratégico para a Política Climática (QEPiC)”. Acedido em 01 de setembro de 2019, em <https://apambiente.pt/>
- Alvarez, A., Nogueiro, D., Pizarro, C., Matos, M. e Bueno, J. (2018), “Non-oxidative torrefaction of biomass to enhance its fuel properties”, *Energy*, 158, 1–8.
- Arteaga-pérez, L., Vega, M., Rodríguez, L., e Flores, M. (2015), “Life-Cycle Assessment of coal – biomass based electricity in Chile: Focus on using raw vs torrefied wood”, *Energy for Sustainable Development*, 29, 81–90.
- Arteaga-Pérez, L., Segura, C., Espinoza, D., Radovic, L. e Jiménez, R. (2015), “Energy for Sustainable Development Torrefaction of *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus*: A combined experimental and modeling approach to process synthesis”, *Energy for Sustainable Development*, 29, 13–23.
- Associação Portuguesa de Energias Renováveis (2019) “Evolução da Produção de Eletricidade por Fonte em Portugal Continental (março de 2017 a março de 2019)”. Acedido em 15 de junho de 2019, em <https://www.apren.pt/>
- BASIS – Biomass Availability and Sustainability Information System (2015), “Report on conversion efficiency of biomass”, 1-20.
- Batidzirai, B., Mignot, A. P. R., Schakel, W. B., Junginger, H. M., e Faaij, A. P. C. (2013), “Biomass torrefaction technology: Techno-economic status and future prospects”, *Energy*, 62, 196–214.
- Baxter, L. (2005), “Biomass-coal co-combustion : opportunity for affordable renewable energy”, *FUEL*, 84, 1295-1302.
- Cardona, S., Javier, L., Valencia, V., Martínez, E. e Alberto, L. (2019), “Torrefaction of eucalyptus-tree residues: A new method for energy and mass balances of the process with the best torrefaction conditions”, *Sustainable Energy Technologies*

and Assessments, 31, 17–24.

Carrasco, J., Oporto, G., Zondlo, J. e Wang, J. (2013), “Torrefaction kinetics of Red Oak (*Quercus rubra*) in a Fluidized Reactor”, *BioResources*, 8, 5067-5082

Chen, W., Peng, J. e Bi, X. (2015), “A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 847–866.

Ciolkosz, D. e Wallace, R. (2011), “A review of torrefaction for bioenergy feedstock production”, *Biofuels, Bioprod. Bioref.*, 5, 317–329.

da Costa, T., Quinteiro, P., Tarelho, L., Arroja, L., e Dias, A. (2018), “Environmental impacts of forest biomass-to-energy conversion technologies: Grate furnace vs fluidised bed furnace”, *Journal of Cleaner Production*, 171, 153–162.

Dias, A. (2014), “Life cycle assessment of fuel chip production from eucalypt forest residues”, *Int J Life Cycle Assess*, 19, 705–717.

Direção Geral de Energia e Geologia (2018) “Relatório de Monitorização da Segurança de Abastecimento do Sistema Elétrico Nacional 2019-2040 (RMSA-E 2018)” Portugal, novembro de 2018. Acedido em 10 de setembro de 2019, em <http://www.dgeg.gov.pt/>

Frischknecht, R. et al., “Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods”, Final report Ecoinvent 2000, Swiss Centre for LCI, Suíça, 2003.

Garcia, R., Marques, P. e Freire, F. (2014), “Life-cycle assessment of electricity in Portugal”, *Applied Energy*, 134, 563–572.

Huijbregts M., Steinmann Z., Elshout P., Stam G., Verones F., Vieira M., et al., (2017), “ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level”, *Int J Life Cycle Assess*, 22:, 138 e 47

Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (2019) “6º Inventário Florestal Nacional - Principais resultados – relatório sumário”. Acedido em 10 de agosto de 2019, em <http://www2.icnf.pt/portal>

Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (2010) “Florestat – Aplicação para consulta dos resultados do 5º Inventário Florestal Nacional”. Acedido em 10 de agosto de 2019, em <http://www2.icnf.pt/portal>

Instituto Nacional de Estatística (2019), “Importações (kg) de bens por Local de origem, Tipo de bens (Nomenclatura combinada - NC6) e Meio de transporte; Anual”. Acedido em 23 de agosto de 2019, em <https://www.ine.pt>

Instituto Nacional de Estatística (2019), “Superfície ardida (ha) por Localização geográfica (NUTS - 2013) e Tipo de superfície ardida; Anual”. Acedido em 25 de agosto de 2019, em <https://www.ine.pt>

ISO (2006a) ISO 14040: Environmental management – life cycle assessment –

- principles and framework. International Organization for Standardization, Geneve
- ISO (2006b) ISO 14044: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Geneve
- Ferreira, J. (2019, 16 de junho) “É importante que Portugal tenha mais de uma centena de centrais a biomassa”, O Jornal Económico. Acedido em 01 de setembro de 2019, em <https://jornaleconomico.sapo.pt/>
- Kabayo, J., Marques, P., Garcia, R. e Freire, F. (2019), “Life-cycle sustainability assessment of key electricity generation systems in Portugal”, *Energy*, 176, 131–142.
- Kabir, M. e Kumar, A. (2012). “Comparison of the energy and environmental performances of nine biomass/coal co-firing pathways” *Bioresource Technology*, 124, 394–405.
- Keller, M. (2010), “Handbook of Emissions Factors for Road Transport (HBEFA)”, Tech. Rep, INFRAS, 3, 169-225.
- Ko, S. e Lautala, P. (2018), “Optimal Level of Woody Biomass Co-Firing with Coal Power Plant Considering Advanced Feedstock Logistics System”, *Agriculture*, 8, 1-21.
- Pronobis, M. e Wojnar, W. (2013), “The impact of biomass co-combustion on the erosion of boiler convection surfaces”, *Energy Conversion and Management*, 74, 462–470.
- Lourinho, G. e Brito, P. (2014), “Assessment of biomass energy potential in a region of Portugal (Alto Alentejo)”, *Energy*, 1-13.
- Marques, P., Kabayo, J., Garcia, R. e Freire, F. (2018), “Avaliação ambiental de ciclo de vida dos principais sistemas de geração de eletricidade em Portugal”, *Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida*, 2, 110-127.
- Martínez, M., Dupont, C., Perez, D., Míguez-Rodríguez, L., Grateau, M., Thiéry, S., Tamminen, T., Meyer, X. e Gourdon, C. (2019), “Assessing the suitability of recovering shrub biowaste involved in wildland fires in the South of Europe through torrefaction mobile units”, *Journal of Environmental Management*, 23, 551–560.
- Mcnamee, P., Adams, P., Mcmanus, M., Dooley, B., Darvell, L., Williams, A. e Jones, J. (2016), “An assessment of the torrefaction of North American pine and life cycle greenhouse gas emissions”, *Energy Conversion and Management*, 113, 177–188.
- Miedema, J., Benders, R., Moll, H. e Pierie, F. (2017), “Renew, reduce or become more

- efficient? The climate contribution of biomass co-combustion in a coal-fired power plant”, *Applied Energy*, 187, 873–885.
- Morrison, B. e Golden, J. (2017), “Life cycle assessment of co-firing coal and wood pellets in the Southeastern United States”, *Journal of Cleaner Production*, 150, 188–196.
- Ndibe, C., Maier, J. e Scheffknecht, G. (2015), “Combustion, cofiring and emissions characteristics of torrefied biomass in a drop tube reactor”, *Biomass and Bioenergy*, 79, 105-115.
- Netto, C. (2008), “Potencial da biomassa florestal residual para fins energéticos de três concelhos do distrito de Santarém”, Dissertação em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologias – Universidade Nova de Lisboa
- Nunes, L., Matias, J. e Catalão, J. (2014), “Biomass waste co-firing with coal applied to the Sines Thermal Power Plant in Portugal”, *FUEL*, 132, 153–157.
- Roni, M., Chowdhury, S., Mamun, S., Marufuzzaman, M., Lein, W. e Johnson, S. (2017), “Biomass co-firing technology with policies, challenges, and opportunities: A global review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1089–1101.
- Royo, J., Sebastián, F., García-Galindo, D., Gómez, M. e Díaz, M. (2020), “Large-scale analysis of GHG (greenhouse gas) reduction by means of biomass co-firing at country-scale: Application to the Spanish case”, *Energy*, 48, 255–267.
- Schakel, W., Meerman, H., Talaei, A., Ramírez, A. e Faaij, A. (2014), “Comparative life cycle assessment of biomass co-firing plants with carbon capture and storage”, *Applied Energy*, 131, 441–467.
- SeaRoutes, Acedido em 01 de setembro de 2019, disponível em <https://www.searoutes.com>
- Sikkema, R., Steiner, M., Junginger, M., Hiegl, W., Hansen, M. e Faaji, A. (2011), “The European wood pellet markets: current status and prospects for 2020”, *Biofuels, Bioprod. Bioref.*, 5, 250–278.
- Sousa, C. (2009), “A biomassa florestal como fonte de energia renovável em Portugal”, *Centro da Biomassa para a Energia*, 1-43.
- Spielmann, M., Bauer, C., Dones, R., Tuchschnid, M. (2007) *Transport Services. ecoinvent report no. 14. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.*
- Tabata, T., Torikai, H., Tsurumaki, M., Genchi, Y. e Ukegawa, K. (2011), “Life cycle assessment for co-firing semi-carbonized fuel manufactured using woody biomass with coal: A case study in the central area of Wakayama, Japan”, *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews, 15, 2772–2778.

- Thành, K., Commandré, J., Valette, J., Volle, G. e Meyer, M. (2015), “Detailed identification and quantification of the condensable species released during torrefaction of lignocellulosic biomasses”, *Fuel Processing Technology*, 139, 226–235.
- Tsalidis, G., Joshi, Y., Korevaar, G. e Jong, W. (2014), “Life cycle assessment of direct co-firing of torrefied and/or pelletised woody biomass with coal in The Netherlands”, *Journal of Cleaner Production*, 81, 168–177.
- Tumuluru, J., Sokhansanj, S., Hess, J., Wright, C. e Boardman, R. (2011), “A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications”, *Industrial Biotechnology*, 7, 384-401.
- Turconi, R., Boldrin, A. e Astrup, T. (2013), “Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations.”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 555–565.

ANEXO A

Tabela 0.1. Fatores de emissão de ciclo de vida para geração de energia para diversas tecnologias (kg/MWh de energia gerada) (Turconi et al. (2013))

Fonte de energia	CO ₂ eq	NO _x	SO ₂
Carvão	660-1050	0.3-3.9	0.03-6.7
Biomassa	8.5-130	0.08-1.7	0.03-0.94

APÊNDICE A

A.1. CAPACIDADE DESTROÇADOR NA CENTRAL

O destroçador fixo foi baseado no estudo de Adams et al. (2015), onde é referido um destroçador com uma capacidade de 5 t/h, com um consumo de 1 kWh por tonelada de madeira destroçada, com um funcionamento 7200 h por ano e uma massa de 12 t de aço. Dado que na central será feito o destroçamento da biomassa proveniente da área envolvente da central a capacidade do destroçador foi calculada com base na biomassa gerada a partir dos concelhos que se inserem nessa área. Verificou-se que essas áreas apresentam uma produção anual de 128 755 t de biomassa. Tendo em conta possíveis variações deste valor, foi considerado um destroçador com uma capacidade de 20 t/h, e funcionamento anual de 7200 h, ou seja, uma capacidade de destroçamento de 144 000 t de biomassa por ano. Considerou-se o mesmo consumo de energia por tonelada e que a massa do destroçador aumenta de forma linear com o aumento da capacidade, resultando num equipamento de 48 t de aço.

A.2. CONSUMOS DE BIOMASSA E DISTÂNCIAS DE TRANSPORTE

Na Tabela 0.1. encontra-se, de forma resumida, os restantes cenários resultantes das análises de sensibilidade ao consumo de energia na secagem, às diferentes condições de torrefação e à fonte de energia para a secagem e torrefação, para além do cenário base referido na secção 2.2.1. (Condições de torrefação – 250 °C; 30 min; Energia consumida na secagem – 6 MJ/kg; Fonte de energia para os processos de secagem e torrefação – Biomassa). Na Tabela 0.2. encontra-se as áreas florestais consideradas e a biomassa necessária para cada um dos cenários referidos na Tabela 0.1. A metodologia utilizada para o cálculo destes valores foi a mesma da explicada na secção 2.2.2.4. Na Tabela 0.3 encontram-se as distâncias percorridas para cada um dos cenários referidos na Tabela 0.1. A metodologia utilizada para o cálculo destes valores foi a mesma da explicada na secção 2.2.2.4.

Tabela 0.1. Restantes cenários analisados

Cenário	Condição de torrefação	Energia consumida na secagem (MJ/kg de água removida)	Fonte de energia para os processos de secagem e torrefação
A	250 °C/30 min	3	Biomassa
B	280 °C/30 min		
C	300 °C/30 min		
D	280 °C/30 min	6	
E	300 °C/30 min		
F	250 °C/30 min		
G	280 °C/30 min	9	
H	300 °C/30 min		
I	250 °C/30 min		Biomassa + Gás de Torrefação
J	280 °C/30 min	3	
K	300 °C/30 min		
L	250 °C/30 min		
M	280 °C/30 min		
N	300 °C/30 min		
O	250 °C/30 min	9	
P	280 °C/30 min		
Q	300 °C/30 min		

Tabela 0.2. Produção anual de biomassa para abastecimento da central para cada cenário analisado

Cenário	Área florestal em 2019 (ha)	Biomassa disponível (t/ano)
A	780 793	985 314
B	875 072	1 103 725
C	912 269	1 153 453
D	953 897	1 208 974
E	1 000 454	1 268 336
F	931 239	1 179 628
G	1 033 423	1 311 385
H	1 088 678	1 382 017
I	776 082	979 155
J	810 193	1 023 869

K	810 193	1 023 869
L	843 674	1 066 092
M	894 862	1 130 235
N	912 269	1 153 453
O	912 269	1 153 453
P	980 455	1 242 567
Q	1 000 454	1 268 336

Tabela 0.3. Distâncias percorridas para cada cenário analisado

Cenário	Distância rodoviária (km)	Distância ferroviária (km)
A	57	210
B	58	234
C	55	246
D	54	257
E	57	270
F	58	257
G	59	270
H	56	293
I	58	199
J	56	210
K	56	210
L	56	210
M	56	246
N	55	246
O	55	246
P	57	270
Q	57	270

A.3. CONSUMOS DE BIOMASSA NOS PROCESSOS DE SECAGEM E TORREFAÇÃO

Tabela 0.4. Consumos de biomassa nos processos de secagem e torrefação

Cenário	Biomassa recolhida (t/ano) rodoviária (km)	Biomassa utilizada para gerar energia para a secagem e torrefação (t/ano)	Biomassa disponível após secagem e torrefação (t/ano)

A	985 314	177 176	398 130
B	1 103 725	188 935	376 157
C	1 153 453	190 463	345 573
D	1 208 974	301 966	376 023
E	1 268 336	307 722	344 702
F	1 179 628	375 552	397 098
G	1 311 385	412 157	375 519
H	1 382 017	423 822	344 082
I	979 155	150 245	398 196
J	1 023 869	105 267	376 652
K	1 023 869	53 550	346 252
L	1 066 092	250 460	397 962
M	1 130 235	219 579	376 193
N	1 153 453	173 721	345 573
O	1 153 453	349 949	397 427
P	1 242 567	332 598	375 854
Q	1 268 336	292 303	344 702

A.4. CÁLCULO INFRAESTRUTURA DE TORREFAÇÃO

A infraestrutura de torrefação, foi baseada no estudo Kabir e Kumar (2012). Para o cálculo da capacidade de produção da central foi considerado o cenário máximo de produção (1270 GWh) e as condições de torrefação de 250 °C; 30 min. Foi obtida a capacidade de 1 050 000 t/ano de biomassa torreficada, tendo em conta os valores obtidos nas Tabelas 2.13. (geração de 508 GWh/ano) e a quantidade de biomassa necessária para a geração dos restantes 762 GWh (através da importação de biomassa em estilha):

$$397\,897\,t + 620\,633\,t = 1\,018\,530\,t$$

Tabela 0.5. Inventário para a infraestrutura de torrefação (baseado em Kabir e Kumar (2012))

Input	Central de torrefação (400 000 t/ano)
Aço (t)	4 218
Cimento (t)	13 071
Alumínio (t)	36

A.5. RESULTADOS DAS ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

Alterações Climáticas

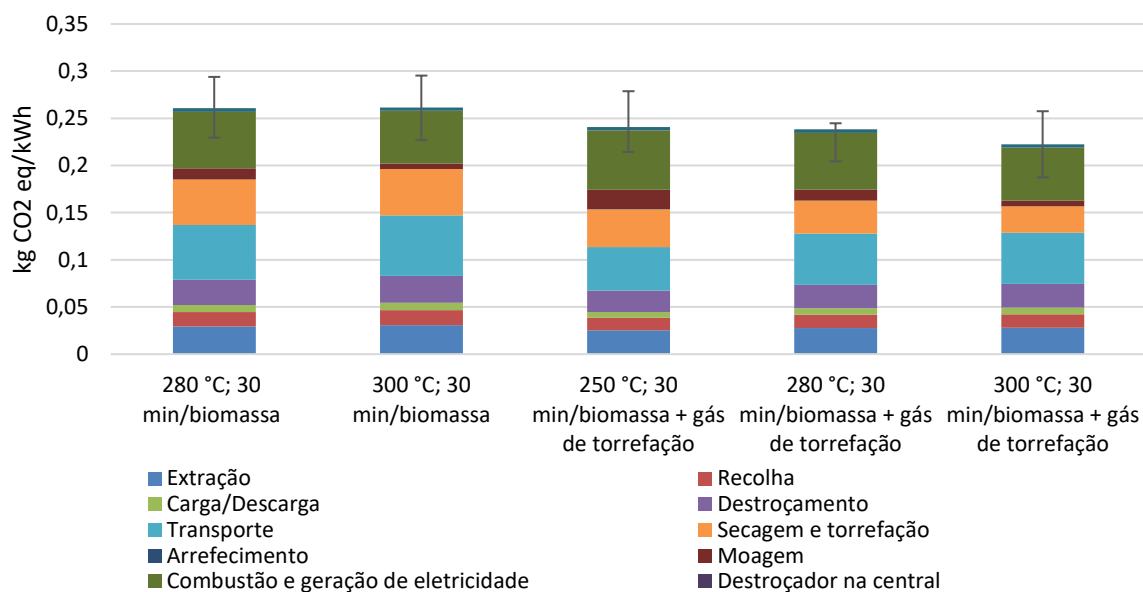


Figura 0.1. Resultados da análise para a geração anual média para a categoria de alterações climáticas

Depleção da camada de ozono

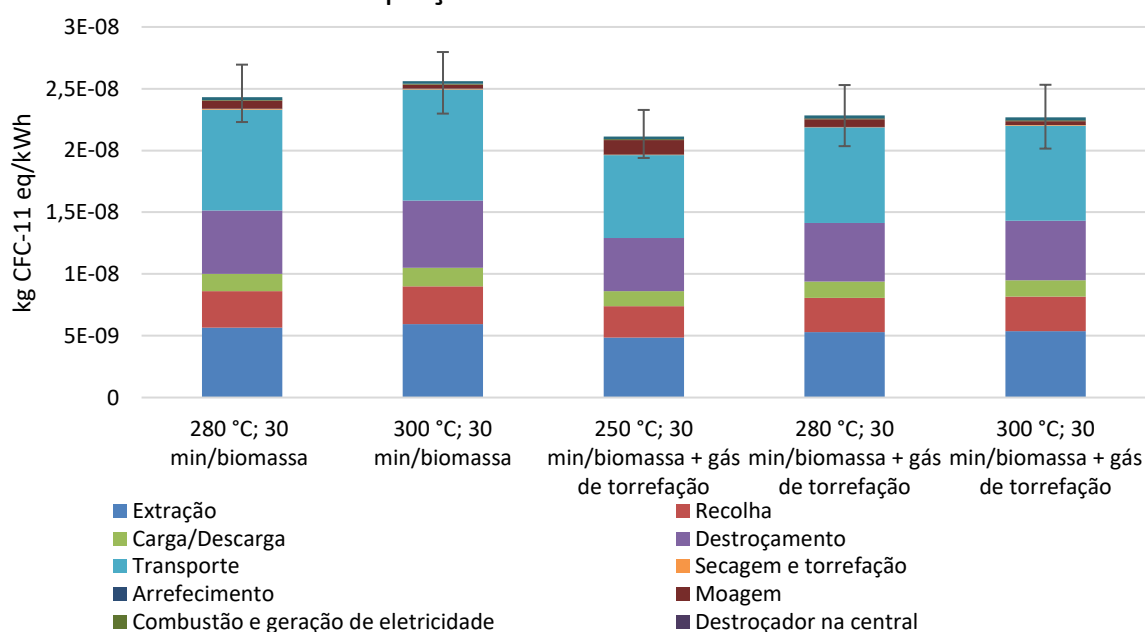


Figura 0.2. Resultados da análise para a geração anual média para a categoria de depleção da camada de ozono

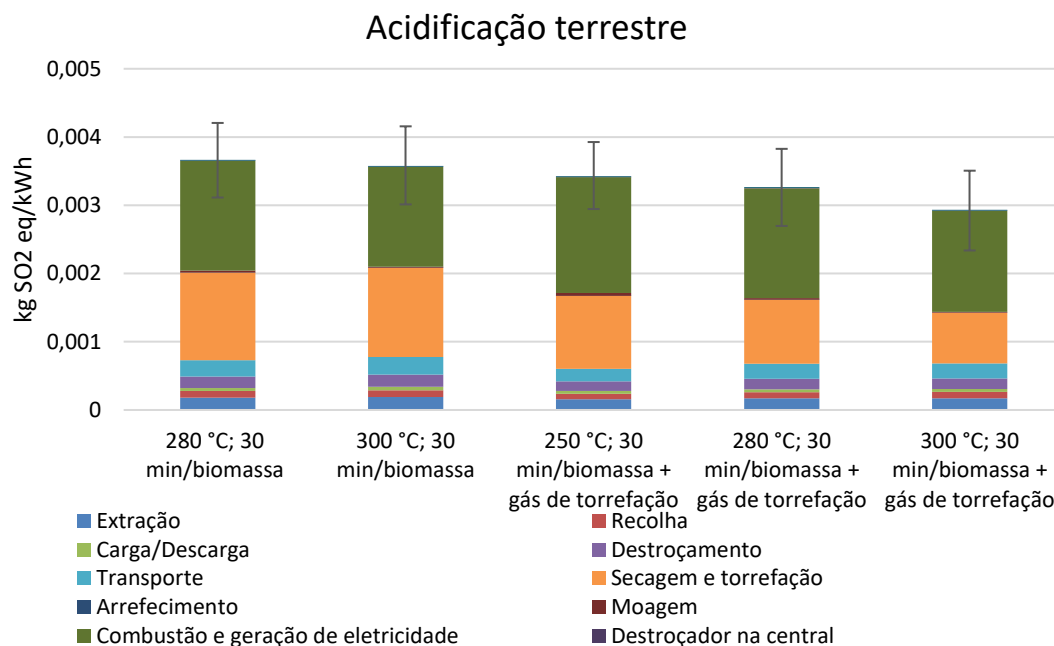


Figura 0.3. Resultados da análise para a geração anual média para a categoria de acidificação terrestre

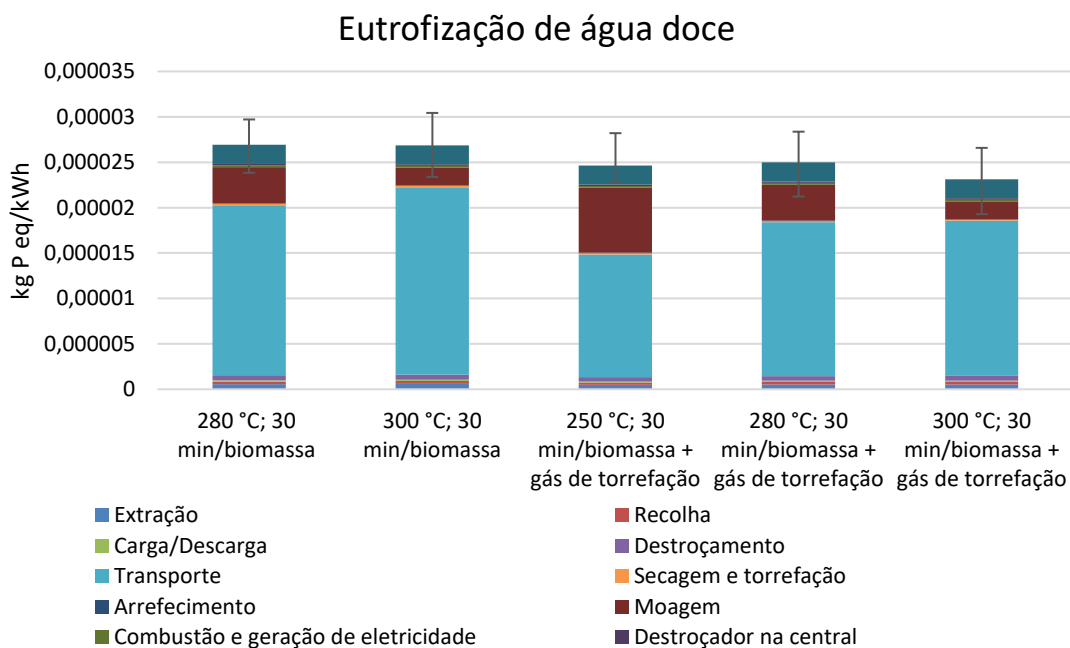


Figura 0.4. Resultados da análise para a geração anual média para a categoria de eutrofização de água doce

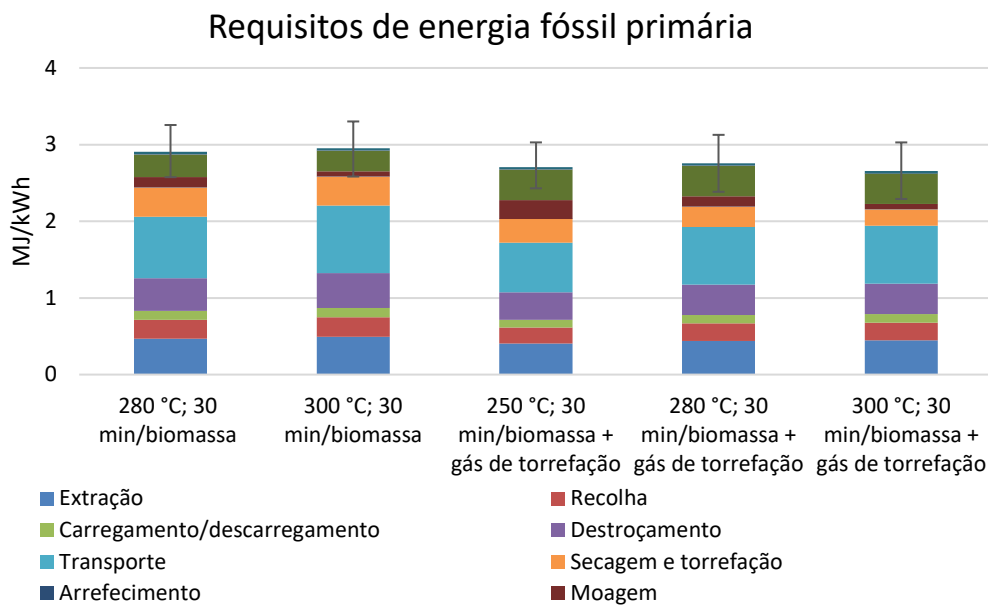


Figura 0.5. Resultados da análise para a geração anual média para a categoria de requisitos de energia fóssil primária

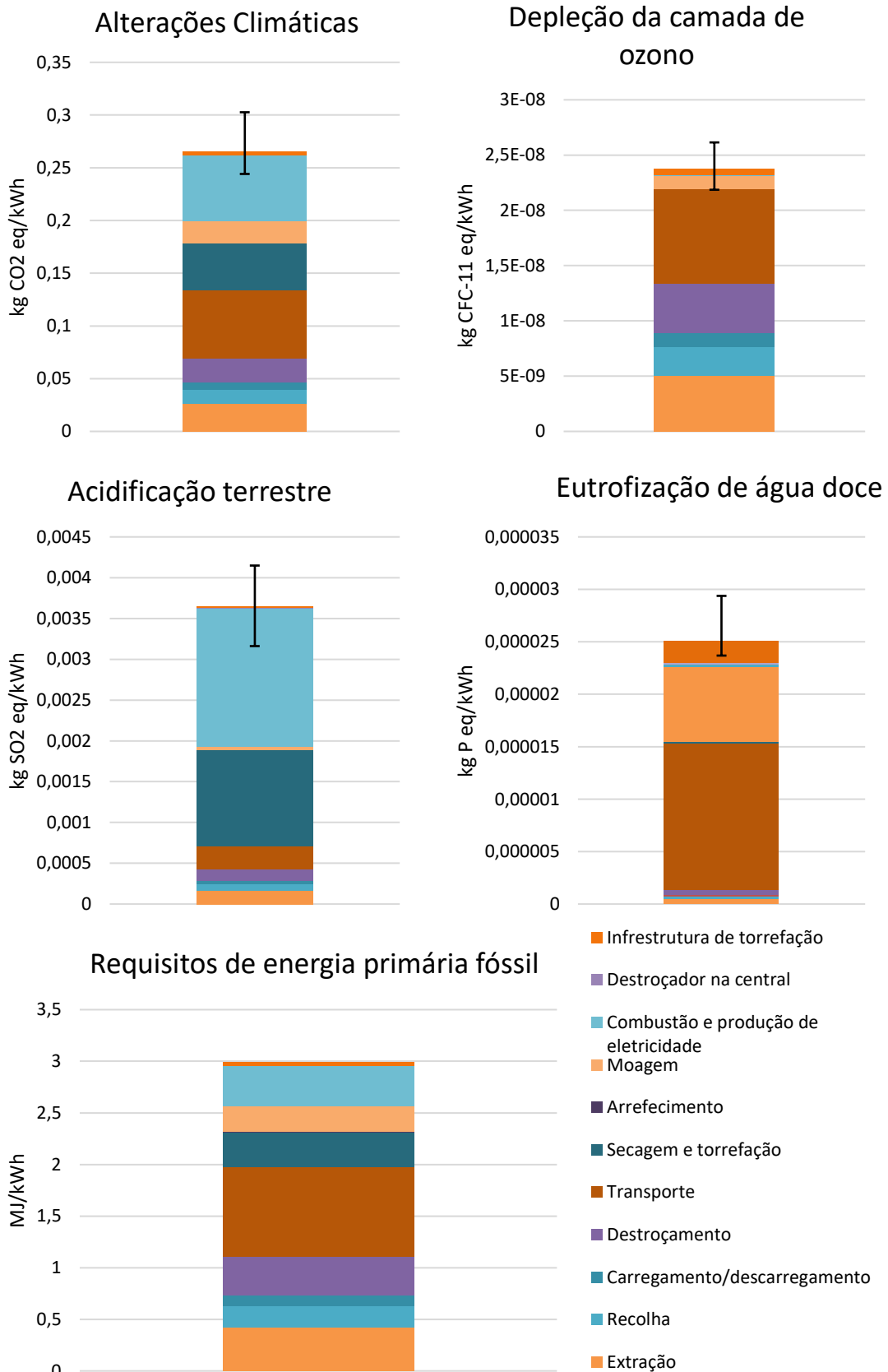


Figura 0.6. Resultados obtidos para a análise da geração média anual para uma disponibilidade de 50 % de biomassa