



**Universidade de Aveiro** Departamento de Química  
2018

**João Guilherme  
Andrade Serra**

**Modelação dos impactes ambientais de sistemas de  
valorização de biomassa florestal**



## **DECLARAÇÃO**

Declaro que este relatório é integralmente da minha autoria, estando devidamente referenciadas as fontes e obras consultadas, bem como identificadas de modo claro as citações dessas obras. Não contém, por isso, qualquer tipo de plágio quer de textos publicados, qualquer que seja o meio dessa publicação, incluindo meios eletrônicos, quer de trabalhos acadêmicos.





**João Guilherme  
Andrade Serra**

**Modelação dos impactes ambientais de sistemas de  
valorização de biomassa florestal**

Monografia apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Biotecnologia Industrial e Ambiental, realizada sob a orientação científica da Doutora Ana Cláudia Dias do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, e do Doutor João Nunes, presidente e CEO da Associação BLC3-Campus de Tecnologia e Inovação.



Dedico este trabalho à minha família, à minha namorada e aos meus amigos,  
por todo o apoio dado.





## **o júri**

Presidente

Prof. Doutor Jorge Manuel Alexandre Saraiva  
investigador auxiliar do Departamento de Química da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor José Vicente Ferreira  
professor coordenador da Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Viseu

Prof. Doutora Ana Cláudia Relvas Vieira Dias  
investigadora auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

Um agradecimento especial a todas as pessoas que acreditaram e sempre me apoiaram neste trajeto, mesmo quando tudo parecia impossível. Este trajeto acadêmico que realizei apresentou altos e baixos que consegui superar e alcançar o objetivo principal, com a realização deste trabalho, demonstrando carácter e determinação para projetos futuros.

À Doutora Ana Cláudia Dias agradeço toda a disponibilidade, paciência por todas as minhas dúvidas e todos os ensinamentos que me forneceu enriquecendo o meu conhecimento durante este trabalho.

Ao Doutor João Nunes agradeço a oportunidade de possibilitar a realização deste estudo em contacto com o mundo empresarial, pela amizade e pelos ensinamentos.

A todos os colaboradores da BLC3, pelo excelente convívio e ambiente de trabalho proporcionados, bem como a generosidade e carinho. Agradecer especialmente a todos os elementos com quem partilhei o meu dia a dia, durante os últimos meses na residência do centro pela amizade e palavra amiga e de incentivo.

O maior agradecimento é dirigido aos meus pais e irmão, por sempre me terem acompanhado neste trajeto, que me dirigiram uma palavra de conforto nas fases más, pelos esforços que sempre fizeram para me proporcionar o melhor na minha vida académica, e pela dedicação, apoio, confiança, paciência e amor demonstrado. Vocês são o melhor da minha vida.

À minha namorada por me ter apoiado quando mais precisei, e nunca ter duvidado das minhas capacidades e empenho. A ti agradeço do fundo do meu coração.



## palavras-chave

Avaliação de Ciclo de Vida, biomassa florestal, impactes ambientais, poluição atmosférica, sistemas de valorização

## resumo

Para minimizar os impactes negativos associados às energias não renováveis, começou a estudar-se outras formas de obtenção de energia mais sustentáveis a nível ambiental e económico, e que apresentassem baixos impactes ambientais sobre a sociedade. As energias renováveis (eólica, hídrica, biomassa, solar, geotérmica), permitiram alcançar estes objetivos, e até aos dias de hoje têm sido bastante estudadas, de modo a poderem ser usadas de forma sustentável e renovável, gerando a energia necessária para a sociedade humana.

A biomassa é uma das fontes de energia renováveis mais utilizada, para produção de calor ou eletricidade e combustíveis, pois apresenta emissões neutras de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para a atmosfera, mas apresenta também alguns impactes negativos associados à combustão, levando a um aumento da poluição atmosférica e consequentemente a danos na sociedade humana.

Este trabalho teve como objetivo modelar os impactes ambientais associados a sistemas que utilizam a biomassa florestal e comparar, de acordo com o produto gerado, quais os processos dentro desses sistemas mais prejudiciais para o meio ambiente, através da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Os sistemas caracterizados neste estudo foram a queima a céu aberto, lareiras com câmara de combustão aberta, recuperadores de calor e centrais elétricas dedicadas a biomassa. As unidades funcionais usadas neste estudo foram 1 MJ de calor libertado na queima a céu aberto, 1 MJ de energia térmica produzida para as lareira e recuperadores de calor e 1 MJ de energia elétrica para as centrais. Os dados de inventário usados neste estudo foram obtidos a partir de bibliografia e introduzidos no programa SimaPro, usando o método ReCiPe 2016 Midpoint V1.01.

Os resultados obtidos permitiram concluir, para as categorias de impacto em estudo, que na queima a céu aberto, a queima de resíduos florestais secos apresentou menos impacto em relação à queima de resíduos florestais húmidos, na categoria de aquecimento global e formação de PM. Em relação às restantes categorias de impacto os impactes foram iguais, apenas existindo contribuição da fase de gestão florestal. Na produção de energia térmica as lareiras apresentaram maior impacto em relação aos recuperadores de calor. Os recuperadores a lenha apresentaram maior impacto em relação aos recuperadores a pellets, e os recuperadores de tecnologia moderna têm menos impactes que os recuperadores tradicionais. Na produção de energia elétrica, a central a grelha apresentou maior impacto que a central de leito fluidizado. O consumo de diesel, nas lareiras e recuperadores de calor, e a gestão florestal, em todos os sistemas, demonstraram ser os maiores responsáveis pelos impactes em quase todas as categorias de impacto em estudo.



**keywords**

Life Cycle Assessment, forest biomass, environmental impacts, atmospheric pollution, valorization systems

**abstract**

To minimize the negative impacts associated with non-renewable energies, other forms of energy production that are more sustainable at the environmental and economic levels and that have low environmental impacts on society have started to be studied. Renewable energies (wind, hydropower, biomass, solar, geothermal) allowed to achieve these objectives, and so far, they have been extensively studied, so that they can be used in a sustainable and renewable way, generating the necessary energy for society.

Biomass is one of the renewable energy source more widely used to produce heat or electricity and fuels because it presents neutral emissions of CO<sub>2</sub> into the atmosphere but also has some negative, leading to an increase in air pollution and consequently damage to human society.

The objective of this work was to mode the environmental impacts associated to systems that use forest biomass and to compare, according to the product generated, the processes within those systems that are most harmful to the environment, through Life Cycle Assessment (LCA). The systems characterized in this study were open burning, open-burning fireplaces, stoves and biomass-based power stations. The functional units used in this study were 1 MJ of heat released in open burning, 1 MJ of thermal energy produced for the fireplace and stoves and 1 MJ of electricity for the power plants. The inventory data used in this study were obtained from literature and introduced in the SimaPro software, using the ReCiPe 2016 Midpoint V1.01 method.

The results obtained allowed to conclude, for the impact categories under study, that the burning of dry forest residues had less impact in relation to the burning of wet forest residues in the category of global warming and PM formation. Regarding the other impact categories, the impacts were the same, only the contribution of the forest management phase. In the production of thermal energy, the fireplaces had a greater impact in relation to the stoves. Wood stoves have a greater impact in relation to pellet stoves, and modern technology stoves have fewer impacts than traditional stoves. In the production of electric power, the grate power plant had greater impact than the fluidized bed power plant. Diesel consumption in fireplaces and stoves, and forest management in all systems have been shown to be most responsible for impacts in almost all study impact categories.





# Índice

<b>agradecimentos</b> .....	<b>XI</b>
<b>resumo</b> .....	<b>XIII</b>
<b>abstract</b> .....	<b>XV</b>
<b>Índice</b> .....	<b>XVII</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>XIX</b>
<b>Índice de Tabelas</b> .....	<b>XXI</b>
<b>Lista de Símbolos e Abreviaturas</b> .....	<b>XXIII</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1. Enquadramento e objetivo .....	1
1.2. Estrutura da dissertação .....	2
<b>2. Estado de arte</b> .....	<b>3</b>
2.1. Biomassa como fonte de biorecursos .....	3
2.2. Tecnologias de conversão de biomassa .....	13
2.2.1. Combustão direta .....	14
2.2.2. Gasificação .....	17
2.2.3. Pirólise .....	17
2.2.4. Fermentação .....	18
2.2.5. Digestão anaeróbia .....	19
2.3. Impactes ambientais da utilização da biomassa .....	20
2.3.1. Perspetiva histórica da poluição atmosférica .....	20
2.3.2. Principais poluentes associados à combustão da biomassa .....	22
2.3.2.1. Gases .....	23
2.3.2.2. Material particulado .....	25
2.4. Avaliação de Ciclo de Vida .....	26
<b>3. Metodologia</b> .....	<b>29</b>
3.1. Objetivo e âmbito .....	29
3.1.1. Unidade funcional .....	29
3.1.2. Fronteiras dos sistemas .....	29
3.2. Inventário .....	33
3.2.1. Queima a céu aberto .....	33
3.2.2. Lareiras com câmara de combustão aberta .....	34
3.2.3. Recuperadores de calor .....	35
3.2.4. Centrais elétricas dedicadas a biomassa .....	37
3.3. Avaliação do impacto ambiental .....	39
<b>4. Resultados e Discussão</b> .....	<b>41</b>
4.1. Queima a céu aberto .....	41
4.2. Lareiras com câmara de combustão aberta .....	43
4.3. Recuperadores de calor .....	44
4.4. Centrais elétricas dedicadas de biomassa .....	46
<b>5. Conclusão</b> .....	<b>53</b>
<b>6. Referências Bibliográficas</b> .....	<b>55</b>



## Índice de Figuras

<b>Figura 1:</b> Constituintes da árvore que podem ser valorizados (adaptado de Searle & Malins, 2013) .....	7
<b>Figura 2:</b> Classificação dos combustíveis à base de madeira (adaptado de ENGASP - Engenharia e Técnicas Afins Lda., 2014) .....	8
<b>Figura 3:</b> Ciclo do carbono (adaptado de Vieira, 2009).....	9
<b>Figura 4:</b> Tecnologias de conversão de biomassa (adaptado de Pinto, 2014).....	13
<b>Figura 5:</b> Nevoeiro tóxico em Donora, Pensilvânia em 1948 (a) e o “Great Smog” em Londres em 1952 (b) .....	21
<b>Figura 6:</b> Tamanho relativo da matéria particulada (adaptado de WHO, 2016) .....	25
<b>Figura 7:</b> Fases de uma ACV (ISO 14044, 2006) .....	27
<b>Figura 8:</b> Fronteiras de sistema, a) queima a céu aberto de resíduos secos e b) queima a céu aberto de resíduos húmidos .....	30
<b>Figura 9:</b> Fronteira de sistema de lareiras com câmara de combustão aberta .....	30
<b>Figura 10:</b> Fronteiras de sistema, a) recuperador de calor a lenha e b) recuperador de calor a pellets .....	31
<b>Figura 11:</b> Fronteiras de sistema, a) recuperador de calor tradicionais e b) recuperador de calor de tecnologia moderna .....	31
<b>Figura 12:</b> Fronteiras de sistemas, a) central elétrica de grelha a madeira de pinheiro bravo; b) central elétrica de leito fluidizado a madeira de pinheiro bravo .....	32
<b>Figura 13:</b> Fronteiras de sistemas, a) central elétrica de grelha a resíduos de eucalipto; b) central elétrica de leito fluidizado a resíduos de eucalipto.....	32
<b>Figura 14:</b> Contribuições relativas aos sistemas de queima a céu aberto nas categorias de impactos ambientais em estudo .....	48
<b>Figura 15:</b> Contribuições relativas aos sistemas de lareiras e recuperadores de calor nas categorias de impactos ambientais em estudo .....	49
<b>Figura 16:</b> Contribuições relativas aos sistemas de centrais elétricas dedicadas nas categorias de impactos ambientais em estudo .....	50



## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1:</b> Vantagens e desvantagens da biomassa como fonte de energia renovável .....	6
<b>Tabela 2:</b> Biomassa florestal em Portugal (adaptado de Nunes, 2015).....	10
<b>Tabela 3:</b> Centrais termoelétricas com utilização de biomassa existentes em Portugal (adaptado de INEGI, 2016).....	12
<b>Tabela 4:</b> Proporções relativas dos produtos de pirólise comparado com os obtidos da gasificação (adaptado de Pinto, 2014).....	18
<b>Tabela 5:</b> Dados de inventário referentes à queima de céu aberto, expresso por 1 MJ de calor libertado.....	34
<b>Tabela 6:</b> Dados de inventário referentes às lareiras com câmara de combustão aberta, expresso por 1 MJ de energia térmica produzida .....	35
<b>Tabela 7:</b> Dados de inventário referentes aos recuperadores de calor (lenha e pellets) expresso por 1 MJ de energia térmica produzida .....	36
<b>Tabela 8:</b> Dados de inventário referentes aos recuperadores de calor (tradicionais e tecnologia moderna) expressos por 1 MJ de energia térmica produzida .....	37
<b>Tabela 9:</b> Dados de inventário referentes às centrais elétricas dedicadas à biomassa (resíduos florestais de eucalipto) expressos por 1 MJ de energia elétrica produzida .....	38
<b>Tabela 10:</b> Dados de inventário referentes às centrais elétricas dedicadas à biomassa (madeira de pinheiro) expressos por 1 MJ de energia elétrica produzida .....	38
<b>Tabela 11:</b> Resultados totais da avaliação de impactes ambientais associados à produção de 1 MJ de energia térmica e elétrica a partir da combustão de resíduos florestais, para cada sistema de valorização .....	42



## **Lista de Símbolos e Abreviaturas**

**%**- Percentagem

**≈** - Aproximadamente

**μm**- Micrómetro

**ACV**- Avaliação de Ciclo de Vida

**AICV**- Avaliação de Impactes de Ciclo de Vida

**C** – Carbono

**CE**- Central elétrica

**CH<sub>4</sub>**- Metano

**CN**- Carbono negro

**CO**- Monóxido de carbono

**CO<sub>2</sub>**- Dióxido de carbono

**COV**- Compostos orgânicos voláteis

**COVNM**- Compostos orgânicos voláteis não metânicos

**CO<sub>x</sub>** - Óxidos de carbono

**DGEG**- Direção Geral de Energia e Geologia

**EDP**- Energia de Portugal

**EJ**- Exajoule

**EN**- Norma Europeia

**eq.** - equivalente

**g**- Grama

**GEE**- Gases com efeito de estufa

**Gha**- Giga hectare

**GWh**- Giga watt hora

**H**- Hidrogénio

**h.** - Humidade

**IEA-** Agência Internacional de Energia

**ISO-** Organização Internacional de Normalização

**kg-** Quilograma

**km-** Quilometro

**kWh-** Quilo watt hora

**m<sup>3</sup>-** Metro cúbico

**MJ-** Megajoule

**MW-** Megawatt

**MW<sub>e</sub>-** Megawatt elétrico

**N-** Azoto

**NH<sub>3</sub> -** Amoníaco

**NO-** Monóxido de azoto

**NO<sub>2</sub> -** Dióxido de azoto

**NO<sub>x</sub>-** Óxidos de azoto

**O<sub>2</sub>-** Oxigénio

**O<sub>3</sub>-** Ozono

**°C-** Graus Celsius

**OMS-** Organização Mundial de Saúde

**P-** Fósforo

**PAH -** Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos

**PCI-** Poder calorífico inferior

**PM-** Material particulado

**QCA-** Queima a céu aberto

**RC-** Recuperador de calor

**RER-** Recursos Energéticos Renováveis

**RF-** Resíduos florestais

**S-** Enxofre

**SO<sub>2</sub>-** Dióxido de enxofre

**SO<sub>3</sub> -** Trióxido de enxofre



**SO<sub>x</sub>** - Óxidos de enxofre

**t** – Tonelada

**UE**- União Europeia



# **1. Introdução**

## **1.1. Enquadramento e objetivo**

Desde sempre, o ser humano tem necessitado de energia para subsistir. Uma das formas de obter essa energia foi através dos combustíveis fósseis. Estes que, desde a revolução industrial, são o ponto chave do desenvolvimento tecnológico, económico e social. Até aos dias de hoje os combustíveis fósseis têm-se mantido dominantes em termos da sua utilização energética a nível mundial, contudo, vários fatores negativos estão associados aos mesmos.

Esses fatores caracterizam-se pela sua escassez que tem aumentado ao longo do tempo, devido às elevadas dependências energéticas por parte de vários países, bem como pela sua contribuição para as alterações climáticas e aumento do efeito de estufa, causada pela combustão destes combustíveis. Para prevenir o aumento dessas alterações climáticas, os líderes mundiais começaram a procurar outras formas alternativas de obtenção de energia, mais eficazes a nível energético e também mais sustentáveis e amigas do ambiente. As fontes de energia renováveis, que englobam a energia solar, hídrica, eólica, geotérmica, biomassa, entre outras, captam bastante interesse devido a serem fontes inesgotáveis ao contrário dos combustíveis fósseis, e apresentarem reduzidas emissões de gases com efeito de estufa (GEE).

No contexto das energias renováveis, a utilização da biomassa tem mostrado bons resultados em vários processos de obtenção de energia. Em países em desenvolvimento, a biomassa tem sido a principal fonte de energia para uso doméstico e aquecimento, para várias famílias. Dada a sua fácil acessibilidade e relevância no plano energético, a biomassa tem sido alvo de vários estudos científicos de modo a ser rentabilizada ao máximo. Contudo, a exploração desta fonte renovável tem sido relacionada com diversos problemas, quer ambientais quer energéticos, exigindo um estudo complexo sobre até onde o seu desenvolvimento poderá chegar sem comprometer o ambiente e o ser humano.

É neste contexto que surge o presente trabalho, que tem como objetivo o estudo da modelação dos impactos ambientais de sistemas de valorização da biomassa florestal numa perspetiva de ciclo de vida, de forma a fazer-se uma comparação entre vários sistemas de queima e valorização energética, em termos ambientais. Os sistemas de queima/valorização analisados são a queima a céu aberto, lareiras com câmara de combustão aberta, recuperadores de calor e centrais elétricas dedicadas a biomassa.

## **1.2. Estrutura da dissertação**

A dissertação está estruturada em 5 capítulos que se passam a apresentar.

O primeiro capítulo é um capítulo introdutório, composto pelo enquadramento, onde se explica o âmbito, o contexto geral do tema escolhido, os principais objetivos, as motivações que levaram à escolha da temática e as linhas orientadoras da dissertação.

No capítulo 2, mostra-se a importância da biomassa como fonte de biorecursos, a nível global e em Portugal, as várias tecnologias de conversão da biomassa, os impactes ambientais derivados da utilização da biomassa, numa perspetiva histórica, e quais os principais poluentes associados à combustão da biomassa.

Este capítulo é ainda dedicado à descrição da metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV) de um produto, com base nas normas ISO 14040 e ISO 14044, que engloba as fases de descrição do objetivo e âmbito, análise do inventário, avaliação de impacto e interpretação. É também apresentada uma breve descrição do software de ACV utilizado neste trabalho, o SimaPro.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia deste estudo, que contém os objetivos, a unidade funcional e as fronteiras utilizadas. Neste capítulo é também apresentado o inventário referente a cada sistema, com base na informação obtida a partir de bibliografia, seguida da descrição da metodologia da avaliação dos impactes ambientais.

No capítulo 4 é realizada a interpretação dos resultados obtidos. No capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões obtidas e propõem-se sugestões para trabalhos futuros.

## **2. Estado de arte**

### **2.1. Biomassa como fonte de biorecursos**

A expansão acentuada do consumo de energia, embora possa refletir o crescimento económico e a melhoria da qualidade de vida, apresenta alguns aspetos negativos, como a possibilidade de esgotamento dos recursos fósseis utilizados para a produção de energia, e o impacto no meio ambiente produzido por essa atividade (Vieira, 2016).

O modelo energético mundial atual baseia-se fundamentalmente na utilização de combustíveis fósseis, um facto que se deve ao domínio tecnológico existente para a utilização destes recursos, aos baixos custos destes mesmos recursos, devido à elevada disponibilidade existente e, à falta de preocupação com as questões ambientais, que só recentemente começaram a despertar curiosidade e um certo tipo de alarme no público em geral (Nunes, 2015). Isso leva ao aumento da preocupação com os impactos ambientais negativos causados pela combustão de combustíveis fósseis, em que o seu processo de combustão gera emissões de, por exemplo, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que origina o aumento das alterações climáticas (Nunes *et al.* 2017).

Os combustíveis fósseis são uma fonte de energia não renovável, em particular o carvão, petróleo e seus derivados, que são formados por processos naturais como a decomposição anaeróbia de materiais orgânicos (plantas e animais) que estiveram expostos a temperaturas e pressões elevadas na crosta terrestre ao longo de milhões de anos. Como consequência direta, os processos de combustão de combustíveis fósseis são considerados a principal causa do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, sendo responsável pelo aquecimento global e pelas alterações climáticas, causando graves problemas de saúde pública e no ecossistema (Cordella, 2010; Cambero *et al.*, 2015). A conversão energética representa 80% das emissões totais de gases de efeito de estufa (GEE) na Europa (Ferreira, Moreira, & Monteiro, 2009). Adicionalmente, o acesso aos combustíveis fósseis pode ser uma das causas de conflitos sociais, políticos, e eventualmente armados, a nível mundial, uma vez que as reservas de petróleo e de gás estão situadas em áreas politicamente instáveis (ex: Iraque e Nigéria) (Cordella, 2010).

As mudanças climáticas, as recentes ameaças no fornecimento e armazenamento de energia na Europa e a volatilidade dos preços da energia baseada em hidrocarbonetos, impõem uma redução ambiciosa do consumo de energia primária e uma diversificação das fontes de energia. Um grande desafio para a humanidade é realização de uma transição para uma sociedade mais sustentável e amiga do ambiente. Essa sociedade irá deparar-se com um conjunto de desafios que englobam a moderação de utilização dos combustíveis fósseis e a consideração de outras opções possíveis de

sustentação energética, capazes de substituir fontes de energia anteriormente utilizadas em determinadas áreas industriais, domésticas, agrícolas, entre outros. Porém, para algumas zonas do mundo e para algumas aplicações específicas, a substituição dos recursos energéticos não será facilmente executável (Sathre & González-García, 2014; Pinto, 2014).

As fontes renováveis têm se tornado cada vez mais importantes num âmbito global, devido, principalmente, ao esgotamento das reservas de combustíveis fósseis, que são limitadas, pois as suas reservas demoram um tempo indeterminado a reporem, não se encontrando distribuídas de forma homogênea a nível geográfico.

O potencial das fontes de energia renováveis é enorme, pois podem, em princípio, atender de forma gradual as necessidades energéticas do mundo. As fontes de energia renováveis são uma forma de energia que se renova de uma forma cíclica, e que podem ser produzidas de forma contínua ou dentro de um período de tempo moderado através de fluxos de energia naturais, incluindo energia solar (calor e eletricidade), energia biológica (energia da biomassa), energia eólica, energia hidroelétrica e energia geotérmica (Cordella, 2010), com base no uso de recursos nativos abundantemente disponíveis.

A nível dos custos sociais, ambientais e dos preços de mercado dos combustíveis fósseis e das energias renováveis, observa-se que ambos se desenvolvem numa direção oposta, ou seja, as energias renováveis estão a tornar-se mais baratas que os combustíveis fósseis. No final de 2015, a capacidade energética renovável instalada era suficiente para suprir aproximadamente 23,7% da eletricidade mundial (REN21, 2016). É esperado que no futuro 30% dos combustíveis usados e 60% do fornecimento de energia elétrica tenha origem em fontes de energia renovável (Pinto, 2014).

Assim, neste contexto surge a aplicação da biomassa como uma das fontes de energia renovável, onde a sua energia química pode ser convertida para a produção de energia sob a forma de calor, energia e biocombustíveis.

Segundo a Diretiva 2009/28/EC, relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis, “a biomassa representa a fração biodegradável de produtos, resíduos de origem biológica da agricultura (incluindo substâncias vegetais e animais), silvicultura e indústrias relacionadas, bem como a fração biodegradável de resíduos industriais e municipais”, ou seja, matéria orgânica que pode ser convertida num gás de baixa qualidade, em reatores próprios, de modo a obter energia, designando-se consequentemente este produto por bioenergia (Parlamento Europeu, 2009).

A bioenergia representa 10% do fornecimento global de energia e em 2012, a nível global, representou 14% do consumo total de energia, com aproximadamente 2,6 biliões de pessoas dependentes de biomassa tradicional para as suas necessidades energéticas (World Energy Council,

2016). Até 2050, estima-se que, globalmente, o uso de biomassa para o fornecimento de calor e aplicações industriais duplique, bem como a produção de eletricidade (Nunes, 2015). Desde o início da civilização, a biomassa tem sido uma importante fonte de energia em todo o mundo. Na última década, existiu um rápido aumento no número de países que exploram a biomassa como uma possibilidade para o fornecimento de energia, ajudando a biomassa a tornar-se uma opção atraente e promissora em comparação com outras fontes de energia renováveis (Cordella, 2010).

A biomassa difere do carvão em relação ao seu conteúdo orgânico, inorgânico e energético e às propriedades físicas. Quando comparada ao carvão, a biomassa geralmente contém níveis inferiores de cinzas, carbono (C), azoto (N) e enxofre (S), contribuindo assim para a mitigação das emissões de metano  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ , óxidos de azoto ( $\text{NO}_x$ ) e óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ), mas apresenta maior teor de oxigénio ( $\text{O}_2$ ) e hidrogénio (H), bem como maior componente volátil. A biomassa apresenta também elevada humidade ao contrário do carvão, o que diminui o seu poder calorífico em relação aos combustíveis fósseis (Nunes *et al.*, 2017; Saidur *et al.*, 2011).

A biomassa é muito mais reativa que o carvão, sendo uma matéria prima bastante atrativa para gasificação e subsequente produção de energia, levando a uma elevada eficiência das indústrias de energia. Assim, esta representa a fonte dominante, tanto como matéria prima para processos biotecnológicos, como fonte sustentável e renovável de combustíveis orgânicos, químicos e outros materiais, apresentando um potencial para assegurar as necessidades energéticas nacionais através da sua produção previsível e não flutuante (Fortuna *et al.*, 2012; Nunes, 2015).

A biomassa apresenta vantagens em relação à sua capacidade de ser convertida diretamente em energia na forma de calor, eletricidade ou em biocombustíveis (na forma líquida ou gasosa), através de vários processos (físicos, químicos ou biológicos). Contudo, também apresenta algumas restrições em comparação com os combustíveis fósseis, tais como: maior biodegradabilidade, maior teor em humidade, baixa densidade energética e distribuição discreta (Tabela 1) (Arteaga-Pérez *et al.*, 2015).

Atualmente, os recursos de biomassa estão disponíveis numa ampla gama de fontes: madeira, fontes agrícolas e resíduos. A biomassa pode ser utilizada em vários campos: calor, energia, biocombustíveis líquidos e produtos à base de biologia (Cordella, 2010). Aproximadamente dois terços da biomassa são utilizados para funções domésticas e para aquecimento em países em desenvolvimento, enquanto o restante uso de energia da biomassa ocorre em países industrializados onde a biomassa é utilizada tanto em indústrias da madeira, bem como nos setores de calor, energia e transporte rodoviário (Cordella, 2010).

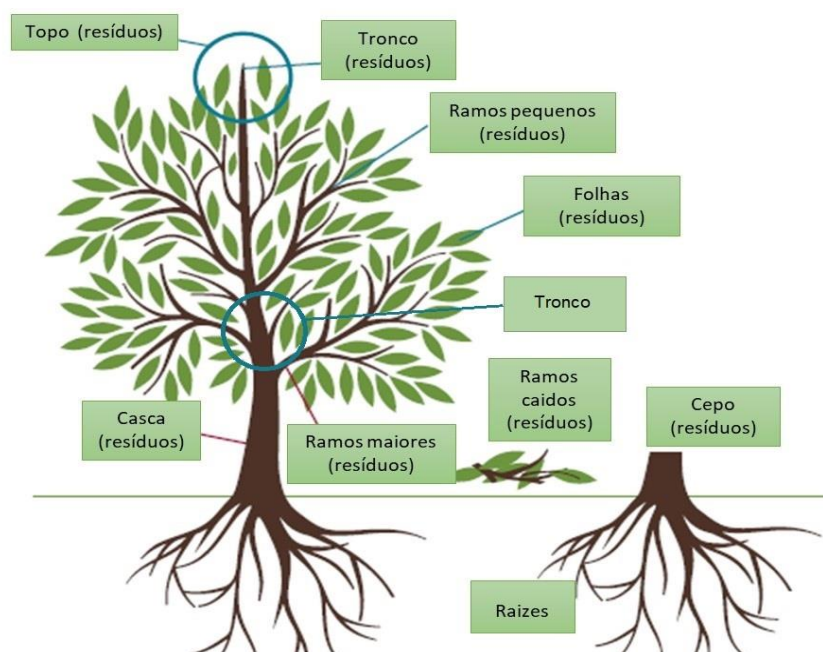
**Tabela 1:** Vantagens e desvantagens da biomassa como fonte de energia renovável

<b>Vantagens</b>	Redução da dependência energética;
	Possibilidade de utilização de resíduos industriais;
	Possibilidade de manutenção e gestão integrada dos resíduos;
	Balanço de emissões de CO <sub>2</sub> nulo;
	A energia obtida da biomassa é relativamente mais barata e confiável;
	Redução da poluição e propagação de doenças, através de reciclagem dos resíduos.
<b>Desvantagens</b>	Elevada probabilidade de emissão de matéria particulada para a atmosfera e produção de cinzas;
	A pressão sobre o recurso poderá aumentar o seu custo;
	Menor poder calorífico comparativamente com os combustíveis fósseis;
	Operações de recolha, transporte e manuseamento complexas;
	É necessário o fornecimento contínuo de biomassa para gerar energia de biomassa;
	Possibilidade de colocar em risco a sustentabilidade do recurso a médio e longo prazo.

De entre as várias formas da biomassa, a biomassa florestal assume-se como umas das energias renováveis mais eficientes e rentáveis, representando uma das matérias primas com maior acessibilidade para produção de vários materiais, bioenergia e biocombustíveis (Fortuna *et al.*, 2012). A biomassa florestal, engloba várias espécies de árvores que podem ser classificadas em dois tipos: angiospérmicas ou *hardwoods* e gimnospérmicas ou *softwoods*. A maioria das *softwoods* crescem mais rapidamente e possui densidades de madeira mais baixas que geralmente significam menores densidades de energia (Carvalho *et al.*, 2009). Entende-se por biomassa florestal os produtos orgânicos gerados na floresta (ramos, folhas, casca, troncos caídos ou cortados), através de ações de manutenção e gestão florestal, como desbastes, desramações e corte final (Figura 1). Também se considera biomassa florestal, os produtos provenientes da indústria de transformação de madeira que podem ser utilizados como matéria-prima, de forma direta, em processos de conversão de biomassa em energia ou processados de modo a originar outro tipo de biocombustíveis sólidos ou líquidos e



produtos no final do seu ciclo de vida (Nunes, 2015). Devido à grande variedade de espécies florestais existentes, a composição química e propriedades básicas da biomassa florestal são bastante variáveis (Marques, 2015).

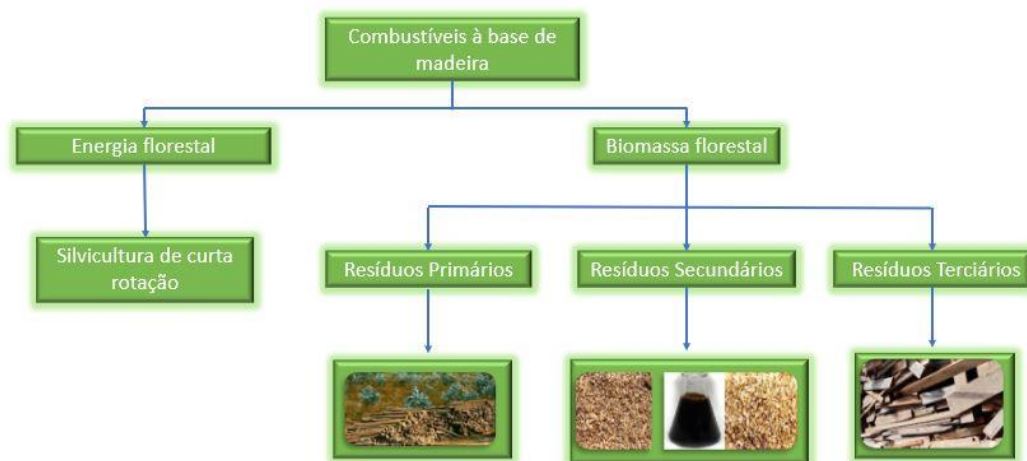


**Figura 1:** Constituintes da árvore que podem ser valorizados (adaptado de Searle & Malins, 2013)

Após a obtenção da biomassa, esta irá ser processada num tipo de biocombustível padronizado como, aparas, estilhas de madeira ou etanol. Por fim estes biocombustíveis são convertidos em bioenergia (eletricidade e calor) (Anttila *et al.*, 2009).

Os resíduos gerados através da gestão florestal estão divididos em três grupos: resíduos primários, secundários e terciários (Figura 2) (Anttila *et al.*, 2009; Nunes, 2015).

- **Resíduos primários** são resíduos disponíveis de exploração de madeira que são subprodutos das operações florestais convencionais;
- **Resíduos secundários** ou industriais são subprodutos disponíveis de processos industriais florestais, após o processamento da madeira em produtos à base da madeira, que incluem serradura, cascas, aparas e lascas e licores negros;
- **Resíduos terciários** ou reciclagem de madeira resultam de produtos de construção, demolição e de bioprodutos no fim da sua vida útil.



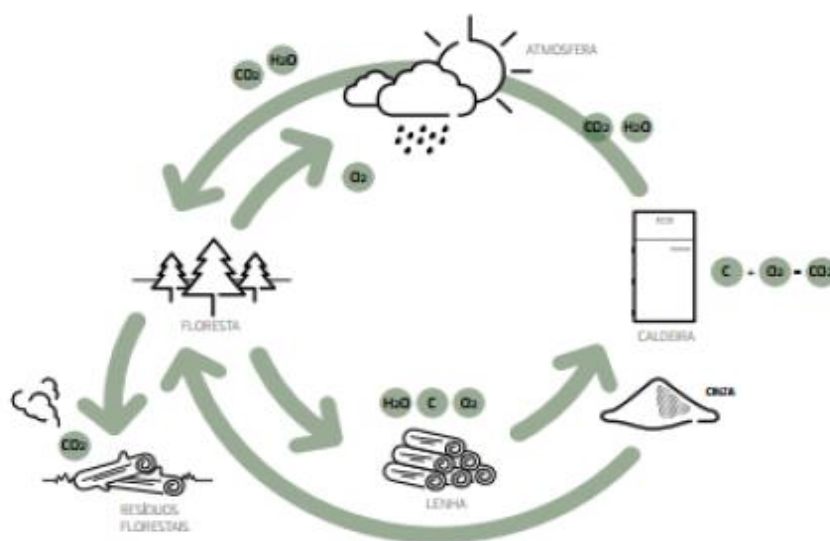
**Figura 2:** Classificação dos combustíveis à base de madeira (adaptado de ENGASP - Engenharia e Técnicas Afins Lda., 2014)

Os principais constituintes químicos da biomassa florestal são a celulose, hemicelulose e a lenhina. A celulose é o polímero natural mais abundante da parede celular e é designado como um homopolissacarídeo composto por unidades de D-glucose ligadas entre si através de ligações glicosídicas  $\beta$ -1,4. As hemiceluloses são heteropolissacarídeos complexos, estruturalmente mais semelhantes com a celulose do que com a lenhina e são constituídas por D-glucose, D-galactose, D-manose, D-xilose, L-arabinose, ácido D-glucurónico e ácido 4-O-metil-glucurónico. A lenhina é a segunda macromolécula mais abundante na biomassa lenhocelulósica. A sua estrutura não é homogênea, possuindo regiões amorfas e estruturas globulares. A composição e a organização dos constituintes variam de uma espécie para outra, dependendo da matriz de celulose/hemicelulose. A lenhina é composta por três diferentes unidades de fenilpropano: álcool p-cumarílico, álcool coferílico e álcool sinapílico.

A biomassa florestal é considerada como a fonte de energia “dos pobres”, o que se revela verdadeiro quando aliado ao uso tradicional de biomassa, que pode ser adquirida de forma “gratuita” em alguns países (ENGASP - Engenharia e Técnicas Afins Lda, 2014). Este material é particularmente atraente pois é bastante abundante e geralmente não está em concorrência direta com o mercado de alimentos, que já gerou tantos problemas políticos em relação aos biocombustíveis (Cordella, 2010).

A biomassa é considerada o “petróleo orgânico”, pois comporta-se como um combustível com identidade renovável. Quando a energia armazenada na biomassa é usada, através de queima ou tratada por outros processos (conversão termoquímica, bioquímica, química), o carbono existente é

libertado juntamente com outros produtos de combustão (GEE, NO<sub>x</sub>, matéria particulada (PM)). O carbono emitido vai reagir com o O<sub>2</sub> presente no ar, formando moléculas de CO<sub>2</sub>, que são libertadas para a atmosfera. Por fim, pelo processo de fotossíntese, o CO<sub>2</sub> gerado pode ser removido da atmosfera pelas plantas em crescimento ou outros organismos autotróficos, ficando o carbono acumulado na sua biomassa (Figura 3) (Pinto, 2014). Contudo, se a biomassa não for utilizada e permanecer presente nas florestas, ao longo do tempo ela irá libertar o carbono nela contida de forma mais lenta, não existindo qualquer tipo de aproveitamento do seu potencial.



**Figura 3:** Ciclo do carbono (adaptado de Vieira, 2009)

Assim o uso de biomassa como combustível pode apresentar um balanço do CO<sub>2</sub> biogénico (com origem na biomassa) neutro, contribuindo para a redução das emissões de GEE e das alterações climáticas. É importante referenciar que o balanço do CO<sub>2</sub> neutro apenas se verifica se excluirmos as emissões adicionais de CO<sub>2</sub> fóssil na recolha, transporte e tratamento da biomassa. Este balanço é menos negativo que o balanço observado numa indústria energética ou de aquecimento que utiliza combustíveis fósseis (Pinto, 2014; Nunes *et al.*, 2017).

Desde há muito tempo, a biomassa florestal tem sido utilizada para produzir eletricidade e calor de uma forma relativamente fácil, sendo bastante usada em alguns países europeus desde 1990, durante a industrialização, e com início em indústrias pioneiras nos Estados Unidos e na Ásia no século XXI (Shen *et al.*, 2015). No planeta, aproximadamente 31% da área terrestre total está coberta por floresta, correspondendo a uma área florestal de 4 mil milhões de hectares (Gha) (Matthews *et*

*al.*, 2014). Mais de metade da área florestal total está situada em 5 países: Rússia, Brasil, Canadá, Estados Unidos da América e China (Sathre *et al.*, 2014).

O abastecimento primário de energia da biomassa florestal utilizada no mundo, para uso doméstico, calor e eletricidade para indústrias e biocombustíveis, é estimado em cerca de 56 EJ, indicando que a biomassa lenhosa é a fonte de mais de 10% de toda a energia fornecida anualmente. Em geral, a biomassa florestal fornece cerca de 90% da energia primária proveniente anualmente de todas as formas de biomassa (da Costa *et al.*, 2018a).

Um estudo realizado no Chile, mostra que a manutenção e processamento da floresta, gera aproximadamente 4 milhões de toneladas/ano de resíduos florestais, que equivalem a 14000 GWh/ano de energia, capaz de substituir uma importante fração ( $\approx 25\%$ ) referente ao carvão (Arteaga-Pérez *et al.*, 2015).

A nível europeu, a floresta bem como os resíduos das indústrias florestais são um dos principais contribuintes para a produção de bioenergia nos países da UE27. Tem-se verificado um aumento no uso de biomassa florestal como resultado da combinação de usos tradicionais e modernos da biomassa na indústria e um aumento crescente no sector de energia. A combustão de biomassa, hoje em dia é responsável por fornecer 4% da energia total primária consumida na União Europeia, que equivale a dois terços do total das energias renováveis consumidas (Pinto, 2014).

Em Portugal, a área florestal corresponde a cerca de 3,1 milhões de hectares, representando 35% do território total nacional, sendo dos países da Europa com maior percentagem de área florestal (da Costa *et al.*, 2018). Estima-se que se produz anualmente 6,5 milhões de toneladas de biomassa florestal geral em Portugal, dos quais 2,2 milhões de toneladas podem ser aproveitadas para a conversão em energia elétrica (Tabela 2) (Nunes, 2015).

**Tabela 2:** Biomassa florestal em Portugal (adaptado de Nunes, 2015)

	Produção [ $10^6$ t/ano]	Disponibilidade [ $10^6$ t/ano]	GWh/ano
Matos (não cultivados)	4	-	-
Matos (cultivados)	1	0,6	3,157
Produção de lenha	0,5	-	-
Ramos e bicadas	1	-	-
Biomassa proveniente de áreas ardidas	-	0,4	2,104
Ramos e bicadas	-	1	5,263
Indústria Transformadora da Madeira	-	0,2	1,052
<b>Total</b>	<b>6,5</b>	<b>2,2</b>	<b>11,578</b>

Segundo a Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), Portugal em 2016, apresentou um nível de dependência energética do exterior de 75 %, inferior ao dos anos anteriores. Por exemplo, em 2006, o nível de dependência energética foi de 84 %. Este indicador tem vindo a diminuir ao longo do tempo, refletindo que a aposta nas energias renováveis tem vindo a ajudar o país a reduzir a dependência do exterior (DGEG, 2017).

Portugal não sendo um país com recursos energéticos de origem fóssil, contém uma elevada abundância de biomassa florestal, caracterizando um dos maiores recursos endógenos de que dispõe e a sua exploração pode contribuir para a limpeza e manutenção florestal, minimizando os riscos de incêndio florestal e contribuindo para a redução dos GEE (ENGASP - Engenharia e Técnicas Afins Lda, 2014; Nunes *et al.*, 2017; da Costa *et al.*, 2018). A produção anual da biomassa residual das florestas é estimada em 0,8-1,2 milhões de toneladas secas por ano, e cerca de 47-58% desses resíduos advêm do eucalipto, uma das espécies mais abundantes na floresta portuguesa (da Costa *et al.*, 2018).

Em Portugal, várias centrais elétricas dedicadas (apenas produzem energia elétrica) alimentadas por biomassa florestal residual foram construídas nos últimos anos (da Costa *et al.*, 2018). Até ao ano de 2005 apenas existiam, em Portugal, duas centrais termoelétricas ligadas à rede elétrica a utilizar a biomassa florestal como principal combustível, a central da Energias de Portugal (EDP), em Mortágua, e a Centroliva, em Vila Velha de Ródão (Nunes, 2015). Hoje em dia existem 13 centrais termoelétricas dedicadas, entre o norte e centro, para além das 9 centrais de cogeração (Tabela 3) (Carneiro, 2010; INEGI, 2016). Em 2016, a biomassa residual florestal foi responsável pela produção de cerca de 1% de eletricidade total no país (correspondente a 234 MWe). No entanto, através da nova estratégia implementada pelo governo Português em 2017, essa percentagem deverá aumentar (Diário da República, 2017).

**Tabela 3:** Centrais termoelétricas com utilização de biomassa existentes em Portugal (adaptado de INEGI, 2016)

Nome	Localização	Potência Instalada (MW)	Consumo de biomassa (t/ano)	Ano de funcionamento
<b>Centrais de Cogeração</b>				
<b>Amorim</b>	Aveiro	1	n.d.	2004
<b>Cacia</b>	Aveiro	35,1	110370	2005
<b>Celtejo</b>	Castelo Branco	23,69	n.d.	1992
<b>Celbi</b>	Coimbra	70,96	219960	1987
<b>Figueira da Foz (Lavos)</b>	Coimbra	95	n.d.	2004
<b>Calma</b>	Santarém	8	54600	2001
<b>Setúbal</b>	Setúbal	53,9	168480	2004
<b>EuroPac Energia Viana</b>	Viana do Castelo	103,7	n.d.	2002
<b>SIAF</b>	Viseu	3,8	n.d.	1996
<b>Centrais Termoelétricas</b>				
<b>Cacia</b>	Aveiro	12,5	146000	2009
<b>Terras de St. Maria</b>	Aveiro	10,75	121500	2008
<b>Corga de Fradelos</b>	Braga	10	85531	2017
<b>Centroliva</b>	Castelo Branco	5,63	60748	1998
<b>PALSER</b>	Castelo Branco	3,3	36500	2010
<b>Belmonte</b>	Castelo Branco	2,53	24300	2010
<b>Rodão</b>	Castelo Branco	12,96	140000	2007
<b>Celbi</b>	Coimbra	6,26	n.d.	
<b>Figueira da Foz</b>	Coimbra	34,31	400000	2009
<b>Constância</b>	Santarém	13,67	140000	2009
<b>Setúbal</b>	Setúbal	12,5	146000	2009
<b>Mortágua</b>	Viseu	9	110000	1999
<b>Calma</b>	Santarém	7,04	n.d.	

Existem dois tipos gerais de utilização da biomassa florestal: tradicional e moderna. A utilização tradicional, envolve o uso de madeira ou carvão como combustível, em pequena escala para aquecimento, uso doméstico e indústrias. É considerada a fonte chave de energia primária doméstica, apesar dos aspetos problemáticos associados à queima de biomassa tradicional em equipamentos ineficientes, que incluem problemas relacionados com a saúde, poluição e deflorestação. No entanto, para países em desenvolvimento, este tipo de utilização tradicional mantém-se como a única opção energética viável, pois a biomassa florestal encontra-se prontamente disponível, livre, simples e fácil de usar.

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), 10% do consumo global de energia é devido ao uso deste tipo de biomassa para aquecimento e utilização doméstica (World Energy Council, 2016). Por exemplo, na Índia, perto de 75% das famílias realizam as suas necessidades energéticas domésticas e de aquecimento através da combustão de biomassa florestal em fogões ou caldeiras tradicionais. Globalmente, cerca de 3 mil milhões de pessoas em países subdesenvolvidos, ainda dependem bastante deste tipo de biomassa tradicional (florestal, resíduos de

culturas energéticas, entre outros) para satisfazer as necessidades energéticas essenciais para a sua sobrevivência. No entanto existem problemas ambientais associados à combustão da biomassa florestal em fornos ou caldeiras ineficientes, pois a combustão realizada não é completa e permite a libertação de compostos tóxicos para a atmosfera (Mehetre, Panwar, Sharma, & Kumar, 2017).

A utilização moderna de biomassa florestal difere da utilização tradicional em duas características chave: em primeiro lugar, a fonte de matéria orgânica deve ser sustentável e, em segundo lugar, a tecnologia utilizada para obter a energia, deve limitar ou mitigar as emissões de gases de combustão e reduzir a produção de cinzas. Apresenta uma eficiência da conversão energética maior, o que leva a uma menor utilização de combustível. Este tipo de técnica tem sido amplamente utilizado em algumas regiões, principalmente no Norte da Europa e algumas partes da América do Norte (World Energy Council, 2016). Um exemplo desta técnica moderna é a utilização do processo de peletização, para produção de pellets para geração de calor e energia.

## 2.2. Tecnologias de conversão de biomassa

A seleção da tecnologia de conversão de biomassa é determinada principalmente pelas características do combustível, legislação ambiental, localização, custos associados, disponibilidade e desempenho do equipamento necessário, bem como a produção de energia desejada (calor, eletricidade, biocombustíveis). Existem várias tecnologias disponíveis para converter a biomassa numa forma de energia utilizável. A melhor das escolhas tecnológicas depende das características físicas e químicas da biomassa, da sua disponibilidade, da sua necessidade e da rentabilidade económica de cada processo. Essas tecnologias são apresentadas na Figura 4.

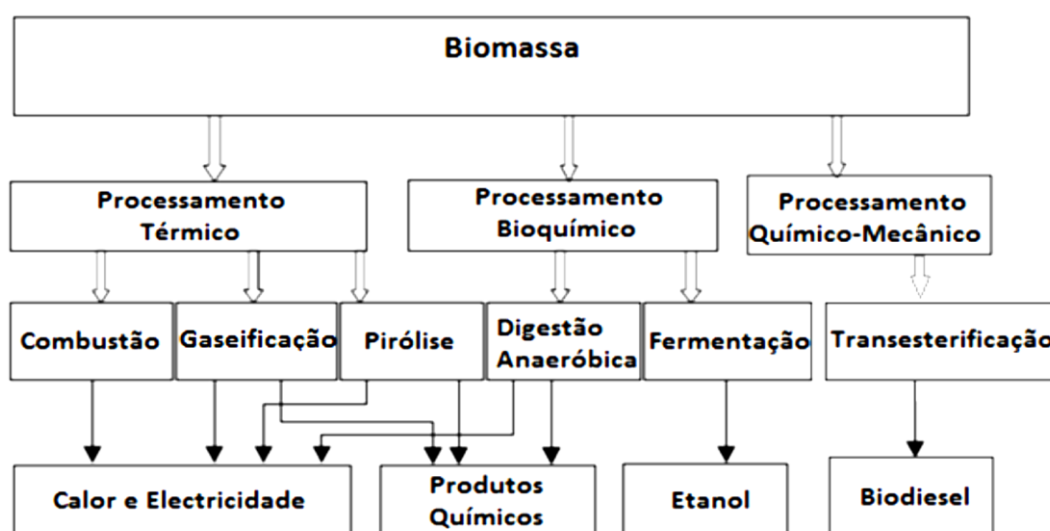


Figura 4: Tecnologias de conversão de biomassa (adaptado de Pinto, 2014)

### 2.2.1. Combustão direta

A combustão direta continua a ser a técnica mais comum para combustão da biomassa, tanto para produção de calor como de eletricidade. A combustão é designada como uma reação química exotérmica de oxidação-redução entre duas ou mais substâncias, combustível e comburente. Para a combustão direta da biomassa podem ser usados vários equipamentos, tais como: caldeiras, lareiras com e sem recuperador de calor, fogões, entre outros. Neste tipo de combustão é possível queimar qualquer tipo de biomassa, mas para se obter uma combustão completa a biomassa deve ter um teor de humidade inferior a 50%. Um elevado nível de humidade causa problemas no processo de combustão (Cordella, 2010; Herzog *et al.*, 2012).

Mais de dois mil milhões de pessoas cozinham por combustão direta, e esses usos tradicionais geralmente envolvem o uso ineficiente de biomassa florestal, em grande parte de fontes de baixo custo, como florestas naturais, que podem contribuir para o desmatamento e degradação ambiental, bem como a utilização de fornos ou fogões ineficientes que permitem a emissão de grandes quantidades de gases.

O processo de combustão da biomassa integra um complexo conjunto de reações, que podem ser divididas em quatro fases distintas: secagem; pirólise; gasificação e combustão (resíduo carbonoso e produtos gasosos). Na fase de secagem, a biomassa começa a perder o seu teor em humidade a uma temperatura entre os 100 e os 150 °C, ocorrendo uma subida da temperatura, com libertação de vapor de água. Na fase de pirólise ou volatilização, a uma temperatura entre os 190 e 500 °C, na ausência de agente oxidante, ocorre a decomposição das estruturas poliméricas do material lenhocelulósico numa vasta gama de compostos (CH<sub>4</sub>; H<sub>2</sub>; CO<sub>2</sub>; hidrocarbonetos leves; compostos líquidos de alcatrão; compostos voláteis). Na fase de gasificação, que ocorre a uma temperatura entre os 500 e os 700 °C e na presença de agente oxidante, inicia-se a degradação térmica dos componentes do combustível produzindo monóxido de carbono (CO). O processo finaliza com a fase de combustão onde se dá a oxidação do resíduo carbonoso e a retenção das cinzas (Marques, 2015; Silva, 2009).

Outra técnica relacionada com a combustão de biomassa é a co-combustão. A co-combustão consiste na combustão combinada de biomassa e carvão, para a produção de energia elétrica e térmica. Esta técnica pode ser vantajosa em relação à substituição parcial de combustíveis fósseis, reduzindo os custos associados aos combustíveis fósseis e às emissões de CO<sub>2</sub>, N e S, minimizando o desperdício e reduzindo a poluição dos solos e de água. Contudo a co-combustão leva à formação de depósitos na caldeira, limitando o seu uso. Esta limitação deve-se à presença de substâncias alcalinas nas cinzas que podem reagir com materiais que constituem a estrutura da caldeira, causando



danos prejudiciais ao funcionamento da mesma. Devido a mudanças indesejadas das composições de cinzas, a parcela da biomassa geralmente é limitada a aproximadamente 20% da entrada de combustível (Saidur *et al.*, 2011; Pinto, 2014).

Uma vez que o presente trabalho incide sobre as tecnologias de conversão termoquímicas (queima a céu aberto, lareiras com câmara de combustão aberta, recuperador de calor e centrais elétricas dedicadas) de biomassa florestal, a seguir apresenta-se com mais detalhe essas tecnologias.

A queima a céu aberto é definida como a combustão de matéria, normalmente residual, num espaço exterior, de forma que os produtos de combustão resultantes são emitidos diretamente para a atmosfera, sem passar por um canal ou chaminé. Esta técnica é a forma mais fácil e barata de reduzir grandes volumes de resíduos e biomassa, mas a sua realização é proibida em centros urbanos, à exceção de queima no âmbito de atividades agroflorestais devidamente autorizada nos termos dos artigos 39º e 40º do Decreto-Lei nº 310/2002, de 18 de dezembro, devido a exposição ao fumo e compostos tóxicos e propagação de incêndios. Nesta situação também pode ocorrer contaminação dos solos e cursos hídricos (Renan & Iino, 2010; M. C. O. T. A., 2002; CCME, 2016).

As lareiras tradicionais são usadas para a combustão de lenha com a função de aquecimento, podendo também ser usadas como modelos acolhedores e de embelezamento. Foram um dos primeiros meios de climatização e com o tempo a sua funcionalidade e aspeto foram evoluindo até aos dias de hoje. As lareiras tradicionais são compostas por duas partes: câmara de combustão aberta revestida de material não inflamável (tijolo refratário), onde se queima a madeira e uma chaminé que permite a saída dos gases de combustão e partículas. No entanto, este método é bastante ineficiente em termos de aquecimento, pois o fluxo de ar descontrolado leva o ar quente até à chaminé saindo para o exterior, sendo repostado por ar frio exterior. O rendimento térmico das lareiras é baixo (10-15%), resultando em elevadas quantidades de fumo e cinzas, gerando pouca quantidade de calor útil (Biomass Energy Centre, 2009). Quando as lareiras não estão em funcionamento, um fluxo grande de ar frio é transportado para dentro da habitação, aumentando os custos de outras formas de aquecimento.

Uma maneira de reduzir esses impactes negativos é através da implementação de recuperadores de calor, que são dispositivos inseridos numa lareira ou que podem estar dispostos na sala ou outra divisão, funcionando como uma câmara de combustão hermética, em que a entrada de ar para alimentação da combustão é regulável, bem como a madeira utilizada pode variar (lenha ou pellets). O objetivo principal deste equipamento é a recuperação do calor perdido pelos gases de combustão, expelidos pela chaminé depois da passagem pelo recuperador. São fabricados em ferro fundido o que lhes permite maior durabilidade e contêm uma porta em vidro vitrocerâmico evitando saída de fagulhas e fumo para o espaço habitacional. O ar interior é absorvido pelas entradas do

recuperador, é aquecido através de um permutador de calor e é expelido de volta ao interior da casa através das entradas no topo do recuperador ou pelas condutas que encaminham o ar quente para outras divisões da casa. Este equipamento apresenta mais vantagens do que as lareiras: níveis de emissão de poluentes menores, baixas fugas de fumo para a zona habitacional e um bom output em termos de aquecimento. O seu rendimento pode variar entre os 40 e os 80% de acordo com o modelo usado (Teixeira, 2011). Os recuperadores de calor antes de serem instalados são testados e certificados segundo a norma europeia EN 13229 (*insert appliances and open fireplaces*), o que constitui uma garantia de segurança (Sousa & Nunes, 2001; Hetsch, 2015).

As centrais dedicadas de biomassa são instalações onde a energia contida na biomassa é convertida em energia elétrica. A biomassa é utilizada na produção energética através de processos como a combustão, ou seja, são idênticas às centrais termoelétricas, mas que utilizam biomassa em vez de combustíveis fósseis. Nas centrais a biomassa, a eletricidade é produzida através da queima de biomassa, de modo a produzir energia calorífica que vai ser usada para ebulir água, criando vapor a altas temperaturas e pressão que será encaminhado para movimentar uma turbina que está ligada a um gerador, gerando assim energia elétrica. No processo de transformação energética, cerca de 65% da energia é desperdiçada sob a forma de calor, sendo só aproximadamente um terço da potência inicial do processo usada como potência elétrica (Silva, 2013).

Os elementos essenciais na constituição de uma central são a caldeira, o condensador, a turbina e o gerador. Em relação às caldeiras usadas em centrais em Portugal, a grande maioria recorre a tecnologia de combustão em grelha, pois tem menores custos e existe há mais tempo, no entanto, já se começa a apostar nas caldeiras de leito fluidizado, principalmente as de leito fluidizado borbulhante, que apresenta melhores rendimentos (Silva, 2013). A instalação deste tipo de centrais deve levar em conta vários fatores, como minimização dos custos de transporte, que é garantido com a proximidade à origem da matéria-prima, minimização dos impactos nas imediações da central e garantia de abastecimento. É necessário também existir um bom sistema rodoviário em redor da central bem como uma distância apropriada a uma rede elétrica de alta voltagem. Na Finlândia, a central elétrica a biomassa Alholmens Kraft é considerada a maior central em funcionamento no mundo. Utilizando por hora cerca de 800 m<sup>3</sup> de biomassa dos quais 40-60% correspondem a cascas das árvores, lascas de madeira e outros bioprodutos derivados da refinação da madeira, sendo a restante percentagem correspondente a turfa, consegue gerar através das suas turbinas 240 MW de eletricidade, 100 MW de vapor e 60 MW de “district heating” (Alholmens Kraf, n.d.).

### 2.2.2. Gasificação

A gasificação, ou combustão indireta, converte o potencial energético de um combustível sólido (carvão, biomassa) num gás combustível (biogás). Este biogás, também designado de gás de síntese ou “*syngas*”, é produzido através da combustão parcial de matéria-prima na presença de um agente de gasificação (ar, O<sub>2</sub>, vapor, CO<sub>2</sub> ou mistura de ambos), obtendo-se desta conversão uma mistura gasosa de H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, vapor de água e pequenas quantidades de hidrocarbonetos pesados. O gás obtido apresenta um pequeno poder calorífico de 4 a 6 MJ/m<sup>3</sup>, equivalente a 10 a 15% do valor de aquecimento do gás natural. O poder calorífico do gás vai depender do processo de gasificação bem como da composição da biomassa usada (tamanho, textura, teor de humidade, etc.). Portanto tanto a matéria orgânica usada como a tecnologia de gasificação deverão ser adequadas à aplicação final do combustível gasoso. Os gaseificadores mais comuns podem ser de leito fixo, leito fluidizado circulantes ou borbulhante e leito de arraste.

Nos gaseificadores de leito fixo, o leito ocupa a maior parte do volume do reator e é composto por biomassa. O fluxo de biomassa entra pelo topo e o agente de gasificação pode entrar pelo topo, base ou pela lateral. Em relação ao leito fluidizado circulante ou de bolhas, o agente de gasificação entra pela base em escoamento ascendente, com uma velocidade suficiente para suspender as partículas do leito, podendo observar-se a formação de bolhas com a passagem do agente de gasificação. Esta tecnologia permite aumentar a área de contacto entre a fase sólida e gasosa contribuindo para uma elevada transferência de calor. Por fim, nos gasificadores de leito de arraste, a biomassa entra pelo topo, em conjunto com vapor de água e o agente de gasificação sob pressão, sendo direccionada à chama no topo do reator (Pinto, 2014; Marques, 2015).

Após o tratamento adequado, os gases resultantes podem ser queimados diretamente para uso doméstico ou aquecimento, ou podem ser usados em dispositivos de conversão secundários, como motores de combustão interna ou turbinas a gás para a produção de eletricidade ou trabalho de eixo (Herzog *et al.*, 2012).

### 2.2.3. Pirólise

A pirólise é um processo de decomposição térmica de biomassa num ambiente com ausência de O<sub>2</sub>. Ocorre uma reação química relativamente lenta, com temperaturas entre os 400 e 800 °C, que converte a biomassa em biocombustíveis.

Este processo pode ser classificado em três tipos: pirólise lenta, pirólise rápida e pirólise flash e origina vários produtos na forma líquida, sólida ou gasosa (hidrocarbonetos, cinzas, resíduos

de carbono sólidos e bio-óleos) onde é possível definir as frações desejadas de cada produto variando as condições da reação (temperatura, pressão, velocidade de aquecimento, tamanho de partículas, catalisadores utilizados e composição da biomassa). A composição típica de gás da pirólise proveniente da biomassa florestal inclui CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e H como principais produtos, juntamente com outros compostos orgânicos (Saidur *et al.*, 2011).

O bio-óleo obtido na reação de pirólise apresenta propriedades semelhantes ao petróleo e pode ser usado em motores a diesel, turbinas ou como matéria-prima em refinarias, necessitando de tratamento de purificação para remoção de impurezas, de modo a não causar danos nos equipamentos. Outro produto gerado é o “*bio-char*” ou carvão vegetal, que pode ser usado para produção de energia elétrica ou calorífica (Pinto, 2014; Marques, 2015). A Tabela 4 compara os rendimentos relativos dos produtos de pirólise (rápida e lenta) em relação aos produtos gerados no processo de gasificação.

**Tabela 4:** Proporções relativas dos produtos de pirólise comparado com os obtidos da gasificação (adaptado de Pinto, 2014)

Processo	Condições	Líquido	Carvão	Gás
<b>Pirólise Rápida</b>	Temp. moderada, período de tratamento reduzido	75%	12%	13%
<b>Pirólise Lenta (Carbonização)</b>	Baixa temp. (300-400 °C), período de tratamento mais longo (horas ou dias)	30%	35%	35%
<b>Gasificação</b>	Alta temp. e período de tratamento longo	5%	10%	85%

#### 2.2.4. Fermentação

A fermentação é um processo biológico que permite converter os açúcares presentes na biomassa em álcoois e posteriormente em biocombustíveis. O processo de fermentação inicia-se com a seleção da biomassa, em relação a sua qualidade, tamanho e composição, para que o processo se torne mais rentável. Antes da biomassa ser colocada num fermentador, vai sofrer pré-tratamento de modo a que biocatalisadores possam atuar de uma forma mais rápida e eficaz.

A biomassa é introduzida num fermentador, após o pré-tratamento, onde vai ocorrer a reação de hidrólise da celulose, por ação de enzimas ou outros catalisadores, permitindo assim a libertação dos açúcares hidrolisados. Depois da hidrólise são então adicionados microorganismos (leveduras), que vão consumir os açúcares hidrolisados (glucose) e vão produzir álcoois, que depois de uma separação são utilizados para produção de biocombustíveis. Alguns produtos residuais que são

formados ao longo do processo, são recuperados e reenviados para refinarias onde podem ser reprocessados para outros fins, obtendo-se assim uma economia circular. Os produtos produzidos na fermentação são álcoois, como o butanol ou o etanol que são muito cobiçados no mercado mundial, pois podem ser substitutos dos combustíveis fósseis, libertando menores emissões de carbono (Pinto, 2014; Marques, 2015).

#### 2.2.5. Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia consiste na conversão bioquímica da biomassa em biogás através da ação de bactérias num ambiente anaeróbio, ou seja, sem presença de  $O_2$ . Este processo pode ser realizado a partir de vários tipos de biomassa, tais como resíduos industriais, municipais, resíduos alimentares entre outros, tornando-se bastante versátil e eficaz. O biogás obtido no final do processo é constituído essencialmente por  $CH_4$  (55 a 75%),  $CO_2$  (25 a 45%) e outros gases residuais. Apresenta um poder calorífico de 18-29 MJ/m<sup>3</sup> (Pinto, 2014).

O seu processo apresenta três fases distintas: fermentação, onde enzimas hidrolíticas vão converter a matéria orgânica em açúcares, aminoácidos e ácidos gordos; acetogénese, onde os produtos de fermentação são convertidos em compostos orgânicos simples (ácido acético, ácido propiónico, etanol, etc.),  $CO_2$  e  $H_2$ , através de bactérias acetogénicas; metanogénese, por ação de bactérias metanogénicas ocorre a formação de  $CH_4$ .

O biogás gerado tem um interesse principal na produção de eletricidade, através da combustão em motores de combustão interna, podendo estar associados a ciclos combinados de recuperação de calor, mas também pode ser utilizado na produção de biocombustíveis (Pinto, 2014; Marques, 2015). Uma vantagem da utilização do biogás produzido é que permite a utilização do  $CH_4$  em vez da sua libertação para a atmosfera, pois o  $CH_4$  apresenta um potencial de aquecimento global muito superior ao  $CO_2$  (27,7 vezes superior) (Cordella, 2010); (Myhre *et al.*, 2013).

## 2.3. Impactes ambientais da utilização da biomassa

### 2.3.1. Perspetiva histórica da poluição atmosférica

A combustão de lenha e carvão, para aquecimento, desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento da poluição do ar; nomeadamente com a industrialização. No final do século XVIII, a expansão das Indústrias resultou num crescimento elevado do número de chaminés e na quantidade de fumo emitido das mesmas. Em 1801, o Manchester Court Leet processou 11 proprietários de fábricas de algodão por queimarem grandes quantidades de carvão, que "ilegalmente" e "prejudicialmente" libertaram "grandes quantidades de fumo e fuligem" para casas vizinhas e para as ruas e estradas comuns, causando grande incómodo e estragos aos habitantes dessa região (Makra & Brimblecombe, 2004).

Em 1843, foi publicada uma petição, no Manchester Guardian, onde se estimava a existência de 500 chaminés industriais na cidade de Manchester. O efeito sobre a atmosfera de cidade foi dramático. Alexis de Tocqueville, um historiador francês, descreveu este evento como "uma cortina de fumo denso que cobre a cidade. O sol aparece através dele como um disco sem raios" (Makra *et al.*, 2004).

Os perigos que advêm da combustão de carvão para o aquecimento residencial, bem como para fins industriais, em países desenvolvidos foram lentamente reconhecidos ao longo de séculos. Nestes perigos inserem-se doenças respiratórias e alterações no ecossistema terrestre que englobam as chuvas ácidas e aquecimento global. Em 1960, o carvão e o coque (um derivado do carvão) eram os combustíveis de eleição para o aquecimento residencial na Alemanha (84% do consumo de energia no setor residencial) e a França (68%) (WHO, 2015).

Anteriormente já tinham sido implementadas medidas políticas para prevenção destes perigos, desencadeadas por dois grandes acontecimentos, Donora, Pensilvânia em 1948 e o "Great Smog" de Londres em 1952, que mudaram a opinião pública acerca da poluição atmosférica (WHO, 2017; WHO, 2015).

Em Donora, no dia 24 de outubro de 1948, perto de 14 000 habitantes da cidade intrigaram-se sobre o denso nevoeiro que cobria toda a cidade. As noites frias de outono combinadas com a água quente do rio Monongahela, que passava ao lado da cidade, e o fumo produzido pelas siderurgias locais, bem como milhares de fornos de carvão em lares locais, limitavam a visibilidade ao final da tarde (Figura 5a). Com o avançar do tempo, pessoas mais velhas começaram a queixar-se de dificuldades respiratórias, acabando algumas por morrer. Em menos de 3 dias, milhares de pessoas

foram afetadas, dos quais centenas ficaram doentes e vinte e seis pessoas morreram, juntamente com dezenas de animais. A 31 de outubro, as chuvas finalmente dispersaram a névoa assassina, mas deixando a nação em choque (Donora Historical Society and Smog Museum, n.d.).

Em relação ao “Great Smog” de 1952, a cidade de Londres viu-se paralisada por um nevoeiro denso e tóxico que reduziu a visibilidade a alguns metros. Durante cinco dias frios de dezembro, esse nevoeiro pesado combinado com a emissão de fumos sulfurosos de queima de carvão, transportes e de chaminés de fábricas, bloqueou os raios solares criando um desastre de saúde pública e paralisando todo o movimento na cidade (Figura 5b). O “Great Smog” foi a pior crise de poluição atmosférica na história europeia, matando cerca de 8 mil a 12 mil pessoas. A poluição atmosférica era tão densa em algumas zonas da cidade que os residentes não conseguiam ver os seus próprios pés enquanto andavam. Alguns habitantes ao regressarem a casa, verificavam que levavam a cara e as narinas negras, assemelhando-se a mineiros de carvão. Este evento foi bastante letal, particularmente para a população mais idosa, jovens e população que sofria de problemas respiratórios. Foi reportado que cerca de 4 mil pessoas morreram imediatamente após o evento. Após este acontecimento o parlamento inglês aprovou a “Lei do Ar Limpo” (Clean Air Act) de 1956, que restringiu a queima de carvão em áreas urbanas e autorizou conselhos locais a criar zonas livres de fumo derivado da queima de carvão (Klein, 2012).



**Figura 5:** Nevoeiro tóxico em Donora, Pensilvânia em 1948 (a) e o “Great Smog” em Londres em 1952 (b)

Graças a estes acontecimentos, com o avançar do tempo foram adotadas novas leis e realizadas várias alterações tecnológicas (sistemas de combustão, adoção de novos combustíveis), para prevenção do aumento de poluição atmosférica.

Em 2014 verificou-se, através dos inventários nacionais de emissões de GEE, uma diminuição de 22,9% na UE-28 em comparação com os valores de 1990, representando uma redução de 1136 milhões de toneladas de CO<sub>2eq</sub>, marcando o ano com as menores emissões registadas desde o início dos protocolos climáticos, podendo nos anos seguintes as emissões registadas ter sido ainda menores (Eurostat, 2016). Com estas reduções a UE está no bom caminho para superar as metas estabelecidas

para 2020 e 2030 de redução das emissões de GEE, respetivamente 20% e 40%, em relação a 1990 (Eurostat, 2016).

### 2.3.2. Principais poluentes associados à combustão da biomassa

A utilização da biomassa pode ser bastante vantajosa no que se refere à diminuição do consumo de combustíveis fósseis e das suas emissões de GEE para a atmosfera, mas alguns estudos realizados mostram que a utilização da biomassa, sob certas condições, apresenta impactes negativos para o ambiente e saúde (Weldu, Assefa, & Jolliet, 2017). Um desses impactes é a poluição atmosférica, que constitui uma questão ambiental e social chave, sendo também um problema complexo que apresenta múltiplos desafios em termos de gestão dos poluentes nocivos emitidos e sua mitigação. A poluição atmosférica caracteriza-se geralmente por uma mistura complexa de poluentes que são emitidos por fontes naturais e/ou antropogénicas. Define-se poluente atmosférico como qualquer forma de matéria sólida, líquida ou gasosa e de energia que, presente na atmosfera, pode torná-la poluída (Almeida, 1999). Numerosos estudos epidemiológicos encontraram uma associação entre a poluição atmosférica e uma ampla gama de efeitos adversos para a saúde na população em geral, bem como nos ecossistemas, no meio ambiente e no clima global (European Environment Agency, 2013; WHO, 2016).

As contribuições das diferentes fontes de emissão para as concentrações de poluição atmosférica dependem não apenas da quantidade de poluente emitida, mas também da proximidade com a fonte, condições de emissão (por exemplo, altura e temperatura) e outros fatores como condições de dispersão e topografia (European Environment Agency, 2017).

A utilização de biomassa florestal, para uso doméstico e aquecimento, pela sua combustão em caldeiras ou fogões tradicionais, é uma das causas da poluição atmosférica. A composição química do efluente gasoso emitido depende do tipo de combustível, das condições de combustão, sendo de grande importância em relação aos efeitos ambientais e à saúde humana (Kjällstrand & Olsson, 2004).

Os fornos convencionais (fogões de cozinha, caldeiras) e a queima de biomassa aberta (incêndios florestais, lareiras) emitem PM e uma ampla gama de poluentes gasosos, como SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, carbono negro (CN) e compostos orgânicos voláteis (COV's) (Petrov, Bi, & Lau, 2017).

Os fogões tradicionais a lenha são considerados ineficientes, insustentáveis e poluentes. Na utilização de dispositivos tradicionais, apenas 5 a 10% da energia potencial térmica da biomassa



florestal é utilizada para aplicações domésticas, emitindo altos níveis de poluentes, causado por uma combustão incompleta (Mehetre *et al.*, 2017).

Estes poluentes podem ser emitidos diretamente para a atmosfera (poluentes primários) ou formados na atmosfera (como poluentes secundários). Os principais poluentes primários incluem MP primárias, CN, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, amoníaco (NH<sub>3</sub>), CO, CH<sub>4</sub>, COV's, compostos orgânicos voláteis não-metano (COVNM), certos metais pesados, como chumbo, zinco, cádmio e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH), incluindo benzo[a]pireno. Os poluentes secundários incluem PM secundárias, ozono (O<sub>3</sub>) e NO<sub>2</sub> secundários. Os poluentes atmosféricos podem ter origem natural, antropogénica ou mista, dependendo das suas fontes ou das fontes de seus precursores (European Environment Agency, 2017).

As emissões de poluentes atmosféricos durante a combustão da biomassa são essencialmente devidas a:

- 1) emissões de poluentes resultantes de combustão incompleta, cujos índices de emissão encontram-se fortemente dependentes do sistema de combustão (equipamento e processo);
- 2) emissões de poluentes cuja formação e emissão dependem da quantidade dos respetivos elementos percursos presente no combustível utilizado.

Os poluentes atmosféricos podem ocorrer em duas formas distintas: gases ou particulados. Estes dois grupos têm sido alvo de vários estudos científicos, devido aos impactos negativos que lhes são atribuídos. Em Portugal, alguns desses poluentes estão sujeitos a regulamentação, com os limites de emissão delineados no Decreto-Lei n. 102/2010 (M. A. O. T., 2010).

#### 2.3.2.1. Gases

Os poluentes gasosos comportam várias famílias, tais como: óxidos de carbono (CO<sub>x</sub>), SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, hidrocarbonetos, COV's, PHA. A seguir, são apresentadas as várias famílias de poluentes gasosos.

**Óxidos de carbono:** os CO<sub>x</sub> são lançados na atmosfera sob a forma de CO e CO<sub>2</sub>, emitidos tanto de fontes naturais como antropogénicos. O CO é o principal poluente desta família. O CO<sub>2</sub> é considerado um gás não tóxico e é um constituinte natural da atmosfera, mas é reconhecido pelo seu grau de aprisionamento do calor, contribuindo para o aquecimento global (Almeida, 1999).

**Óxidos de enxofre:** o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) é o principal poluente da família dos SO<sub>x</sub>. Uma das suas características principais é que após lançado na atmosfera sofre reações químicas,

gerando novos óxidos. O trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ ) é um desses óxidos, originado através da reação entre o  $\text{SO}_2$  e o  $\text{O}_2$ . As principais fontes antropogénicas são a geração de energia estacionária, indústria e combustíveis comerciais, institucionais e domésticos (European Environment Agency, 2017).

**Compostos de azoto:** existem várias formas destes compostos na atmosfera. Exemplos disso são os  $\text{NO}_x$  e  $\text{NH}_3$ . Os  $\text{NO}_x$  são formados através da reação que ocorre entre o N e o  $\text{O}_2$  na atmosfera. Os  $\text{NO}_x$ , considerados relevantes no que diz respeito à poluição atmosférica, englobam o óxido nítrico (NO) e  $\text{NO}_2$ . As principais fontes de  $\text{NO}_x$  são processos de combustão, que podem ser estacionários ou móveis. O NO representa a maioria das emissões de  $\text{NO}_x$ : o NO é subsequentemente oxidado para formar  $\text{NO}_2$ , embora algum  $\text{NO}_2$  seja emitido diretamente (European Environment Agency, 2017).

**Hidrocarbonetos:** os hidrocarbonetos agrupam um vasto conjunto de compostos orgânicos constituídos unicamente por átomos de H e C. Os hidrocarbonetos podem apresentar várias formas: cadeia simples ou ramificada, cíclicas ou associadas a compostos cíclicos, e ainda podem ser saturados, apresentando ligações simples ou insaturados, apresentando ligações duplas. Um exemplo é o  $\text{CH}_4$ , um hidrocarboneto gasoso, que se apresenta na sua forma de gás à temperatura ambiente (Almeida, 1999).

**Oxidantes fotoquímicos:** os oxidantes fotoquímicos são originados na atmosfera através de reações químicas que envolvem poluentes atmosféricos,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_2$  e luz solar. O  $\text{O}_3$  é um importante oxidante fotoquímico. O  $\text{O}_3$  troposférico é um gás pesado, que pesa cerca de 1,66 vezes mais que o  $\text{O}_2$  e mantém-se perto do solo. Uma vez inalado, o  $\text{O}_3$  pode causar uma série de doenças respiratórias, desde irritações simples das vias aéreas superiores, ataques de tosse e doenças pleurais, a doenças mais graves como bronquite aguda e enfisema (Rusu-Zagar *et al.*, 2013).

**Compostos Orgânicos Voláteis (COV's):** os COV's são compostos que contêm pelo menos um átomo de C ligado com átomos de H,  $\text{O}_2$ , N, S, halogéneos, fósforo (P) e silício. Estes compostos podem estar na atmosfera na forma de gases, devido às suas propriedades físico-químicas. Os COV's são libertados em processos industriais que envolvem o uso de solventes (produção de produtos químicos de base e refinados, aplicação de tintas, limpeza de metais, colas e adesivos, perfumes e cosméticos, etc.) e outros sem a utilização de solventes (refinação de petróleo, produção de bebidas alcoólicas, combustão de combustíveis, etc.). Os COV's têm vários efeitos adversos na saúde. Podem causar problemas através de inalação (substâncias aromáticas) ou através do contacto com a pele (aldeídos), causar distúrbios cardíacos, renais e nervosos. Um exemplo de COV's é o benzeno, que

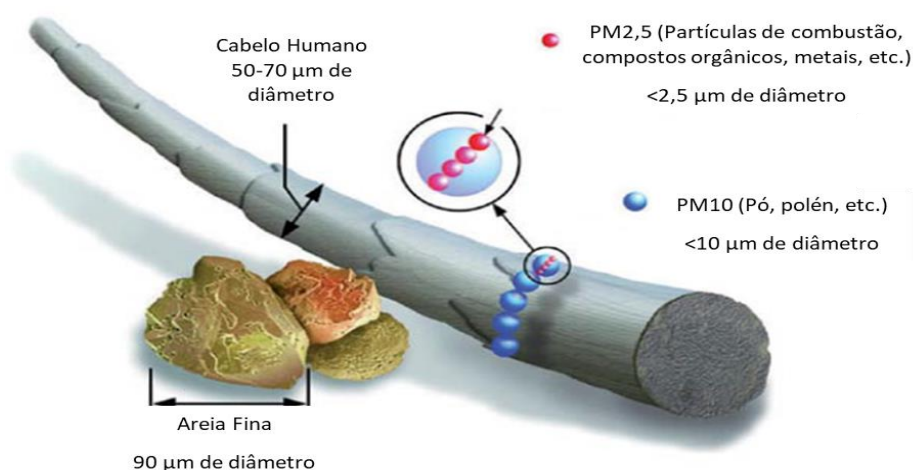
é um composto cancerígeno e mutagénico. As suas concentrações no ambiente são baixas. Os COV's são considerados GEE indiretos (CITEPA, 2017).

#### 2.3.2.2. Material particulado

A PM é composta por partículas sólidas ou líquidas emitidas por fontes de poluição atmosférica ou formadas na atmosfera. Podem também ser denominadas de aerossóis quando dispersas no ar. A PM pode ser emitida diretamente da fonte (PM primária) bem como serem apenas formadas na atmosfera através de interações entre compostos preexistentes (PM secundária). As partículas primárias e secundárias apresentam diferenças significativas em relação ao tamanho, morfologia, composição química e propriedades físicas (Almeida, 1999).

As partículas podem ser geradas por fontes naturais, tais como erupções vulcânicas e ressuspensão do solo em desertos, e por fontes antropogénicas, tais como atividades industriais e combustão de combustíveis. As três principais fontes de emissão de PM são as atividades industriais, combustão de combustíveis e o transporte, onde a distribuição do tamanho das partículas e a concentração mássica das mesmas são, fortemente influenciadas pelo combustível, o regime de combustão, e o tipo de combustão (Nussbaumer, 2017).

As partículas mais prejudiciais para a saúde são as que apresentam um diâmetro inferior a  $10\text{ }\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) ou inferior a  $2,5\text{ }\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ ) representadas na Figura 7, pois podem penetrar e alojar-se profundamente nos pulmões (WHO, 2016a).



**Figura 6:** Tamanho relativo da matéria particulada (adaptado de WHO, 2016)

Vários estudos mostram fortes evidências de que as partículas geradas pela combustão estão relacionadas com efeitos de saúde adversos, tais como citotoxicidade, stress oxidativo, inflamação, efeitos fisiológicos, genotoxicidade e carcinogenicidade, podendo levar à morte (Nussbaumer, 2017).

Em 2010, a Europa central era a região com a maior proporção de matéria particulada com diâmetro aerodinâmico inferior a  $2,5\ \mu\text{m}$  ( $\approx 21\%$ ). Estima-se que 61 000 mortes prematuras na Europa foram atribuídas ao aquecimento residencial com combustíveis sólidos (madeira e carvão), representando 55% de todas as mortes em todo o mundo, atribuídas à exposição à poluição atmosférica exterior a partir de aquecimento residencial com madeira e carvão (WHO, 2015).

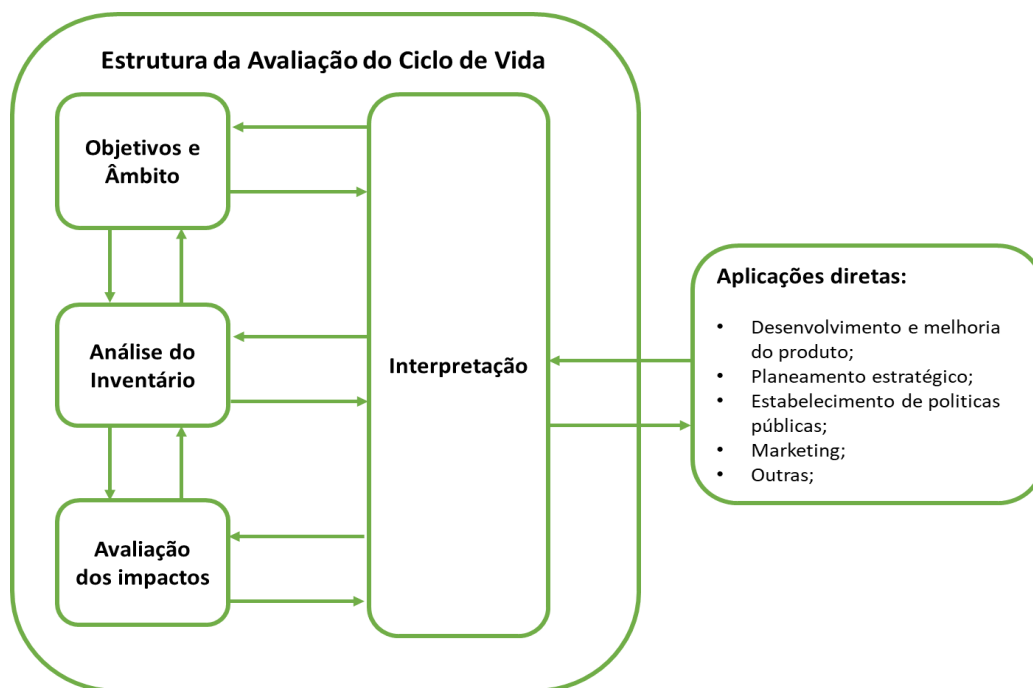
A poluição atmosférica e as mudanças climáticas estão entrelaçadas. Vários poluentes atmosféricos também são forçadores climáticos, que têm um potencial impacto no clima e no aquecimento global. Um desses poluentes é o carbono negro, um dos componentes de  $\text{PM}_{2,5}$  (European Environment Agency, 2017). Este composto é formado através da combustão incompleta de biomassa, que permite a absorção eficiente da luz solar, causando o aumento da temperatura na atmosfera (Pinto, 2014). A utilização de biomassa sólida para uso doméstico e aquecimento contribui globalmente com 25% de emissões de carbono negro, podendo aumentar até 2030 (Mehetre *et al.*, 2017).

No entanto, a poluição atmosférica não é só causada pela combustão de biomassa florestal, mas sim também pelo cultivo e recolha da mesma, bem como o seu transporte. Estas atividades contribuem para a maior parte das emissões de GEE (Silva, 2009). Uma maneira de se reduzir as emissões de  $\text{CO}_2$  e o custo de transporte, passa por existir uma proximidade entre os centros produtores de energia e as florestas, podendo assim obter-se uma maior eficiência energética, reduzindo as deslocações (Fortuna *et al.*, 2012; Silva, 2009).

## **2.4. Avaliação de Ciclo de Vida**

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) permite realizar uma avaliação ambiental sobre todo o ciclo de vida de um produto, processo, serviço ou atividade económica, desde o início (por exemplo, desde a extração da matéria-prima) até ao final da vida útil do produto (por exemplo, quando este é encaminhado para aterro, incineração ou reciclagem), passando pelas várias etapas intermédias (produção, distribuição, utilização). Esta ferramenta, faz uma avaliação dos aspetos ambientais (consumo de recursos e emissões para o ambiente) e dos correspondentes impactes ambientais potenciais associados ao sistema em análise ao longo do seu ciclo de vida. A ACV está estruturada em 4 fases, de acordo com as normas ISO 14040 e 14044 (ISO 14040, 2006; ISO 14044,

2006): definição do objetivo e âmbito, análise do inventário, avaliação dos impactos ambientais e interpretação (Figura 7).



**Figura 7:** Fases de uma ACV (ISO 14044, 2006)

A fase de definição do objetivo, como o próprio nome diz, refere-se à definição da aplicação pretendida e das razões para a realização da ACV, bem como a indicação do público-alvo, ou seja, a quem se destinam os resultados gerados. Na definição do âmbito do estudo é feita a definição do produto e do seu ciclo de vida, das fronteiras do sistema e da unidade funcional do sistema (etapa essencial nesta fase), bem como as escolhas metodológicas, suposições e limitações mais importantes. Esta fase permite a realização de uma avaliação de forma consistente e é bastante importante, pois os aspetos que são definidos irão aparecer em todas as fases da ACV e ser relevantes para o ciclo de vida do produto (ISO 14044, 2006).

Na análise do inventário, existe o planeamento e a recolha de dados, considerada a parte mais exigente do ACV, e procedimentos de cálculo que representam os fluxos de entradas e saídas das diversas etapas do ciclo de vida do produto, de acordo com as fronteiras do sistema estabelecidas na fase anterior, compilando todos os dados numa lista que inclui consumos de materiais, água e energia e emissões de substâncias para o solo, água e ar. Nesta fase devem estar envolvidas etapas de recolha, validação, agregação e verificação dos dados, permitindo identificar se existe necessidade de obter

mais dados ou se existem limitações que causem mudanças nos métodos de levantamento dos dados (ISO 14044, 2006).

Na avaliação dos impactos da ACV, há a compreensão e avaliação dos potenciais impactos ambientais (magnitude e significância) do sistema. Os objetivos da AICV são melhorar a legibilidade dos resultados, através da redução do número de parâmetros por categoria, permitindo assim a comparação entre sistemas, e tornar os resultados mais compreensíveis, relevantes e fáceis de apresentar (ISO 14040, 2006).

A AICV é constituída por seis elementos, onde três elementos são de realização obrigatória (seleção das categorias de impacto, classificação e caracterização) e três elementos opcionais (normalização, agrupamento e ponderação). Na seleção das categorias de impacto, ocorre a escolha das categorias, indicadores de categoria e modelos de caracterização que devem ser implementados. A seleção destas categorias deve estar relacionada com os objetivos e âmbito do estudo. Na classificação, ocorre a correspondência dos dados de inventário com as categorias de impacto selecionadas, podendo ser relacionados a uma ou mais categorias. Por fim a caracterização, engloba a agregação dos dados de inventário dentro de cada categoria e a conversão para os indicadores de categoria correspondentes, resultando assim num único valor por categoria. Neste passo ocorre a utilização de fatores de caracterização (ISO 14044, 2006).

Existem ainda técnicas adicionais e informação que pode ser requerida para melhor entender os resultados da AICV, de modo a ajudar a distinguir se existem ou não diferenças significativas, identificar dados de inventário insignificantes e guiar o processo iterativo na ACV. A análise da qualidade dos dados é composta por estudos de incidência, incerteza e sensibilidade (ISO 14044, 2006).

Por fim, existe a fase de interpretação onde os resultados obtidos da análise do inventário e da AICV são sumariados e discutidos, fornecendo conclusões, limitações e recomendações de acordo com os objetivos e âmbito estipulados (ISO 14040, 2006).

Existem vários softwares usados para realização de estudos de ACV, sendo o SimaPro um dos mais utilizados. Este software foi desenvolvido para ser uma fonte de informação baseada em ciência, fornecendo total transparência, permitindo total controlo do estudo de ACV. É uma ferramenta profissional para recolha, análise e monitorização de dados de performance de sustentabilidade de produtos ou serviços, e pode ser usado para uma vasta variedade de aplicações, tais como, relatórios de sustentabilidade, pegada de carbono, pegada hídrica, design de produtos, criação de declarações ambientais de produto e determinação de indicadores-chave de desempenho (Pré, 2008).

### 3. Metodologia

#### 3.1. Objetivo e âmbito

O objetivo deste estudo incide na modelação e comparação dos impactes ambientais associados a sistemas de queima e valorização de biomassa florestal, de forma a efetuar a comparação entre alguns sistemas e identificar quais os processos que apresentam maior impacto ambiental dentro de cada sistema. A metodologia usada foi a ACV "*cradle-to-gate*", que significa que abrange todas as etapas relevantes do processo, desde a produção de matéria-prima até à conversão em energia térmica e energia elétrica nos sistemas em estudo.

Os sistemas de queima/valorização analisados neste estudo são a queima a céu aberto, lareiras com câmara de combustão aberta, recuperadores de calor e centrais elétricas dedicadas a biomassa. Para a queima a céu aberto realizou-se a comparação entre a queima de resíduos florestais secos e húmidos. Nos recuperadores de calor, fez-se a comparação entre recuperador de calor tradicional e de tecnologia moderna, assim como da forma de biomassa usada, nomeadamente lenha e pellets, ambas obtidas a partir de madeira de pinheiro bravo. Nas centrais elétricas dedicadas fez-se a comparação entre combustão em grelha e em leito fluidizado e também entre a utilização de madeira de pinheiro bravo e resíduos de eucalipto.

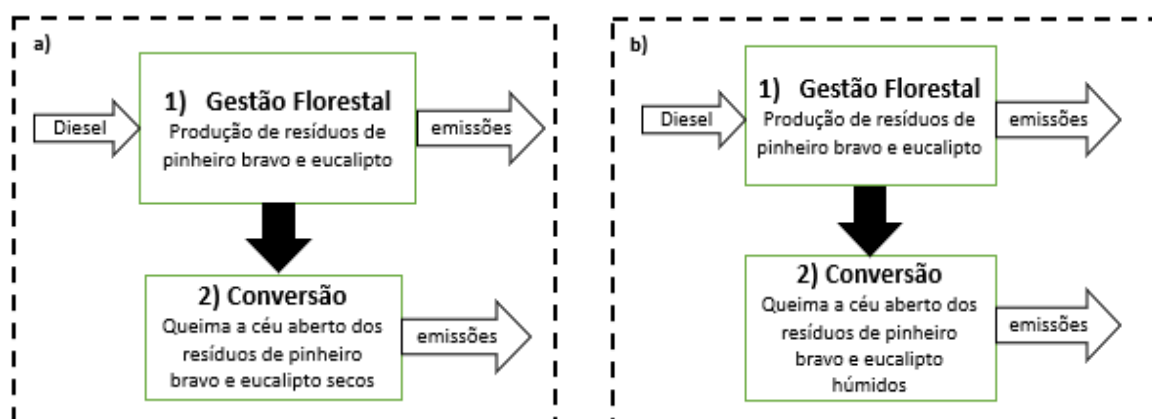
##### 3.1.1. Unidade funcional

A unidade funcional selecionada foi 1 MJ de calor libertado para a atmosfera para a queima a céu aberto, 1 MJ de energia térmica produzida para as lareiras e recuperadores de calor e 1 MJ de energia elétrica para as centrais elétricas dedicadas de biomassa.

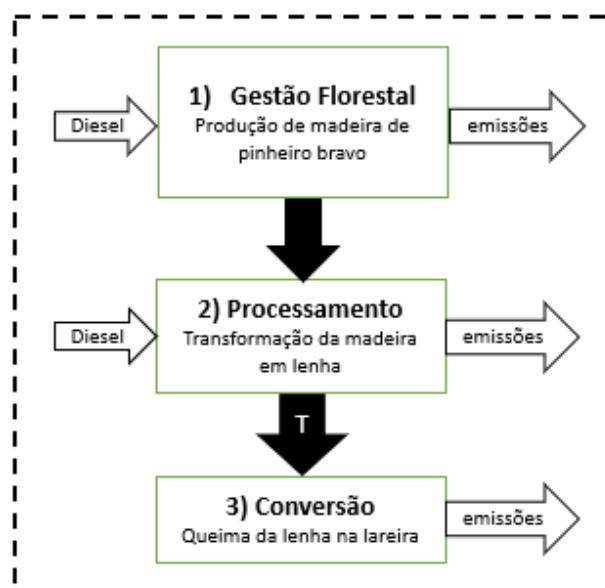
##### 3.1.2. Fronteiras dos sistemas

As fronteiras dos sistemas identificam os processos considerados na ACV. Neste estudo, a ACV aborda 11 sistemas, divididos em três etapas, cada um deles com vários processos integrados (Figuras 8 a 13). A primeira etapa é a gestão florestal, que inclui todas as operações de gestão florestal, incluindo preparação do terreno, instalação e condução dos povoamentos florestais, corte e recolha dos resíduos e madeira na floresta e o seu armazenamento para transporte.

A segunda etapa é o processamento da madeira e resíduos florestais na floresta ou em instalações de processamento. Nos sistemas de lareiras, recuperadores de calor a lenha e centrais elétricas, a madeira e resíduos usados para conversão são processados na floresta, através de rachadores ou estilhadores e, no caso dos recuperadores a pellets, a madeira (toros) pode ser transportada para instalações onde é devidamente processada, através do processo de peletização para formação dos pellets.

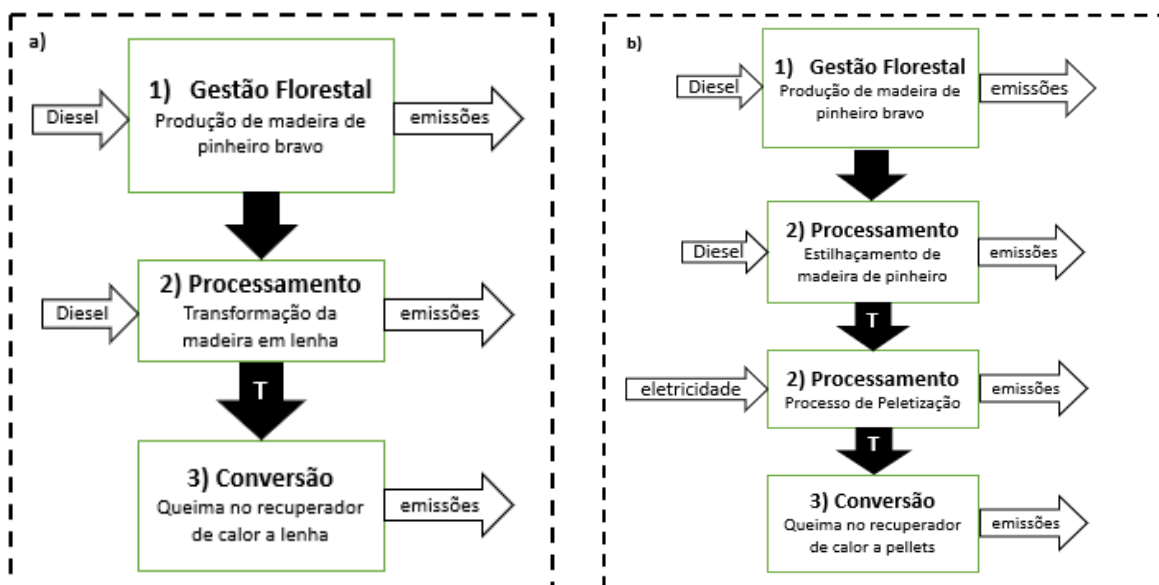


**Figura 8:** Fronteiras de sistema, a) queima a céu aberto de resíduos secos e b) queima a céu aberto de resíduos húmidos

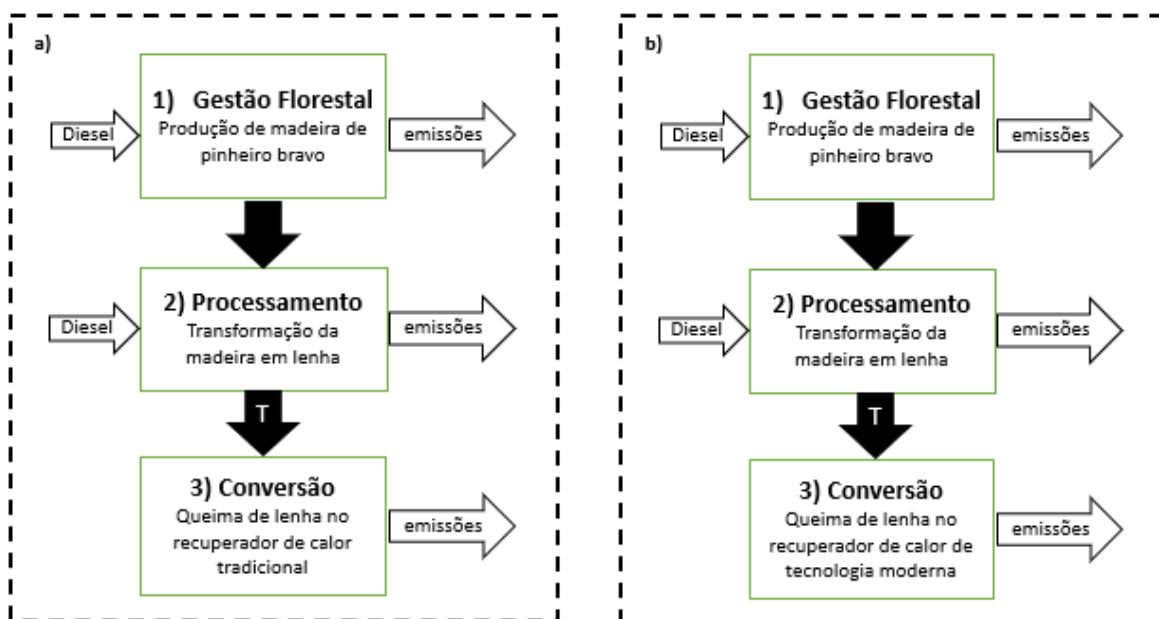


**Figura 9:** Fronteira de sistema de lareiras com câmara de combustão aberta

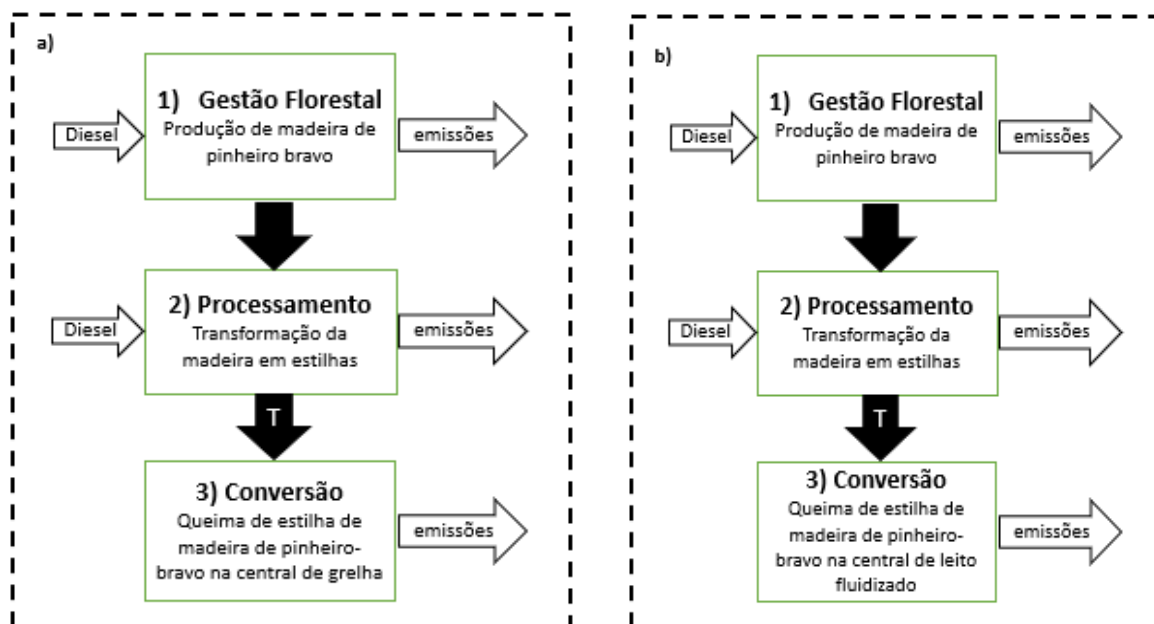




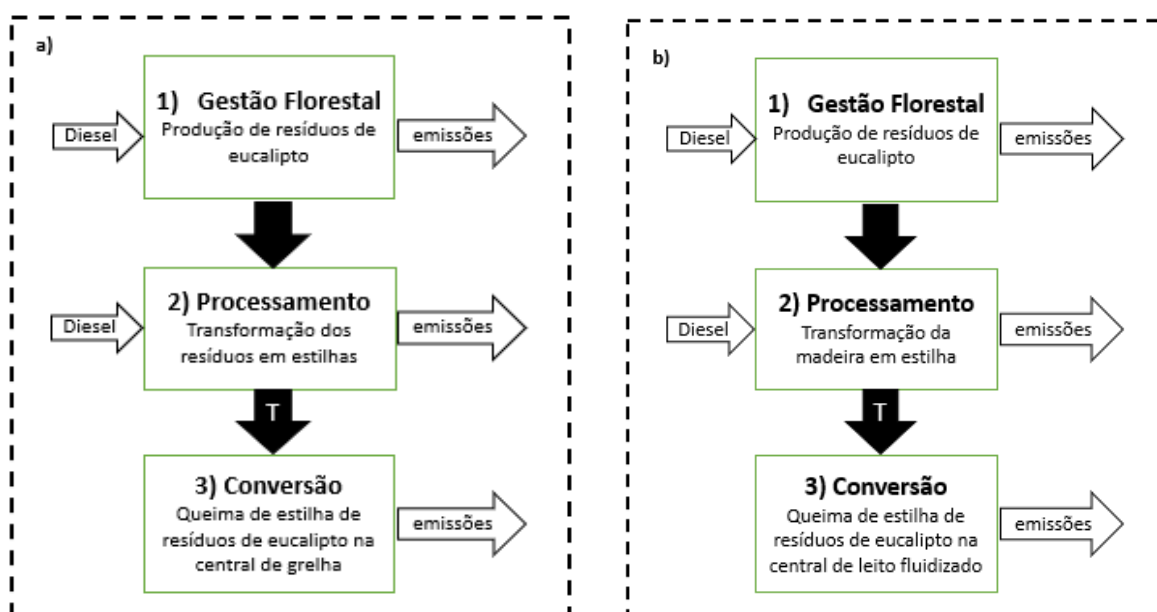
**Figura 10:** Fronteiras de sistema, a) recuperador de calor a lenha e b) recuperador de calor a pellets



**Figura 11:** Fronteiras de sistema, a) recuperador de calor tradicionais e b) recuperador de calor de tecnologia moderna



**Figura 12:** Fronteiras de sistemas, a) central elétrica de grelha a madeira de pinheiro-bravo; b) central elétrica de leito fluidizado a madeira de pinheiro-bravo



**Figura 13:** Fronteiras de sistemas, a) central elétrica de grelha a resíduos de eucalipto; b) central elétrica de leito fluidizado a resíduos de eucalipto

A terceira etapa é a conversão da biomassa em energia térmica ou elétrica, através da combustão da biomassa nos sistemas em estudo. Na queima a céu aberto, a queima dos resíduos é efetuada na floresta. Entre todas as fases existe transporte da biomassa desde a recolha no terreno até à sua utilização em cada um dos sistemas, exceto na queima a céu aberto onde a biomassa é queimada na floresta.

### **3.2. Inventário**

Os dados referentes à utilização de biomassa para produção de energia térmica ou elétrica foram obtidos através de fontes bibliográficas identificadas ao longo do documento, devido à falta de dados reais. Alguns dados referentes à produção de eletricidade, água, gás natural, areia, tratamento de cinzas e águas residuais foram obtidos da base de dados Ecoinvent do software SimaPro (Ecoinvent, 2017). Introduziu-se também o consumo de diesel no processamento da madeira, com base em Cespi *et al.* (2014), adotando o mesmo consumo específico (ou seja, por massa de biomassa usada) dos sistemas baseados em recuperadores de calor a lenha, de modo a uniformizar esses sistemas. Para os impactes associados à produção de madeira de pinheiro (rolaria) e resíduos florestais, as fontes de dados foram Dias, (2014) e Dias & Arroja, (2012), com alocação mássica entre resíduos e rolaria.

#### **3.2.1. Queima a céu aberto**

Na queima a céu aberto, os dados de inventário usados foram retirados de Aurell *et al.* (2017), fazendo-se uma divisão entre biomassa seca e biomassa húmida (Tabela5 ). Estes dados sofreram algumas alterações antes de serem introduzidos no SimaPro. A primeira alteração incidiu na unidade funcional que passou de kg de biomassa consumida para 1 MJ de calor libertado. A segunda alteração foi ao tipo de biomassa usada, em que se considerou resíduos de eucalipto e de pinheiro bravo (50% de cada) em vez de abeto (*Pseudotsuga menziesii*). O poder calorífico inferior (PCI) adotado para os resíduos foi de 17,5 MJ/kg, (base seca). Na biomassa seca o teor de humidade (*h*) foi de 10% e para a biomassa húmida foi de 30%.

**Tabela 5:** Dados de inventário referentes à queima de céu aberto, expresso por 1 MJ de calor libertado

Unidades		Total	
		Seca (10% <i>h</i> )	Húmida (30% <i>h</i> )
<b>ENTRADAS</b>			
Resíduos florestais	kg	0,064	0,082
<b>SAÍDAS</b>			
CO <sub>2</sub> biogénico	g	102	96,514
CO	g	1,657	4,686
CH <sub>4</sub>	g	0,063	0,326
PM <sub>2,5</sub>	g	0,257	1,029
BC	g	0,014	0,027
COV	mg	34,971	234,629
Naftaleno	mg	0,251	0,971
Acenaftileno	mg	0,143	0,914
Acenafteno	mg	0,019	0,091
Fluoreno	mg	0,055	0,366
Fenantereno	mg	0,189	1,086
Antraceno	mg	0,037	0,234
Fluoranteno	mg	0,051	0,394
Pireno	mg	0,045	0,354
Benzo(a)antraceno	mg	0,014	0,12
Criseno	mg	0,022	0,143
Benzo(b)fluoranteno	mg	0,007	0,074
Benzo(k)fluoranteno	mg	0,009	0,097
Benzo(a)pireno	mg	0,009	0,097
Indeno(1,2,3-cd)pireno	mg	0,004	0,048
Dibenz(a,h)antraceno	mg	0,001	0,011
Benzo(g,h,i)perileno	mg	0,005	0,056

### 3.2.2. Lareiras com câmara de combustão aberta

Nas lareiras os dados de inventário foram obtidos de Adamczyk, Piwovar, & Dzikuć, (2017) (Tabela 6). Neste sistema, foram feitas alterações em relação aos dados originais, alterando-se inicialmente a unidade funcional de 1 kWh de energia térmica produzida para 1 MJ de energia térmica produzida. Outra alteração realizada foi a utilização de madeira de pinheiro com um teor de *h* de 20% e PCI de 18,5 MJ/kg (base seca). A eficiência das lareiras foi de 10%. Assumiu-se por fim, uma distância de 30 km no transporte da biomassa desde a recolha até à sua utilização. O meio

de transporte considerado foi um caminhão de transporte de carga, com capacidade de 16-32 toneladas métricas.

**Tabela 6:** Dados de inventário referentes àslareiras com câmara de combustão aberta, expresso por 1 MJ de energia térmica útil produzida

	Unidades	Total
<b>ENTRADAS</b>		
Madeira, Pinheiro (20% <i>h</i> )	kg	0,0676
Transporte	tkm	0,0020
Diesel	kg	0,107
<b>SAÍDAS</b>		
CO <sub>2</sub> , biogénico	kg	0,092
CO	mg	444,444
NO <sub>x</sub>	mg	80,556
PM	mg	115,278
COV	mg	8,333
Cinzas	mg	9456

### 3.2.3. Recuperadores de calor

Nos recuperadores de calor, foram utilizados dois conjuntos de dados diferentes. Os dados retirados de Cespi *et al.* (2014), foram usados para a comparação entre recuperadores de calor a lenha e recuperadores de calor a pellets (Tabela 7 ). A eficiência dos recuperadores a lenha é de 60% e a eficiência dos recuperadores a pellets é de 64%. Algumas alterações foram realizadas aos dados originais. O tipo de biomassa usado nos recuperadores a lenha foi madeira de pinheiro com um teor de *h* de 20% e PCI de 18,5 MJ/kg (base seca) e para os recuperadores a pellets utilizou-se madeira de pinheiro, na forma de toros, com um teor de *h* de 10% e PCI de 18,5 MJ/kg (base seca). O meio de transporte considerado foi um caminhão de transporte de carga, com capacidade de 16-32 toneladas métricas, assumindo uma distância de 30 km no transporte da biomassa desde a recolha até à sua utilização.

**Tabela 7:** Dados de inventário referentes aos recuperadores de calor (lenha e pellets) expresso por 1 MJ de energia térmica produzida

Unidades		Total	
		Lenha (20% <i>h</i> )	Pellets (10% <i>h</i> )
<b>ENTRADAS</b>			
Madeira, Pinheiro	kg	0,113	0,094
Diesel	kg	1,78E-01	-
Eletricidade	kWh	-	2,43E-02
Transporte	tkm	0,003	0,002
<b>SAÍDAS</b>			
PM <sub>2.5</sub>	kg	1,46E-04	3,33E-05
CO <sub>2</sub> biogénico	kg	1,17E-01	1,24E-01
CO	kg	2,88E-03	1,23E-04
NO <sub>x</sub>	kg	2,00E-04	8,97E-05
PAH	kg	1,39E-08	1,42E-08
Dioxinas	kg	3,88E-14	3,97E-14
Arsénio	kg	1,25E-09	1,28E-09
Cadmio	kg	8,75E-10	8,97E-10
Crómio	kg	4,95E-09	5,07E-09
Cobre	kg	2,75E-08	2,82E-08
Chumbo	kg	3,13E-08	3,20E-08
Mercúrio	kg	3,75E-10	3,84E-10
Níquel	kg	7,50E-09	7,69E-09
Zinco	kg	3,75E-07	3,84E-07
Cinzas, incinerador	kg	1,92E-03	9,19E-04
Cinza, aterro	kg	1,92E-03	9,19E-04

Para a comparação entre os recuperadores de calor tradicionais e recuperadores de calor de tecnologia moderna, os dados de inventário foram retirados de Solli *et al.* (2009) (Tabela 8). O tipo de biomassa usado para ambos os recuperadores foi madeira de pinheiro com um teor de *h* de 20% e PCI de 18,5 MJ/kg (base seca). A eficiência dos recuperadores utilizada no artigo para estes recuperadores foi de 50% para os recuperadores tradicionais e de 70% para os de tecnologia moderna. Os dados originais foram alterados devido à alteração da unidade funcional de 1 kWh de energia térmica produzida para 1 MJ de energia térmica produzida. O meio de transporte considerado foi um camião de transporte de carga, com capacidade de 16-32 toneladas métricas, assumindo uma distância de 30 km no transporte da biomassa desde a recolha até à sua utilização.

**Tabela 8:** Dados de inventário referentes aos recuperadores de calor (tradicionais e tecnologia moderna) expressos por 1 MJ de energia térmica produzida

Unidades		Total	
		Tradicional	Tecnologia moderna
ENTRADAS			
Madeira, Pinheiro (20% <i>h</i> )	kg	0,135	0,097
Diesel	kg	2,14E-01	1,53E-01
Transporte	tkm	0,004	0,003
SAÍDAS			
CH <sub>4</sub>	kg	8,06E-04	5,83E-04
COVNM	kg	9,72E-04	6,94E-04
PM <sub>10</sub>	kg	2,36E-06	1,75E-06
PM <sub>2,5</sub>	kg	5,28E-03	6,11E-04
CO <sub>2</sub> biogénico	kg	1,00E-02	7,22E-03
CO	kg	2,03E-02	5,00E-03
NO <sub>x</sub>	kg	2,14E-04	1,53E-04
NH <sub>3</sub>	kg	4,17E-07	3,06E-07
N <sub>2</sub> O	kg	5,28E-06	3,61E-06
SO <sub>2</sub>	kg	3,06E-05	2,22E-05
PAH	kg	3,61E-07	2,78E-09
Dioxinas	kg	1,36E-13	9,72E-14
Arsénio	kg	1,78E-10	1,33E-10
Cádmio	kg	1,36E-08	9,72E-09
Crómio	kg	1,08E-09	8,06E-10
Cobre	kg	4,17E-09	3,06E-09
Chumbo	kg	6,39E-10	4,72E-10
Mercúrio	kg	6,67E-11	5,00E-11
Cinzas	kg	1,65E-03	1,18E-03

#### 3.2.4. Centrais elétricas dedicadas a biomassa

Nas centrais elétricas dedicadas a biomassa os dados originais retirados de da Costa *et al.* (2018), foram usados para realizar a comparação entre centrais elétricas de grelha e centrais elétricas de leito fluidizado, usando diferentes tipos de biomassa, nomeadamente resíduos florestais provenientes de eucalipto, com teor de *h* de 40% e PCI de 17,5 MJ/kg (base seca) (Tabela 9) e madeira de pinheiro, com teor de *h* de 20% e PCI de 18,5 MJ/kg (base seca) (Tabela 10). Os dados originais foram alterados devido à alteração da unidade funcional (da Costa *et al.* (2018) considera 1 kWh de energia produzida). Além disso, e tendo em conta que da Costa *et al.* (2018) considerou apenas resíduos florestais (RF) de eucalipto, os dados de consumo de biomassa para as centrais com utilização de madeira de pinheiro foram ajustados tendo em conta as eficiências (20% para a central a grelha e 25% para a central de leito fluidizado). As emissões foram também ajustadas, considerando os mesmos fatores de emissão (por massa de biomassa) de da Costa *et al.* (2018). O meio de transporte considerado foi um camião de transporte de carga, com capacidade de 16-32 toneladas métricas, assumindo uma distância de 30 km no transporte da biomassa desde a recolha até à sua utilização.

**Tabela 9:** Dados de inventário referentes às centrais elétricas dedicadas à biomassa (resíduos florestais de eucalipto) expressos por 1 MJ de energia elétrica produzida

Unidades		Total	
		Grelha	Leito fluidizado
ENTRADAS			
Resíduos florestais, Eucalipto (40% de <i>h</i> )	kg	0,306	0,254
Água	kg	0,561	0,789
Gás Natural	m <sup>3</sup>	0,005	0,001
Areia	g	-	3,5
Transporte	tkm	0,010	0,008
SAÍDAS			
CO <sub>2</sub> , fóssil	g	10,383	1,994
SO <sub>2</sub>	g	0,160	0,098
CH <sub>4</sub>	g	0,358	0,005
CO	g	1,383	0,194
N <sub>2</sub> O	g	0,017	0,039
NO <sub>x</sub>	g	0,894	0,744
COVNM	g	0,040	0,033
PM <sub>10</sub>	g	0,134	0,111
PM <sub>2,5</sub>	g	0,111	0,078
Cinzas	g	31,1	26,1
Águas residuais	kg	0,028	0,039

**Tabela 10:** Dados de inventário referentes às centrais elétricas dedicadas à biomassa (madeira de pinheiro) expressos por 1 MJ de energia elétrica produzida

Unidades		Total	
		Grelha	Leito fluidizado
ENTRADAS			
Madeira, Pinheiro bravo (20% de <i>h</i> )	kg	0,260	0,214
Água	kg	0,561	0,789
Gás Natural	m <sup>3</sup>	0,005	0,001
Areia	g	-	3,5
Transporte	tkm	0,008	0,006
SAÍDAS			
CO <sub>2</sub> , fóssil	g	10,383	1,994
SO <sub>2</sub>	g	0,136	0,083
CH <sub>4</sub>	g	0,305	0,004
CO	g	1,179	0,164
N <sub>2</sub> O	g	0,014	0,033
NO <sub>x</sub>	g	0,765	0,629
COVNM	g	0,033	0,027
PM <sub>10</sub>	g	0,114	0,094
PM <sub>2,5</sub>	g	0,094	0,066
Cinzas	g	26,494	22,038
Águas residuais	kg	0,028	0,039



### 3.3. Avaliação do impacto ambiental

Depois da definição do objetivo e âmbito e da criação do inventário do ciclo de vida para cada sistema em estudo, o próximo passo é a Avaliação dos Impactes do Ciclo de Vida (AICV), em que os resultados são agregados em categorias de impacto ambiental. Neste estudo, a avaliação dos impactes foi realizada através do método ReCiPe 2016 Midpoint V1.01 (Huijbregts *et al.*, 2016).

Este método veio suceder aos métodos Eco-indicator 99 e CML-IA, incorporando a "abordagem orientada a problemas" do CML-IA e a "abordagem orientada para danos" do Eco-indicator 99.

O ReCiPe possui categorias de impacto de *midpoint* (orientadas para problemas) e de *endpoint* (orientadas para danos). A nível de *midpoints*, o ReCiPe apresenta 18 categorias de impacto, como por exemplo alterações climáticas, depleção de ozono estratosférico, radiação ionizante, formação de matéria particulada, formação de ozono fotoquímico, acidificação terrestre, eutrofização de água doce, toxicidade, uso do solo, escassez de recursos minerais e fósseis. A nível de *endpoints* considera três categorias, nomeadamente dano na saúde humana, danos nos ecossistemas e danos na disponibilidade de recursos.

As categorias de impacto usadas para a análise neste estudo foram selecionadas de acordo com o tipo de dados do inventário disponíveis. Assim, foram consideradas os seguintes impactes:

- **Aquecimento global**, medidas em g de CO<sub>2</sub> eq. Causadas pela emissão de GEE, que conduz a um aumento da concentração atmosférica de GEE, e consequentemente a um aumento da temperatura média global. O aumento da temperatura vai causar danos à saúde humana e aos ecossistemas. As emissões de CO<sub>2</sub> biogénico resultante da queima de biomassa são consideradas neutras para o impacto do aquecimento global, uma vez que o CO<sub>2</sub> libertado na queima é reabsorvido pelas árvores no seu crescimento (Fortuna *et al.*, 2012).

- **Formação de matéria particulada**, medida em mg de PM<sub>2,5</sub> eq. Originada pela poluição do ar que causa aerossóis primários e secundários na atmosfera. Pode ter um impacto negativo substancial na saúde humana, variando de sintomas respiratórios até à morte. A PM<sub>2,5</sub> representa uma mistura complexa de substâncias orgânicas e inorgânicas. A PM<sub>2,5</sub> causa problemas de saúde humana quando atinge a parte superior das vias aéreas e pulmões quando inalado. As PM<sub>2,5</sub> secundárias são formadas no ar através das emissões de SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> e NO<sub>x</sub>, entre outros elementos.

- **Acidificação**, medida em g de SO<sub>2</sub> eq. É causada pela deposição atmosférica de substâncias inorgânicas, como sulfatos, fosfatos e nitratos, que alteram a acidez do solo. As maiores emissões acidificadoras são as substâncias como NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> ou SO<sub>2</sub>. Estes compostos ao serem

depositados no solo, vão sofrer um processo de lixiviação para o solo, e alterar a concentração de  $H^+$  existente. Esta mudança na acidez, pode afetar as espécies existentes naquele solo, podendo causar o seu desaparecimento.

- **Formação de ozono fotoquímico**, medida em g de  $NO_x$  eq. O ozono não é diretamente emitido para a atmosfera, mas sim formado através de reações fotoquímicas entre poluentes primários ( $NO_x$ , COVNM, CO), sendo um processo não linear pois depende das concentrações de  $NO_x$ . O ozono nos seres humanos, em elevadas concentrações pode originar doenças respiratórias e na flora causa a redução do crescimento e produção de sementes nas plantas e senescência das folhas (Gregor, 2003).

- **Eutrofização**. Ocorre devido à libertação de nutrientes no solo, em rios ou no mar que causa o aumento dos níveis destes nutrientes (P e N). Existem vários impactes associados a eutrofização, como o aumento do crescimento de plantas aquáticas e algas que conduzem à redução das concentrações de  $O_2$ , afetando outras espécies como os peixes. Este aumento excessivo de nutrientes pode levar a alterações indesejáveis como o desaparecimento de espécies. Na **eutrofização marinha**, medida em mg de N eq, os impactes são baseados na emissão de azoto e na **eutrofização de água doce**, medida em mg de P eq, os impactes são baseados nas emissões de P do solo para os rios e lagos.

- **Escassez de recursos fósseis**, medida em kg de óleo eq. O aumento da extração de combustíveis fósseis causa um aumento nos custos de extração, devido a alterações nas técnicas de produção ou no fornecimento. Um exemplo é quando todo o petróleo convencional é consumido, em que técnicas alternativas serão aplicadas, como recuperação avançada de petróleo, ou este será produzido em locais geográficos que apresentam custos mais elevados, como as regiões do Ártico. O potencial de combustível fóssil é usado na determinação deste impacte.

- **Escassez de recursos minerais**, medida em kg de Cu eq. Quando são extraídos minerais, o teor de minério desse mineral diminui, logo quanto menor o teor de minério, maior a quantidade do mesmo que precisa de ser produzida para extrair a mesma quantidade do recurso mineral, o que implica maior produção de resíduos. Futuramente as próximas extrações de minerais devem ser consideradas. O indicador desta categoria será o aumento da quantidade de minério por kg de mineral extraído, considerando todo o recurso mineral futuro a ser extraído.

## 4. Resultados e Discussão

Na Tabela 11 são apresentados os resultados obtidos para os impactos ambientais na produção de 1 MJ de calor libertado, 1 MJ de energia térmica produzida e 1 MJ de energia elétrica produzida a partir da combustão de biomassa florestal, em cada sistema de queima/valorização. As Figuras 14, 15 e 16 exibem as contribuições relativas de cada sistema nas categorias de impacto em estudo, sendo a Figura 14 relativa à queima a céu aberto (QCA) seca e húmida, a Figura 15 relativa às lareiras e recuperadores de calor (RC), e a Figura 16 relativas às centrais elétricas (CE).

### 4.1. Queima a céu aberto

Para o aquecimento global registou-se maior impacto na fase de conversão na utilização de resíduos húmidos em relação aos resíduos secos, estando de acordo com o esperado, uma vez que as emissões de  $\text{CH}_4$  geradas através da queima dos resíduos florestais são maiores na queima de resíduos húmidos devido a elevada concentração de humidade, a combustão dos resíduos é ineficiente, demorando mais tempo a ser consumidos, produzindo maior formação/libertação de gases de combustão. A fase de gestão florestal apresenta também um contributo nesta categoria, devido às emissões de gases poluentes associados aos processos de recolha dos resíduos

Na formação de material particulado, a conversão teve uma maior contribuição em relação à gestão florestal, sendo que para a QCA de resíduos húmidos existe uma maior contribuição da conversão do que para a QCA de resíduos secos. Um resultado coerente, visto que, na queima de biomassa húmida existe maior emissão de matéria particulada devido à baixa eficiência de combustão que leva a maior emissão de fumo, causada pela percentagem elevada de humidade existente na biomassa.

Para os restantes impactos analisados, a formação de ozono, a acidificação, a eutrofização de água doce e marinha e a escassez de recursos minerais e fósseis, estes sistemas, com base nos dados disponíveis, apresentaram graficamente apenas a contribuição da gestão florestal, que se apresentou igual para a QCA de resíduos secos e QCA de resíduos húmidos, uma vez que não se obteve informação relativa à etapa de conversão.

**Tabela 11:** Resultados totais da avaliação de impactes ambientais associados à produção de 1 MJ de energia térmica e elétrica a partir da combustão de resíduos florestais, para cada sistema de valorização

Categorias de impacte	Unidade	1 MJ energia térmica							1 MJ energia elétrica			
		QCA seca	QCA húmida	Lareira aberta	RC lenha	RC pellets	RC tradicional	RC tecnologia moderna	CE grelha	CE leito fluidizado	CE grelha (RF)	CE leito fluidizado (RF)
<b>Aquecimento global</b>	g CO2 eq	3,358	12,295	56,048	90,912	12,594	101,649	73,134	32,196	16,858	35,703	19,581
<b>Formação ozono, saúde humana</b>	g NO <sub>x</sub> eq	0,004	0,004	0,270	0,501	0,121	0,630	0,451	0,795	0,652	0,924	0,767
<b>Formação de matéria particulada</b>	mg PM2.5 eq	260,109	1031,535	1636,252	419,556	67,673	5522,275	785,132	228,626	167,147	271,602	201,021
<b>Formação ozono, ecossistema terrestre</b>	g NO <sub>x</sub> eq	0,004	0,004	0,281	0,521	0,121	0,754	0,540	0,799	0,655	0,929	0,771
<b>Acidificação</b>	g SO2 eq	0,012	0,012	0,465	0,861	0,104	0,760	0,546	0,439	0,330	0,553	0,423
<b>Eutrofização água doce</b>	mg P eq	0,291	0,291	10,156	8,656	3,636	5,809	4,171	12,828	10,745	14,996	12,658
<b>Eutrofização marinha</b>	mg N eq	2,590	2,590	6,70E-01	1,291	0,194	0,993	0,714	0,189	0,253	16,787	14,044
<b>Escassez recursos minerais</b>	kg Cu eq	7,42E-07	7,42E-07	8,61E-06	6,54E-06	1,94E-06	5,07E-06	3,64E-06	2,71E-06	2,42E-06	3,0E-06	2,69E-06
<b>Escassez recursos fósseis</b>	kg óleo eq	4,0E-04	4,0E-04	0,112	0,219	0,003	0,187	0,134	0,007	0,002	0,007	0,002

## 4.2. Lareiras com câmara de combustão aberta

O contributo no aquecimento global pelos sistemas de lareiras deveu-se, principalmente, ao consumo de diesel que está associado às maquinarias de processamento da madeira (rachamento), através de emissões de CO<sub>2</sub>. A fase de gestão florestal também apresenta um pequeno contributo derivado da emissão de CO<sub>2</sub> através da combustão de combustíveis fósseis nas maquinarias de recolha e processamento da madeira.

As emissões de NO<sub>x</sub>, CO e COV estão envolvidas na formação de ozono, sendo que o diesel através da sua combustão é produtor destas emissões, apresentando-se como principal contribuidor neste impacte. A conversão da madeira em energia térmica através da sua queima e a gestão florestal também apresentaram contribuição na formação de ozono, mas bastante mais pequena.

Para o impacte da formação de material particulado, a principal contribuição observada foi na transformação da madeira, através da queima do diesel, devido à libertação de PM (2,5) e NO<sub>x</sub>. A etapa de conversão apresenta também contributo neste impacte, devido ao mesmo tipo de emissões. No entanto, seria de esperar um impacte superior nesta etapa, pois as emissões de material particulado são maiores nas lareiras, que apresenta uma eficiência inferior a 10%, devido à temperatura na câmara de combustão deste equipamento ser inferior, comparado com os recuperadores de calor. Estas temperaturas mais baixas, são causadas por níveis elevados de excesso de ar na câmara de combustão, originando taxas de conversão de biomassa menores e causando maiores emissões de compostos inqueimados (Gonçalves *et al.*, 2011).

Na acidificação, apresentaram-se contribuições na conversão de biomassa, no transporte e na utilização do diesel, sendo esta última a principal contribuição, como se esperava. Esta utilização gera a emissão de NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> para a atmosfera que formará chuvas ácidas, causando acidez dos solos e da água. O transporte e a gestão florestal, que apresentaram uma menor contribuição neste impacte, contribuem através da queima de combustíveis fósseis durante as deslocações (recolha -consumidor) e processos de gestão florestal, respetivamente.

A emissão de compostos fosfatados associados à utilização de diesel justifica os resultados que apresentam este como principal contribuinte na eutrofização de água doce. A gestão florestal e a disposição das cinzas derivadas da combustão da madeira, também contribuíram para este impacte. Na eutrofização marinha, as emissões que mais contribuem são de NO<sub>x</sub> emitidos na libertação de gases gerados na combustão de combustível fóssil, como é o caso do diesel, que nesta categoria de impacte se apresentou como o maior contribuinte.

Relativamente à escassez de recursos minerais, este sistema de lareira aberta apresentou, semelhantemente aos restantes impactes, como principal responsável o diesel, justificado pelos processos de extração de petróleo necessário para a formação do diesel. Também a gestão florestal apresentou uma contribuição que é associada aos processos silvícolas, através de utilização de fertilizantes. Para a escassez de recursos fósseis, tal como esperado, apresentou maior contribuição através da utilização do diesel.

#### **4.3. Recuperadores de calor**

No impacto de aquecimento global, os principais contribuintes foram a utilização de diesel, nos três tipos de recuperadores a lenha, e o consumo de eletricidade nos recuperadores a pellets. O consumo de diesel é usado no processo de rachamento da madeira, contudo, em relação às lareiras, o diesel apresentou uma contribuição menor devido a um menor consumo causado por uma menor utilização de lenha. Em relação à eletricidade, nos recuperados a pellets, o seu contributo está associado ao processo de peletização (secagem e extrusão) que representam um impacto reduzido.

O impacto da etapa de conversão foi nulo para os recuperadores a lenha e os recuperadores a pellets, devido à neutralidade assumida para o balanço de CO<sub>2</sub> e pelo facto de a fonte bibliográfica utilizada não fornecer emissões de CH<sub>4</sub>. A fase de conversão, nos recuperadores tradicionais e de tecnologia moderna, apresenta contribuições neste impacto devido às emissões de CH<sub>4</sub> verificando-se para os recuperadores de tecnologia moderna um menor contributo em relação aos tradicionais, tal como esperado.

Na formação de ozono, o principal contribuinte observado foi o diesel, relacionado com os recuperadores a lenha, usado nos processos de rachamento da madeira. A conversão apresentou contribuições neste impacto em todos os recuperadores, sendo menor nos recuperadores a pellets e modernos, devido a uma combustão mais eficiente produzindo menos poluentes que os recuperadores tradicionais e a lenha.

O impacto da formação de matéria particulada, teve como principais contribuintes a conversão de biomassa e consumo de diesel, através da emissão de PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>x</sub> e PAH, verificando-se resultados diferentes entre as várias tipologias de recuperadores analisadas. Nos recuperadores a lenha a utilização de diesel apresentou maior destaque em relação aos restantes contribuintes. Nos recuperadores a pellets, a conversão é o maior contribuinte devido à utilização de eletricidade. Os resultados da conversão indicaram maior formação de material particulado nos recuperadores a lenha em relação aos recuperadores a pellets, devido à eficiência de combustão do recuperador a pellets ser maior em relação ao recuperador a lenha e as características da biomassa usada na combustão serem

diferentes. Em relação aos recuperadores tradicionais e modernos, a conversão da madeira em energia térmica apresentou maior contributo, seguindo-se a utilização do diesel. A contribuição na conversão, apresentou-se significativamente maior nos recuperadores tradicionais, em relação aos modernos, devido à eficiência de combustão e taxa de remoção de gases formados durante a combustão serem inferiores.

Na acidificação, os recuperadores a lenha, tradicionais e de tecnologia moderna apresentam contribuições, devido principalmente às emissões de substâncias precursoras, como o  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}_x$ , através da queima do diesel no processamento de madeira. No caso dos recuperadores a pellets o consumo de eletricidade representou uma contribuição importante neste impacte. No gráfico representado na Figura 15, a conversão de biomassa nos recuperadores a lenha e tradicionais demonstrou-se maior em relação aos pellets e recuperadores modernos. A gestão florestal apresentou um pequeno contributo devido aos processos de transformação e recolha da madeira.

No impacte de eutrofização de água doce, o maior contribuinte é o consumo de eletricidade para os recuperadores a pellets e o consumo de diesel para os restantes recuperadores. A formação de cinzas, apresentou contribuição neste impacte devido à emissão de  $\text{NH}_3$  e  $\text{NO}_x$ . Observou-se nos resultados obtidos, uma formação de cinzas maior nos recuperadores a lenha e tradicionais devido à combustão ineficiente. A gestão florestal apresentou uma contribuição neste impacte, associado aos processos de cultivo, corte e recolha da madeira e manutenção do solo. No impacte de eutrofização marinha, o principal contribuinte nos recuperadores a lenha, tradicionais e tecnologia moderna foi o diesel consumido nos diversos processos de tratamento da madeira, e no recuperador a pellets foi o consumo de eletricidade, para o processo de peletização.

Na escassez de recursos minerais, o contributo do diesel destaca-se devido aos processos envolvidos na produção do combustível fóssil. A fase de gestão florestal apresentou uma pequena contribuição associada à utilização de nutrientes (fertilizantes) na produção da biomassa. Para a escassez fóssil, o diesel é também o principal contribuinte, nos recuperadores a lenha, tradicionais e de tecnologia moderna. Nos recuperadores a pellets, o impacte nesta categoria é muito inferior, estando principalmente associado à utilização de combustíveis fósseis na gestão da madeira na floresta.

#### 4.4. Centrais elétricas dedicadas de biomassa

Abordando as centrais elétricas dedicadas, os resultados obtidos foram divididos em dois grupos de acordo com o tipo de biomassa utilizada (resíduos florestais derivados de eucalipto e madeira derivada de pinheiro bravo) e o tipo de central elétrica (grelha e leito fluidizado). Observou-se, para ambos os tipos de biomassa, que as centrais elétricas de leito fluidizado apresentavam menores impactos em todas as categorias em estudo, em relação às centrais elétricas de grelha.

Os contributos associados ao aquecimento global resultam principalmente da fase de conversão da biomassa em energia elétrica, devido às emissões de CO<sub>2</sub> fóssil emitido durante o início de combustão da biomassa (queima de gás natural). Como se observa na Figura 16, no gráfico referente a esta categoria, a utilização de gás natural é superior nas centrais a grelha em relação às de leito fluidizado. O transporte da biomassa também apresentou um contributo para esta categoria de impacto, associado à queima de combustíveis fósseis com emissão de GEE, desde o local de recolha até à central. A gestão florestal também demonstrou um contributo nesta categoria, devido às emissões de GEE causadas pelos processos de cultivo, recolha da biomassa e manutenção do solo.

Na formação de matéria particulada, os impactos obtidos estão relacionados com a eficiência de conversão da biomassa em energia elétrica por parte das centrais. Esta formação é causada pela eficiência de combustão, verificando-se que as centrais de leito fluidizado apresentam melhor taxa de combustão, produzindo menor concentração de material particulado em relação às centrais de grelha. A etapa de gestão florestal apresenta uma contribuição mais reduzida, que é causada pela libertação de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, COVNM durante os processos de recolha da biomassa, verificando-se maiores na gestão florestal de resíduos de eucalipto em relação à gestão florestal de madeira de pinheiro.

Na formação de ozono, os impactos são associados à presença de emissões de CO, COVNM e NO<sub>x</sub> provenientes da fase de conversão energética através da queima de biomassa e gás natural. Estas emissões verificam-se superiores nas centrais de grelha em relação às de leito fluidizado devido, às condições de conversão serem mais eficientes e taxa de combustão da biomassa ser maior nas centrais de leito fluidizado. O transporte da biomassa e a gestão florestal também apresentam contribuição nesta categoria de impacto, mas pouco relevante.

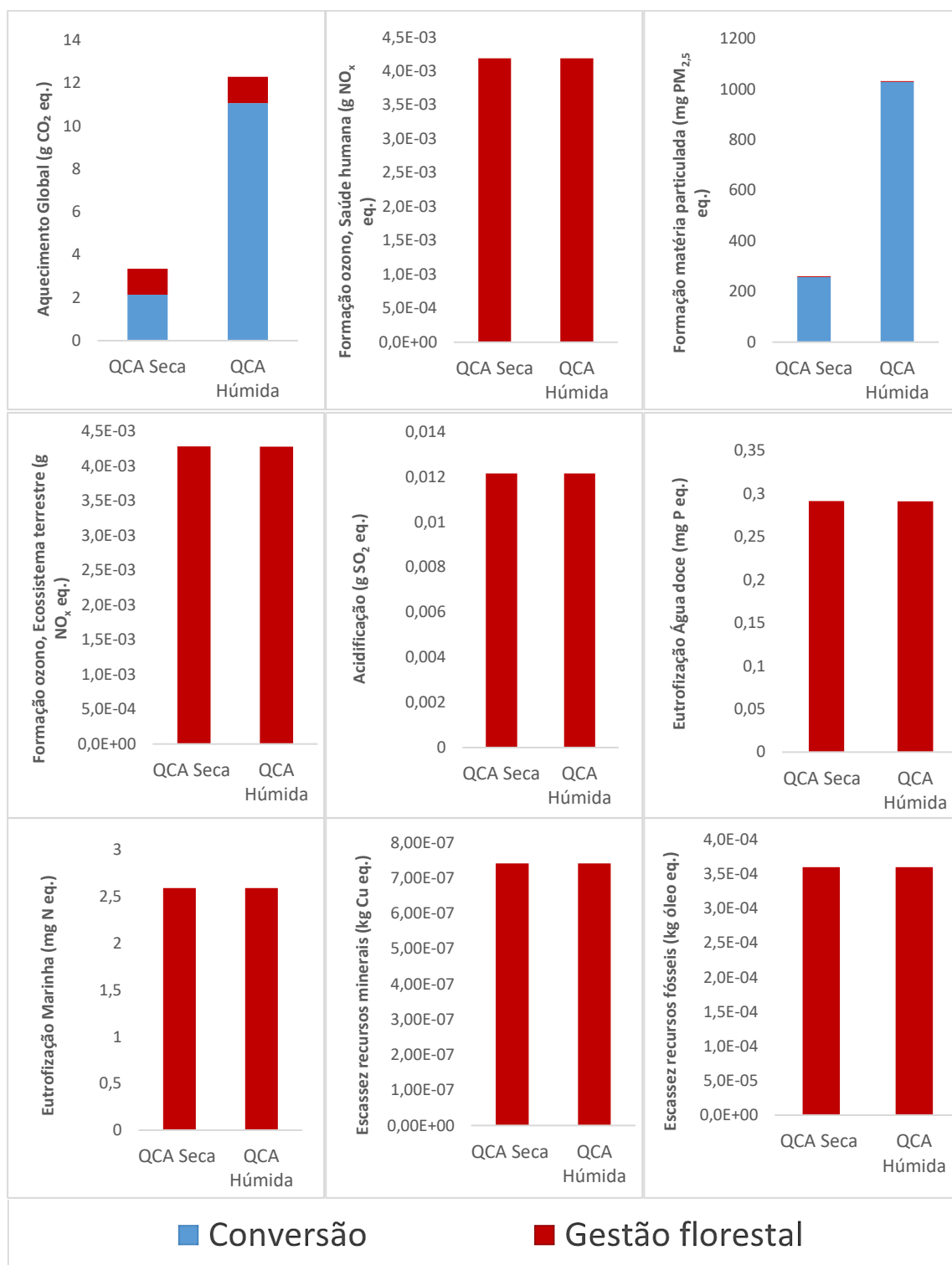
Na categoria de acidificação, as emissões responsáveis para este impacto são de NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub>, derivadas principalmente da fase de combustão da biomassa e de gás natural nas centrais. O transporte e gestão florestal também apresentam um contributo associado a esta categoria, notando-se maior impacto, na recolha de resíduos de eucalipto em relação à recolha de madeira de pinheiro.



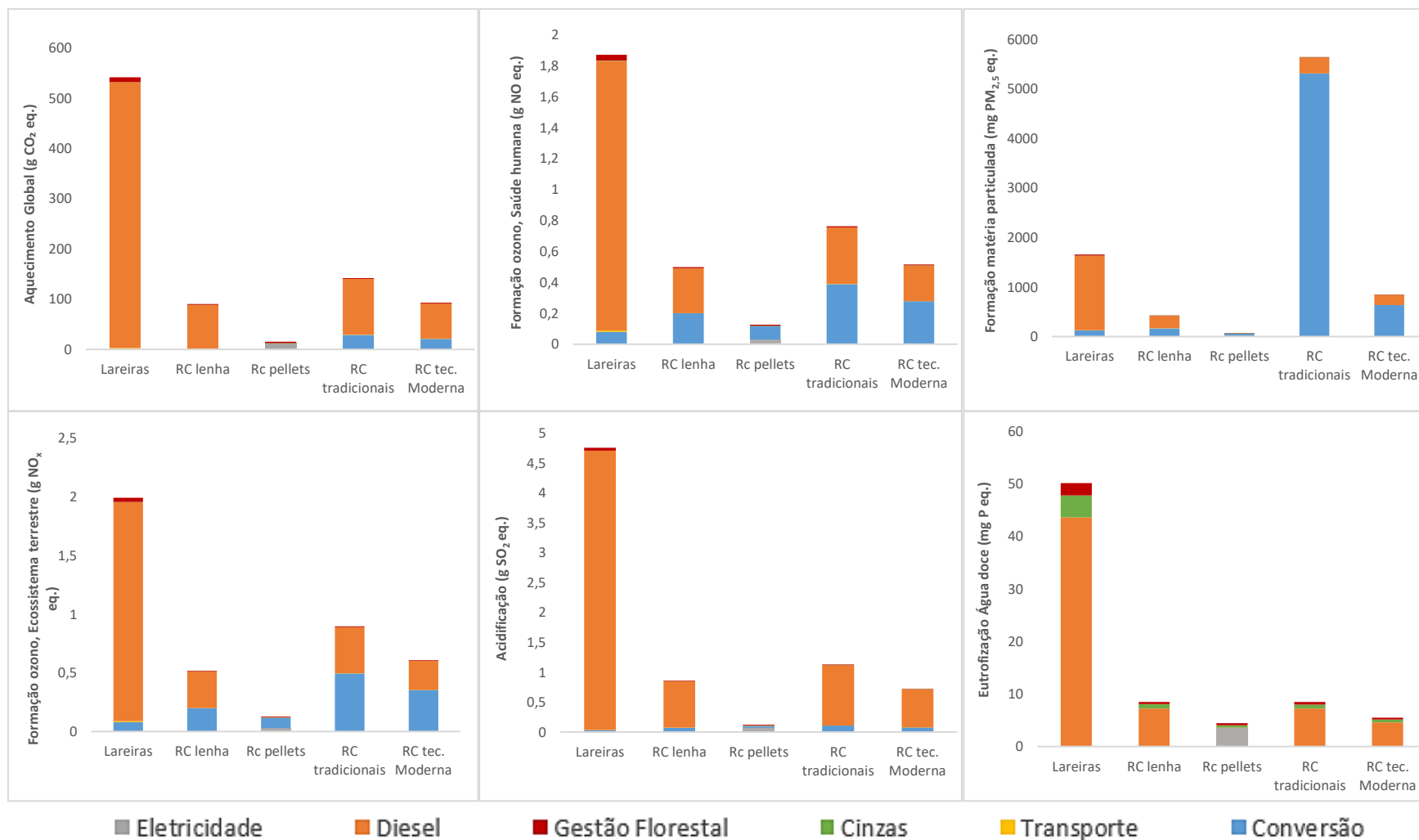
Na categoria de eutrofização em água doce, verificou-se que onde existia maior emissão de compostos de fosfato era na deposição de cinzas. Esta formação é maior nas centrais a grelha devido ao maior consumo de biomassa necessário para produzir 1 MJ de energia elétrica, em relação à central de leito fluidizado, quer na utilização de resíduos de eucalipto quer na utilização de madeira de pinheiro.

Na categoria de eutrofização marinha, verificou-se que onde existia maior emissão de compostos de azoto era na fase de gestão florestal, devido aos processos de fertilização no cultivo da biomassa. Segundo o gráfico referente a esta categoria, o maior contributo foi nas centrais elétricas dedicadas com utilização de resíduos de eucalipto, pois o consumo de azoto durante o cultivo é superior em relação ao pinheiro-bravo.

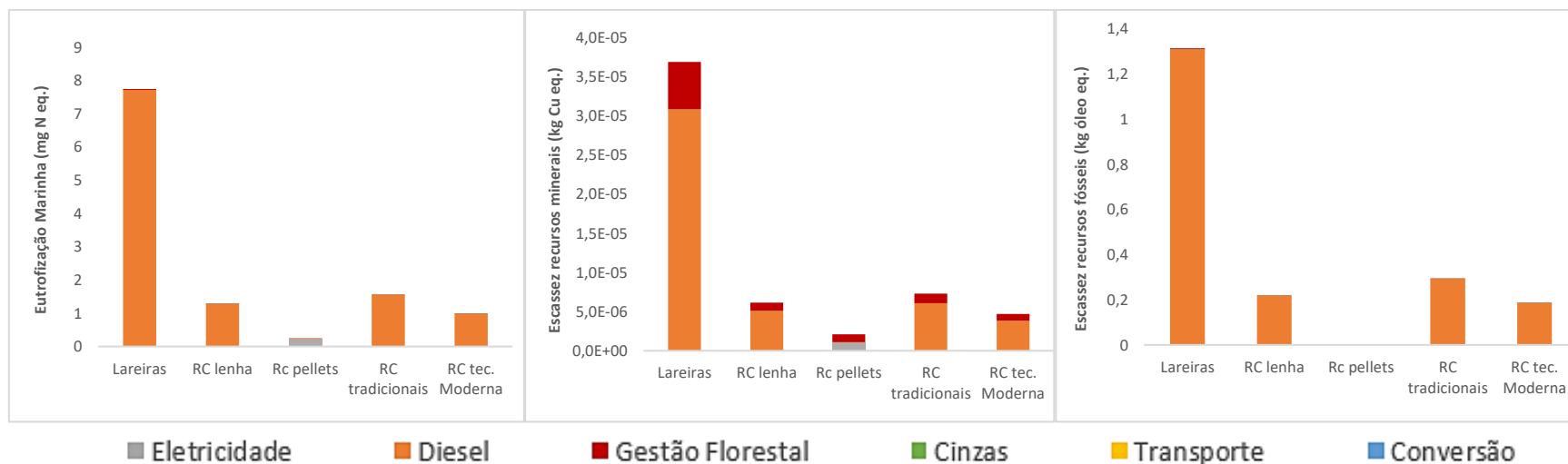
No impacte da escassez de recursos minerais, a maior contribuição foi na fase de gestão florestal, para todas centrais, devido ao consumo de nutrientes durante a fase de cultivo da biomassa (madeira de pinheiro e resíduos de eucalipto). No impacte da escassez de recurso fósseis, a maior contribuição foi da utilização de gás natural, usado para iniciar o processo de combustão da biomassa, sendo maior nas centrais de grelha. A gestão florestal e o transporte também apresentam contribuição para este impacte, devido ao consumo de combustíveis fósseis.



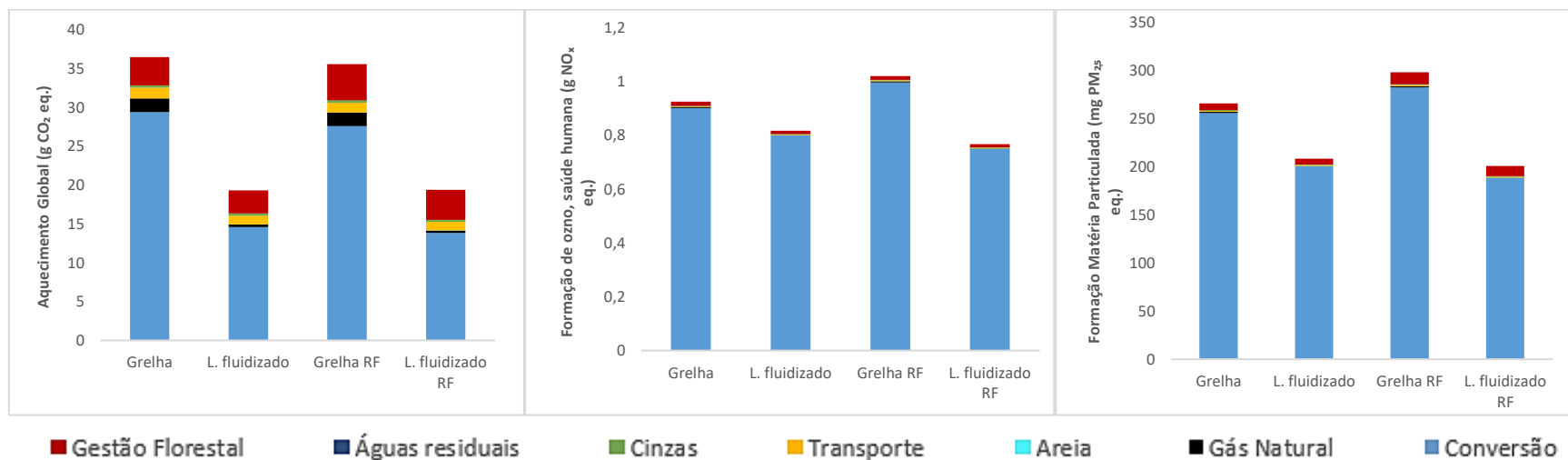
**Figura 14:** Contribuições relativas aos sistemas de queima a céu aberto nas categorias de impactos ambientais em estudo



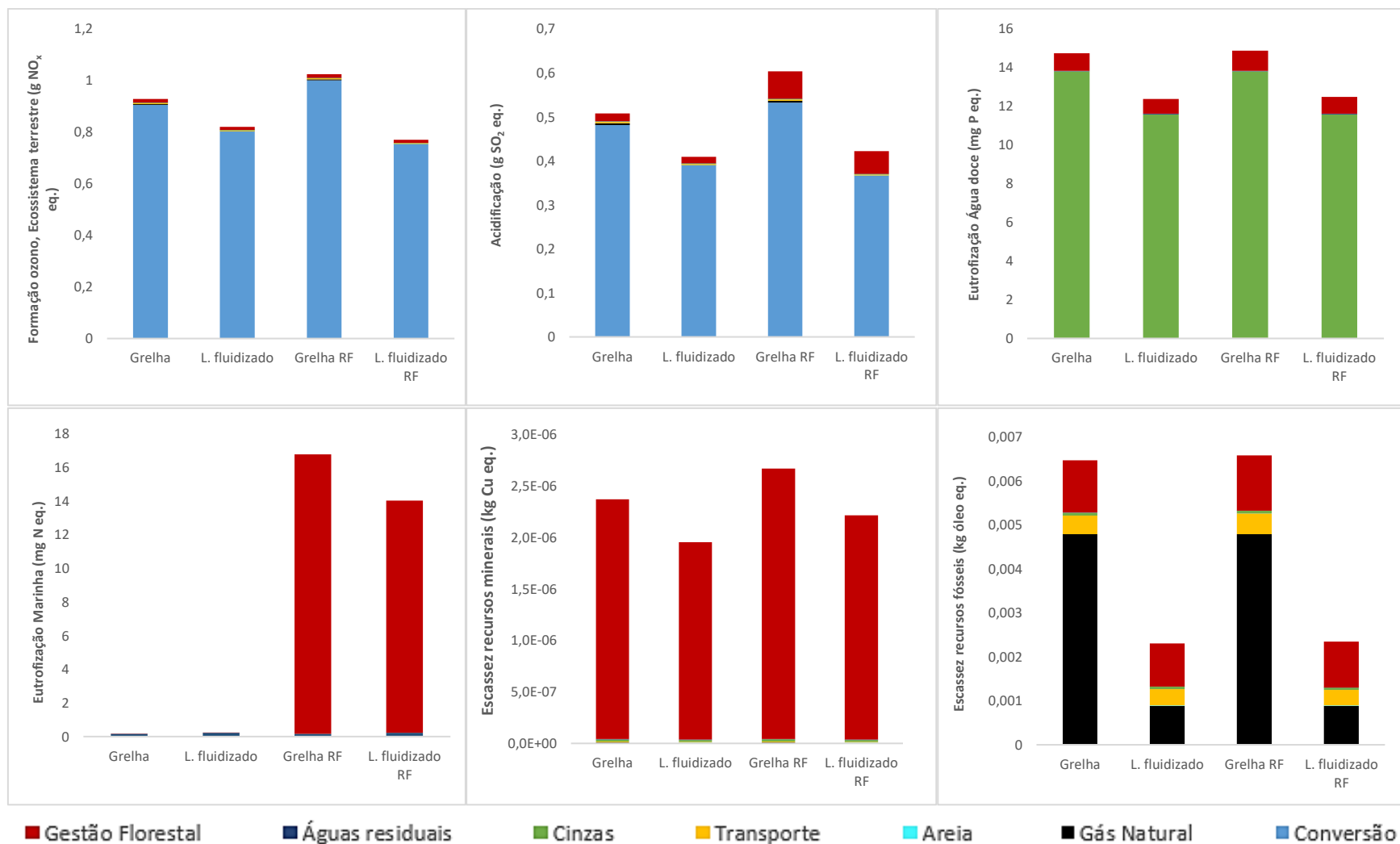
**Figura 15:** Contribuições relativas aos sistemas de lareiras e recuperadores de calor nas categorias de impactos ambientais em estudo



**Figura 15:** Contribuições relativas aos sistemas de lareiras e recuperadores de calor nas categorias de impactes ambientais em estudo (continuação)



**Figura 16:** Contribuições relativas aos sistemas de centrais elétricas dedicadas nas categorias de impactes ambientais em estudo



**Figura 16:** Contribuições relativas aos sistemas de centrais elétricas dedicadas nas categorias de impactos ambientais em estudo (continuação)



## 5. Conclusão

O presente estudo destinou-se a modelar os impactos ambientais relativos ao consumo de recursos e emissões para o ambiente resultantes da combustão de biomassa florestal nos sistemas em estudo. Os resultados obtidos foram ao encontro do objetivo pretendido neste estudo.

A utilização da ACV permitiu realizar uma comparação entre os vários sistemas em estudo para as diferentes categorias de impacto ambiental. Esta modelação apresenta a vantagem de quantificar a contribuição de cada processo dentro de cada sistema, ajudando a entender quais os aspetos mais críticos a serem selecionados e tratados de modo a reduzir cargas para o meio ambiente.

Os resultados gerados pela ACV mostraram que na queima a céu aberto a utilização de madeira húmida apresenta maior impacto nas categorias de aquecimento global e formação de PM em relação à utilização de madeira seca. Em relação às outras categorias de impacto verifica-se que a queima a céu aberto de resíduos secos apresenta os mesmos resultados que a queima a céu aberto de resíduos húmidos, devido apenas existir contribuição da gestão florestal, onde os impactos observados são iguais.

Em relação às lareiras abertas, os impactos observados estão associados principalmente ao consumo de diesel usado no processamento da biomassa, e uma parte associada à produção de energia térmica, através da combustão da madeira que contribui para a formação de matéria particulada e outros compostos ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , COVNM), à gestão floresta, devido a todos os processos de recolha e tratamento da madeira, ao transporte realizado desde o local de recolha até ao consumidor, bem como à deposição de cinzas derivadas da combustão da biomassa.

Nos recuperadores de calor, fez-se a comparação entre recuperadores de calor usando lenha e pellets e também a utilização de recuperadores tradicionais e de tecnologia moderna. Os resultados observados permitiram indicar que os impactos obtidos para cada categoria de impacto ambiental em estudo dependem do tipo de biomassa usado (lenha ou pellets). Assim, a utilização de pellets apresenta menor impacto do que a utilização de lenha para todas as categorias, devido ao baixo impacto inerente à utilização de eletricidade nos recuperadores a pellets comparativamente à utilização de diesel nos restantes recuperadores analisados. Por outro lado, a comparação entre recuperadores tradicionais e modernos revela que estes últimos têm menores impactos uma vez que usam tecnologia que permite controlar a eficiência de combustão e fluxo de gases emitidos. Comparando no fim as lareiras com os recuperadores de calor, observou-se que os recuperadores de calor apresentam menos impactos associados em quase todas as categorias de impacto, em relação às lareiras.

Por fim, nas centrais elétricas dedicadas de biomassa observou-se que as centrais de leito fluidizado apresentam menos impactes que as centrais de grelha, pois apresentam maior eficiência de conversão da biomassa em energia elétrica. Verificou-se também que a utilização de resíduos florestais derivados de eucalipto nessas centrais apresentava maiores impactes em relação a utilização de madeira de pinheiro, devido ao consumo de resíduos ser maior que o consumo de madeira para produzir a mesma quantidade de energia.

Em trabalhos futuros, existem vários pontos que podem ser abordados de modo a obter mais informação e resultados para melhoria dos sistemas em estudo. Esses pontos incluem: obtenção de dados gerados de forma própria e não da bibliografia que permitam realização de um estudo mais consistente e aprofundamento do conhecimento dos vários sistemas, e também incorporar a análise das biorefinarias permitindo comparar todos os sistemas de queima/valorização, relativo ao consumo de recursos e emissões ambientais resultantes da combustão da biomassa florestal.



## 6. Referências Bibliográficas

- Adamczyk, J., Piwowar, A., & Dzikuć, M. (2017). Air protection programmes in Poland in the context of the low emission. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(19), 16316–16327. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9233-9>
- Alholmens Kraf (n.d.). Alholmens Kraft Power Plant. Retrieved October 26, 2018, from <http://www2.alholmenskraft.com/en/home>
- Almeida, I. T. (1999). *A poluição atmosférica por material particulado na mineração a céu aberto*. Universidade de São Paulo, Brasil. Retrieved from [www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-31012002-170628/publico/ita.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-31012002-170628/publico/ita.pdf)
- Anttila, P., Anttila, P., Karjalainen, T., Karjalainen, T., Asikainen, A., & Asikainen, A. (2009). *Global Potential of Modern Fuelwood* (Vol. 2). Finland: Finnish Forest Research Institute. Retrieved from <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2009/mwp118.ht>
- Arteaga-Pérez, L. E., Vega, M., Rodríguez, L. C., Flores, M., Zaror, C. A., & Casas Ledón, Y. (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. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.10.004>
- Aurell, J., Gullett, B. K., Tabor, D., & Yonker, N. (2017). Emissions from prescribed burning of timber slash piles in Oregon. *Atmospheric Environment*, 150, 395–406. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.11.034>
- Biomass Energy Centre (2009). Wood as Fuel: a guide to choosing and drying Logs, (01420), 1–4.
- Camero, C., Hans Alexandre, M., & Sowlati, T. (2015). Life cycle greenhouse gas analysis of bioenergy generation alternatives using forest and wood residues in remote locations: A case study in British Columbia, Canada. *Resources, Conservation and Recycling*, 105, 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.014>
- Carneiro, M. P. G. (2010). *Avaliação Económica da Biomassa para a Produção de Energia*. Universidade do Minho, Braga. Retrieved from [sepp.dps.uminho.pt/pdf7.pdf](http://sepp.dps.uminho.pt/pdf7.pdf)
- Carvalho, W., Carrilha, L., Ferraz, A., & Milagres, A. M. F. (2009). Uma visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira. *Química Nova*, 32(8), 2191–2195. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000800033>

- CCME (2016). Guidance Document for Canadian Jurisdictions on Open-Air Burning. (C. C. of M. of the E. CCME & I. C. Services, Eds.). Canada: Canadian Council of Ministers of the Environment. Retrieved from [http://www.ccme.ca/files/Resources/air/wood\\_burning/pn\\_1548\\_CCME Guidance Document on Open Air Burning FINAL.pdf](http://www.ccme.ca/files/Resources/air/wood_burning/pn_1548_CCME_Guidance_Document_on_Open_Air_Burning_FINAL.pdf)
- Cespi, D., Passarini, F., Ciacci, L., Vassura, I., Castellani, V., Collina, E., ... Morselli, L. (2014). Heating systems LCA: Comparison of biomass-based appliances. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(1), 89–99. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0611-3>
- CITEPA (2017). Volatile Organic Compounds - VOCs. Retrieved January 18, 2018, from <https://www.citepa.org/en/air-and-climate/pollutants-and-ghg/aep/vocs>
- Cordella, M. (2010). *Methods for sustainability assessment: analysis of energy supply chains for biomass valorisation*. Bologna University, Bologna, Italy.
- da Costa, T. P., Quinteiro, P., Tarelho, L. A. da C., Arroja, L., & Dias, A. C. (2018). Environmental impacts of forest biomass-to-energy conversion technologies: Grate furnace vs. fluidised bed furnace. *Journal of Cleaner Production*, 171, 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.287>
- DGEG (2017). *Balanços Energéticos 2016*. Lisboa. Retrieved from <http://www.dgeg.gov.pt/wwwbase/wwwinclude/ficheiro.aspx?access=1&id=15901>
- Diário da República. (2017). Decreto-Lei n.º 64/2017 de 12 de julho, 1ª série, N.º113. Lisboa.
- Dias, A. C. (2014). Life cycle assessment of fuel chip production from eucalypt forest residues. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(3), 705–717. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0671-4>
- Dias, A. C., & Arroja, L. (2012). Environmental impacts of eucalypt and maritime pine wood production in Portugal. *Journal of Cleaner Production*, 37, 368–376. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.056>
- Donora Historical Society and Smog Museum (n.d.). 1948 Smog - Donora Historical Society and Smog Museum. Retrieved January 18, 2018, from <https://www.sites.google.com/site/donorahistoricalsociety/>
- Ecoinvent (2017). Ecoinvent. Zurique: Ecoinvent Database.
- ENGASP - Engenharia e Técnicas Afins Lda. (2014). Estudo do potencial energético de calor de cada biomassa / resíduo agrícola e vegetal. Projeto n.º 34001., 52.

- European Environment Agency (2017). *Air quality in Europe- 20017 report. EEA Report No 4/2012.* Denmark. <https://doi.org/10.2800/22775>
- Eurostat (2016). *Energy, transport and environment indicators - 2016 edition.* Luxemburgo. <https://doi.org/10.2785/138586>
- Ferreira, S., Moreira, N. A., & Monteiro, E. (2009). Bioenergy overview for Portugal. *Biomass and Bioenergy*, 33(11), 1567–1576. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.07.020>
- Fortuna, M. E., Simion, I. M., & Gavrilescu, M. (2012). Assessment of sustainability based on LCA case of woody biomass. *Cellulose Chemistry and Technology*, 46(7–8), 493–510. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84872973936&partnerID=40&md5=8fb57413d37b3a941962c42f84b34b97>
- Gonçalves, C., Alves, C., Fernandes, A. P., Monteiro, C., Tarelho, L., Evtyugina, M., & Pio, C. (2011). Organic compounds in PM<sub>2.5</sub> emitted from fireplace and woodstove combustion of typical Portuguese wood species. *Atmospheric Environment*, 45(27), 4533–4545. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.05.071>
- Gregor, H.-D. (2003). *O Estado Das Florestas na Europa-Relatório síntese de 2003.* Hamburgo, Alemanha.
- Herzog, A. V., Lipman, T. E., & Kammen, D. M. (2012). *Renewable Energy Sources. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS) Forerunner.* Berkeley. Retrieved from <http://socrates.berkeley.edu/~rael>
- Hetsch, D. (2015). Open Fireplace vs Wood Burning Insert - Louisville KY - All. Retrieved January 28, 2018, from <https://aachimneyservice.com/the-differences-between-an-open-fireplace-and-a-wood-burning-insert/>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M. D. M., ... Zelm, R. van. (2016). *ReCiPe 2016 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization.* Netherlands: National Institute for Public Health and the Environment. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- INEGI (2016). *Energias Endógenas de Portugal.* Retrieved February 1, 2018, from <http://e2p.inegi.up.pt/index.asp#Tec2>
- ISO 14040 (2006). *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework* (Second edi). (E. C. for Standardization, Ed.), *ISO 14040:2006.* Switzerland: British Standards.

- ISO 14044 (2006). *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*. (I. O. for Standardization, Ed.), *ISO 14044:2006*. Switzerland: International Organization for Standardization. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0297-3>
- Kjällstrand, J., & Olsson, M. (2004). Chimney emissions from small-scale burning of pellets and fuelwood - examples referring to different combustion appliances. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 557–561. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.014>
- Klein, C. (2012). The Great Smog of 1952 - History in the Headlines. Retrieved January 18, 2018, from <http://www.history.com/news/the-killer-fog-that-blanketed-london-60-years-ago>
- Makra, L., & Brimblecombe, P. (2004). Selections from the history of environmental pollution, with special attention to air pollution. *International Journal of Environment and Pollution*, 22(6), 641. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2004.006044>
- Marques, A. (2015). *Utilização Energética da Biomassa em Portugal - Caso de estudo da Tratolixo*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Matthews, R., Sokka, L., Soimakallio, S., Mortimer, N., Rix, J., Schelhaas, ... Randle. (2014). *Review of literature and key issues on biogenic carbon and life cycle assessment of forest bioenergy*. United Kingdom.
- Mehetre, S. A., Panwar, N. L., Sharma, D., & Kumar, H. (2017). Improved biomass cookstoves for sustainable development: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73(February), 672–687. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.150>
- M. C. O. T. A. (2002). *Decreto-Lei n.º 310/2002, de 18 de Dezembro. Diário da República-I Série-A* (Vol. 292). Lisboa.
- M. A. O. T. (2010). *Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de setembro. Diário da República*. Lisboa. Retrieved from <https://dre.pt/pesquisa/-/search/342123/details/normal?l=1>
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., ... Zhang, H. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In A. R. Ravishankara, D. Jacob, & K. Shine (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 659–740). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018>

- Nunes, L. J. R. (2015). *A Utilização de Biomassa como Alternativa Energética para a Sustentabilidade e Competitividade da Indústria Portuguesa Engenharia e Gestão Industrial*. Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. S. (2017). Biomass in the generation of electricity in Portugal: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 373–378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.067>
- Nussbaumer, T. (2017). *Aerosols from Biomass Combustion: Technical report on behalf of the IEA Bioenergy Task 32*. Switzerland.
- Parlamento Europeu (2009). Directiva 2009/28/Ce. *Jornal Oficial Da União Europeia*, 16–62. [https://doi.org/10.3000/17252555.L\\_2009.140.eng](https://doi.org/10.3000/17252555.L_2009.140.eng)
- Petrov, O., Bi, X., & Lau, A. (2017). Impact assessment of biomass-based district heating systems in densely populated communities. Part II: Would the replacement of fossil fuels improve ambient air quality and human health? *Atmospheric Environment*, 161, 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.001>
- Pinto, D. M. (2014). *Queima de peletes em regime permanente , análise teórica simplificada*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Pré (2008). SimaPro LCA software. Retrieved June 4, 2018, from <https://simapro.com/about/>
- REN21 (2016). *Energias Renováveis 2016: Relatório da situação mundial*. France.
- Renan, C., & Iino, F. (2010). Toxic emissions from open burning. *Chemosphere*, 80(3), 193–207. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.03.057>
- Rusu-Zagar, G., Rusu-Zagar, C., Iorga, I., & Iorga, A. (2013). Air Pollution Particles PM10, PM2,5 and the Tropospheric Ozone Effects on Human Health. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 92, 826–831. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.761>
- Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2262–2289. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>
- Sathre, R., & González-García, S. (2014). Life cycle assessment (LCA) of wood-based building materials. In E. Inc. (Ed.), *Eco-efficient Construction and Building Materials* (pp. 311–337). Woodhead. <https://doi.org/10.1533/9780857097729.2.311>

- Shen, X., Kommalapati, R., & Huque, Z. (2015). The Comparative Life Cycle Assessment of Power Generation from Lignocellulosic Biomass. *Sustainability*, 7(10), 12974–12987. <https://doi.org/10.3390/su71012974>
- Silva, A. T. O. S. (2013). *Análise Termodinâmica de uma Central de Biomassa Lenhosa*. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Silva, M. T. C. (2009). *Análise do balanço entre sequestro e emissão de CO<sub>2</sub> resultante do circuito de produção e consumo de biomassa florestal numa central de co-geração*. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Solli, C., Reenaas, M., Strømman, A. H., & Hertwich, E. G. (2009). Life cycle assessment of wood-based heating in Norway. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(6), 517–528. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0086-4>
- Sousa, N., & Nunes, M. C. (2001). Caracterização Energética e Segurança na Utilização de Recuperadores de Calor para Lareiras. Faro.
- Teixeira, J. D. F. (2011). *Dimensionamento de uma lareira com recuperador de calor*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Vieira, A. F. F. G. (2016). *Pellets: Viabilidade de produção e consumo*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.
- Weldu, Y. W., Assefa, G., & Jolliet, O. (2017). Life cycle human health and ecotoxicological impacts assessment of electricity production from wood biomass compared to coal fuel. *Applied Energy*, 187, 564–574. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.101>
- WHO (2015). *Residential heating with wood and coal: health impacts and policy options in Europe and North America*. World Health Organization. Copenhagen, Denmark.
- WHO (2016a). *Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease*. (W. H. Organization, Ed.). Switzerland. <https://doi.org/9789241511353>
- WHO (2016b). *Health risk assessment of air pollution: General principles*. World Health Organization. Copenhagen, Denmark.
- WHO (2017). *Evolution of WHO air quality guidelines: past, present and future*. World Health Organization. Copenhagen, Denmark.

World Energy Council. (2016). *World Energy Resources 2016* (Vol. 2007). London, United Kingdom. Retrieved from [http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete\\_WER\\_2013\\_Survey.pdf](http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf)