



**Politécnico
Castelo Branco**

Escola Superior
de Tecnologia

Avaliação do Ciclo de Vida Produção de Energia a Partir de Resíduos Florestais

Natalícia Santos Carvalho

Orientadores

Luís Cláudio de Brito Brandão Guerreiro Quinta-Nova

Nuno Cláudio da Rocha Meses Pedro

Trabalho de Projeto apresentado à Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Licenciado em Engenharia das Energias Renováveis, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Luís Cláudio de Brito Brandão Guerreiro Quinta-Nova e Professor Doutor Nuno Cláudio da Rocha Meses Pedro, do Instituto Politécnico de Castelo Branco.

Outubro 2025

Composição do júri

Presidente do júri

Professor Doutor António Francisco Canatário Duarte

Professor Adjunto, IPCB

Vogais

Professora Doutora Cristina Maria Martins Alegria

Professor Adjunta, IPCB

Professor Doutor Luís Cláudio de Brito Brandão Guerreiro Quinta-Nova

Professor Adjunto, IPCB

Professor Doutor Nuno Cláudio da Rocha Meses Pedro

Professor Adjunto, IPCB

Dedicatória

Dedico este trabalho, com profundo reconhecimento e gratidão, aos meus pais, que sempre foram o meu alicerce. A sua presença constante, o apoio incondicional e o amor que sempre me ofereceram foram fundamentais em todos os momentos, especialmente nos mais desafiantes. À minha mãe, em particular, dirijo uma homenagem especial: exemplo incomparável de força, resiliência e dedicação, cuja coragem e determinação inspiram-me diariamente a persistir e a acreditar nos meus sonhos.

Por fim, à minha querida madrinha, que, com generosidade, sensibilidade e uma dedicação inabalável, caminhou ao meu lado em todas as fases desta jornada. A sua presença firme, o incentivo constante e a fé que sempre demonstrou nas minhas capacidades foram essenciais para que eu nunca perdesse o rumo, mesmo nos momentos de maior incerteza. Cada gesto de apoio, palavra de incentivo ou simples presença fez a diferença e ficará para sempre na minha memória.

Agradecimentos

A realização deste trabalho académico representa o final de uma etapa marcante da minha formação, e não teria sido possível sem o contributo de diversas pessoas e instituições, a quem deixo aqui o meu mais sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Prof. Luís Quinta-Nova, e ao meu coorientador, Prof. Nuno Pedro, pela orientação, disponibilidade e valiosos contributos científicos ao longo de todo o processo de desenvolvimento deste projeto. A sua exigência e dedicação foram fundamentais para a concretização deste trabalho.

Agradeço igualmente às empresas que, de forma pronta e colaborativa, contribuíram para a recolha dos dados, desempenhando um papel essencial para o sucesso deste projeto.

De seguida, manifesto o meu agradecimento a todos os docentes do curso de Engenharia das Energias Renováveis, da Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco, pela transmissão de conhecimentos, apoio contínuo e incentivo constante ao pensamento crítico e à investigação.

Resumo

Este trabalho apresenta uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da produção de eletricidade a partir de biomassa florestal residual de eucalipto em Portugal, aplicada a uma central termoelétrica dedicada com 12,89 MW de potência instalada, 37% de rendimento global e 8 592 horas de funcionamento anuais, resultando numa produção de 110.750.880 kWh/ano.

Os resultados mostram que as emissões associadas à gestão florestal são reduzidas, situando-se em 11,65 kg CO₂ eq./odt com o *harvester* e 10,65 kg CO₂ eq./odt com a *feller-buncher*, esta última apresentando ligeira vantagem operacional. foram avaliados três cenários distintos — S1, correspondente à trituração da biomassa num parque secundário com corte por *harvester* e extração por *forwarder*; S2, com o mesmo processo, mas utilizando uma *feller-buncher* no corte; e S3, que envolve o transporte dos resíduos até um terminal onde ocorre a trituração, com corte por *harvester* e extração por camião. O cenário S3 registou o maior impacte (25,78 kg CO₂ eq./odt) devido às operações logísticas adicionais, enquanto S1 e S2 apresentaram valo.

A conversão destacou-se como a etapa dominante. Foram quantificados 0,930 kg CO₂ eq./kWh, correspondendo a mais de 102 mil toneladas/ano. Quando expressa por unidade funcional comparável, a combustão de 1 odt gera cerca de 5 760 kWh e emite 5 363 kg CO₂ eq./odt. Contudo, estas emissões são biogénicas e, portanto, neutras em termos climáticos, ao contrário das emissões provenientes das operações mecanizadas, que resultam do uso de combustíveis fósseis e constituem emissões líquidas do sistema.

De forma global, a análise confirma que a sustentabilidade da bioeletricidade depende menos da conversão e mais da eficiência das fases logísticas e do consumo de gasóleo nas operações. Assim, a otimização do transporte, a escolha adequada de equipamentos e a modernização tecnológica surgem como estratégias-chave para reduzir os impactes ambientais.

Palavras-chave

ACV, Biomassa, Energia renovável, GEE, Resíduos de Eucalipto

Abstract

This study presents a Life Cycle Assessment (LCA) of electricity production from residual eucalyptus forest biomass in Portugal, applied to a dedicated biomass power plant with an installed capacity of 12.89 MW, an overall efficiency of 37%, and 8,592 annual operating hours, resulting in an output of 110,750,880 kWh/year.

The results show that emissions associated with forest management are relatively low, reaching 11.65 kg CO₂ eq./odt with the harvester and 10.65 kg CO₂ eq./odt with the feller-buncher, the latter presenting a slight operational advantage. Three distinct scenarios were evaluated — S1, corresponding to biomass chipping at a secondary yard with cutting performed by a harvester and extraction by a forwarder; S2, following the same process but using a feller-buncher for cutting; and S3, which involves transporting the residues to a terminal where chipping takes place, with cutting performed by a harvester and extraction by truck. Scenario S3 recorded the highest impact (25.78 kg CO₂ eq./odt) due to additional logistical operations, while S1 and S2 showed similar values.

Energy conversion emerged as the dominant stage. Emissions were quantified at 0.930 kg CO₂ eq./kWh, corresponding to more than 102,000 tonnes/year. When expressed in comparable functional units, the combustion of 1 odt generates approximately 5,760 kWh and emits 5,363 kg CO₂ eq./odt. However, these emissions are biogenic and therefore considered climate-neutral, in contrast with emissions from mechanized operations, which result from the use of fossil fuels and represent the net emissions of the system.

Overall, the analysis confirms that the sustainability of bioelectricity depends less on conversion and more on the efficiency of logistics and the diesel consumption of operations. Thus, transport optimization, appropriate equipment selection, and technological modernization emerge as key strategies to reduce environmental impacts.

Keywords

Biomass, Eucalyptus Residues, GEE, LCA, Renewable Energy

Índice geral

1. Introdução	1
2. Setor florestal e produção de biomassa em Portugal.....	3
2.1. Uso da biomassa na gestão de risco de incêndio.....	4
2.2. Biomassa florestal	5
2.3. Análise técnica da valorização energética de resíduos de biomassa florestal	7
2.3.1. Gestão florestal	8
2.3.2. Cadeia de abastecimento.....	10
2.3.3. Conversão em energia	11
3. Metodologia.....	15
3.1. Objetivos e âmbito	17
3.2. Inventário de Ciclo de Vida	18
3.2.1. Gestão florestal	19
3.2.2. Processamento e transporte	20
3.2.3. Conversão em energia	21
3.3. Avaliação de Impactes do Ciclo de Vida.....	23
4. Apresentação e análise dos resultados.....	25
4.1. Gestão florestal.....	25
4.2. Processamento e transporte.....	26
4.3. Conversão em energia	26
4.4. Análise global	27
5. Conclusão	29
Bibliografia	31
Anexos	35
Anexo A.....	35
Anexo B.....	37

Índice de figuras

Figura 1 - Biomassa total por espécie (ICNF, 2019).....	5
Figura 2 - Biomassa residual florestal primária e secundária, adaptado de IMFlorestal (2014)	6
Figura 3 - Quantitativos estimados de biomassa florestal residual para energia por espécie.....	7
Figura 4 - Esquema exemplificativo da cadeia de abastecimento (IEA Bioenergy, 2023)	11
Figura 5 - Tecnologias de conversão, adaptado de Costa (2019).....	12
Figura 6 - Estrutura da Avaliação de Ciclo de Vida, adaptado de APA (2023) 16	
Figura 7 - Fronteiras do sistema da ACV de resíduos florestais para a produção de energia, adaptado de Costa (2019).....	17
Figura 8 - Etapas do Inventário de Ciclo de Vida, adaptado de (Soares <i>et al.</i> , 2023)	18
Figura 9 - Sistema de combustão em leito fluidizado (Costa, 2019).....	22
Figura 10 - Emissões de CO ₂ eq por etapa do ciclo de vida	27
Figura 11 - Inquérito aplicado à etapa de exploração florestal	35

Lista de tabelas

Tabela 1 - Principais operações na gestão de povoamento de eucalipto (Biond, 2024; Costa, 2019).....	8
Tabela 2 - Operações principais na cadeia de abastecimento da biomassa florestal residual (CAOF, 2022; Costa, 2019).....	10
Tabela 3 - Dados de inventários para a gestão florestal associado a produção de 1 odt madeira de eucalipto	19
Tabela 4 - Inventário de dados de processamento e transporte.....	20
Tabela 5 - Inventário de conversão de biomassa em energia elétrica	22
Tabela 6 - Inquérito aplicado à etapa de conversão de energia.....	37

Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
g	Gramas
GEE	Gases com efeito estufa
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
ICNF	Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas
kg	Quilograma
kg CO ₂ eq	Quilograma de dióxido de carbono equivalente
kWh	Kilowatt-hora
L	Litro
m ³	Metro cúbico
m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹	Metros cúbicos por hectare por ano
Mtep	Milhões de toneladas equivalentes de petróleo
MJ/kg	Megajoule por quilograma
NO _x	Óxidos de azoto
odt	Tonelada métrica de matéria seca (oven dry tonne)
odt/m ₃	Tonelada métrica de matéria seca por metro cúbico
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
REN	Redes Energéticas Nacionais
SO ₂	Dióxido de enxofre
TWh	Terawatt-hora
°C	Graus celsius

1. Introdução

A busca por um futuro energético sustentável é uma das questões mais urgentes do nosso tempo. Atualmente, a economia mundial enfrenta uma preocupante dependência relativamente aos combustíveis fósseis, como petróleo e gás natural. Segundo a *International Energy Agency* (IEA), em 2022 essas fontes foram responsáveis por 40% das emissões globais de CO₂ relacionadas à produção de energia. Tal dependência traz consequências significativas, incluindo a degradação dos ecossistemas, o esgotamento de recursos finitos e a instabilidade económica global, tornando evidente a necessidade de alternativas viáveis. Nesse contexto, a diversificação da matriz energética surge como uma prioridade estratégica, impulsionada por políticas nacionais e internacionais voltadas para a transição energética (IEA, 2023; Wang e Azam, 2024).

A transição energética é uma oportunidade para a inovação tecnológica e ambiental que vai além da substituição dos combustíveis fósseis. Entre as alternativas, as energias renováveis, como solar, eólica e biomassa, destacam-se por oferecerem soluções sustentáveis. De acordo com o *Relatório do Estado Global de Energias Renováveis de 2024*, no primeiro semestre de 2024 as fontes renováveis geraram 50% da eletricidade na União Europeia (Comissão Europeia, 2024). Em Portugal, a produção renovável atingiu um recorde anual histórico de 36,7 TWh, impulsionada pela expansão das instalações de energia limpa e por condições meteorológicas favoráveis. No total, as renováveis abasteceram 71% do consumo nacional de eletricidade, evidenciando o avanço significativo do país rumo a um sistema energético mais sustentável (REN, 2025).

Entre 2015 e 2024, Portugal registou um elevado crescimento na produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis, que passou de 25.514 GWh para 44.500 GWh, representando um aumento de 74,4%. Dentro desse avanço, o setor da biomassa florestal tem se destacado como um recurso estratégico. A biomassa proveniente de resíduos florestais, como galhos, folhas e cascas e entre outros resíduos que normalmente seriam descartados ou queimados, a biomassa oferece uma solução prática e ambientalmente responsável. Este reaproveitamento não apenas reduz desperdícios, mas também contribui para a redução do risco de incêndios florestais e das emissões líquidas de CO₂, promovendo uma economia circular e sustentável (APA, 2019, 2024; DGEG, 2024).

Além do impacto ambiental positivo resultante do seu aproveitamento e valorização, a biomassa apresenta características únicas que a diferenciam de outras fontes renováveis. Ao contrário de fontes intermitentes como energia solar e eólica, a biomassa oferece um fornecimento constante e previsível de energia, essencial para garantir estabilidade no suprimento de eletricidade e calor. A sua flexibilidade na produção também permite ajustes conforme as necessidades energéticas, promovendo a segurança energética e reduzindo a dependência de

fontes não renováveis. Com cerca de 3,2 milhões de hectares de florestas, equivalentes a 36,2% do território continental, Portugal possui um enorme potencial para o uso sustentável desse recurso. O eucalipto, espécie predominante no país e responsável por 26% da área florestal, representa um importante recurso na produção de biomassa (ICNF, 2019).

No entanto, o aproveitamento responsável desses recursos exige uma gestão sustentável e rigorosa. Nesse sentido, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) surge como uma ferramenta indispensável. Essa metodologia permite uma análise completa dos impactos ambientais associados à produção de energia a partir de resíduos florestais, considerando todas as etapas do processo, desde a extração e transporte até a conversão da biomassa em eletricidade. A ACV permite ainda a comparação entre diferentes tecnologias de conversão, a quantificação das emissões de gases com efeito estufa e a avaliação da sustentabilidade na gestão florestal, tornando-se essencial para otimizar o uso deste material para a produção elétrica.

Em Portugal, existem poucos estudos que abordem a utilização da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na produção de energia a partir de biomassa florestal, avaliando os impactos ambientais associados a este processo. No entanto, a crescente necessidade de soluções sustentáveis torna a biomassa uma peça-chave na construção de um modelo energético que equilibre desenvolvimento económico e preservação ambiental.

A ACV constitui uma ferramenta científica reconhecida internacionalmente, definida pelas normas ISO 14040 e 14044, que permite quantificar e comparar os impactos ambientais de produtos, processos ou serviços ao longo de todas as suas etapas, desde a extração de matérias-primas até à fase final de utilização e descarte. Através desta abordagem “do berço à cova” (cradle-to-grave), é possível identificar as fases mais críticas de um sistema produtivo e propor medidas de melhoria ambiental. No contexto da bioenergia, a ACV é particularmente útil para avaliar o desempenho ambiental das cadeias logísticas da biomassa e apoiar decisões técnicas e políticas orientadas para a sustentabilidade.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma ACV da produção de energia a partir de resíduos florestais de eucalipto, com foco específico nos gases com efeito de estufa. Pretende-se quantificar as emissões de CO₂, proceder à análise e interpretação dos resultados obtidos e estruturar uma ACV que permita compreender os impactos ambientais associados a este processo, contribuindo assim para uma transição energética mais eficiente e ambientalmente responsável.

2. Setor florestal e produção de biomassa em Portugal

As florestas são essenciais para o equilíbrio ambiental global e para a subsistência de milhões de pessoas, fornecendo matérias-primas, regulando o clima, protegendo a biodiversidade e impulsionando economias locais. Estima-se que mais de 86 milhões de empregos estejam direta ou indiretamente ligados ao setor florestal, sendo notório o papel das mulheres na recolha de lenha e produção de carvão vegetal, atividade que envolve cerca de 880 milhões de pessoas (FAO, 2020).

No cenário global, a distribuição das florestas é bastante desigual. Apenas alguns países concentram por volta de 34% da cobertura florestal mundial, totalizando aproximadamente 1.375 milhões de hectares. A Federação Russa lidera esse grupo com 20% das florestas do planeta (815 milhões de hectares), seguida pelo Brasil (12%, 497 milhões de hectares) e pelo Canadá (9%, 347 milhões de hectares). Os Estados Unidos (8%) e China (5%) completam o grupo das nações com maiores áreas florestais, ao passo que outros países, como Austrália, República Democrática do Congo, Indonésia, Peru e Índia, somam entre 2% e 3% da cobertura mundial. Mesmo com os esforços de reflorestação e regeneração natural, a desflorestação continua a superar a expansão, reforçando a necessidade de um planeamento estratégico e de políticas públicas eficazes para equilibrar exploração e preservação (FAO, 2020).

Em Portugal, os espaços florestais – incluindo áreas de floresta, matos e terrenos improdutivos – ocupam 69,4% do território continental, dos quais a floresta propriamente dita corresponde a 36%. Essa cobertura, semelhante à média dos países da União Europeia, reflete não só a importância das zonas densas de árvores, mas também a dinâmica de áreas temporariamente desarborizadas por cortes, incêndios ou regeneração natural (ICNF, 2019). No âmbito produtivo, o volume de madeira em crescimento chegou a 172 milhões de metros cúbicos em 2015, mantendo-se estável relativamente ao inventário de 2005, embora haja variações entre espécies – o pinheiro-bravo, por exemplo, tem diminuído, enquanto o crescimento do eucalipto não acompanha proporcionalmente a área plantada (ICNF, 2019).

O impacto económico do setor florestal em Portugal é significativo, fornecendo matéria-prima essencial para diversas indústrias, como a de pasta e papel, a corticeira e a bioenergética. A indústria da pasta e papel é uma das principais responsáveis pela criação de emprego e pelo volume de exportações associadas ao setor florestal, representando cerca de 5% das exportações nacionais. Já a indústria da cortiça, sustentada pela exploração do sobreiro, emprega mais de 12.000 pessoas e é responsável por aproximadamente um terço das exportações de produtos florestais (Nunes *et al.*, 2019). A estrutura florestal do país é dominada por três espécies principais: o eucalipto, que ocupa 26% da área florestal (812.000 hectares); o sobreiro, com 23% (737.000 hectares); e o pinheiro-bravo, também

com 23% (714.000 hectares), todas fundamentais para o funcionamento e sustentabilidade destas indústrias (ICNF, 2019).

A presença marcante dessas espécies reflete processos naturais e intervenções humanas que se estendem por séculos. O eucalipto, por exemplo, foi introduzido no século XIX por entusiastas da jardinagem e, diante da escassez de madeira, passou a ser adotado industrialmente a partir da década de 1940, com o crescimento da indústria de pasta de papel. Embora os impactos ambientais – como a potencial redução da biodiversidade, o consumo de água e o risco de incêndios – continuem em debate, essa espécie é crucial para a geração de biomassa energética e para o desenvolvimento económico, sustentada por regulamentações que buscam minimizar os danos ambientais (Fabres, 2021; Nunes *et al.*, 2019).

2.1. Uso da biomassa na gestão de risco de incêndio

O uso da biomassa na gestão do risco de incêndio é um tema central nas políticas energéticas e florestais, tanto nacionalmente quanto no contexto europeu. Portugal, o país europeu mais afetado por incêndios rurais, enfrenta perdas socioeconómicas e ambientais significativas, uma situação que se intensificou nas últimas décadas. A acumulação de biomassa lenhosa nos povoamentos florestais tem sido identificada como um fator determinante para o aumento progressivo deste risco, pois cria condições favoráveis para incêndios intensos e de grande escala (Fernandes Antunes, 2023; Ferreira, Pinto e Valente, 2024).

Nesse contexto, a utilização da biomassa para a produção de energia – seja elétrica ou térmica – surge como uma alternativa promissora. Ao converter a biomassa florestal em energia, não só se reduz a quantidade de combustível disponível para o fogo, mas também se promove a reorganização dos povoamentos e da paisagem, diminuindo tanto a área quanto a intensidade dos incêndios. Esse aproveitamento agrega valor de mercado à biomassa removida, criando estímulos económicos para a realização de uma gestão florestal mais integrada e eficaz (Observatório Técnico Independente *et al.*, 2020).

Embora ainda não existam avaliações rigorosas sobre a quantidade exata de biomassa disponibilizada diretamente para a redução do risco, estima-se que essa quantidade seja considerável. Em Portugal, a rede primária de faixas de gestão de combustível abrange 129.545 hectares, demonstrando a amplitude de intervenções necessárias para um efeito significativo na alteração do regime do fogo. Os incêndios recentes reforçam a necessidade de intervenções silvícolas e de gestão em vastas áreas de regeneração natural, cujo planeamento e financiamento deveriam estar, idealmente, vinculados à utilização da biomassa para a energia. Historicamente, a gestão adequada dos combustíveis sempre foi crucial para a manutenção dos ecossistemas. O Observatório Técnico Independente (OTI) considera que a biomassa lenhosa é um elemento-chave na articulação de políticas

nacionais, contribuindo decisivamente para a redução do risco de incêndio e para um uso mais sustentável dos recursos florestais (Observatório Técnico Independente *et al.*, 2020).

2.2. Biomassa florestal

Nos últimos anos, observa-se um aumento da biomassa arbórea total no país, impulsionado pela diversificação das espécies florestais e pela melhoria dos métodos de avaliação. Espécies como castanheiro e pinheiro-manso têm demonstrado crescimento significativo, enquanto o pinheiro-bravo permanece como a principal fonte de acumulação de biomassa (Figura 1). Esse aumento reflete a importância da biomassa como recurso energético e destaca a necessidade de uma gestão eficiente e sustentável dos recursos florestais.

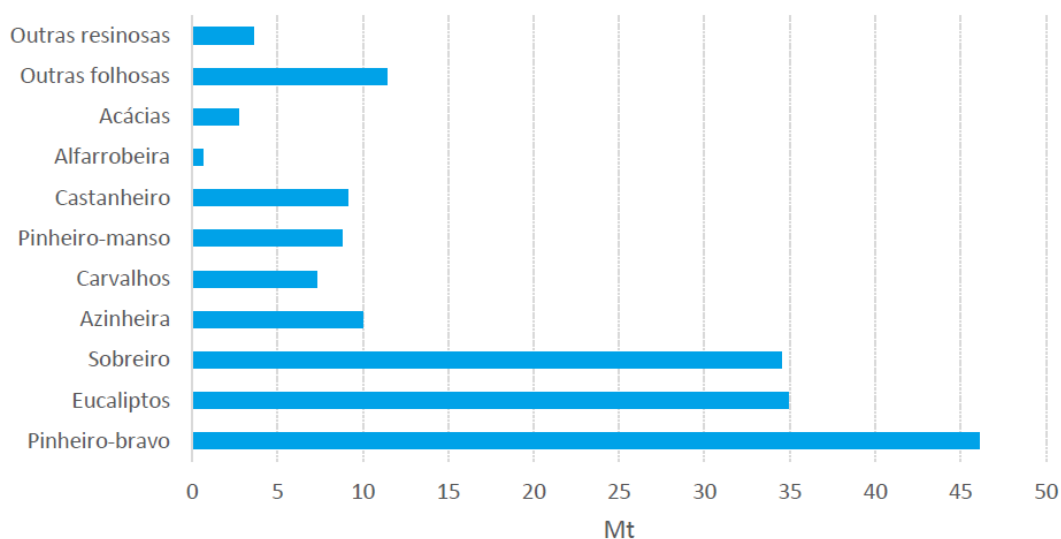


Figura 1 - Biomassa total por espécie (ICNF, 2019)

A biomassa é hoje amplamente reconhecida como uma fonte de energia renovável de grande importância no contexto da transição energética e do combate às alterações climáticas. A sua versatilidade permite que seja convertida em eletricidade, calor ou combustíveis, oferecendo uma contribuição significativa para a descarbonização de setores estratégicos, como o industrial e o dos transportes. A sua origem biológica reforça esse papel, garantindo uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis.

A biomassa pode ser utilizada de diversas formas. Uma das aplicações mais diretas é a sua queima para produção de calor e eletricidade. Além disso, pode ser convertida em biocombustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, atendendo às necessidades de transporte e processos industriais. Em 2021, cerca de 59% do consumo de energia renovável na União Europeia teve origem na biomassa, sendo a Alemanha o maior produtor de biomassa sólida. No mesmo ano, o setor industrial

Europeu consumiu aproximadamente 21,1 Mtep provenientes desse recurso (Comissão Europeia, 2025).

Conforme a Diretiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de abril de 2009, biomassa é definida como “a fração biodegradável de produtos, resíduos e detritos de origem biológica provenientes da agricultura (incluindo substâncias de origem vegetal e animal), da exploração florestal e de indústrias afins, incluindo da pesca e da aquicultura, bem como a fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos”. Essa definição reflete a diversidade de fontes possíveis e a ampla gama de aplicações que tornam a biomassa um recurso estratégico para a transição energética.

No grupo de biomassas disponíveis, a biomassa florestal residual ocupa um lugar de destaque. Essa categoria é composta por materiais remanescentes após a colheita de árvores comerciais, podendo ser classificados como resíduos primários, originados diretamente de operações florestais, ou resíduos secundários (Costa, 2019), provenientes de processos industriais (Figura 2).

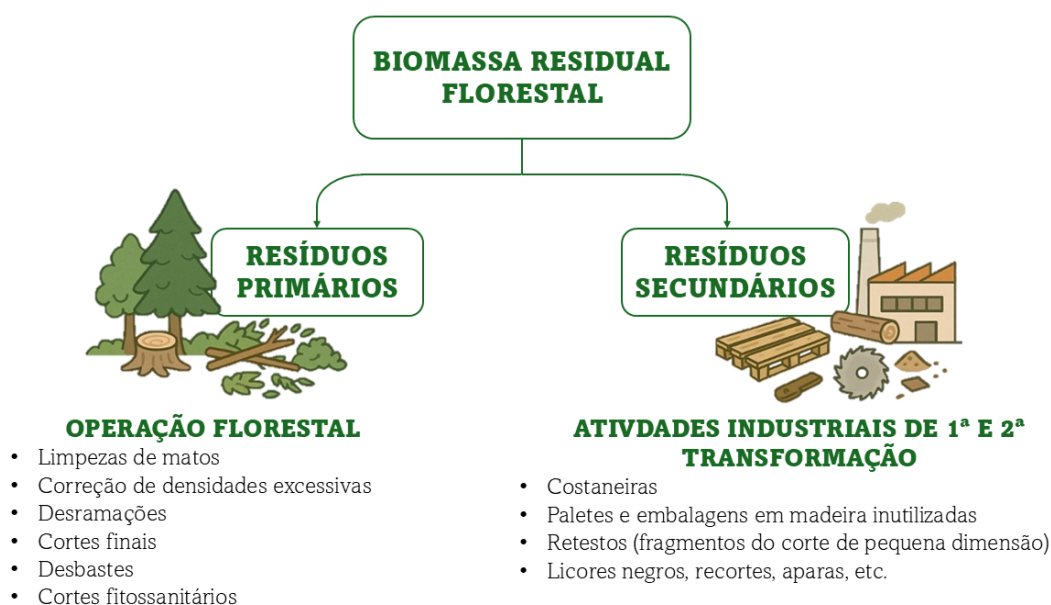


Figura 2 - Biomassa residual florestal primária e secundária, adaptado de IMFlorestal (2014)

O uso da biomassa residual oferece uma série de benefícios ambientais, económicos e sociais que reforçam a sua importância na matriz energética sustentável. Ao reaproveitar resíduos provenientes de atividades florestais e industriais, essa fonte de energia contribui para a redução do desperdício de materiais orgânicos, promovendo uma economia circular e um melhor aproveitamento dos recursos naturais (Greenvolt, 2025).

Estima-se que Portugal produza anualmente cerca de 3,9 milhões de toneladas de biomassa florestal residual para energia, distribuídas por várias espécies. A Figura 3 apresenta as quantidades anuais estimadas de biomassa florestal residual

por espécie disponível para energia em Portugal. Destacam-se os matos com cerca de 1.025.370 t/ano, seguidos do pinheiro-bravo (543.867 t/ano), eucalipto (447.920 t/ano) e resíduos verdes herbáceos (441.000 t/ano). As demais espécies apresentam valores mais baixos, evidenciando a importância dos matos e das principais espécies florestais no potencial energético do país (Diário da República, 2017).

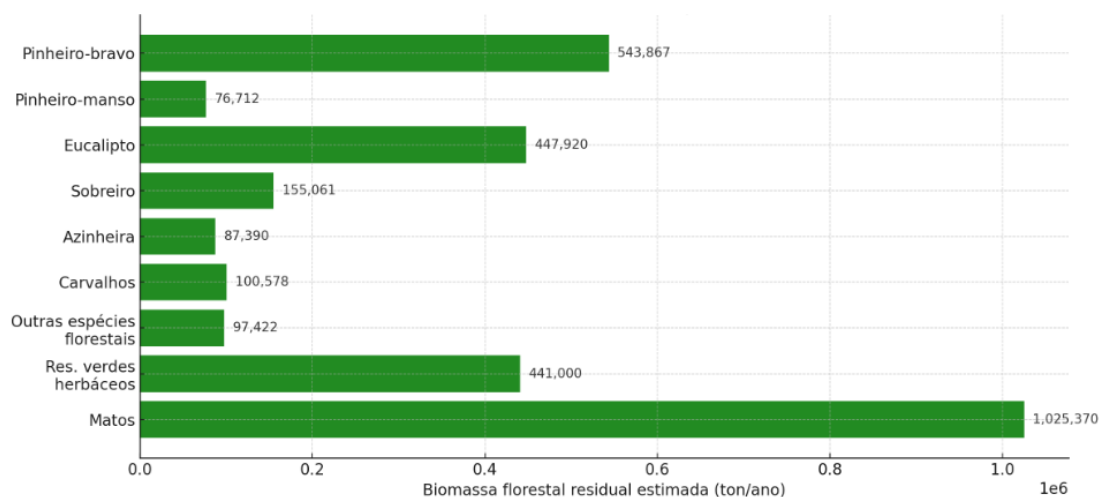


Figura 3 - Quantitativos estimados de biomassa florestal residual para energia por espécie, adaptado de (Diário da República, 2017)

2.3. Análise técnica da valorização energética de resíduos de biomassa florestal

A valorização energética dos resíduos florestais é um processo complexo que envolve três componentes essenciais: gestão florestal, gestão da cadeia de abastecimento e conversão energética (Costa, 2019). Cada uma dessas etapas desempenha um papel fundamental na viabilidade e eficiência do sistema, garantindo que os resíduos sejam utilizados de maneira sustentável e rentável.

Nos últimos anos, a produção de bioenergia a partir de resíduos florestais tem crescido significativamente em Portugal. Embora sejam fontes renováveis, os resíduos florestais apresentam uma disponibilidade limitada, o que os distingue de outras formas de energia renovável, como a eólica ou a solar. O potencial de valorização desses resíduos depende de fatores teóricos, como produtividade florestal, clima e modelos de gestão, além de aspetos técnicos, incluindo taxa de extração, contaminação, estrutura do terreno, logística, infraestrutura e distância de transporte (Costa, 2019).

2.3.1. Gestão florestal

A produção de madeira não depende exclusivamente das condições climáticas ou das características do solo. Embora fatores como a capacidade de retenção de água, a profundidade e a disponibilidade de nutrientes desempenhem um papel importante, o sucesso dos povoamentos de eucaliptos depende também da adoção de boas práticas de gestão florestal. Esta gestão inclui diversas fases fundamentais, como o estabelecimento de infraestruturas, a preparação do local, a instalação do povoamento, a sua manutenção e, por fim, a exploração florestal. Os principais objetivos destas práticas consistem na redução da competição por luz, água e nutrientes provocada pela vegetação herbácea e pela regeneração natural indesejada, na mitigação dos riscos e danos associados à exposição ao sol e ao vento, na promoção de uma adequada formação morfológica das plantas, na regulação dos níveis de nutrientes no solo, na prevenção de incêndios florestais e no controlo de pragas e doenças (Costa, 2019).

A Tabela 1 apresenta as principais operações que podem ser realizadas na fase de gestão florestal. No entanto, nem todas serão aplicadas em todos os casos, pois a sua realização depende não só do tipo de solo, mas também de outros fatores como as condições ambientais, o tipo de povoamento florestal, a topografia e os objetivos de gestão definidos (Florestas, 2024).

Tabela 1 - Principais operações na gestão de povoamento de eucalipto (Biond, 2024; Costa, 2019)

Operações	Descrição
Limpeza de matos	Elimina a vegetação indesejada para facilitar operações subsequentes, remover madeira morta e melhorar as condições do solo.
Destroçamento de cepos	Remove os cepos após três rotações sucessivas de talhadia para evitar competição com novas plantas. Pode ser feito mecanicamente ou com herbicidas homologados.
Gradagem	Incorpora ao solo a vegetação, sobrantes e cepos destroçados, promovendo a preparação do terreno.
Ripagem	Fratura a estrutura do solo e proporciona escarificação profunda (até 60 cm). Ao contrário da ripagem, os dentes possuem asas horizontais que aumentam a fratura e o levantamento do solo. Sem subsolagem, as plantações podem estagnar após alguns anos.
Subsolagem	Rompe o solo na vertical (40 a 70 cm de profundidade) sem perturbar os horizontes, favorecendo infiltração e drenagem. Deve seguir as curvas de nível.

Tabela 1 (cont.) - Principais operações na gestão de povoamento de eucalipto (Biond, 2024; Costa, 2019)

Operações	Descrição
Abertura de covas	Mobiliza o solo de forma localizada para permitir a plantação das mudas. Essencial para um bom enraizamento inicial.
Construção ou beneficiação de terraços	Forma plataformas horizontais em terrenos inclinados (>25%) para estabilizar o solo e permitir a mecanização.
Plantação	Inclui receção e armazenamento das mudas. Recomenda-se compasso quadrilátero (ex.: 3,5×3 m 3 3 × 3) e densidade entre 1000 a 1500 árvores/ha, dependendo da pluviosidade.
Adubação	Aplicação de nutrientes de acordo com análise do solo, foliar ou diagnóstico visual. Deve ser feita na instalação e nos primeiros anos (1 e 3 anos na 1. ^a rotação; 2 e 4 anos na talhadia).
Retanchar	Reposição de mudas mortas após a plantação. Realizada no final do inverno ou semanas após a plantação, consoante a época.
Sacha e amontoa	Sacha: limpeza manual ao redor das mudas. Amontoa: acumular terra junto à base para conservar água e melhorar suporte.
Controlo de vegetação	Eliminação de vegetação infestante por meios manuais, mecânicos ou químicos. Deve ser feita enquanto a vegetação é jovem.
Desramação	Remoção dos ramos inferiores da copa para melhorar a qualidade da madeira e facilitar o acesso ao interior do povoamento. Este procedimento não é aplicado em povoamentos de eucalipto conduzidos em talhadia.
Seleção de varas	Em povoamentos de talhadia, seleccionam-se 2-3 varas por cepa. A 1. ^a seleção é feita entre 2 a 3 anos após o corte; a 2. ^a é feita dois anos depois para eliminar novas rebentações.
Desbaste	Remoção de parte das árvores para reduzir a densidade do povoamento e favorecer o crescimento em diâmetro das árvores remanescentes. Este procedimento é realizado exclusivamente em povoamentos conduzidos em alto fuste.

O processo de exploração florestal no povoamento de eucalipto envolve diversas operações fundamentais que pretendem garantir um aproveitamento eficiente, tecnicamente adequado e ambientalmente responsável dos recursos madeireiros. A primeira etapa consiste no corte, ou abate, que envolve o derrube das árvores em pé, seguido da desramação do tronco e do corte em toros, ou seja, segmentos do tronco sem ramos. Após o abate, procede-se à retirada dos galhos, operação conhecida como desrama, que pode ser realizada manualmente com

recurso à motosserra ou mecanicamente, através de cabeças de corte acopladas a máquinas *harvester* (CAOF, 2022; Costa, 2019).

Em seguida, realiza-se o descascamento, que corresponde à remoção da casca das árvores abatidas. Esta operação pode também ser manual ou mecanizada, sendo frequentemente efetuada com recurso a máquinas equipadas com cabeças de corte específicas, como o *harvester*, embora, em Portugal, o descascamento do eucalipto seja geralmente realizado na fábrica (Celbi, 2025). Por fim, a recheга e extração da madeira são realizadas por meio de dois métodos principais: arraste e semi-arraste, utilizando-se para tal equipamentos como tratores com guincho ou máquinas específicas como o *skidder* (CAOF, 2022; Costa, 2019).

2.3.2. Cadeia de abastecimento

A cadeia de abastecimento é responsável pela recolha, processamento e transporte dos resíduos, assegurando que estes cheguem de forma eficiente e sustentável aos locais de conversão (Costa, 2019).

A gestão desta cadeia envolve várias operações que permitem o correto aproveitamento dos resíduos florestais, desde o local de exploração até ao destino. Para facilitar a compreensão, a Tabela 2 apresenta de forma organizada e clara as principais operações que integram esta cadeia, destacando os processos essenciais para um abastecimento eficiente da biomassa florestal residual.

Tabela 2 - Operações principais na cadeia de abastecimento da biomassa florestal residual (CAOF, 2022; Costa, 2019)

Operações	Descrição
Transporte primário	Realizado dentro da área florestal e inclui operações como a recheга e a extração, que deslocam a madeira desde o local de abate até pontos de concentração junto à estrada.
Recheга e extração	Movimentação dos resíduos do local de exploração para pontos intermédios de armazenamento, utilizando tratores ou <i>forwarders</i> .
Trituração em parque secundário	Transporte dos resíduos para um parque próximo, onde são triturados com equipamentos mais eficientes e dispõem de melhores condições logísticas para armazenamento e secagem.
Trituração no terminal	Um ponto final de recolha e processamento, muitas vezes próximo de uma central termoelétrica.
Transporte secundário	Transporte da biomassa triturada até às centrais elétricas, realizado por camiões com capacidade entre 16 e 26 toneladas, conforme o teor de humidade.

Complementando as informações anteriores, a Figura 4 apresenta um exemplo das diversas etapas que integram a cadeia de abastecimento da biomassa florestal. Permite visualizar como as operações de processamento e transporte se interligam, desde a recolha e acondicionamento dos resíduos florestais até à sua entrega nas unidades consumidoras, evidenciando as alternativas logísticas e as decisões técnicas que influenciam a eficiência do processo.

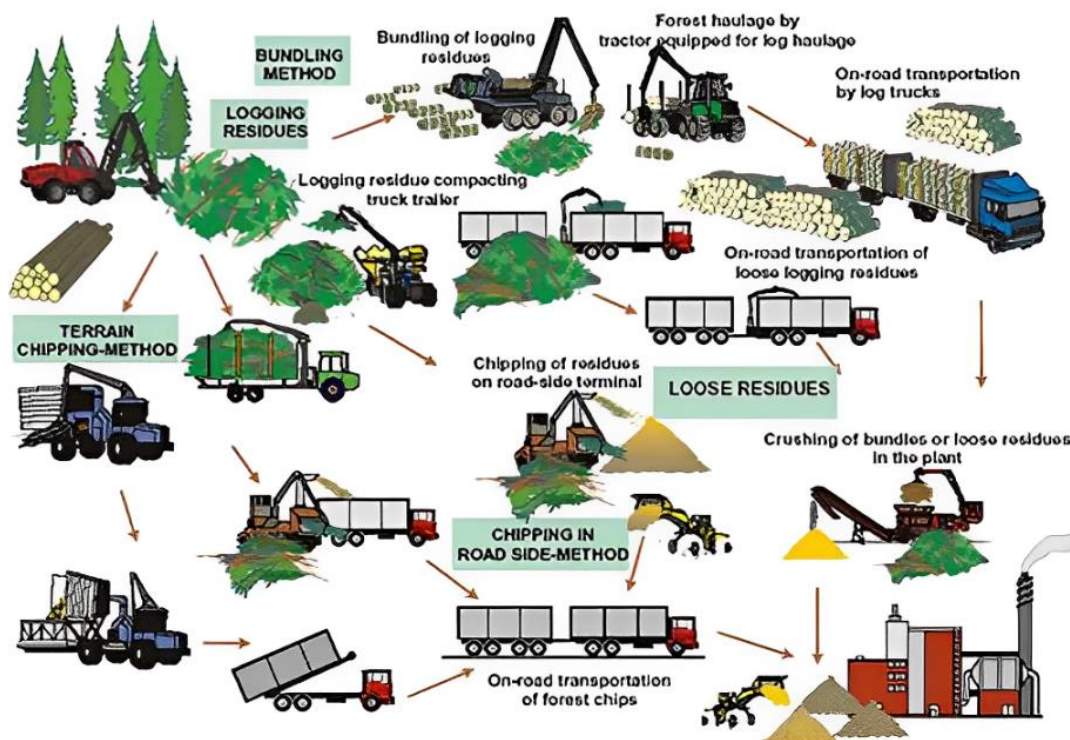


Figura 4 - Esquema exemplificativo da cadeia de abastecimento (IEA Bioenergy, 2023)

2.3.3. Conversão em energia

A conversão de biomassa em bioenergia desperta um interesse crescente globalmente, sobretudo devido ao seu carácter renovável e aos seus benefícios ambientais. Esta fonte de energia oferece vantagens significativas, como a facilidade de armazenamento e transporte, a flexibilidade na utilização da carga e a versatilidade nas suas aplicações. A energia química acumulada pela biomassa resulta da fotossíntese, durante a qual o CO_2 é combinado com a energia solar para formar hidratos de carbono. Assim, quando a biomassa é queimada, liberta o dióxido de carbono previamente capturado, o que, em termos de balanço, pode contribuir para a neutralidade carbónica (Garba, 2020).

Em Portugal, a produção de eletricidade a partir de resíduos de biomassa florestal ocorre predominantemente através da combustão. Este processo envolve a oxidação da matéria orgânica a temperaturas entre 700 e 1000 °C, libertando calor, gases, vapor de água e cinzas.

As tecnologias de conversão da biomassa são geralmente agrupadas em dois grandes grupos: os métodos termoquímicos e os métodos bioquímicos (Figura 5). Esta classificação permite compreender de forma integrada as diferentes formas de conversão de energia, evidenciando as possibilidades de aproveitamento para produção de calor, eletricidade e biocombustíveis.

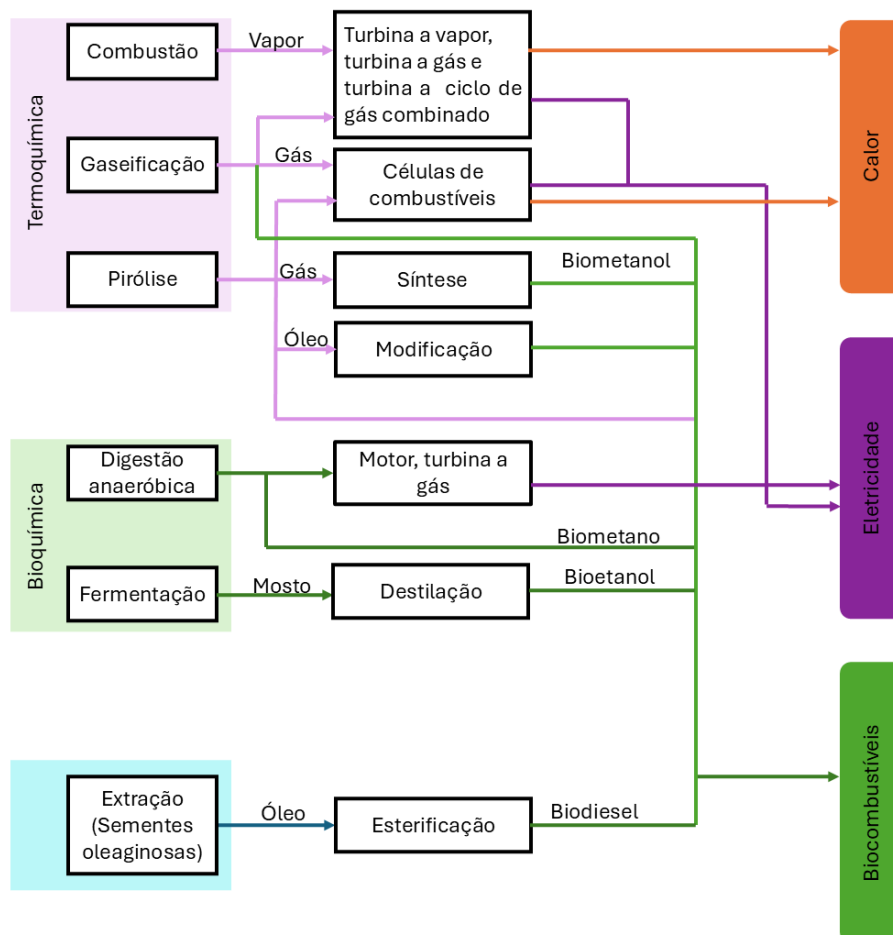


Figura 5 - Tecnologias de conversão, adaptado de Costa (2019)

Entre os métodos termoquímicos, a combustão destaca-se como a mais utilizada. Este processo não seletivo permite a queima direta da biomassa, convertendo-a essencialmente em dióxido de carbono e água. A quantidade de energia térmica gerada está diretamente relacionada com o teor energético da matéria-prima e com a eficiência do processo (Costa, 2019; Garba, 2020).

Outro método termoquímico relevante é a gaseificação, um processo endotérmico em que a biomassa é convertida em gases combustíveis, como hidrogénio, monóxido de carbono e metano, através do uso de agentes gaseificantes como ar, vapor de água ou dióxido de carbono. Este processo ocorre a temperaturas entre 800 e 1300 °C e permite integrar o syngas resultante em diversos sistemas industriais e de geração de energia. Variáveis como o teor de humidade, o teor de cinzas e o tamanho das partículas da biomassa influenciam significativamente o desempenho do processo (Garba, 2020; Tshikovhi e Motaung, 2023).

A pirólise é outro processo termoquímico relevante, no qual a biomassa é aquecida na ausência de oxigênio ou na presença de um gás inerte. Dependendo das condições operacionais, como temperatura, taxa de aquecimento e tempo de residência, este processo pode gerar diferentes proporções de bio-óleo, bio-carvão e gases. A pirólise rápida, por exemplo, visa maximizar a produção de bio-óleo aquecendo rapidamente a biomassa a temperaturas entre 450 e 600 °C durante menos de dois segundos. Já a pirólise intermediária opera entre 300 e 500 °C, gerando líquidos de menor viscosidade e com baixo teor de alcatrão. Por fim, a pirólise lenta, historicamente usada para a produção de carvão vegetal, é realizada a baixas temperaturas, com aquecimento lento e tempos de residência prolongados (Costa, 2019; Garba, 2020; Tshikovhi e Motaung, 2023).

A torrefação é um processo de pirólise mais brando, realizado a temperaturas entre 225 e 300 °C. Através da remoção da humidade e de compostos voláteis da biomassa, obtém-se um produto sólido, seco, preto e hidrofóbico, com propriedades energéticas superiores às da matéria-prima original (Garba, 2020; Tshikovhi e Motaung, 2023).

Paralelamente aos processos termoquímicos, os métodos bioquímicos utilizam microrganismos ou enzimas para converter biomassa em combustíveis e produtos químicos. Estes processos, geralmente mais limpos e seletivos, incluem a digestão anaeróbica e a fermentação. A digestão anaeróbica é particularmente eficaz na conversão de resíduos lignocelulósicos e outros resíduos orgânicos em biogás, uma mistura composta maioritariamente por metano e dióxido de carbono. Este processo ocorre em condições controladas de temperatura, geralmente entre 30 e 55 °C, e envolve duas etapas: a acidogénese, que decompõe compostos complexos em ácidos orgânicos, e a metanogénese, que converte estes ácidos em metano e dióxido de carbono. O digestato gerado, rico em nutrientes, pode ser aproveitado como fertilizante agrícola (Garba, 2020; Tshikovhi e Motaung, 2023).

O biogás produzido pode ser utilizado para geração de calor e eletricidade ou purificado em biometano para injeção na rede de gás natural ou uso como combustível veicular. Apesar das suas vantagens, a digestão anaeróbica pode resultar em emissões de gases com efeito de estufa se ocorrerem fugas de metano, principalmente durante o armazenamento do substrato ou do digestor. Contudo, sistemas modernos são projetados para serem estanques, reduzindo significativamente essas perdas. A purificação do biogás, embora energeticamente exigente, permite a obtenção de um combustível de maior valor acrescentado, sendo possível também capturar o CO₂ removido para utilização industrial (Garba, 2020; Tshikovhi e Motaung, 2023).

A fermentação é outro processo biológico, no qual microrganismos, como leveduras, convertem açúcares simples da biomassa em etanol e dióxido de carbono (Costa, 2019). Este processo requer etapas prévias de hidrólise para libertar os açúcares das cadeias poliméricas da biomassa, o que pode ser feito separada ou simultaneamente à fermentação. As matérias-primas preferenciais

são os resíduos agrícolas e florestais, que não competem com culturas alimentares. O etanol produzido é separado por destilação, um processo intensivo em energia que pode comprometer o balanço energético final. Os resíduos sólidos da fermentação, por sua vez, podem ser aproveitados como alimentação animal ou como combustível (Garba, 2020; Tshikovhi e Motaung, 2023).

A esterificação é uma das rotas de pré-tratamento selecionadas para reduzir o índice de acidez de matérias-primas, como óleos vegetais e gorduras animais, utilizadas na produção de biodiesel. A esterificação é definida como uma reação entre um ácido orgânico e um álcool, na presença de um catalisador ácido, a partir da qual se obtém um éster (Rovere, Rodrigues e Teleken, 2020).

No contexto da produção de biodiesel, a esterificação é essencial, pois a reação de transesterificação, comumente utilizada para produzir biodiesel, é limitada quando se utilizam resíduos ou óleos não processados que apresentam níveis de acidez mais elevados (Rovere, Rodrigues e Teleken, 2020).

A escolha entre os diversos processos de conversão depende de múltiplos fatores, como a natureza e disponibilidade da matéria-prima, os requisitos energéticos e ambientais, a política energética vigente, a viabilidade econômica e os objetivos específicos do projeto.

3. Metodologia

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é definida como uma metodologia sistemática para compilar e avaliar as entradas (*inputs*), saídas (*outputs*) e os potenciais impactos ambientais de um sistema de produto ao longo de todo o seu ciclo de vida. Este ciclo abrange todas as etapas, desde a aquisição das matérias-primas, passando pelos processos de produção e utilização, até à gestão de resíduos e, quando aplicável, à fase de reciclagem - abordagens conhecidas como *cradle to grave* ou *cradle to gate* (Liu, Zhu e Tian, 2024).

Inicialmente desenvolvida no final da década de 1960, a ACV surgiu a partir de um estudo promovido pela Coca-Cola em 1969, visando selecionar o tipo de embalagem mais sustentável (Costa, 2019; Liu, Zhu e Tian, 2024). No entanto, foi apenas no final dos anos 1980 que o método começou a ser amplamente reconhecido, sendo formalmente estruturado pela *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) em 1990. Posteriormente, foi incorporado nas normas internacionais de gestão ambiental ISO 14040, pela *International Standard Organization* (ISO), em 1993 (Liu, Zhu e Tian, 2024).

Atualmente, a ACV é uma ferramenta amplamente reconhecida e aplicada em diversos setores, incluindo gestão ambiental, produção industrial, transportes, energia e planeamento territorial (Costa, 2019; Soares *et al.*, 2023). O seu valor reside na capacidade de fornecer uma visão abrangente dos impactos ambientais associados a produtos, processos ou serviços, tornando-se essencial para o desenvolvimento sustentável (Liu, Zhu e Tian, 2024). Quando integrada com tecnologias como os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), a ACV permite ainda análises mais precisas e localizadas, especialmente no contexto da produção de biomassa (Liu, Zhu e Tian, 2024).

Apesar dos seus benefícios, a ACV exige recursos significativos e pode ser um processo demorado. O custo associado à realização de um estudo precisa ser equilibrado com os benefícios esperados, uma vez que a metodologia não determina a viabilidade económica ou a eficiência operacional de um produto, ou processo. Em vez disso, os dados fornecidos devem ser considerados parte de um processo de decisão mais amplo, que envolve outros fatores, como desempenho técnico e custos (Liu, Zhu e Tian, 2024).

No presente trabalho, adotou-se uma abordagem que integra a recolha de dados primários, obtidos por meio de inquéritos, com a realização da ACV com recurso ao software openLCA (GreenDelta GmbH, 2024). Esta ferramenta permitiu avaliar os impactos ambientais associados à utilização de resíduos florestais na produção de energia em centrais termoelétricas, desde a extração da biomassa até à sua conversão final em energia.

Para garantir a precisão dos resultados, o processo segue as diretrizes estabelecidas nas normas ISO 14040/14044 e envolve quatro fases principais (Figura 6).

A primeira fase, definição do objetivo e âmbito, estabelece a finalidade do estudo, os limites do sistema e os critérios de avaliação. Em seguida, realiza-se o Inventário do Ciclo de Vida (ICV), onde são identificados e quantificados os fluxos de *inputs* e *outputs* (Pereira, 2019), ao longo de todo o ciclo de vida do sistema analisado.

Posteriormente, na fase de Avaliação de Impactes do Ciclo de Vida (AICV), analisam-se os potenciais impactes ambientais desses fluxos, considerando categorias como emissões atmosféricas, consumo de recursos naturais e geração de resíduos.

Por fim, na interpretação dos resultados, os dados obtidos são avaliados de forma crítica, possibilitando a extração de conclusões e a formulação de recomendações para otimizar a sustentabilidade do processo (Finnveden e Potting, 2014; Muralikrishna e Manickam, 2017).

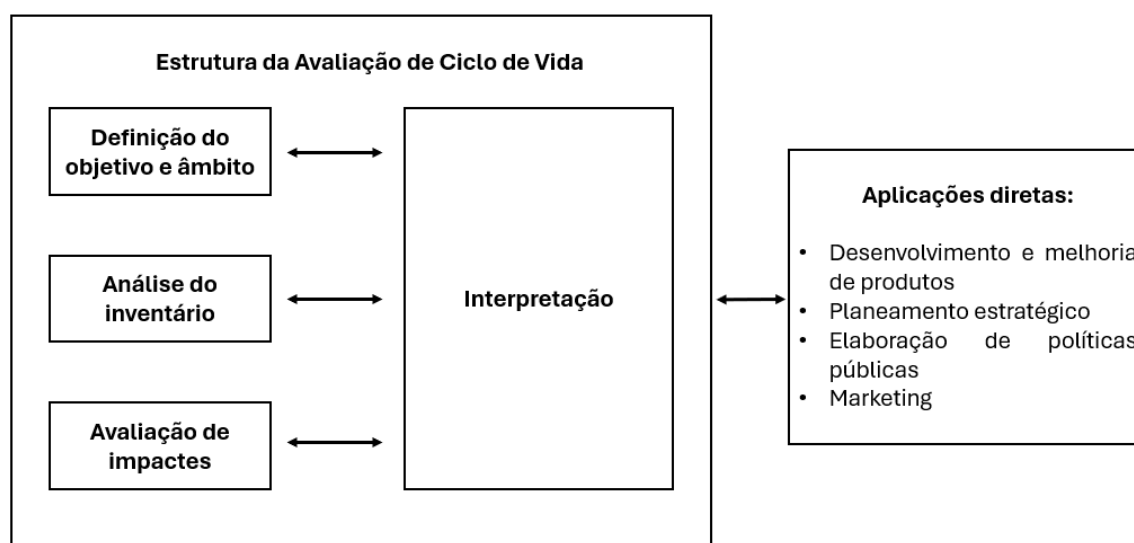


Figura 6 - Estrutura da Avaliação de Ciclo de Vida, adaptado de APA (2023)

A aplicação da ACV neste estudo permite identificar oportunidades de melhoria ambiental, apoiar a tomada de decisões estratégicas e comunicar os impactes ambientais de forma clara e objetiva, nomeadamente no contexto de declarações ambientais de produtos (Muralikrishna e Manickam, 2017; Pereira, 2019). Assim, a metodologia adotada possibilita uma análise detalhada dos impactes ambientais associados à utilização de resíduos florestais para a produção de energia, contribuindo para a definição de estratégias mais sustentáveis e eficientes no setor energético.

3.1. Objetivos e âmbito

No âmbito deste trabalho, definiram-se os principais elementos metodológicos da análise, incluindo a unidade funcional, os pressupostos considerados, os critérios de qualidade dos dados e os limites do sistema, abrangendo todas as etapas desde a preparação do solo para a plantação de eucalipto até à produção de energia nas centrais termoelétricas dedicadas. A avaliação inclui a gestão florestal, o processamento, o transporte dos resíduos e a sua conversão em energia (Figura 7).

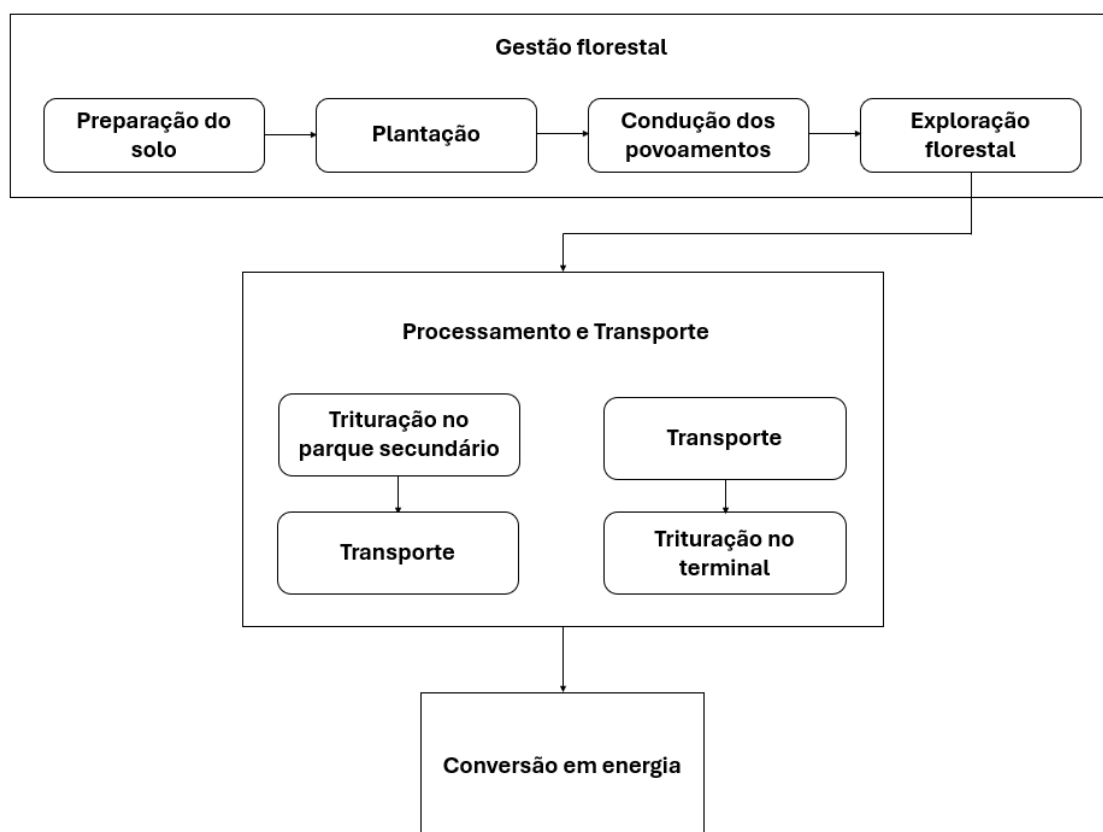


Figura 7 - Fronteiras do sistema da ACV de resíduos florestais para a produção de energia, adaptado de Costa (2019)

A unidade funcional, que será oportunamente definida, servirá como referência para quantificar os fluxos de *inputs* e *outputs* do sistema. A sua escolha será essencial para garantir a comparabilidade dos resultados e a coerência da análise.

A alocação consiste, essencialmente, na distribuição dos *inputs* e *outputs* de um sistema entre as suas diferentes funções ou fluxos de coprodutos. Quando se pretende repartir os impactos ambientais entre os coprodutos de um processo (Schrijvers, Loubet e Sonnemann, 2016).

O principal objetivo da alocação é garantir que os impactos ambientais sejam atribuídos de forma coerente, transparente e sistemática. Desta forma, os resultados obtidos tornam-se comparáveis entre diferentes estudos de ACV e mais

representativos da realidade dos sistemas analisados (Schrijvers, Loubet e Sonnemann, 2016).

Por fim, a delimitação clara dos limites do sistema assegura a transparência do estudo, focando a avaliação nas fases com maior relevância ambiental e permitindo um equilíbrio entre exatidão, disponibilidade de dados e aplicabilidade prática. Esta estrutura metodológica proporciona uma base sólida para o desenvolvimento de um modelo de ACV consistente e alinhado com os objetivos definidos.

3.2. Inventário de Ciclo de Vida

Após a definição do objetivo e do âmbito, segue-se a fase do ICV, que constitui uma etapa central na ACV. Nesta fase, procede-se à identificação e quantificação de todos os fluxos de *inputs* e *outputs* relacionados com o sistema analisado, abrangendo consumos de recursos, emissões para o ambiente, produção de resíduos e fluxos energéticos ao longo de todas as etapas do ciclo de vida (Figura 8).

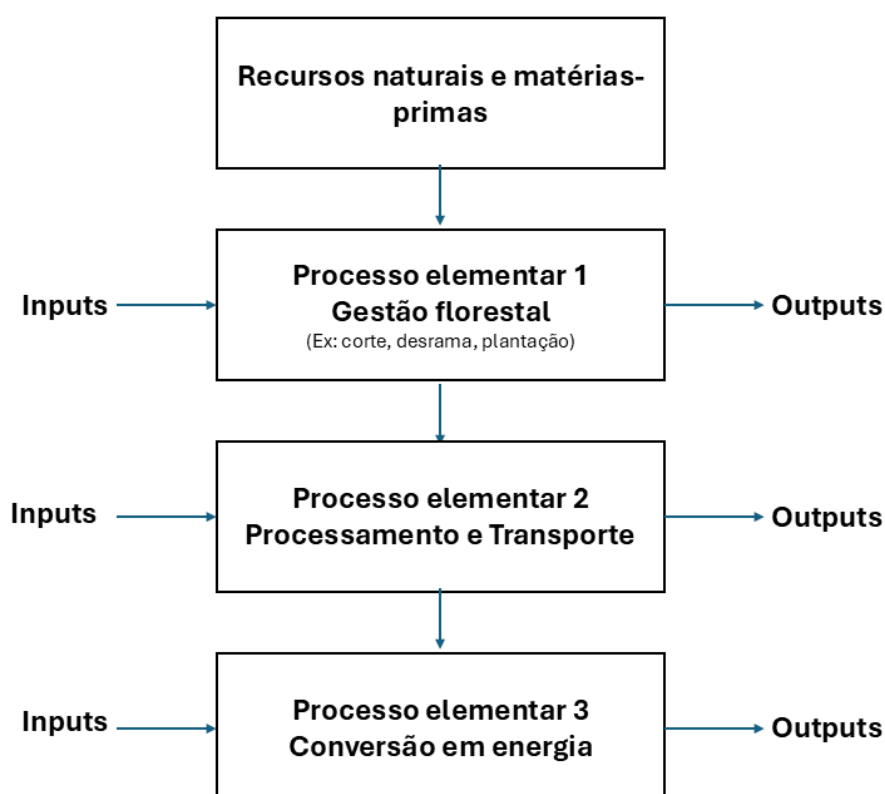


Figura 8 - Etapas do Inventário de Ciclo de Vida, adaptado de (Soares *et al.*, 2023)

No contexto deste estudo, o ICV compreende a recolha de dados relativos às atividades envolvidas na gestão florestal, no processamento e transporte dos resíduos de eucalipto, bem como na sua conversão em eletricidade nas centrais termoelétricas. Foram consideradas todas as operações relevantes, desde o uso

de maquinaria na colheita e transporte dos resíduos, ao consumo de combustíveis fósseis, passando pelas perdas de biomassa e emissões associadas à combustão.

A precisão nesta fase é fundamental, pois os resultados da análise de impactos ambientais dependem diretamente da qualidade e representatividade dos dados recolhidos (Costa, 2019). Assim, para garantir a consistência metodológica, os fluxos foram expressos com base na unidade funcional definida previamente, permitindo a normalização dos resultados e a sua posterior interpretação em termos de impactos ambientais.

Além disso, o estabelecimento claro das fronteiras do sistema permitiu excluir processos irrelevantes para o objetivo do estudo, concentrando a análise nos aspetos mais significativos e com maior potencial de impacto.

3.2.1. Gestão florestal

As principais fases que compõem a gestão florestal dos povoamentos de eucalipto incluem: a preparação do terreno para a instalação do povoamento, a plantação, a condução dos povoamentos e a exploração. Estes povoamentos são geridos sob o regime de talhadia, com três rotações sucessivas, cada uma com uma duração de 12 anos (Costa, 2019).

Os dados de inventário relacionados com a gestão florestal (Tabela 3) basearam-se no estudo de Dias (2014), complementados por informações recolhidas por meio de inquéritos (Anexo A), nomeadamente no que respeita aos dados da *feller-buncher* quanto à quantidade de gasóleo consumida.

O inventário de dados referente à gestão florestal, até ao momento do abate das árvores, foi estimado considerando uma produtividade típica de $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para todas as espécies. Para a conversão dos dados, foi utilizada uma densidade básica de $0,550 \text{ odt/m}^3$ de madeira (Dias, 2014).

Tabela 3 - Dados de inventários para a gestão florestal associado a produção de 1 odt madeira de eucalipto

	Corte com <i>Harvester</i>	Corte com <i>Feller-buncher</i>
Inputs:		
Gasóleo (L/odt)	4,84	4,57
Outputs:		
Produtos:		
Madeira (odt)	1	1
Resíduos (odt)	0,133	0,133

Tabela 3 (cont.) - Dados de inventários para a gestão florestal associado a produção de 1 odt madeira de eucalipto

	Corte com <i>Harvester</i>	Corte com <i>Feller-buncher</i>
Emissões atmosféricas:		
CO ₂ (kg/odt)	13,205	12,065
Resíduos deixados no solo:		
Resíduos (odt)	0,133	0,133
Cepos (odt)	0,058	0,058

3.2.2. Processamento e transporte

O levantamento de dados para esta análise seguiu o mesmo método utilizado na recolha de informações para a gestão florestal, baseado em inquéritos e em fontes provenientes de estudos científicos. Nesta fase, foram avaliadas três situações distintas: a primeira consiste na trituração da biomassa em um parque secundário, seguida do seu transporte até ao destino, designada como Sistema 1 (S1), onde o corte das árvores é realizado com um *harvester* e a extração dos resíduos com um *forwarder*. O Sistema 2 (S2) segue exatamente o mesmo processo, diferenciando-se apenas por utilizar uma *feller-buncher* para o corte. Neste caso, os dados foram obtidos através de um inquérito realizado junto de uma empresa local. A terceira situação, denominada Sistema 3 (S3), envolve o transporte da biomassa até um terminal, onde a trituração é efetuada posteriormente; neste caso, o corte é feito com um *harvester*, mas a extração dos resíduos é realizada por um camião (Tabela 4). Em todos os sistemas, foram consideradas perdas de matéria seca de 2%, tanto durante o armazenamento dos resíduos quanto no processo de trituração (Costa, 2019).

Tabela 4 - Inventário de dados de processamento e transporte

	Trituração no parque secundário (S1)	Trituração no parque secundário (S2)	Trituração no terminal (S3)
Inputs			
Gasóleo (L/odt)	6,82	6,84	9,59
Outputs:			
Estilha (odt)	1	1	1
CO ₂ (kg/odt)	18,35	18,08	25,78

Relativamente às distâncias percorridas, o estudo considerou trajetos “ótimos” do ponto de vista económico, com base no trabalho de Dias (2014). No cenário S1, foi definida uma distância de 35 km entre a beira da estrada e a central termoelétrica, utilizando camiões de 40 toneladas com uma carga útil de 20 toneladas. O cenário S2 segue a mesma distância de ida e inclui também 35 km de regresso, utilizando igualmente camiões de 40 t e 20 t de carga útil. No cenário S3, os resíduos são inicialmente transportados por tratores com semi-reboque, com carga útil de 10 t, percorrendo 10 km entre a beira da estrada e o parque de trituração. Posteriormente, a biomassa triturada percorre mais 25 km até à central, recorrendo novamente a camiões de 40 t com carga útil de 20 t (Dias, 2014).

3.2.3. Conversão em energia

Esta fase integra-se de forma interligada com outras componentes essenciais do ciclo, como a gestão florestal, o processamento e o transporte da biomassa, formando em conjunto os limites do sistema considerados na ACV da produção de eletricidade a partir de resíduos florestais.

Entre as opções disponíveis para a conversão de energia por meio da combustão, destacam-se duas tipologias de fornos utilizadas para esta finalidade: a fornalha de grelha e o forno de leito fluidizado. No presente estudo, opta-se por analisar exclusivamente o forno de leito fluidizado (Figura 9), dada a sua crescente relevância no contexto nacional e as vantagens técnicas associadas à sua operação. Os dados utilizados para esta modelação baseiam-se no estudo de Costa (2019), que apresenta uma caracterização detalhada deste tipo de tecnologia.

As atividades compreendidas nesta fase da ACV incluem o processo de combustão propriamente dito, englobando o consumo de biomassa como combustível principal, o uso de gás natural como combustível auxiliar, além de insumos como areia e água. Inclui-se ainda a gestão das cinzas resultantes da combustão, tratadas como um subproduto com implicações ambientais relevantes. A conversão de energia nas centrais que utilizam turbinas a vapor segue, em geral, o ciclo termodinâmico de Rankine, no qual o calor gerado pela queima da biomassa é utilizado para produzir vapor a alta pressão, que por sua vez aciona uma turbina acoplada a um gerador de eletricidade (Costa, 2019).

As caldeiras de combustão em leito fluidizado têm ganho destaque nas últimas décadas, especialmente devido à sua capacidade de queimar combustíveis com características complexas, como os resíduos florestais. Estas caldeiras operam a temperaturas típicas entre 800 e 900 °C (Sher *et al.*, 2017).

A tecnologia FBC apresenta diversas vantagens que justificam a sua escolha para o tratamento de biomassa florestal. Entre elas destaca-se a elevada eficiência de combustão, favorecida pela excelente mistura entre o gás e o sólido na câmara

de combustão, promovendo uma transferência de calor eficaz. Além disso, a operação a temperaturas mais baixas permite reduzir significativamente as emissões de NO_x, tornando este sistema ambientalmente mais vantajoso face a outras tecnologias convencionais (Sher *et al.*, 2017).

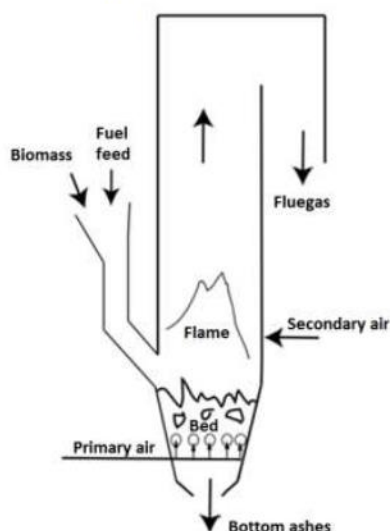


Figura 9 - Sistema de combustão em leito fluidizado (Costa, 2019)

A Tabela 5 apresenta os valores considerados na conversão de biomassa em energia elétrica. Para este cálculo, os valores do PCS (20,76 MJ/kg) e do PCI (10,51 MJ/kg) foram determinados com base na composição elementar da biomassa, neste caso resíduos de *Eucalyptus globulus* (Enes *et al.*, 2019). Considerou-se um teor de humidade de 50% (base húmida). Os cálculos tiveram por base dados recolhidos através de um inquérito realizado numa central termoelétrica dedicada (Anexo B), com potência de 12,89 MW e um rendimento de conversão de 37%.

Tabela 5 - Inventário de conversão de biomassa em energia elétrica

Grelha de leito fluidizado	
Inputs:	
Estilha (kg)	0,92567
Gás natural (m ³)	0,00319
Areia (g)	12,6
Água total ^[1] (L)	1,734
Outputs:	
Produto:	
Eletricidade (kWh)	1

Tabela 5 (cont.) - Inventário de conversão de biomassa em energia elétrica

Grelha de leito fluidizado	
Emissões atmosféricas:	
CO ₂ (kg)	0,929676
Desperdício (<i>Wastes</i>):	
Cinzas (kg)	0,0632
Escórias (kg)	0,0316

^[1] Água total = 12.000 m³/mês fabril + 4.000 m³/mês desmineralizada, convertido para ano e litros.

3.3. Avaliação de Impactes do Ciclo de Vida

Esta etapa consiste em relacionar os dados obtidos no inventário com categorias específicas de impacto ambiental e os respetivos indicadores, para compreender melhor os efeitos ambientais associados ao sistema estudado. Além disso, a fase de AICV fornece informações fundamentais para a etapa de interpretação do ciclo de vida.

Neste projeto, a categoria de impacto selecionada foi as alterações climáticas, expressas em termos de emissões de gases com efeito de estufa (GEE). Esta categoria foi escolhida por ser particularmente relevante no contexto da produção de energia a partir de biomassa, tendo em conta o seu potencial de emissão ou mitigação de GEE como o CO₂.

Para a AICV, foi utilizado o método de caracterização desenvolvidos pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC): o IPCC 2013 GWP 100a. Embora antigo, continua a ser amplamente utilizado na maioria dos estudos de ACV, sendo também a referência em várias bases de dados, como oecoinvent (IPCC, 2013).

A escolha deste método permite analisar as emissões de gases com efeito de estufa (GEE) associadas ao sistema estudado, contribuindo para uma avaliação robusta e fundamentada dos impactes climáticos. Os resultados obtidos servirão de base para a fase de interpretação, com o objetivo de identificar as etapas mais impactantes do ciclo de vida em termos de emissões de GEE, permitindo fundamentar a tomada de decisões e propor estratégias para a mitigação dos impactes ambientais identificados.

4. Apresentação e análise dos resultados

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos na Avaliação do Ciclo de Vida, com base na modelação do sistema no software openLCA, bem como a sua análise e discussão. As diferentes etapas do processo foram inseridas conforme os dados recolhidos e organizadas de forma a refletir o fluxo real da operação em estudo. Os resultados são apresentados por etapa, permitindo observar o contributo de cada fase para os impactos ambientais globais.

4.1. Gestão florestal

Devido a limitações na base de dados disponível, a modelação da fase de gestão florestal considerou apenas o consumo de gasóleo pelo *harvester* e *feller-buncher*, utilizado nas operações de corte e processamento do eucalipto. Embora esta abordagem constitua uma simplificação, os cálculos foram realizados com rigor, assegurando coerência e transparência nos resultados obtidos.

Os dados foram extraídos dos ficheiros gerados pelo software openLCA, relativos às simulações dos sistemas em análise. Para o *harvester*, as emissões na gestão florestal atingiram 11,654898 kg de CO₂ eq por unidade funcional definida no estudo, enquanto para a *feller-buncher* se registaram 10,64872 kg de CO₂ eq. Esta diferença representa um aumento de cerca de 9,45% nas emissões associadas ao *harvester*, equivalente a mais 1,006178 kg de CO₂ eq por unidade funcional, evidenciando relevância no contexto da sustentabilidade florestal e da avaliação do desempenho ambiental destas tecnologias.

A razão principal desta diferença está relacionado com as características operacionais de cada máquina. O *harvester* combina várias funções, como corte, desramação e outras operações, implicando um tempo de trabalho mais prolongado e, conseqüentemente, maior consumo de combustível, o que reflete diretamente nas emissões de CO₂ eq (Santos *et al.*, 2018). Em contraste, a *feller-buncher* é usada unicamente para o corte e agrupamento, o que lhe confere menor tempo de operação e menores emissões nesta fase (Ferreira *et al.*, 2024). Contudo, a utilização da *feller-buncher* obriga à realização de outras etapas, como desramação e corte em comprimento, geralmente efetuadas por outros equipamentos ou em unidades industriais, podendo deslocar parte do impacto ambiental para fases posteriores da cadeia de abastecimento.

Em síntese, os resultados indicam que, na fase específica de gestão florestal, a *feller-buncher* apresenta um desempenho ambiental mais favorável em termos de emissões de CO₂ eq. No entanto, a decisão entre estas tecnologias deve ponderar não apenas o impacto direto desta etapa, mas também como as condições do terreno, a experiência do operador de máquina e entre outros pontos.

4.2. Processamento e transporte

Na análise da fase de processamento e transporte, foram considerados três cenários distintos de operação, para os quais se determinaram as emissões de CO₂ eq associadas ao consumo de combustível. Os valores obtidos evidenciam diferenças significativas entre os sistemas modelados, sendo que o cenário S3 apresenta um impacto ambiental superior, com emissões na ordem dos 25,78 kg de CO₂ eq, comparativamente aos cenários S1 e S2, cujos valores se situam em 18,35 kg e 18,08 kg de CO₂ eq, respetivamente. Este acréscimo observado no S3 resulta essencialmente da combinação de operações adicionais de transporte e da menor eficiência energética dos equipamentos utilizados, traduzindo-se num maior consumo de gasóleo face aos outros cenários.

Embora os cenários S1 e S2 apresentem resultados próximos, é de notar que pequenas variações no consumo de combustível entre ambos indicam uma ligeira vantagem ambiental para o S2. No caso do S3, as necessidades de diversas operações contribuem para o aumento do consumo específico de combustível e, conseqüentemente, para o agravamento das emissões.

4.3. Conversão em energia

Na etapa de conversão de energia foram registadas emissões diretas de 0,930 kg de CO₂ eq. por cada kWh de eletricidade gerado, resultantes da combustão da biomassa florestal residual. Este valor mostra que a fase de conversão é a principal responsável pelas emissões diretas do sistema, uma vez que concentra os maiores fluxos de carbono. No entanto, estas emissões correspondem sobretudo ao carbono biogénico libertado na queima da biomassa, que já tinha sido absorvido pelas árvores durante o seu crescimento. Por isso, apesar de o valor ser elevado em termos absolutos, não representa um impacto líquido adicional nas alterações climáticas, confirmando o carácter renovável e de ciclo curto do carbono dos resíduos florestais.

Neste contexto, destaca-se a tecnologia de leito fluidizado, particularmente vantajosa em centrais dedicadas à produção de energia. Esta permite uma maior eficiência de conversão, reduzindo a necessidade de combustível por kWh produzido e, conseqüentemente, diminuindo a pegada de carbono. Proporciona ainda uma combustão mais uniforme e controlada, mitigando a formação de poluentes como os NO_x, e adapta-se melhor a variações na qualidade da biomassa. Além disso, esta tecnologia permite menores emissões de CO₂ fóssil durante os arranques e fases de operação parcial, contribuindo para um impacto ambiental global inferior face à tradicional fornalha de grelha.

4.4. Análise global

De forma global, os resultados obtidos permitem compreender o peso relativo de cada etapa no ciclo de vida da produção de energia a partir de resíduos florestais. Embora na gestão florestal e no processamento e transporte se verifiquem contributos relevantes associados sobretudo ao consumo de gasóleo, é na fase de conversão energética que se registam as emissões mais expressivas em termos absolutos.

Na conversão, foram quantificadas 0,930 kg de CO₂ eq. por cada kWh de eletricidade gerado. Considerando que a central em estudo possui uma potência instalada de 12,89 MW, um tempo de funcionamento anual de 8 592 horas (equivalente a uma operação contínua com uma pausa de uma semana) e um rendimento global de 37%, obtém-se uma produção anual de 110 750 880 kWh. Convertendo as emissões à mesma unidade funcional utilizada para as restantes etapas do ciclo de vida, conclui-se que a queima de 1 odt de biomassa seca produz cerca de 5 760 kWh, o que corresponde a 5 363 kg de CO₂ eq./odt. Este resultado mostra claramente o peso desta etapa no inventário global de emissões.

A Figura 11 apresenta as emissões de CO₂ eq. associadas a cada etapa do ciclo de vida analisado, expressas em kg CO₂ eq./odt. Os valores permitem comparar o contributo relativo das operações de gestão florestal, processamento e transporte da biomassa, bem como da conversão em energia. Enquanto as emissões da conversão resultam da constituição em carbono da própria biomassa — sendo, por isso, biogénicas e consideradas neutras, por corresponderem ao CO₂ previamente sequestrado pelas árvores durante o seu crescimento —, as emissões associadas às operações mecanizadas derivam do consumo de combustíveis fósseis e são contabilizadas como emissões líquidas de todo o processo.

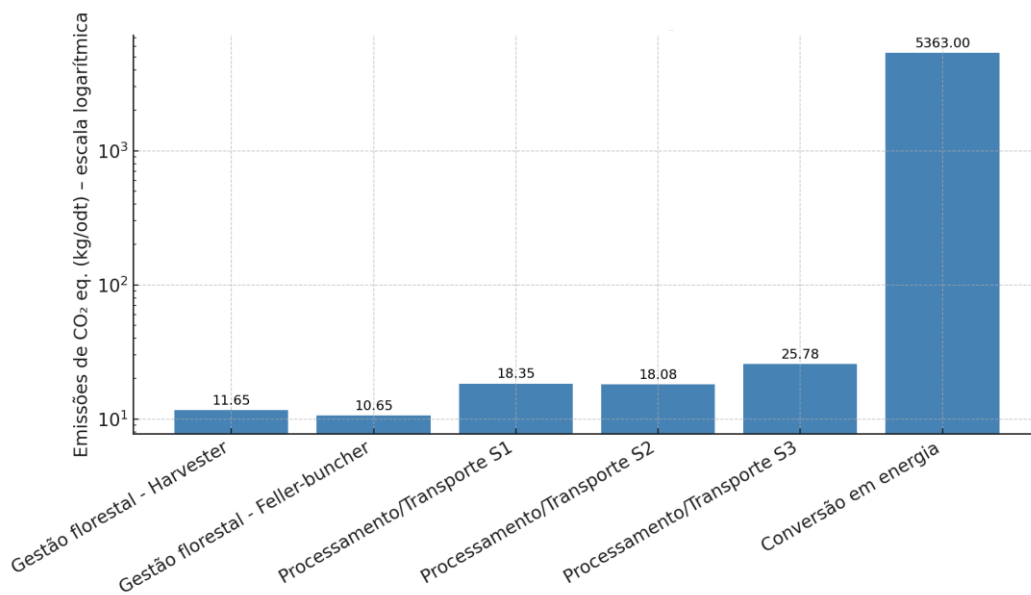


Figura 10 - Emissões de CO₂ eq por etapa do ciclo de vida

Assim, a análise confirma que o desempenho ambiental da produção de eletricidade a partir de biomassa florestal depende sobretudo da eficiência operacional nas fases de transporte e processamento, que recorrem diretamente a gásóleo, enquanto a conversão energética, apesar de concentrar o maior volume de emissões, mantém-se neutra do ponto de vista climático por se tratar de um ciclo de carbono de curta duração.

5. Conclusão

A Avaliação do Ciclo de Vida realizada evidencia o potencial da biomassa florestal residual de eucalipto como uma fonte renovável relevante para a produção de eletricidade em Portugal, contribuindo para a redução das emissões de gases com efeito de estufa quando comparada às fontes fósseis convencionais. Os resultados demonstram que, apesar de as emissões diretas associadas à combustão da biomassa representarem a fração dominante do inventário em termos absolutos, os contributos mais críticos em termos líquidos surgem a montante, sobretudo nas fases de processamento e transporte, que devem ser considerados.

A gestão florestal mostrou um peso mais reduzido, com diferenças entre o harvester e a feller-buncher, esta última com ligeira vantagem devido à simplicidade das operações realizadas. Já no processamento e transporte, observaram-se variações relevantes entre cenários, com o S3 a apresentar maior impacto devido às operações logísticas adicionais, enquanto o S2 revelou um desempenho mais favorável. Estes resultados reforçam a importância da otimização logística e da escolha adequada dos equipamentos como estratégias de mitigação ambiental.

O estudo enfrentou algumas limitações, nomeadamente a escassez de dados atualizados e específicos para o contexto português e as restrições associadas às bases de dados disponíveis.

Como sugestões para trabalhos futuros, destaca-se a necessidade de gerar inventários primários mais representativos da realidade nacional, expandir a avaliação para outros impactes ambientais além das emissões de GEE e integrar cenários de inovação tecnológica, como máquinas florestais mais eficientes, combustíveis alternativos e otimização logística apoiada em ferramentas de simulação.

Em síntese, a biomassa florestal residual de eucalipto constitui uma alternativa sólida e estratégica no contexto da transição energética e da descarbonização, mas o seu aproveitamento pleno requer dados mais robustos, análises integradas e políticas que incentivem a transparência e a modernização tecnológica ao longo de toda a cadeia de valor.

Bibliografia

APA - LONG-TERM STRATEGY FOR CARBON NEUTRALITY OF THE PORTUGUESE ECONOMY BY 2050

APA - Revisão do PNEC 2030 PLANO NACIONAL ENERGIA E CLIMA 2021-2030 (PNEC 2030)

BIOND - Projeto Melhor Eucalipto - Rearborização [Em linha], atual. 2024. [Consult. 27 mai. 2025]. Disponível em WWW:<URL:https://melhoreucalipto.biond.pt/rearborizacao/>.

CAOF - TABELA EXPLORAÇÃO FLORESTAL DO EUCALIPTO

CELBI - Altri investe 125 milhões de euros [Em linha], atual. 16 jan. 2025. [Consult. 3 jul. 2025]. Disponível em WWW:<URL:https://shre.ink/SNYc>.

COMISSÃO EUROPEIA - Relatório do Estado Global de Energias Renováveis de 2024

COMISSÃO EUROPEIA - Biomass [Em linha], atual. 9 mar. 2025. [Consult. 9 mar. 2025]. Disponível em WWW:<URL:https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/bioenergy/biomass_en>.

COSTA, Tamiris - Avaliação de Ciclo de Vida da produção de energia a partir de resíduos florestais

DGEG - FICHA TÉCNICA: Estatísticas rápidas das renováveis

DIÁRIO DA REPÚBLICA - Resolução do Conselho de Ministros n.º 163/2017, de 31 de outubro. 2017).

DIAS, Ana Cláudia - Life cycle assessment of fuel chip production from eucalypt forest residues. *International Journal of Life Cycle Assessment*. . ISSN 16147502. 19:3 (2014) 705–717. doi: 10.1007/s11367-013-0671-4.

ENES, Teresa *et al.* - Residual agroforestry biomass-thermochemical properties. *Forests*. . ISSN 19994907. 10:12 (2019). doi: 10.3390/F10121072.

FABRES, Sérgio - Floresta de produção em Portugal [Em linha], atual. 2021. [Consult. 26 abr. 2025]. Disponível em WWW:<URL:https://www.e-globulus.pt/biblioteca-online/dossiers/floresta-producao>.

FAO - THE STATE OF THE WORLD'S FORESTS - FORESTS, BIODIVERSITY AND PEOPLE. 2020).

FERNANDES ANTUNES, Maria - Ecopontos Florestais-a Gestão e Valorização da Biomassa e a Prevenção dos Incêndios Florestais Análise da Implementação de Ecopontos Florestais na Comunidade Intermunicipal da Região de Coimbra

FERREIRA, Carla; PINTO, Lígia Costa; VALENTE, Marieta - Forest fire causes and prevention strategies in Portugal: Insights from stakeholder focus groups. *Forest Policy and Economics*. . ISSN 13899341. 169:2024). doi: 10.1016/j.forpol.2024.103330.

FERREIRA, Francisco De Assis Costa *et al.* - Technical and economic performance of a feller buncher in eucalyptus forests with different yields in Southern Bahia, Brazil. *Caderno Pedagógico*. 21:8 (2024) e6737. doi: 10.54033/cadpedv21n8-130.

FINNVEDEN, G.; POTTING, J. - Life Cycle Assessment. *Encyclopedia of Toxicology: Third Edition*. 2014) 74–77. doi: 10.1016/B978-0-12-386454-3.00627-8.

FLORESTAS - Quais são as principais operações de gestão florestal? [Em linha], atual. 7 out. 2024. [Consult. 20 jun. 2025]. Disponível em WWW:<URL:https://florestas.pt/saiba-mais/quais-sao-as-principais-operacoes-de-gestao-florestal/>.

GARBA, Abdurrahman - Biomass Conversion Technologies for Bioenergy Generation [Em linha] Disponível em WWW:<URL:www.intechopen.com>.

GREENDELTA GMBH - openLCA [Em linha], atual. 2024. [Consult. 2 mai. 2025]. Disponível em WWW:<URL:GreenDelta GmbH>.

GREENVOLT - Energia da Biomassa: Porque é que a transformação importa? [Em linha], atual. 19 mai. 2025. [Consult. 31 mai. 2025]. Disponível em WWW:<URL:https://greenvolt.com/pt-pt/energia-biomassa/>.

ICNF - 6.º INVENTÁRIO FLORESTAL NACIONAL: Principais resultados

IEA - Emissions from Oil and Gas Operations in Net Zero Transitions A World Energy Outlook Special Report on the Oil and Gas Industry and COP28 [Em linha] Disponível em WWW:<URL:www.iea.org>.

IEA BIOENERGY - Comparison of possible supply chains for forestry derived biomass for bioenergy in New Zealand

IPCC - Climate change 2013: the physical science basis. [S.l.] : Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013. ISBN 9789291691388.

LIU, Min; ZHU, Guangyan; TIAN, Yajun - The historical evolution and research trends of life cycle assessment. *Green Carbon*. . ISSN 29501555. 2:4 (2024) 425–437. doi: 10.1016/j.greenca.2024.08.003.

MURALIKRISHNA, Iyyanki V.; MANICKAM, Valli - Life Cycle Assessment. *Environmental Management*. 2017) 57–75. doi: 10.1016/B978-0-12-811989-1.00005-1.

NUNES, Leonel J. R. *et al.* - Historical development of the Portuguese forest: The introduction of invasive species. *Forests*. . ISSN 19994907. 10:11 (2019). doi: 10.3390/f10110974.

OBSERVATÓRIO TÉCNICO INDEPENDENTE *et al.* - ESTUDO TÉCNICO Redução do risco de incêndio através da utilização de biomassa lenhosa para energia

PEREIRA, Tobias - AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE NUMA CENTRAL TERMOELÉTRICA A CARVÃO CONVERTIDA PARA BIOMASSA FLORESTAL

REN - Recorde de produção de renováveis abastece 71% do consumo de eletricidade em 2024 [Em linha], atual. 6 jan. 2025. [Consult. 15 jun. 2025]. Disponível em WWW:<URL:https://www.ren.pt/pt-pt/media/noticias/recorde-de-producao-de-renovaveis-abastece-71-do-consumo-de-eletricidade-em-2024>.

ROVERE, Bruno Oliveira; RODRIGUES, Johnata Henrique; TELEKEN, Joel Gustavo - Redução do índice de acidez através da neutralização e esterificação para produção de biodiesel. *Brazilian Journal of Development*. . ISSN 25258761. 6:5 (2020) 24678–24686. doi: 10.34117/bjdv6n5-064.

SANTOS, Diego *et al.* - Desempenho técnico, econômico e ambiental do harvester em distintas rotações do motor. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*. . ISSN 14139324. 46:118 (2018) 319–326. doi: 10.18671/scifor.v46n118.17.

SCHRIJVERS, Dieuwertje L.; LOUBET, Philippe; SONNEMANN, Guido - Developing a systematic framework for consistent allocation in LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*. . ISSN 16147502. 21:7 (2016) 976–993. doi: 10.1007/s11367-016-1063-3.

SHER, Farooq *et al.* - Experimental investigation of woody and non-woody biomass combustion in a bubbling fluidised bed combustor focusing on gaseous emissions and temperature profiles. *Energy*. . ISSN 03605442. 141:2017) 2069–2080. doi: 10.1016/j.energy.2017.11.118.

SOARES, Adelino *et al.* - SC5 - Avaliação do Ciclo de Vida

TSHIKOVHI, Azwifunimunwe; MOTAUNG, Tshwafo Ellias - Technologies and Innovations for Biomass Energy Production. *Sustainability (Switzerland)*. . ISSN 20711050. 15:16 (2023). doi: 10.3390/su151612121.

WANG, Jiannan; AZAM, Waseem - Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries. *Geoscience Frontiers*. . ISSN 16749871. 15:2 (2024). doi: 10.1016/j.gsf.2023.101757.

Anexos

Anexo A

EMPRESA - FORESTCORTE			
ABATE		TRANSPORTE PRIMÁRIO	
MÁQUINA	FELLER-BUNCHER	MÁQUINA	FORWARDER
TIPO DE COMBUSTÍVEL	gasoleo verde	TIPO DE COMBUSTÍVEL	gasoleo verde
CONSUMO (litros/hora)	16	CONSUMO (litros/h)	12
CONSUMO ANUAL (litros)	28224	CONSUMO ANUAL (litros)	25368
PRODUTIVIDADE (ton biomassa/hora)	6	CAPACIDADE DE CARGA (m ³)	12,8
PRODUTIVIDADE COM PINHEIRO BRAVO (ton biomassa/hora)	6 a 8	PRODUTIVIDADE RESÍDUOS DE EUCALITPO (t/hora)	12
PRODUTIVIDADE COM EUCALIPTO (ton biomassa/hora)	6 a 8	DISTÂNCIA MÉDIA PERCORRIDA (ABATE - PARQUE DE TRITURAÇÃO)	2
TRITURADORES		TRANSPORTE SECUNDÁRIO	
MÁQUINA	ALBACH	Camião	VOLVO
TIPO DE COMBUSTÍVEL	gasoleo verde	TIPO DE COMBUSTÍVEL	gasoleo
CONSUMO ANUAL (litros)	78300	CAPACIDADE DE CARGA (m ³)	90
QUANTIDADE DE BIOMASSA TRITURADA (ton)	35235	CONSUMO ANUAL (litros)	18000
CONSUMO DE RESÍDUOS DE EUCALIPTO (litros/ton)	60	CONSUMO (litros/100KM)	24,3
		DISTÂNCIA PERCORRIDA ANUALMENTE (KM)	74100

Figura 11 - Inquérito aplicado à etapa de exploração florestal

Anexo B

Tabela 6 - Inquérito aplicado à etapa de conversão de energia

Perguntas	Respostas
Que tipos de resíduos florestais são usados?	Casca de eucalipto (própria) e biomassa residual (eucalipto, pinheiro, outros).
Quantidade anual de biomassa?	Cerca de 140–150 mil toneladas.
Com que regularidade a biomassa é entregue à central?	Diariamente.
Qual é a quantidade média de água consumida anualmente pela central?	Cerca de 12000 m ³ água fabril e cerca de 4000 m ³ de água desmineralizada por mês.
Qual é o volume de águas residuais gerado?	Inexistente.
Potência da central (MW)?	12, 89
Qual é o rendimento médio anual da central em termos de conversão de biomassa em eletricidade (em %)?	Cerca de 37%
Que tipo de caldeira é utilizada?	Caldeira de Leito Fluidizado (BFB)
Qual é a capacidade da caldeira instalada na central?	39,1 MW
Existem processos para reduzir o consumo de água, como reutilização no ciclo de produção?	Sim, no circuito de refrigeração e purga da caldeira. Perdas apenas por evaporação.
Quantidade anual de resíduos?	Cerca de 7.000 toneladas de cinzas volantes e 3.500 de escórias.
Qual é o destino atual das cinzas geradas na central?	Cinzas – estabilizar aterros, para fazer betão, compostagem, indústria de curtumes, matérias de construção. Escórias – para encher vazios na pedreira e para cimenteira (pequena quantidade).