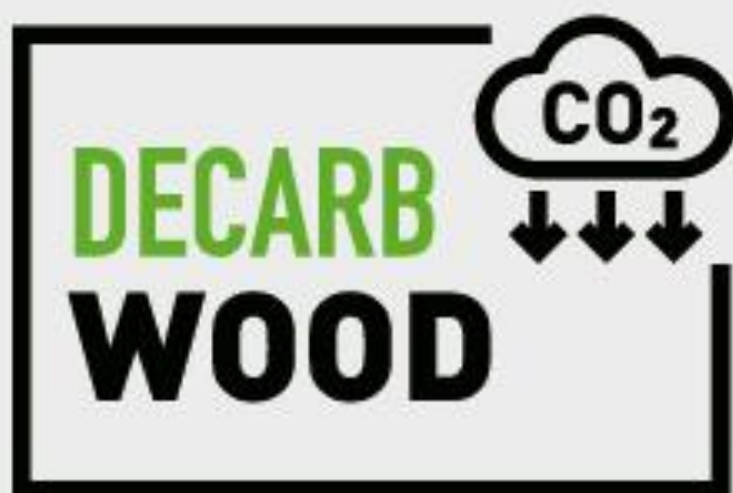




DEARBWOOD: Roteiro para a Descarbonização das Indústrias de Madeira

Ferramentas e soluções para a transição energética e sustentabilidade do setor.

RECUPERARPORTUGAL.GOV.PT

Promotor



Financiamento



Compilação de Relatórios Técnicos



Roteiro para a descarbonização das Indústrias de Madeira



CARATERIZAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES COM EFEITO DE ESTUFA DO SETOR

III SUMÁRIO EXECUTIVO

O presente documento visa apresentar o relatório de encerramento e a análise de inquéritos no âmbito da Fase A do projeto DECARBWOOD da AIMMP, com as contribuições para apoio ao desenvolvimento do Roteiro de Descarbonização das Indústrias de Madeira – DECARBWOOD”, no âmbito do AVISO Nº 01/C11-I01/2021 - Roteiros De Descarbonização da Indústria e Capacitação das Empresas.

O **DECARBWOOD: Roteiro para a Descarbonização das Indústrias de Madeira**, é um projeto realizado pela AIMMP com financiamento do PRR, cuja finalidade é a de fornecer um referencial para que as empresas implementem os seus próprios programas de descarbonização.

A **AIMMP** pretende desenvolver o seu roteiro (financiado pelo Plano de Recuperação e Resiliência, no âmbito da Componente 11 – Descarbonização da Indústria) que visa alavancar a descarbonização do setor industrial e empresarial e promover uma mudança de paradigma na utilização dos recursos, concretizando medidas do Plano Nacional Energia Clima 2030 (PNEC 2030) e contribuindo para acelerar a transição para uma economia neutra em carbono.

Este documento, elaborado com base na experiência que detida pelo **INEGI** e **SerQ**, relata os procedimentos e resultados associados à fase de inquéritos desenvolvidos no âmbito do projeto DECARBWOOD - Roteiro para a Descarbonização das Indústrias de Madeira.

III O INQUÉRITO

_Caracterização prévia do setor

Para a formulação do inquérito foram utilizadas informações relacionadas à identificação dos principais indicadores de desempenho relacionados à descarbonização, eficácia e eficiência e economia circular: Neste primeiro passo, as equipas do INEGI e do SerQ realizaram uma pesquisa abrangente, consultando materiais bibliográficos, anuários estatísticos, relatórios e documentos técnicos relevantes. Essa pesquisa documental ajudou a identificar os indicadores-chave relevantes para avaliar o progresso da descarbonização.

Para apoiar a preparação do inquérito foi inicialmente realizada uma análise de caracterização prévia do setor (informações contidas no relatório Projeto Decarbwood - Caracterização do setor). Uma vez que indústria da Madeira e artigos de madeira é composta por diversos CAEs, para o projeto foram selecionados para análise apenas os CAE expostos na seguinte tabela.

CAE	Descrição
16101	Serração de madeira
16102	Impregnação de madeira
16211	Fabricação de painéis de partículas de madeira
16212	Fabricação de painéis de fibras de madeira
16213	Fabricação de folheados, contraplacados, lamelados e de outros painéis
16220	Parqueteria
16230	Fabricação de outras obras de carpintaria para a construção
16240	Fabricação de embalagens de madeira
32995	Fabricação de caixões mortuários em madeira

Tabela: CAEs analisados

Verificou-se que, para os CAEs referidos anteriormente, são totalizadas 2142 empresas que se dividem pelas respetivas atividades económicas. De realçar a grande representatividade da Fabricação de outras obras de carpintaria para a construção com 65% e da 'Serração de madeira' com 23%. Também se observou que, em termos geográficos, o Centro concentra a maior parte das empresas, contabilizando cerca de 46%, seguido do Norte com cerca de 16% e o a área metropolitana de Lisboa com cerca de 13%.

Relativamente ao volume de negócios, as atividades económicas contabilizaram cerca de 2450 milhões de euros. Desta maneira, em termos percentuais e realçando apenas as duas atividades económicas com maior peso, a 'Fabricação de outras obras de carpintaria para a construção' representou 30,5% e a 'Serração de madeira' representou 21,5%.

Com relação ao valor acrescentado bruto, o setor em análise totalizou cerca de 659 M€, sendo que, os três subsectores que mais representatividade foram a 'Fabricação de outras obras de carpintaria para a construção' com 38,1%, a 'Serração de madeira' com 24,2% e a 'Fabricação de embalagens de Madeira' com 13,3%.

Para cada um dos CAE apresentados foi então realizado o levantamento dos produtos e coprodutos produzidos e respetivos processos de fabrico, apresentados em detalhe no relatório Projeto Decarbwood - Caracterização do setor.

Neste documento ainda foi apresentada a análise energética do setor, baseada no balanço anual da DGEG para a indústria 'Madeira e artigos de madeira, onde foi constatado que a eletricidade e as lenhas e resíduos vegetais representam quase a totalidade da energia utilizada no setor, com cerca de 83% da energia total consumida. Também foi verificado que, desde 2015 até 2022, o consumo de energia aumentou cerca de 30% atingindo 187261 tep em 2022.

No que diz respeito às emissões, em 2022, a emissão de gases com efeito estufa (GEE) associada ao uso de energia no setor da Madeira e artigos da madeira corresponderam a 242 mil toneladas de CO2 equivalente, sendo que se verifica uma redução em relação a 2015, mas com uma ligeira subida desde 2020. Sendo que, a eletricidade foi o vetor energético com maior contribuição para as emissões associadas ao setor, com 77,41% das emissões totais com alguma representatividade por parte do gasóleo (12,21%) e gás natural (8,43%).

Definição dos parâmetros iniciais

Após a caracterização do setor, foram realizadas diversas reuniões de ponto de situação e tomada de decisão com a participação das equipas do INEGI, SerQ, AIMMP e Essência do Ambiente.

Os dados obtidos na caracterização foram apresentados e as informações foram cruzadas com os associados AIMMP, foram validados os critérios de seleção das entidades e efetuado o levantamento das empresas com interesse prévio de participação no projeto.

Os critérios de sugestão de seleção de empresas com base nos CAE considerados foram discutidos, apresentados potenciais desafios com relação à participação de empresas não associadas e discrepâncias entre o CAE principal e a principal atividade econômica. Foi efetuado o refinamento e definição dos CAE.

Foram apresentados os principais parâmetros para o conteúdo do inquérito para confeção de versão piloto do inquérito e realizados testes de diferentes plataformas, levando em consideração parâmetros como o Tipos de respostas; Limitações; Personalização; Facilidade a nível do utilizador; Exportação de dados (.xls, etc).

Foram apresentadas durante as reuniões de ponto de situação diversas propostas para a estruturação do inquérito juntamente com seus avanços, textos introdutórios, disclaimer e inclusão de parâmetros solicitados pela AIMMP. Também foram discutidos os riscos identificados e possíveis medidas de controle.

Foi definido que a plataforma ideal para o inquérito online seria a hospedagem diretamente na página do Decarbwood <https://decarbwood.pt/> (Figura – Homepage do Projeto), com estruturação do inquérito e cálculos desenvolvidos pelo INEGI/SerQ e apoio da MG Digital para a hospedagem online.

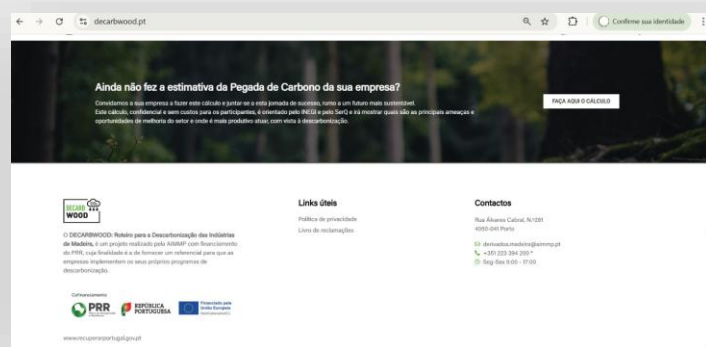


Figura – Homepage do Projeto

Estrutura e conteúdo do questionário

O inquérito teve por objetivo permitir a identificação e quantificação de fluxos de matérias-primas, resíduos e subprodutos existentes nas indústrias, bem como a forma de tratamento e disposição final dos mesmos. Além disso, esperava-se identificar os diferentes consumíveis, matérias-primas e produtos utilizados no processo industrial e possibilitar um pré-diagnóstico carbónico.

A escolha dos indicadores foi cuidadosamente considerada com base na caracterização prévia, indicadores e métricas necessárias para o cálculo das emissões de carbono e necessidades da AIMMP para a caracterização do setor.

O questionário foi estruturado com perguntas específicas para medir indicadores de forma que cada pergunta foi formulada de maneira clara e objetiva, de modo a obter informações precisas sobre o desempenho em relação aos indicadores. As informações foram discutidas nas reuniões de ponto de situação e os textos validados pela AIMMP/Essência do Ambiente antes de sua disponibilização para preenchimento online.

O inquérito proposto pelo consórcio visou realizar uma estimativa das emissões de CO₂ de uma organização, com base na metodologia do GHG Protocol, e considerando fatores de emissão baseados no Despacho n.º 17313/2008, de 26 de junho do Ministério da Economia e da Inovação - Direcção-Geral de Energia e Geologia Português.

Para os cálculos, foram considerados dados referentes aos consumos de combustíveis, energia e gases para os âmbitos 1 – Emissões diretas provenientes de atividades sob controle da organização e 2 – Emissões indiretas associadas ao consumo de eletricidade, calor ou vapor adquiridos de terceiros. Não sendo consideradas emissões de âmbito 3 – Outras emissões indiretas ao longo da cadeia de valor não contempladas nos âmbitos anteriores.

Em resumo o inquérito contou com 4 módulos, foi hospedado no link <https://decarbwood.pt/estimativa-da-pegada-de-carbono/> e apresentou a estrutura ilustrada na Figura seguinte.

Figura – Inquérito Online

Módulo 1 – Caracterização da empresa

Nesta seção foram solicitados dados gerais de caracterização da entidade (Figura - Módulo 1). As perguntas abrangeram diversas áreas como operações, processos, consumo de recursos e impacto.

O questionário foi dividido em seções distintas, a começar pela identificação da empresa e seu contexto em que os respondentes foram solicitados a fornecer informações detalhadas, incluindo o nome e informações cadastrais da empresa, detalhes de contato responsável pelo preenchimento, aceitação da regulamentação RGPD, a localização geográfica da empresa e a categoria CAE principal, o tamanho da empresa em termos de número de funcionários, o que é relevante para compreender a sua escala e suas necessidades.

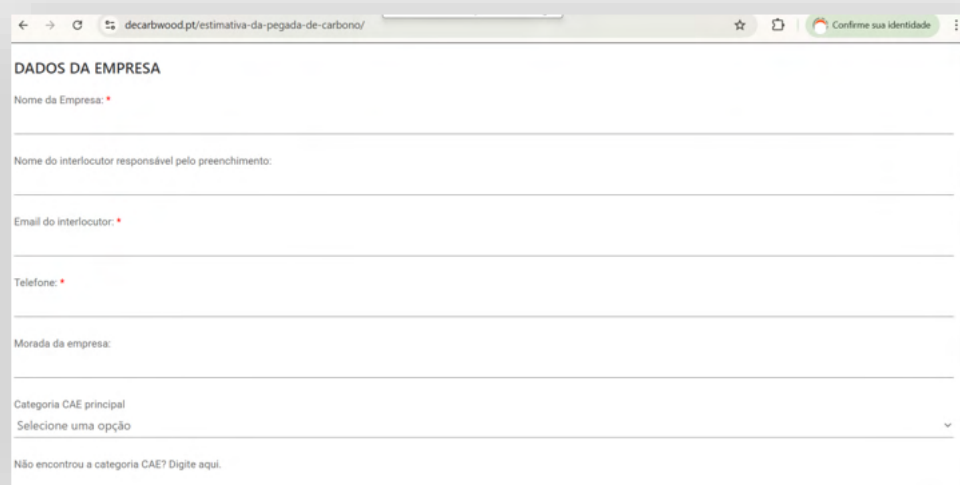
A imagem mostra uma captura de tela de um formulário web no navegador. O endereço da barra de endereços é 'decarbwood.pt/estimativa-da-pegada-de-carbono/'. O formulário, intitulado 'DADOS DA EMPRESA', contém os seguintes campos: 'Nome da Empresa:' com um asterisco vermelho obrigatório; 'Nome do interlocutor responsável pelo preenchimento:'; 'Email do interlocutor:' com um asterisco vermelho obrigatório; 'Telefone:' com um asterisco vermelho obrigatório; 'Morada da empresa:'; 'Categoria CAE principal' com uma lista suspensa que mostra 'Selecione uma opção'; e 'Não encontrou a categoria CAE? Digite aqui.'.

Figura - Módulo 1

Foram questionadas as possíveis iniciativas de descarbonização e eficiência energética, onde as empresas foram questionadas sobre a existência de um plano integrado em execução para alcançar a neutralidade carbónica, bem como metas de descarbonização específicas e certificações. Essas informações são cruciais para entender o compromisso e o progresso das empresas em direção à sustentabilidade e redução de emissões de carbono. Além disso, o questionário abordou o consumo intensivo de energia, o que é fundamental para identificar as empresas que têm um papel significativo na demanda energética.

Uma seção adicional solicitou detalhes sobre os dados gerais de produção e consumo, como o nome do produto/processo/atividade, sua descrição, unidade funcional ou unidade de referência, e se conhecida, qual a quantidade de madeira no produto final (%). Também foram questionadas a percentagem de produção direcionada para o mercado internacional e informações com relação ao total de faturação.

Foram incluídas questões sobre o total da produção anual, onde era solicitado que fossem listados todos os itens produzidos e vendidos na organização, e o total de compras, onde foi solicitado que fossem listados todos os itens de matérias-primas. Também se adicionou uma secção sobre o processo de fabrico, onde poderiam ser descritas as principais operações realizadas.

Módulo 2 – Emissões da estimativa da Pegada de carbono

Foram solicitadas informações sobre os diferentes combustíveis e suas respectivas quantidades e unidades (Figura-Módulo 2).

As fontes de emissão foram divididas entre Móveis e Estacionárias e também foi possível indicar os Gases Adquiridos. Para facilitar a utilização do usuário no preenchimento, nesta seção foram definidos que os tipos seriam incluídos de forma que fosse intuitivo o autopreenchimento com a listagem prévia dos principais tipos de fontes de emissão para o setor.

A imagem mostra a interface web de emissões de carbono, especificamente a seção "Fontes Móveis". O título principal é "PEGADA DE CARBONO" e o subtítulo é "Emissões de Fontes Móveis e Estacionárias". Abaixo, há uma seção "Fontes Móveis" com uma explicação: "Insira dados anuais para os consumos do veículo ou grupo de veículos. Insira apenas os consumos dos veículos propriedade da empresa ou alugados. Todos os outros usos de veículos, como deslocamentos de funcionários ou viagens de negócios não serão contabilizados nesse pré-diagnóstico.".

Existem cinco campos de entrada para diferentes tipos de combustíveis:

- Eletricidade:** Campo para "Tipo de combustível", "Quantidade" (com exemplo "Ex: 1.500,00") e "Unidade" (com valor "kWh/ano").
- Gás Natural:** Campo para "Tipo de combustível", "Quantidade" (com exemplo "Ex: 1.500,00") e "Unidade" (com valor "Selecione a unidade").
- Gás Propano:** Campo para "Tipo de combustível", "Quantidade" (com exemplo "Ex: 1.500,00") e "Unidade" (com valor "Selecione a unidade").
- Gasóleo:** Campo para "Tipo de combustível", "Quantidade" (com exemplo "Ex: 1.500,00") e "Unidade" (com valor "Selecione a unidade").
- Gasolina:** Campo para "Tipo de combustível", "Quantidade" (com exemplo "Ex: 1.500,00") e "Unidade" (com valor "Selecione a unidade").

Figura - Módulo 2

Módulo 3 - Resíduos de madeira

Neste módulo foram solicitadas informações relacionadas com os resíduos de madeira associados em específico tipo de resíduos (estilha, casca, serrim e madeira serrada), quantidade, unidade, a massa unitária e a possibilidade de indicar a presença de contaminantes. Também foi questionada a utilização de produtos preservadores de madeira, que podiam ser selecionados na listagem com os principais tipos.

A imagem mostra a interface web de resíduos de madeira, especificamente a seção "Resíduos de Madeira". No topo, há uma barra de progresso com quatro etapas: "1 Caracterização da Empresa", "2 Emissões", "3 Resíduos e Produtos de Madeira" (destacada em verde) e "4 Submissão".

O título principal é "RESÍDUOS DE MADEIRA" e o subtítulo é "Resíduos de madeira: Forneça informações relacionadas com os resíduos de madeira associados à organização.".

Existem dois campos de entrada:

- Tabela 7. Resíduos de Madeira:** Campo para "Adicionar".
- São utilizados produtos preservadores de madeira?** Campo para "Selecione a unidade" (com valor "Selecione a unidade").

Na parte inferior, há uma lista de produtos preservadores de madeira:

- ACQ (Quaternário de Cobre Alcalino)
- Boratos
- CA (Azol de Cobre)
- CCA (Cobre, Cromo e Arsénio)

Abaixo da lista, há uma instrução: "(Para selecionar múltiplas respostas mantenha pressionada a tecla CTRL/CMD)".

No rodapé, há dois botões: "Voltar" e "Avançar".

Figura - Módulo 3

Módulo 4 – Submissão

No módulo 4 (Figura-Módulo 4), antes da submissão deveriam ser obrigatoriamente aceitos os termos e condições da política de privacidade e opcionalmente ser autorizada a divulgação da participação da empresa no projeto Decarbwood.

← → ↻ decarbwood.pt/estimativa-da-pegada-de-carbono/ 🔍 ☆ 📄 Confirmar sua identidade ⋮

1 2 3 4
Caracterização da Empresa Emissões Resíduos e Produtos de Madeira Submissão

DISCLAIMER

Os resultados apresentados na caracterização das emissões para as categorias avaliadas são diretamente dependentes dos dados inseridos, os quais são da responsabilidade exclusiva da empresa inquirida. Estes resultados não são certificáveis, não possuem efeito vinculativo e devem ser considerados apenas como uma orientação geral, de modo a possibilitar um pré diagnóstico que auxilie a tomada de medidas em direção à sustentabilidade com fins de descarbonização. Por se tratar de um relatório simplificado, para este pré-diagnóstico não estão consideradas as categorias de refrigeração e ar-condicionado, supressão de incêndio e emissões de âmbito 3.

☐ Aceito os termos e condições da política de privacidade

☐ Autorizo a divulgação da participação da empresa que represento no projeto DECARBWOOD.

Voltar Submeter

Figura - Módulo 4

Procedimentos e entregáveis

Após a análise dos cálculos fornecidos pelo consórcio e testes de implementação pela MGDigital, uma vez que a plataforma de hospedagem no site da AIMMP não permitiu o cálculo automático e apresentação imediata dos resultados na tela, precisou ser criada uma forma alternativa de apresentação de resultados.

Desta maneira, os resultados precisaram ser inicialmente submetidos no site pelo utilizador, e posteriormente, a listagem era extraída pela MGDigital e a realização dos cálculos, confecção do relatório e envio por email feita de forma individual por empresa em conjunto pela equipa do SerQ/INEGI.

Assim, foi também preparado um modelo de relatório pela equipa do SerQ/INEGI com o resumo das informações, que foi validado pela AIMMP/Essência do Ambiente e foi enviado por email para as empresas participantes do projeto (Figura - Relatórios individualizados). O relatório integrar informações totalizando 3 páginas de forma a incluir informações das matérias-primas, produtos finais e resíduos de madeira.

The figure displays three individualized report templates for AIMMP, showing sections for Emissions, Products, and Residues.

RELATÓRIO DA ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE CO₂ (Âmbito 1 e 2)

A partir dos dados inseridos pelo utilizador as emissões estimadas para a empresa totalizam: 8,8 tons CO₂. Na tabela abaixo são apresentadas as respetivas quantidades e a percentagem para cada um dos setores informados.

Setor	Valor	Percentagem na categoria
Setor Móvel	0,0	0,0%
Eleticidade	0	0,0%
Gas Natural	0	0,0%
Gas Propano	0	0,0%
Gasóleo	0	0,0%
Gasolina	0	0,0%
Setor Fixo	8,8	100,0%
Biomassa	0	0,0%
Eleticidade	0	0,0%
Gas Natural	0	0,0%
GPL	0	0,0%
Óleo	0	0,0%
Gasóleo	0	0,0%
Gasolina	0	0,0%
Frígido	0	0,0%
Copos de Plástico	0	0,0%
Gasóleo	0	0,0%
Setor Resíduos	0,0	0,0%
Óxido de Carbono (CO ₂)	0	0,0%
Metano (CH ₄)	0	0,0%
Óxido Nitroso (N ₂ O)	0	0,0%
Perfluorocarbonos (PFCS)	0	0,0%
Hidrofluorocarbonos (HFCs)	0	0,0%
Hexafluoreto de Enxofre (SF ₆)	0	0,0%
Trifluoreto de Nitrogénio (NF ₃)	0	0,0%

Nota: valores em toneladas (t) e kg.

DISCLAIMER: Os resultados apresentados na caracterização das emissões para as categorias atividades são diretamente dependentes dos dados inseridos, os quais são da responsabilidade exclusiva da empresa inserida. Estes resultados não são certificados, não possuem efeito vinculativo e devem ser considerados apenas como uma estimativa geral, de modo a possibilitar um diagnóstico que auxilie a tomada de medidas em direção à sustentabilidade com fins de decarbonização.

Por se tratar de um relatório simplificado, para este pré-diagnóstico não foram consideradas as categorias de refrigeração e ar-condicionado, aquecimento de edifícios e emissões de âmbito 3.

A metodologia seguida para recolha destes dados é semelhante à metodologia que poderá ser seguida para elaboração de uma Declaração Ambiental de Produto (DAP) (através da Norma EN 15804+A2). Deverá ser tido em conta que a estimativa apresentada é relativa à separação e à elaboração de uma DAP e não a contabilização da informação para o produto em questão.

Para a elaboração de uma DAP deverá ser feita a identificação dos produtos para os quais se pretende obter a DAP, as fontes dos sistemas, e para os processos industriais da empresa deve de ser qualificada e quantificada a seguinte informação, relativa a pelo menos um ano de produção:

- Aquisição de matérias-primas;
- Elaboração e saída de matérias-primas, produtos, co-produtos e emissões;
- Distribuição e transporte;
- Produção e uso de combustíveis, eletricidade e calor;
- Uso e manutenção dos produtos;
- Disposição final de produtos e resíduos;
- Recuperação de produtos usados;
- Produção de materiais auxiliares;
- Manutenção e desmantelamento de equipamentos;
- Operações adicionais;

Este processo pode seguir a seguinte ordem de tarefas:

- Passo 1: Recolha de dados (incluindo visitas técnicas às instalações da empresa);
- Passo 2: Estado de Avaliação do Ciclo de Vida;
- Passo 3: Relatório de Avaliação do Ciclo de Vida para obtenção da DAP;
- Passo 4: Verificação por entidade externa;
- Passo 5: Publicação da DAP.

Abaixo são listadas as informações adicionais que foram apresentadas sobre: Produtos Finais, Matérias-Primas e Resíduos de Madeira.

Produtos Finais

Descrição do Produto	Quantidade	Unidade
Não preenchido	Não preenchido	Não preenchido

Matérias-Primas

Descrição da Matéria-Prima	Quantidade	Unidade
Não preenchido	Não preenchido	Não preenchido

Resíduos de Madeira

Tipo de Resíduo	Quantidade	Unidade	Massa Utilizada	Contaminantes
Não preenchido	Não preenchido	Não preenchido	Não preenchido	Não preenchido

As DAPs podem conter informação sobre a quantidade de carbono biogénico "armazenado" nos produtos que saem da fábrica e esta quantidade deve ser declarada separadamente para o produto e para qualquer embalagem que o acompanhe. Esta quantidade pode ser declarada através do indicador "potencial de sequestro global - biogénico" que tem em conta qualquer carbono proveniente de uma fonte de biomassa, como árvores e plantas (por exemplo, madeira). Para medir o carbono biogénico da madeira e dos produtos de madeira, pode seguir-se a norma EN16449. A avaliação da norma EN 15804+A2 exige que todo o ciclo de vida do carbono biogénico seja monitorizado, armazenado assim a compensação dos impactos ambientais de um produto ou serviço de construção e reduzindo o greenwashing.

Nota: 1 kg de carbono biogénico é equivalente a 4412 kg de CO₂.

Figura - Relatórios individualizados

Foram também produzidos pelo SerQ/INEGI como material de apoio, um manual de utilização (Figura - Manual do Utilizador), disponibilizado no site do Decarbwood na página inicial do inquérito (<https://decarbwood.pt/estimativa-da-pegada-de-carbono/>) sendo redirecionado para o link de hospedagem <https://drive.google.com/file/d/1XzzBvL2wFrt1G51HxpCO1-LAi2GSMY9V/view> contendo informações sobre o passo-a-passo do preenchimento.



Figura - Manual do Utilizador

Também foi realizado um webinar de apresentação a 11 de outubro de 2024 (Figura - Webinar de esclarecimento), instruções de preenchimento e retirada de dúvidas, o qual foi gravado e está disponível no site do Decarbwood, podendo ser acedido pelo botão na página principal do inquérito ou através do link <https://decarbwood.pt/webinar-decarbwood-11-outubro/>. Para as dúvidas restantes, também foi realizado pelo SerQ/INEGI suporte às empresas participantes via e-mail e videoconferência quando solicitado.



Figura - Webinar de esclarecimento

A pedido da AIMMP, também foi preparado um relatório técnico contendo os teores de dióxido de carbono retidos por diferentes espécies florestais libertados para a atmosfera em cenário de fim-de-vida (Figura - Carbono madeira), o qual pode ser acedido através do link https://decarbwood.pt/wp-content/uploads/2025/02/RT-SERQ-20250102_AIMMP_signed_assinado_signed.pdf.



Figura - Carbono madeira

Resultados obtidos

Esta seção visa apresentar os resultados alcançados e realizar uma análise sobre as principais informações obtidas principalmente sob o âmbito das emissões de CO₂. As informações descritas combinam análises qualitativas e quantitativas quanto aos dados obtidos variando a profundidade da análise das informações disponibilizadas.

Ressalta-se que dados considerados extremos foram descartados para evitar enviesamentos as demais informações, ainda se cita que a qualidade e veracidade das informações está sempre dependente da lisura e boa-fé das entidades participantes e não era escopo a certificação das informações fornecidas.

CAES Abrangidos e setores

Os dados recolhidos no inquérito mostram que a maioria dos inquiridos se enquadra na atividade de Serração de madeira, que representa 38% do total. Isso indica que a maior parte dos participantes atua no processamento inicial da madeira, transformando toros em produtos serrados como tábuas e vigas. Essa etapa é fundamental para a cadeia produtiva, pois fornece a matéria-prima para outras atividades, sendo complementada, por exemplo, pela Impregnação de madeira (3%), garantindo durabilidade e funcionalidade.

A produção de Painéis de madeira (como partículas, fibras e contraplacados, CAE 16211, 16212 E 16213) representam um total de 3%, com 1% cada.

A Fabricação de obras de carpintaria para a construção aparece como a segunda atividade mais frequente entre as entidades que responderam o inquérito, com 16%, sugerindo que muitos estão voltados para a produção de elementos estruturais e decorativos usados na construção civil. Ainda no setor da construção, a Parqueteria (2%) também aparece no levantamento, indicando que alguns respondentes estão focados em produtos mais especializados, como pisos e revestimentos e trabalhos de carpintaria e de caixilharia, assim como o Comércio por grosso de madeira e produtos derivados (6%), Comércio por grosso de materiais de construção (excepto madeira) e equipamento sanitário (2%), Montagem de trabalhos de carpintaria e de caixilharia (2%), e Fabricação de portas, janelas e elementos similares em metal (1%).

A fabricação de móveis de madeira também tem uma presença relevante entre os respondentes, com a categoria Fabricação de mobiliário de madeira para outros fins representando 6% do total (CAE 31091), Fabricação de mobiliário de madeira para outros fins (CAE 31004, 1%), Fabricação de mobiliário para escritório e comércio (2%), e a Fabricação de mobiliário de cozinha (1%).

Outras atividades também se destacam entre os respondentes, como a Fabricação de embalagens de madeira (7%), Fabricação de caixões mortuários em madeira (3%) e a Fabricação de outras obras de madeira (3%), Comércio a retalho de artigos em segunda mão, em estabelecimentos especializados (1%), Combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, não derivados do petróleo (1%). Essas atividades demonstram a diversidade de nichos atendidos pelos participantes do inquérito e indicam que alguns respondentes atuam em setores mais específicos, como funerárias, serviços de embalagem, montagem e outros.

Se observa no gráfico da Figura seguinte que o setor da Serração e impregnação atingiu 41% das respostas, seguido do setor da construção com 29%, Diversos com 16%, Mobiliário com 11% e Painéis com 3%

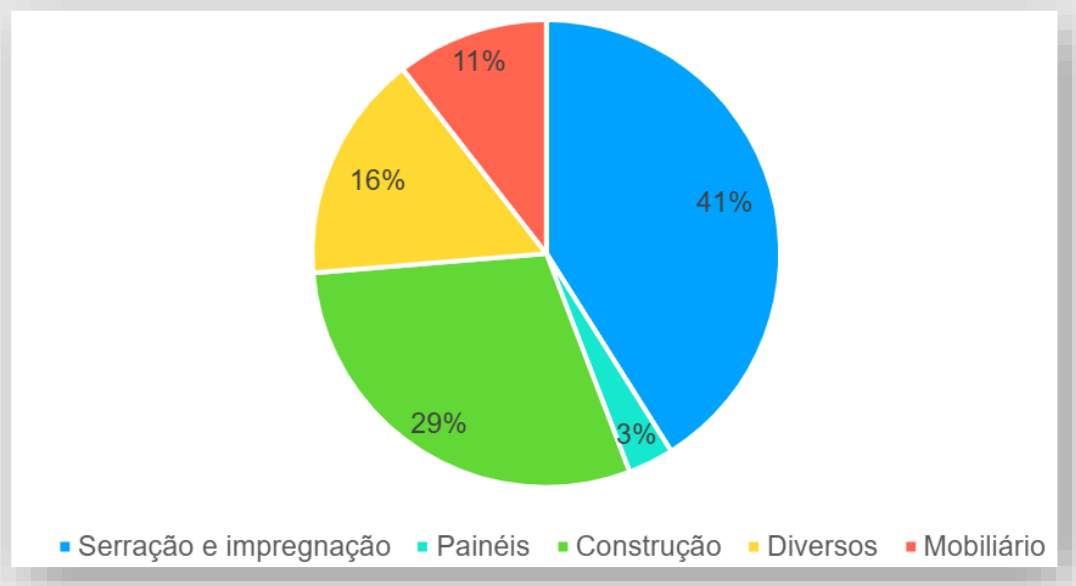


Figura - Webinar de esclarecimento

No geral, o levantamento reflete um perfil diversificado de entidades, com atividades que vão desde o processamento básico até a produção de produtos acabados e sua comercialização. A Tabela seguinte sumariza as entidades que responderam ao inquérito.

CAES	%
16101 - Serração de madeira Principal	38%
16102 - Impregnação de madeira Acessória	3%
16211 - Fabricação de painéis de partículas de madeira Acessória	1%
16212 - Fabricação de painéis de fibras de madeira Acessória	1%
16213 - Fabricação de folheados, contraplacados, lamelados e de outros painéis	1%
16220 - Parqueteria Acessória	2%
16230 - Fabricação de outras obras de carpintaria para a construção Acessória	16%
16240 - Fabricação de embalagens de madeira Acessória	7%
32995 - Fabricação de caixões mortuários em madeira	3%
16291 - Fabricação de outras obras de madeira	3%
25120 - Fabricação de portas, janelas e elementos similares em metal	1%
31004 - Fabricação de mobiliário de madeira para outros fins	1%
31010 - Fabricação de mobiliário para escritório e comércio	2%
31020 - Fabricação de mobiliário de cozinha	1%
43320 - Montagem de trabalhos de carpintaria e de caixilharia	2%
46731 - Comércio por grosso de madeira em bruto e de produtos derivados	6%
46732 - Comércio por grosso de materiais de construção (excepto madeira) e equipamento sanitário	2%
31091 - Fabricação de mobiliário de madeira para outros fins	6%
47790 - Comércio a retalho de artigos em segunda mão, em estabelecimentos especializados	1%
46712 - Combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, não derivados do petróleo	1%

Tabela – Lista de CAE's

Perfil dos colaboradores

O setor da madeira apresenta uma estrutura diversificada, com forte presença de pequenas e médias empresas, o que é evidenciado pelo número de funcionários (Figura - Número de Funcionários) nas organizações analisadas. A maioria das empresas (70,53%) possui até 50 funcionários, enquanto apenas 3% empregam mais de 200 pessoas. Isso sugere que o setor é dominado por unidades produtivas de menor escala, muitas vezes voltadas para a transformação da madeira e fabricação de produtos derivados, como painéis, embalagens e mobiliário.

Esse perfil reflete tendências globais observadas em estudos sobre a indústria madeireira, onde a descentralização produtiva e a especialização de nicho são fatores estratégicos para a competitividade. Foi informado também um total de 383 trabalhadores licenciados ou mestrados e 23 doutorados.

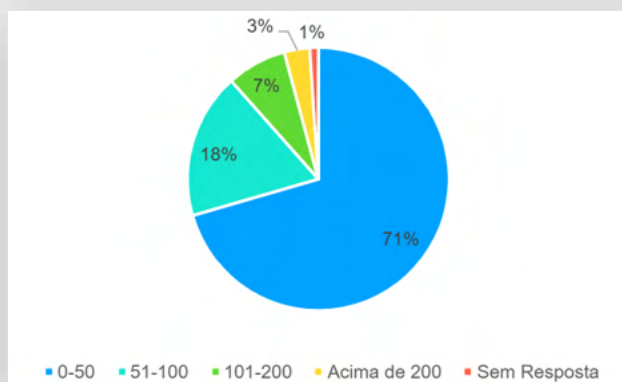


Figura - Número de Funcionários

Em relação à organização produtiva, os dados indicam que a maior parte das empresas (77%) opera em um único turno, enquanto 11% utilizam três turnos e 4% trabalham em dois turnos (Figura - Número de turnos). Isso sugere que, para muitas dessas empresas, a demanda e a capacidade instalada ainda permitem um modelo de funcionamento convencional, sem a necessidade de operações contínuas. No entanto, a existência de turnos múltiplos pode indicar setores com maior exigência produtiva ou mercados com prazos de entrega mais rigorosos.

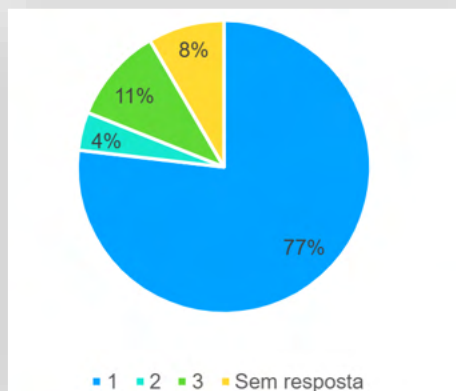


Figura - Número de turnos

Certificações

As certificações (Tabela – Lista de Certificações e número de observações) desempenham um papel crucial na indústria madeireira, garantindo padrões de qualidade, sustentabilidade e segurança em diversas etapas da cadeia produtiva.

Certificações	Número
FSC (Forest Stewardship Council)	39
ISO 9001 (Sistema de Gestão da Qualidade)	29
Certificação de Cadeia de Custódia (Chain of Custody Certification)	12
PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification)	28
ISO 14001 (Sistema de Gestão Ambiental)	5
OHSAS 18001 - Sistemas de Gestão da Saúde e Segurança Ocupacional	2
ISO 45001 (Sistema de Gestão da Segurança e Saúde Ocupacional)	2
ISO 28000 - Security and resilience	1

Tabela – Lista de Certificações e número de observações

A certificação mais presente é a FSC (*Forest Stewardship Council*), com 39 empresas certificadas (Figura – Certificações). Esse selo garante que a madeira utilizada provém de florestas manejadas de forma sustentável, considerando aspectos ambientais, sociais e econômicos. A sua adoção reflete um compromisso crescente com a sustentabilidade, especialmente em mercados que valorizam práticas responsáveis na extração de matéria-prima.

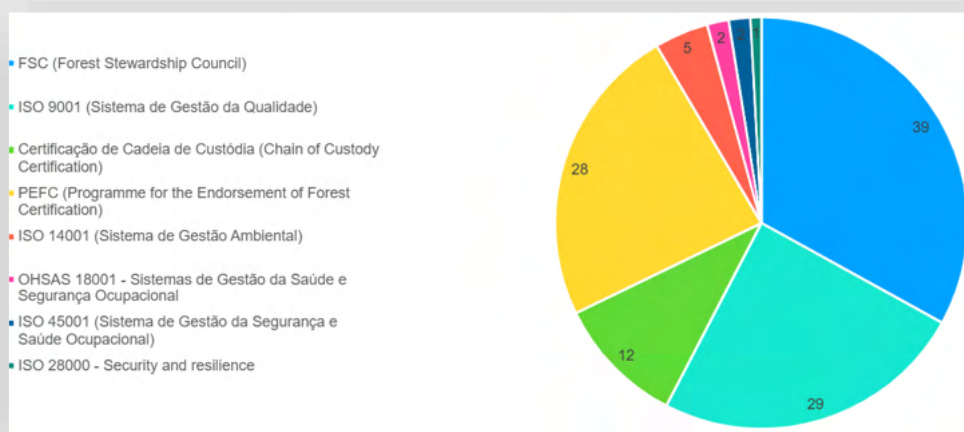


Figura – Certificações

A certificação ISO 9001, presente em 29 empresas, evidencia a busca por um Sistema de Gestão da Qualidade estruturado, garantindo padronização de processos e melhoria contínua na produção. Associada a essa certificação, encontra-se a Certificação de Cadeia de Custódia (*Chain of Custody Certification*), adotada por 12 empresas, que assegura a rastreabilidade da madeira desde a floresta até ao consumidor final, um requisito essencial para atender a regulamentações internacionais e aceder a mercados mais exigentes. Além disso, 28 empresas possuem a certificação PEFC (*Programme for the Endorsement of Forest Certification*), que também atesta a origem sustentável da madeira e é reconhecida como alternativa ao FSC em diversas regiões.

No que se refere à gestão ambiental e segurança ocupacional, a certificação ISO 14001 é adotada por 5 empresas, indicando a implementação de práticas voltadas à redução de impactos ambientais e conformidade com regulamentações ecológicas.

No campo da segurança e saúde ocupacional, há um número reduzido de certificações: OHSAS 18001 e ISO 45001, cada uma presente em 2 empresas, demonstram um nível ainda inicial de adoção desses padrões no setor. A certificação ISO 28000 – *Security and Resilience*, que trata da segurança na cadeia de suprimentos, é a menos frequente, sendo adotada por apenas 1 empresa, o que pode ser explicado pela sua maior aplicabilidade em setores logísticos e industriais mais complexos.

A tendência global aponta para um aumento na exigência dessas certificações, especialmente à medida que regulamentos ambientais e de segurança se tornam mais rigorosos e a procura por produtos certificados cresce no mercado internacional.

Exportação e Mercado Internacional

Observa-se que 21 empresas operam exclusivamente no mercado nacional, sem destinar parte de sua produção para exportação (Figura - Percentagem de produção direcionada para o mercado internacional). Um grupo significativo (10 empresas) direciona até 10% da produção para o exterior, enquanto 11 empresas exportam entre 11% e 50%.



Figura - Percentagem de produção direcionada para o mercado internacional

O número de empresas que têm uma forte dependência do mercado internacional é mais reduzido: apenas 6 empresas direcionam entre 51% e 80% da sua produção para fora, enquanto 22 empresas exportam mais de 80% da sua produção, demonstrando uma orientação fortemente internacionalizada. No entanto, há um número expressivo de 25 empresas que não responderam, o que pode indicar falta de dados estruturados.

Faturação Média

A distribuição da faturação das empresas (Figura - Distribuição da faturação das empresas) mostra uma grande variação, desde pequenas empresas até grandes grupos. 6 empresas faturam até 250.000 €, indicando um perfil de pequeno negócio. Já 16 empresas situam-se na faixa de 250.001 €

a 1.000.000 €, enquanto o maior grupo, com 22 empresas, tem faturação entre 1.000.001 € e 3.000.000 €. Seguido por 21 empresas que apresentam faturação entre 3.000.001 € e 10.000.000 €, sugerindo que há um número significativo de empresas com operações bem estabelecidas. No topo da cadeia, 9 empresas superam 10 milhões de euros em faturação, indicando um grupo restrito, mas relevante, de grandes players do setor.

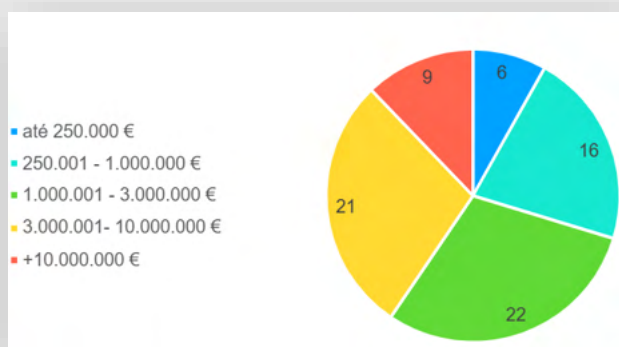


Figura - Distribuição da faturação das empresas

Esses dados evidenciam um setor diversificado, onde algumas empresas possuem um forte foco na exportação, enquanto outras atuam maioritariamente no mercado interno. A distribuição da faturação sugere que a maioria das empresas são de pequeno e médio porte, com uma presença significativa de empresas de faturação média-alta e um número mais reduzido de grandes indústrias.

Caracterização Energética

Relativamente à caracterização energética (Figura - Caracterização energética), aproximadamente metade (49%) das entidades que responderam ao inquérito indicaram serem consumidoras intensivas de energia, porém apenas 13% apresentam metas específicas para a descarbonização e 7% possuem um plano integrado para alcançar a neutralidade carbónica.



Figura - Caracterização energética

Do total de empresas, apenas 24% apresenta contrato de fornecimento de eletricidade a partir de fontes de energia renovável. No entanto, 59% já apresentam painéis fotovoltaicos nas instalações e 36% possuem sistemas de monitorização em tempo real ou gestão energética implementados.

Medidas de Eficiência Energética

Quando questionadas sobre as medidas de eficiência energética implementadas (Figura 25) em suas indústrias, as entidades apresentaram respostas variadas, desde descrições detalhadas com KPIs associados até breves menções. A seguir, são destacadas as medidas mais referidas nos questionários, embora isso não signifique que todas tenham o mesmo impacto na redução do consumo de energia ou na descarbonização das atividades.

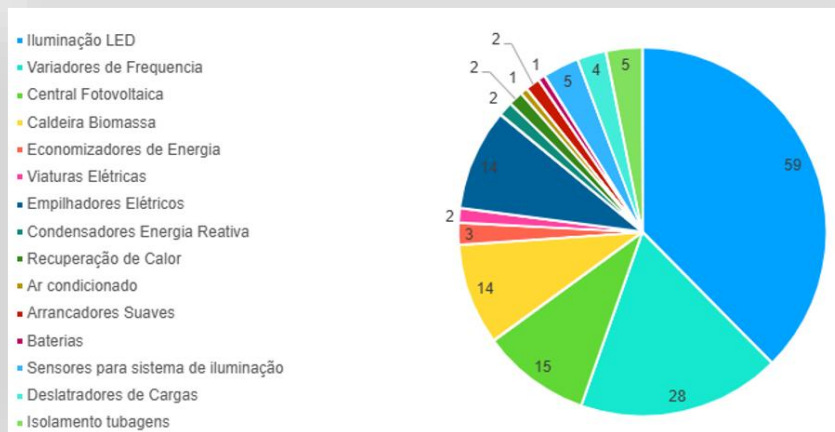


Figura - Medidas de eficiência energética

- Iluminação LED:** A tecnologia LED tem sido amplamente adotada, representando a medida mais citada. Luminárias LED consomem significativamente menos energia do que lâmpadas incandescentes e fluorescentes, além de terem uma vida útil mais longa. Na indústria da madeira, onde pavilhões e áreas de armazenamento precisam de iluminação constante, essa solução contribui para reduzir custos operacionais e melhorar a segurança no ambiente de trabalho.
- Variadores de Frequência:** Os variadores de frequência permitem otimizar o consumo energético em motores elétricos ao ajustar sua velocidade de operação conforme a necessidade real. Na indústria da madeira, são frequentemente aplicados em serrarias e sistemas de ventilação, ajudando a reduzir desperdícios de energia e prolongando a vida útil dos equipamentos.
- Centrais Fotovoltaicas:** A geração de energia solar por meio de painéis fotovoltaicos permite que as empresas reduzam sua dependência da rede elétrica e aproveitem fontes renováveis. Como a indústria da madeira geralmente possui grandes áreas ao ar livre, muitas empresas instalam esses sistemas em telhados ou terrenos adjacentes, diminuindo os custos energéticos a longo prazo.
- Caldeira a Biomassa:** A biomassa, muitas vezes proveniente de resíduos de madeira da própria indústria, pode ser utilizada como fonte de energia térmica em caldeiras. Essa energia térmica gerada pode ser utilizada para secagem de madeira, calefação e outros processos produtivos.
- Economizadores de Energia:** Dispositivos economizadores ajudam a reduzir picos de consumo e otimizar a eficiência energética geral das instalações. Na indústria da madeira,

podem ser aplicados em circuitos elétricos e sistemas de climatização, proporcionando um uso mais eficiente da energia elétrica.

- **Viaturas Elétricas:** Embora ainda pouco implementadas no setor, as viaturas elétricas podem reduzir a pegada de carbono no transporte interno de mercadorias e funcionários. Empresas que operam grandes frotas para distribuição de madeira e derivados podem beneficiar-se dessa solução, especialmente em combinação com energia renovável própria.
- **Empilhadores Elétricos:** Empilhadores elétricos substituem os modelos a combustão, reduzindo emissões e ruído em armazéns e fábricas. Na indústria da madeira, essas máquinas são essenciais para movimentação de matéria-prima e produtos acabados, promovendo eficiência e sustentabilidade.
- **Arrancadores Suaves:** Arrancadores suaves controlam o início da operação de motores elétricos, evitando picos de corrente e reduzindo o desgaste mecânico. Em serrarias e outras operações que utilizam motores potentes, essa tecnologia melhora a eficiência energética e reduz custos de manutenção.
- **Sensores para Sistemas de Iluminação:** Sensores de presença e luminosidade ajudam a otimizar o uso da iluminação artificial, reduzindo o consumo desnecessário de energia. Na indústria da madeira, podem ser implementados em escritórios, áreas de armazenamento e até mesmo em setores produtivos, garantindo que a luz esteja ativada apenas quando necessário.
- **Deslastradores de Cargas:** Essa tecnologia permite identificar e eliminar cargas elétricas fantasmas ou ineficientes, otimizando o uso da energia. Em indústrias que operam com múltiplas máquinas e sistemas elétricos, essa solução pode resultar em uma redução considerável no consumo energético.
- **Isolamento de Tubagens:** O isolamento térmico das tubagens contribui para minimizar perdas energéticas em sistemas de aquecimento e transporte de fluidos térmicos. Na indústria da madeira, onde o vapor e a água quente são usados para secagem e processamento, essa medida melhora a eficiência e reduz custos operacionais.

Uso da Energia

Foram reportados pelas empresas dados quantitativos aos consumos dos vetores Eletricidade, Gás Natural, Gás Propano, Gasóleo, Gasolina, Biomassa, Dióxido de Carbono (CO₂) e Óxido Nitroso (N₂O). A Tabela - Vetores energia – Total apresenta as quantidades totais obtidas para cada vetor no estudo.

Vetor		
Eletricidade	31309872	kWh
Biomassa	204241551	kWh
Gasóleo	3032700459	kWh
Gasolina	273113	kWh
Gás Natural	1150726684	kWh
Gás Propano	17446	kWh
Dióxido de Carbono (CO ₂)	432	Ton
Óxido Nitroso (N ₂ O)	0,4	Ton/ano

Tabela - Vetores energia - Total

O consumo de eletricidade (31309872 kWh) é significativo, mas, considerando a natureza industrial do setor da madeira, é esperado que esse vetor energético tenha um peso relevante. A eletricidade provavelmente é utilizada principalmente para acionamento de máquinas, iluminação, ventilação e outros processos fabris.

A biomassa (204241551 kWh) aparece como uma importante fonte de energia, com um consumo elevado. Isso pode indicar que muitas empresas estão aproveitando resíduos da própria indústria madeireira (serragem, aparas, etc.) para gerar energia térmica. Esse uso é positivo do ponto de vista de sustentabilidade e economia circular, pois reduz a dependência de combustíveis fósseis e reaproveita subprodutos.

Gasóleo (3032700459 kWh) é o maior consumo entre todos os vetores energéticos, o que sugere uma grande dependência de combustíveis fósseis, provavelmente utilizados para transporte, geração de calor em processos industriais ou mesmo em maquinários específicos. A alta demanda por gasóleo pode ser um ponto crítico na análise de emissões de CO₂ e na busca por alternativas mais sustentáveis.

O consumo de gasolina (273113 kWh) é bastante reduzido comparado ao gasóleo, o que indica um uso muito menor desse combustível, provavelmente restrito a veículos leves e transporte de pequeno porte.

O consumo de gás natural (1150726684 kWh) é bastante elevado, sugerindo que é utilizado como fonte de energia para processos industriais específicos, como aquecimento, secagem de madeira e geração de eletricidade. Embora seja um combustível fóssil, é considerado menos poluente que o gasóleo e a gasolina. O uso de gás propano (17.446 kWh) é muito reduzido comparado aos outros vetores energéticos.

As emissões reportadas de Dióxido de Carbono (432 Ton) e Óxido Nitroso (0,4 Ton/ano) indicam que o setor ainda apresenta uma pegada de carbono relevante. O Dióxido de Carbono (CO₂) é o principal gás de efeito estufa emitido. O Óxido Nitroso (N₂O) é menos significativo em quantidade, mas possui um potencial de aquecimento global muito mais elevado que o CO₂, o que exige atenção em processos industriais que possam gerá-lo.

A alta dependência de combustíveis fósseis (principalmente gasóleo e gás natural) é uma preocupação ambiental que exige estratégias de mitigação. O uso intensivo de biomassa é um ponto positivo, especialmente se for proveniente de resíduos industriais, contribuindo para práticas sustentáveis. A eletricidade possui um consumo considerável, sendo importante um balanço detalhado sobre a origem dessa energia (renovável vs. não renovável).

As emissões relatadas indicam a necessidade de implementação de medidas adicionais de descarbonização.

Resíduos

Em análise técnica. Informação disponibilizada brevemente.

_Considerações gerais

A análise realizada proporcionou uma visão abrangente do setor da madeira, destacando aspectos fundamentais relacionados às atividades produtivas, perfil dos colaboradores, certificações, mercado de exportação, faturação e eficiência energética.

Predominância de Pequenas e Médias Empresas: O setor é composto majoritariamente por pequenas e médias empresas com até 50 funcionários (70,53%), evidenciando um perfil de unidades produtivas menores focadas em nichos específicos. A serração de madeira é a atividade principal (38%), seguida por setores voltados para construção (29%) e fabricação de mobiliário (11%), demonstrando uma cadeia produtiva diversificada e especializada.

Certificações e Sustentabilidade: A adoção de certificações como FSC e PEFC, presentes em 39 e 28 empresas, respectivamente, indica um compromisso crescente com a sustentabilidade e rastreabilidade da cadeia produtiva. Contudo, a baixa adoção de certificações voltadas para segurança e saúde ocupacional, como ISO 45001 e OHSAS 18001, destaca uma área que requer atenção e aprimoramento.

Orientação para o Mercado Internacional: Uma parte significativa das empresas exporta uma fração considerável de sua produção, especialmente aquelas que destinam mais de 80% dos seus produtos ao mercado externo. Entretanto, ainda existem 21 empresas que atuam exclusivamente no mercado nacional, indicando potencial oportunidade de expansão para mercados internacionais.

Eficiência Energética e Uso de Energia: A caracterização energética revelou que, embora 49% das empresas sejam consumidoras intensivas de energia, poucas possuem metas específicas para descarbonização (13%) ou planos integrados para alcançar a neutralidade carbônica (7%). Iniciativas como a instalação de painéis fotovoltaicos (59%) e sistemas de monitorização energética (36%) demonstram esforços importantes para o uso de energia renovável e aumento da eficiência energética.

Adoção de Tecnologias para Eficiência Energética: Tecnologias como Iluminação LED, variadores de frequência e caldeiras a biomassa vêm sendo implementadas como soluções práticas e economicamente viáveis para reduzir o impacto ambiental. Entretanto, o uso de práticas mais avançadas, como viaturas elétricas e empilhadores elétricos, ainda é limitado e requer maior incentivo para se tornar mais comum no setor.

Dificuldades na Recolha de Dados Energéticos: Embora o questionário tenha sido elaborado para facilitar o preenchimento, especialmente com a possibilidade de múltiplas unidades de medição (kWh/ano e m³/ano para gás natural), as empresas demonstraram dificuldades em fornecer informações completas e organizadas. Essa limitação sugere a necessidade de melhorias no controle e análise interna dos dados.

De maneira geral, o setor da madeira mostra-se diversificado e consolidado em algumas áreas, mas enfrenta desafios relacionados à ampliação do controle de dados, matérias-primas, consumos, e certificações voltadas para saúde e segurança, planejamento energético estruturado e práticas sustentáveis.

ANÁLISE ESTRATÉGICA PARA DEFINIÇÃO DO ROTEIRO

III SUMÁRIO EXECUTIVO

A fileira da madeira e do imobiliário é cada vez mais influenciada por fatores externos, com origem em dinâmicas globais de rápida transformação. Para compreender este contexto, recorreu-se à análise **PESTAL**, uma ferramenta que examina os principais fatores Políticos, Económicos, Sociais, Tecnológicos, Ambientais e Legais que influenciam um setor. Esta análise permitiu identificar pressões estratégicas relevantes, como a digitalização, a descarbonização, a escassez de mão de obra, o reforço da regulamentação ambiental e a mudança nos padrões de consumo, com uma procura crescente por soluções em madeira mais sustentável.

Complementarmente, foi construída uma **matriz de incertezas**, instrumento que permite mapear os eixos de imprevisibilidade mais relevantes para o setor. Ao cruzar o grau de impacto com o nível de incerteza, esta matriz ajuda a antecipar desafios e oportunidades futuras que podem condicionar o desenvolvimento da indústria.

Com base neste enquadramento, foram ainda identificadas **tendências** – movimentos emergentes com impacto a médio prazo – e **megatendências**, que correspondem a transformações estruturais, globais e de longo prazo. Entre as mais relevantes para o setor destacam-se a crise climática, o aumento da eficiência energética e dos processos produtivos, a eletrificação e a transição para uma economia circular. Estas forças de mudança estão a reconfigurar o futuro da fileira da madeira, exigindo capacidade de adaptação, inovação e visão estratégica por parte dos seus principais atores. No que diz respeito ao roteiro de descarbonização do setor da madeira, o primeiro passo consistiu na identificação das metas de neutralidade carbónica, com base nos objetivos definidos pelos roteiros nacionais de descarbonização. Em seguida, foram analisados os vetores energéticos e as tecnologias com maior potencial para apoiar a transição energética do setor, tendo em conta critérios de viabilidade técnica, económica e ambiental.

Para apoiar a tomada de decisão estratégica, foi desenvolvido um modelo energético utilizando a ferramenta OSeMOSYS, que permitiu simular e avaliar cinco cenários distintos de evolução do setor: (i) um cenário business-as-usual (BAU), sem alterações face às políticas atuais; (ii) um cenário com restrições de emissões de gases com efeito de estufa; (iii) um cenário baseado exclusivamente na aplicação de taxas de carbono; (iv) um cenário híbrido, que combina restrições de emissões com a aplicação de taxas; e (v) um cenário orientado para a eletrificação progressiva dos consumos energéticos.

Através da análise comparativa entre os diferentes cenários, foi possível avaliar o desempenho de cada um em termos de custos totais do sistema, emissões associadas, vetores energéticos predominantes e tecnologias mais adequadas em cada contexto. Esta abordagem permitiu identificar os *trade-offs* entre diferentes opções de política e traçar possíveis caminhos de descarbonização para a fileira da madeira, alinhados com os objetivos nacionais e as tendências globais de sustentabilidade.

III ANÁLISE DE MERCADO

A realização de uma **análise de mercado** aprofundada da fileira da madeira e do setor imobiliário permite compreender os fatores que influenciam a sua evolução e competitividade e de que forma os seus agentes se podem posicionar para progredir. Através da ferramenta **PESTAL**, é possível identificar as forças externas – políticas, económicas, sociais, tecnológicas, ambientais e legais – que afetam o desempenho do setor, permitindo uma leitura sistémica do ambiente envolvente. A **matriz de incertezas** complementa esta abordagem ao destacar os eixos de maior imprevisibilidade, essenciais para antecipar cenários e orientar decisões estratégicas mais resilientes. Por fim, a **análise de tendências e megatendências** permite reconhecer movimentos estruturais de médio e longo prazo, como a transição climática, a digitalização e a procura por madeira sustentável, que irão moldar o futuro da fileira. Em conjunto, estas ferramentas oferecem um enquadramento estratégico robusto para apoiar empresas, investidores e decisores políticos na definição de prioridades e caminhos de adaptação.

Pestal

A análise **PESTAL** é uma ferramenta usada para avaliar fatores externos que influenciam uma organização ou indústria. A análise das suas seis dimensões permite que as organizações consigam perceber em que contexto se inserem de forma a identificarem potenciais riscos ou oportunidades e tomarem decisões mais fundamentadas e informadas. A seguir, apresenta-se um esquema-resumo com os principais fatores de cada dimensão, que serão detalhados posteriormente.



Política

No setor da madeira, destacam-se os seguintes fatores políticos como os mais prováveis de exercer impacto significativo:

- **Apoio Governamental:** O governo desenvolveu o Plano de Intervenção para a Floresta 2025-2050, através de Resolução do Conselho de Ministros n.º 130-B/2024. O Plano representa uma oportunidade significativa para a indústria da madeira em Portugal, promovendo uma gestão florestal mais eficiente, sustentável e resiliente. As medidas propostas visam assegurar um fornecimento contínuo e sustentável de matéria-prima, enquanto fortalecem a competitividade e a inovação no setor ("Floresta 2050 FUTURO+VERDE PLANO DE INTERVENÇÃO PARA A FLORESTA 2025-2050", s.d.; República Portuguesa 2025);
- **Políticas Florestais internacionais:** A legislação da União Europeia (UE) influencia diretamente o setor, promovendo práticas de gestão florestal sustentável, entre as diversas medidas, destacam-se:
 - Estratégia Florestal da UE para 2030: Inserida no Pacto Ecológico Europeu, a Estratégia define ações para aumentar e melhorar as florestas da UE, reforçando a sua proteção, restauração e resiliência face às alterações climáticas (Comissão Europeia, s.d.);
 - FLEGT (Forest Law Enforcement, Governance and Trade): Este plano é relativo à aplicação da legislação, à governação e ao comércio no setor florestal, define um conjunto de medidas destinadas a excluir a entrada de madeira ilegal no mercado europeu, melhorar o fornecimento de madeira extraída legalmente, e aumentar a procura de produtos de madeira de extração responsável (EFI, s.d.).
- **Falta de licenciamento:** Segundo Vítor Poças, presidente da AIMMP (Lusa 2021a), parte das empresas no setor da madeira operam sem licenciamento, o que pode trazer consequências negativas para a indústria, como a perda de credibilidade e obstáculos ao crescimento e à inovação. Para combater este fenómeno, o presidente da AIMMP sugere a promoção de parcerias entre o governo e as câmaras municipais, com vista a facilitar o licenciamento das empresas (Lusa 2021b).

Económica

Relativamente aos fatores económicos, destacam-se os seguintes:

- **Exportações Relevantes:** O setor da madeira tem uma presença significativa nas exportações portuguesas, destacando-se mercados estratégicos como França e Espanha. Em 2022, as exportações de madeira e mobiliário atingiram um valor recorde de 3029 milhões, um aumento de 17% face a 2021 (AIMMP, s.d.), e um aumento de 10% em 2023 face ao ano anterior (Lusa 2023a)(AIMMP 2023). Em 2024 a tendência alterou-se, tendo existido uma queda nas exportações de 4% face a 2023 (Lusa 2025);
- **Crescimento da indústria:** De uma forma geral, a indústria da madeira e mobiliário em Portugal continua a crescer, com expansão da presença em mercados internacionais (Nuno Braga 2025), e com uma previsão de crescimento moderado da indústria até 2028 (Reporter Linker, s.d.);
- **Custo e Falta de Mão de Obra:** A baixa atratividade das profissões associadas ao setor, a falta de formação profissional especializada e a competição com outros setores pela mesma mão de obra traz limitações ao setor da Madeira. Além disso, essa escassez de mão-de-obra,

leva a um natural aumento dos custos associados com recursos humanos, que levam também a um aumento dos custos de produção (Vitor Poças 2024);

- **Dificuldade de financiamento:** A baixa dimensão de grande parte das empresas leva a uma maior dificuldade na obtenção de financiamento bancário. Por outro lado, a falta de licenciamento, descrita nos fatores Políticos, leva à dificuldade em obter financiamento comunitário ou público nos seus projetos (Lusa 2021b);
- **Dependência do setor da madeira face à construção civil e ao mercado imobiliário:** O setor da madeira está fortemente condicionado pela evolução da construção civil e do mercado imobiliário, dada a elevada utilização de madeira nestes domínios. Por isso, ciclos de crescimento ou crise nestes setores refletem-se diretamente na procura por produtos de madeira, tornando o setor particularmente vulnerável às suas flutuações económicas e conjunturais (AIMMP 2022);
- **Desafios na Adoção de Novas Tecnologias:** As pequenas empresas enfrentam dificuldades em investir em inovação tecnológica e em maior eficiência energética e dos processos produtivos. Há um reduzido investimento na proteção da Propriedade Intelectual e do desenvolvimento o que pode indicar um ambiente tecnológico pouco dinâmico ou pouco acessível (AIMMP 2022).

Social

No que toca aos fatores sociais com impacto significativo no setor, destacam-se os seguintes:

- **Crescente Consciência Ambiental:** Os consumidores finais estão cada vez mais atentos à sustentabilidade, favorecendo os produtos de madeira certificada e forçando as empresas a tomarem medidas para se posicionarem de acordo com essa exigência. Nesse sentido, têm sido desenvolvidos alguns sistemas de certificação florestal que incentivam o uso de madeira sustentável, como por exemplo o FSC e o PEFC:
 - **O PEFC (*Programme for the Endorsement of Forest Certification*):** é um sistema internacional de certificação florestal que promove a gestão sustentável das florestas. Para além disso, atua em projetos com o objetivo de incentivar o uso de madeira mais sustentável de forma a aumentar a área florestal certificada (PEFC 2023c);
 - **O FSC (*Forest Stewardship Council*)** é uma organização internacional sem fins lucrativos que também fornece certificação florestal, mas de maior rigor, dedicada à promoção de uma gestão florestal ambientalmente responsável, socialmente justa e economicamente viável (FSC, s.d.). Por exemplo, um estudo de 2018 da APFC (Associação de Produtores Florestais do Concelho de Coruche) concluiu que a madeira certificada de eucalipto e pinho para a indústria de pasta e papel tem um prémio médio de +4 €/m³ comparativamente à madeira não certificada (APFEC 2018).
- **Tendências demográfica e falta de mão de obra:** Na
-
- **Figura - Número de pessoal ao serviço por atividade económica, relativo ao ano de 2023(Pinhão 2025)** apresenta-se o número de pessoal ao serviço por atividade económica, observando-se que a categoria "Fabricação de outras obras de carpintaria para a construção" representa a maior proporção de pessoal ao serviço, correspondendo a cerca de 60% do setor em análise. Sendo este um setor predominante e em expansão, é plausível que esteja a absorver grande parte da mão de obra disponível, o que pode estar a gerar pressão sobre as

restantes atividades do setor – ou seja, um aumento da procura sem um correspondente aumento da oferta de trabalhadores. Do lado da oferta, verifica-se uma escassez generalizada de mão de obra, agravada pelo envelhecimento da população ativa e pelo êxodo rural, fatores que acentuam ainda mais as dificuldades de recrutamento associadas ao setor (AIMMP 2022) (AIMMP, s.d.);



Figura - Número de pessoal ao serviço por atividade económica, relativo ao ano de 2023

- **Potencial para resolver a crise de habitação:** A madeira pode contribuir para a crise de habitação em Portugal, ao permitir construções mais rápidas, leves e acessíveis, graças à sua capacidade de pré-fabricação e montagem eficiente. A industrialização do processo reduz custos, tempo e falhas humanas, viabilizando habitação modular e económica (Pinhão 2025; Sales J. 2025; Kozowood);
- **“Fast Furniture”:** Este termo refere-se à criação de mobiliário de forma fácil e “rápida”, produzido em massa e barato, mas com baixa longevidade. Esta tendência pode contrariar a tendência de mobiliário sustentável e pode ser uma ameaça para as metas quer nacionais quer europeias no setor da madeira por captarem o consumidor com o baixo preço e facilidade de obtenção, mas caracterizada pela baixa durabilidade (Russell, Huff e Haviarova 2023).

Tecnológica

Relativamente aos fatores tecnológicos com maior probabilidade de exercer impacto significativo no setor da Madeira, destacam-se os seguintes:

- **Inovação em Processamento de Madeira:** Novas tecnologias conseguem por vezes um melhor aproveitamento da matéria-prima e obtenção de produtos com maior valor acrescentado. Nessa vertente, destaca-se por exemplo, o uso de tecnologias emergentes na gestão florestal como: drones; inteligência artificial ou sistemas de automação, permitindo um controlo mais preciso das florestas. Ao mesmo tempo que otimizam os processos produtivos, estas tecnologias permitem reduzir o consumo energético e contribuem para a diminuição das emissões de CO₂. O uso do *Building Information Modeling* (BIM) reforça esta transformação, promovendo uma maior eficiência e integração entre as várias fases do ciclo de vida dos produtos de madeira. Neste contexto, a transição para a Indústria 5.0 surge como um passo natural, ao colocar o ser humano e a sustentabilidade no centro da inovação

tecnológica. Para além disso, as rotas de transporte estão a começar a ser otimizadas através do uso machine learning diminuindo consumos e emissões através da maior eficiência nos processos. Esta evolução implica maiores custos de investimento inicial e também uma mudança nos perfis profissionais exigidos, obrigando a uma reestruturação da procura no mercado de trabalho (Jornal oficial da Comissão Europeia 2023);

- **Digitalização da Cadeia de Valor:** A transformação digital está a redefinir profundamente a cadeia de valor da madeira, desde a gestão florestal até à fase final da construção. Esta evolução assenta na integração de tecnologias como sensores inteligentes e softwares avançados, permitindo uma análise mais precisa de dados ao longo de todas as etapas do processo produtivo. O objetivo é otimizar recursos, aumentar a eficiência e melhorar a tomada de decisões. No entanto, embora promissora, esta transição tecnológica pode representar desafios significativos em termos de gestão e adaptação por parte das empresas do setor (Scholz et al. 2018);
- **Avanços tecnológicos:** As bombas de calor representam um avanço tecnológico importante para a indústria da madeira, ao oferecerem uma alternativa mais eficiente e sustentável face às tradicionais caldeiras a biomassa ou gás. Permitem alcançar temperaturas compatíveis com os processos de secagem e tratamento térmico, com menores consumos energéticos e emissões, contribuindo para a descarbonização do setor e a modernização das unidades fabris. Nas indústrias de MDF (*Medium-Density Fiberboard* – painel de fibras de média densidade), OSB (*Oriented Strand Board* – painel de tiras de madeira orientadas) e aglomerados, a prensagem contínua foi o principal salto tecnológico, reduzindo custos e otimizando processos. Já nas áreas de carpintaria e mobiliário, os elevados custos laborais aceleraram a adoção de tecnologias assistidas por computador (CAD/CAM – *Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing*), com foco no acabamento e montagem – etapas de maior valor agregado (CEIS-Bois, Belgian Woodforum e Gunilla Beyer 2011).

Ambiental

Entre os fatores ambientais que se perspetiva que tenham maior impacto no setor da madeira, destacam-se:

- **Impacto das alterações climáticas:** Incêndios florestais e pragas afetam gravemente a produção de madeira e a saúde das florestas, originando escassez de matéria-prima para a indústria. Esta realidade tem levado a uma perda económica significativa do valor das florestas europeias. Em Portugal, o montado, o eucalipto e o pinheiro são essenciais para a indústria, sendo os incêndios um dos principais obstáculos. As associações empresariais têm tido um papel fundamental na resposta a estes desafios (Lusa 2021b) (Marc Hanewinkel 2012);
- **Áreas de engenharia a desenvolver, decorrentes das Diretivas do Ambiente:** O crescimento e a modernização de várias áreas da engenharia têm sido impulsionados pela necessidade de responder às exigências ambientais, tanto a nível nacional como europeu. As diretivas ambientais, cada vez mais rigorosas, exigem o desenvolvimento de novas tecnologias e soluções mais avançadas, promovendo assim a inovação e a atualização constante no setor da engenharia (AIMMP, s.d.);
- **Sustentabilidade e Certificação:** A procura por madeira de origem sustentável está a aumentar, pressionando o setor a adotar práticas mais responsáveis, nomeadamente através da certificação FSC e PEFC, que asseguram uma gestão florestal responsável (PEFC 2023a);

- **Biodiversidade:** Em Portugal a monocultura é uma prática comum, sobretudo no setor florestal. As espécies mais representativas desta prática são o eucalipto, o sobreiro e o pinheiro-bravo. Estas monoculturas têm grande importância económica. O eucalipto é essencial para a indústria da pasta e do papel, sendo uma das principais espécies exportadas no país. O sobreiro sustenta a produção de cortiça, onde Portugal lidera a nível mundial. Já o pinheiro-bravo fornece madeira e resina, com relevância para a construção e indústria transformadora. Apesar do valor económico, estas práticas são por vezes criticadas por reduzirem a biodiversidade, empobrecerem os solos e, no caso do eucalipto e do pinheiro-bravo, aumentarem o impacto associado aos incêndios florestais, por isso, tem-se promovido uma gestão mais sustentável e a diversificação das paisagens florestais (Sousa Diogo 2024; Lusa 2023b; ICNF 2019);
- **Urbanização e Design Sustentável:** A procura por soluções de construção ecológica está a crescer. A Estratégia Nacional para a Bioeconomia Sustentável 2030 incentiva o uso de produtos florestais na construção. Esta tendência representa uma oportunidade para o setor madeireiro, dada a crescente valorização da construção em madeira por ser renovável, reciclável e com baixa pegada de carbono (James Wormald 2023).

Legal

A legislação portuguesa e europeia regula rigorosamente o uso e comércio da madeira, promovendo a sua rastreabilidade e legalidade. Destacam-se o Regulamento Europeu da Madeira e o Plano de Ação de Aplicação da Legislação, Governação e Comércio no Setor Florestal (FLEGT), que combatem a entrada de madeira ilegal na UE. A nível nacional, o Código Florestal e diplomas como os Decretos-Leis n.º 31/2020, 123/2015 e 76/2013 reforçam a gestão sustentável, o controlo fitossanitário e a aplicação das normas europeias. As novas normas de construção sustentável também incentivam o uso responsável da madeira:

- **Regulamentos Europeus:** Leis como a EUDR (*European Union Deforestation Regulation*) substituem o antigo EUTR (*European Union Timber Regulation*) e exigem não apenas a rastreabilidade e legalidade, mas também a comprovação de que a madeira e outros produtos não estejam associados à desflorestação, mesmo que esta seja legal no país de origem. A comercialização desses produtos na UE requer geolocalização precisa da área de origem e um processo rigoroso de *due diligence* (PEFC 2013) (Comissão Europeia, s.d.);
- **Código Florestal Português:** Regula o uso, exploração e proteção das florestas, influenciando diretamente a atividade económica (ICNF, s.d.);
- **Decreto-Lei n.º 123/2015: legislação e medidas de controlo fitossanitário** adotadas para combater o nemátodo-da-madeira-do-pinheiro (NMP) (Ministério da Agricultura e do Mar 2015);
- **Decreto-Lei n.º 31/2020:** Destaca a importância da floresta nacional e da gestão sustentável dos recursos florestais em três dimensões principais: económica, social e ambiental (Presidência dos conselhos de ministros 2020);
- **Normas de Construção Sustentável:** A introdução de exigências legais mais rigorosas no âmbito europeu, como o Regulamento da UE sobre a Desflorestação (EUDR), está a impulsionar transformações significativas no setor da construção civil. Estas normas, ao promoverem práticas de sustentabilidade e rastreabilidade na cadeia de valor, incentivam o

uso de materiais de origem renovável e com menor pegada de carbono, como a madeira. Paralelamente, políticas como o Pacto Ecológico Europeu e os requisitos do Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD) fomentam a adoção de soluções construtivas com menor impacto ambiental. Neste contexto, a madeira certificada e proveniente de florestas geridas de forma sustentável surge como uma alternativa viável e preferencial a materiais convencionais mais poluentes, como o betão ou o aço. A sua utilização em edifícios de média e grande escala, aliada a novas tecnologias está a ganhar relevância no cumprimento de metas ambientais, contribuindo para a descarbonização do setor da construção (PEFC 2023b; European Commission, s.d.);

- **Legislação de importação da madeira:** A União Europeia implementou o Plano de Ação FLEGT, que estabelece um conjunto de medidas com o objetivo de combater o comércio de madeira ilegal, promover o fornecimento de madeira legalmente extraída e incentivar a procura por produtos de madeira provenientes de fontes responsáveis e sustentáveis. Para Portugal, esta legislação tem impacto principalmente devido à aplicação do EUDR, como visto anteriormente, que impõe às empresas portuguesas a obrigação de verificar a legalidade da madeira que colocam no mercado, e devido também ao reforço da fiscalização nas fronteiras que é essencial dado o papel estratégico dos portos portugueses como ponto de entrada de madeira tropical na Europa (ICNF, s.d.);
- **Decreto-Lei n.º 76/2013:** implementação em Portugal do Regulamento (UE) n.º 995/2010, que proíbe a entrada e comercialização no mercado da União Europeia de madeira extraída ilegalmente e seus derivados (Ministério da Agricultura 2013);
- **Passaporte digital de produto:** O Passaporte Digital de Produto é uma ferramenta digital que compila dados sobre um produto ao longo do seu ciclo de vida, promovendo a transparência, sustentabilidade e rastreabilidade. A sua implementação na UE começa em 2027, sendo obrigatória inicialmente para setores como têxteis, eletrónicos e materiais de construção. Embora a indústria da madeira ainda não esteja diretamente abrangida, é influenciada indiretamente, sobretudo através da construção, onde produtos de madeira – como painéis, vigas ou revestimentos – poderão ser incluídos nas exigências futuras de conformidade e rastreabilidade (PDP 2024);
- **Marcação CE:** No contexto legal da fileira da madeira e do imobiliário, a marcação CE (Conformidade Europeia) assume um papel importante para garantir que determinados produtos cumprem os requisitos da União Europeia em matéria de segurança, saúde e proteção ambiental, (Diário da República 2011). Esta marcação é obrigatória para produtos abrangidos por legislação específica da UE, como madeira estrutural, painéis derivados da madeira e componentes utilizados na construção. Importadores e distribuidores também partilham a responsabilidade de assegurar que apenas produtos conformes são colocados no mercado. Na fileira da madeira, esta exigência legal reforça a segurança dos consumidores, a qualidade dos materiais aplicados na construção e facilita a livre circulação de bens no mercado europeu (European Union 2008).

Matriz de incertezas

A matriz de incertezas é construída a partir da identificação de duas incertezas principais que possuem alto impacto e alto grau de imprevisibilidade. Essas incertezas são dispostas num eixo horizontal e vertical, formando uma matriz 2x2 com quatro cenários possíveis. Cada quadrante representa uma combinação distinta de nível de incerteza e impacto permitindo que o setor explore diferentes futuros possíveis, avalie riscos e prepare estratégias adequadas para cada cenário de uma forma visual.

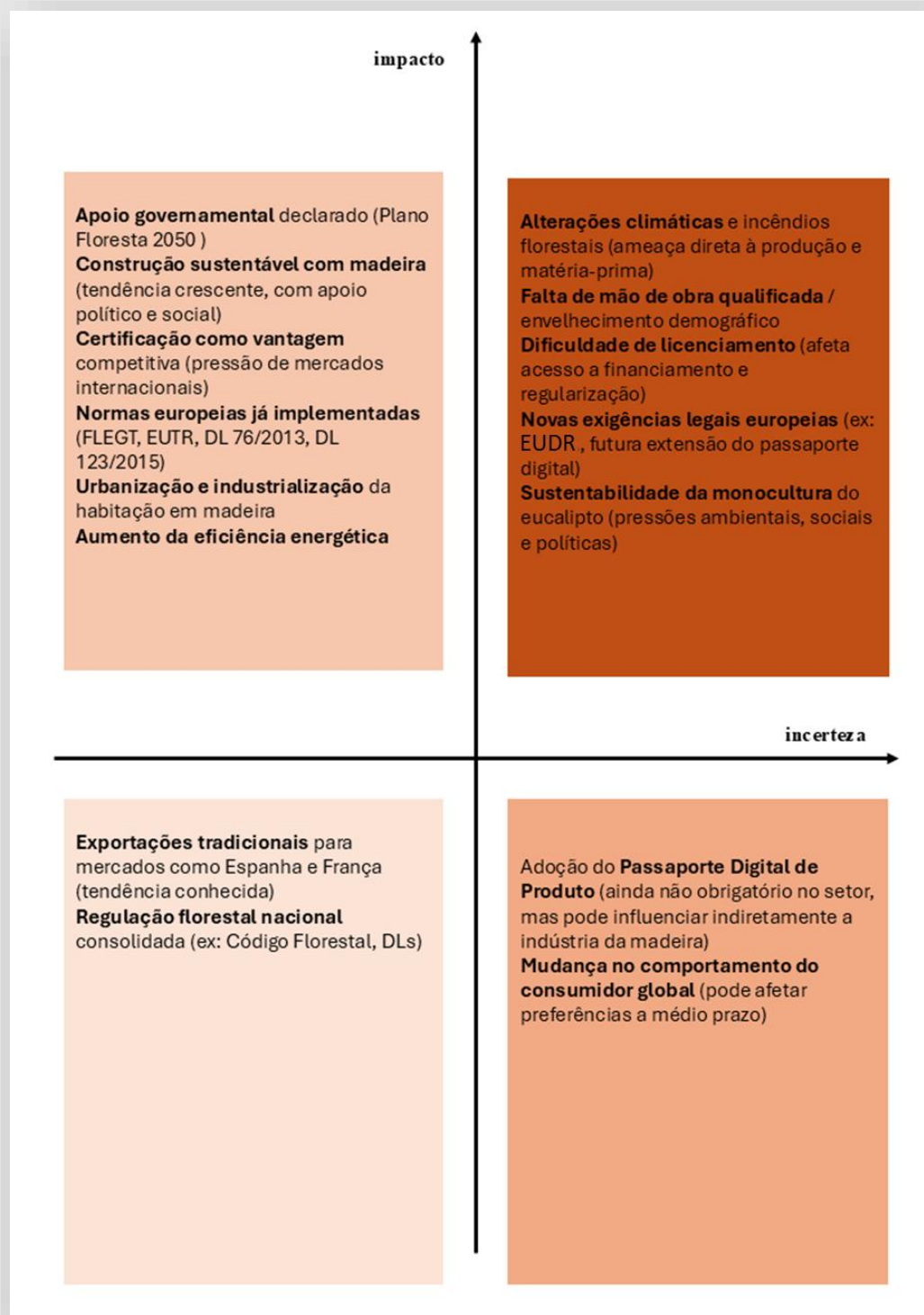


Figura - Matriz de incertezas

Análise de tendências e megatendências

A análise de tendências e megatendências consiste numa abordagem estratégica que examina as mudanças de médio prazo que podem impactar um setor ou organização. As tendências referem-se a padrões emergentes e mudanças mais imediatas, como novas preferências dos consumidores, inovações tecnológicas ou mudanças económicas. Já as megatendências são transformações globais e profundas, de longo prazo, que moldam o futuro, como a digitalização, urbanização, sustentabilidade ambiental e envelhecimento da população. Ao entender essas tendências e megatendências, as empresas podem antecipar mudanças e identificar novas oportunidades para se adaptarem ao futuro.

Tendências

No que toca às Tendências a ter em conta para o setor da Madeira, destacam-se a Procura por Madeira sustentável, o aumento da eficiência energética de forma generalizada, a tendência de eletrificação e o aumento do valor de mercado das certificações:

- **Procura por Madeira sustentável:** A crescente consciencialização ambiental, aliada a regulamentações mais rigorosas quanto à sustentabilidade, está a impulsionar a procura por madeira proveniente de fontes mais sustentáveis. Consumidores, construtores e fabricantes estão cada vez mais atentos à origem dos materiais, preferindo produtos com menor pegada ecológica. Esta tendência é reforçada, como visto anteriormente, por incentivos à construção verde, que incitam o uso de madeira certificada e de baixo impacto ambiental;
- **Aumento da eficiência energética:** A indústria da madeira está a investir em tecnologias e processos que promovem uma maior eficiência energética, tanto na produção como na transformação da madeira. Isto inclui a modernização de equipamentos, isolamento térmico de instalações, utilização de variadores de velocidade, motores de maior classe e uso de fontes de energia renovável. Estes investimentos não só reduzem os custos operacionais, como também ajudam as empresas a cumprir metas ambientais e a melhorar a sua imagem junto de clientes e parceiros (APA 2024a);
- **Tendência de eletrificação:** Dado que as bombas de calor são equipamentos significativamente mais eficientes do que os atualmente instalados – como caldeiras ou queimadores a biomassa e gás natural – tem-se verificado uma crescente adoção destes sistemas na indústria. Esta tendência é impulsionada, entre outros fatores, pela disponibilidade crescente de bombas de calor capazes de operar a temperaturas mais elevadas, compatíveis com as exigências dos processos produtivos do setor.
- Adicionalmente, observa-se um **aumento na utilização de sistemas fotovoltaicos (PV) para autoconsumo**, de forma individual ou através de comunidades de energia renovável ou de autoconsumo coletivo. A viabilidade da sua implementação é analisada caso a caso, sendo que, sempre que as unidades fabris operem em regime noturno, poderá justificar-se o investimento em sistemas de armazenamento elétrico. A transição para a eletrificação também abrange a logística interna das instalações, nomeadamente através da substituição de empilhadores movidos a gasóleo por empilhadores elétricos, contribuindo assim para uma operação mais sustentável e eficiente;
- **Aumento do valor de mercado das certificações:** As certificações como **FSC PEFC** estão a tornar-se requisitos valiosos para aceder a mercados internacionais e grandes cadeias de retalho, que exigem garantias de origem sustentáveis e boas práticas de gestão florestal. A

tendência aponta para uma valorização crescente destas certificações, que funcionam como selo de confiança e transparência para consumidores e investidores.

Mega tendências

No que toca às Mega tendências a ter em conta para o setor da Madeira, destacam-se a Crise climática atual e o papel que o setor da Madeira terá, a Economia circular, a digitalização e automação e a escassez de mão de obra qualificada:

- **Crise climática:** A indústria da madeira tem vindo a posicionar-se como um setor com potencial para contribuir para os objetivos de descarbonização sobretudo através da promoção da madeira como material de construção com menor pegada de carbono. A aposta em produtos duráveis, reutilizáveis e em processos industriais mais eficientes e menos emissores de gases com efeito de estufa (GEE) é apontada como uma das vias para alinhar o setor com as metas climáticas.

Neste contexto, o Plano de Ação da Bioeconomia Sustentável 2030 prevê um conjunto de medidas com impacto direto no setor florestal e na indústria da madeira. Entre elas, destaca-se a criação de grupos de trabalho setoriais, com o objetivo de identificar e analisar constrangimentos legais existentes que dificultem a valorização de subprodutos e resíduos, propor simplificações regulamentares e facilitar o aproveitamento intersectorial de matérias de base biológica. Do lado da oferta, o plano propõe ações para minimizar barreiras à entrada de novos produtos no mercado, incluindo:

- **Estudos técnicos para a desclassificação de resíduos**, permitindo a sua qualificação legal como subprodutos ou como tendo atingido o “fim de estatuto de resíduo”;
- **Apoio financeiro a projetos integrados de valorização de biomassa**, especialmente os que explorem simbioses industriais e respeitem o princípio de utilização em cascata;
- **Incentivos à utilização de tecnologias comerciais sustentáveis**, com recurso a fundos como o Fundo Ambiental, FEADER, FEDER, entre outros.

Do lado da procura, prevê-se o reforço da confiança nos biomateriais, através de sistemas de rastreabilidade e certificação, e a promoção do seu uso nas compras públicas como forma de criar mercados para produtos de base biológica. Estas medidas indicam uma vontade política e estratégica de enquadrar melhor o setor da madeira no esforço nacional de transição climática e bioeconómica, embora a concretização dos seus efeitos dependa da implementação efetiva dos instrumentos propostos e da mobilização dos agentes económicos envolvidos [49];

- **Economia circular:** A transição para modelos de economia circular tem vindo a ganhar relevância, centrando-se no reaproveitamento de subprodutos, como serrim, aparas e cascas, para a produção de pellets ou painéis aglomerados. Esta abordagem visa a redução de resíduos e a maximização do valor económico e ambiental dos recursos florestais. A longo prazo, prevê-se a adoção de tecnologias avançadas para a recuperação de materiais, com o objetivo de alcançar um sistema de “resíduos zero”. Tendo em conta que este é um setor potencialmente eletrificável, os resíduos atualmente sem valorização poderão, no futuro, representar uma fonte estratégica de matéria-prima. Setores cuja descarbonização é limitada pelas tecnologias disponíveis poderão utilizá-los, conferindo-lhes um valor acrescentado superior. Adicionalmente, outros setores poderão recorrer a processos como a gaseificação e a tecnologia BTL (*Biomass to Liquid*) para a produção de biocombustíveis ou gases renováveis;
- **Digitalização e automação:** A adoção de tecnologias digitais está a transformar a indústria, desde a gestão florestal e de resíduos industriais com sistemas IoT, até à automação de linhas

de produção. A médio-longo prazo prevê-se uma ampliação do uso destas tecnologias de forma a existir uma gestão integrada do ciclo de vida em empresas. Estas inovações permitem maior precisão, rastreabilidade, redução de desperdícios e aumento da produtividade, tornando as operações mais ágeis e competitivas;

- **Escassez de mão de obra qualificada:** A indústria da madeira em Portugal enfrenta um constrangimento estrutural relacionado com a escassez de mão de obra qualificada, particularmente em funções técnicas e operacionais. Este défice é intensificado pelo envelhecimento da população ativa e pela reduzida atratividade dos setores industriais junto das camadas mais jovens. A origem do problema reside na ausência de uma estratégia consolidada de formação técnico-profissional ajustada às necessidades reais do mercado, bem como na perceção generalizada de que estes setores oferecem condições pouco competitivas em termos salariais e de progressão de carreira. Estes fatores contribuem para um desfasamento entre a oferta e a procura de competências, comprometendo a capacidade produtiva das empresas.

III VALUE CHAIN ANALYSIS

O setor florestal desempenha um papel crucial na mitigação das alterações climáticas, contribuindo simultaneamente para o sequestro de carbono e para o fornecimento responsável de recursos naturais. Estudos mostram que a gestão sustentável das florestas pode reduzir emissões e assegurar o abastecimento contínuo de madeira, sobretudo em regiões tropicais. Para tal, a eficácia e a transparência ao longo de toda a cadeia de fornecimento - desde as florestas até ao consumidor final - são fundamentais para garantir a utilização sustentável desses recursos (Ma et al. 2025).

A cadeia de valor da madeira engloba todas as etapas do ciclo de vida dos produtos madeireiros, desde a gestão sustentável das florestas até a reciclagem, sendo fundamental para aumentar o valor económico e reduzir os impactos ambientais (Zorzos et al. 2025).

Com a valorização crescente da madeira como material sustentável e os desafios atuais do setor, torna-se essencial promover inovação e colaboração em toda a cadeia de valor da indústria de produtos de madeira. O mapeamento detalhado desta cadeia é fundamental para compreender os fluxos de materiais, identificar oportunidades de melhoria e apoiar decisões estratégicas que favoreçam a sustentabilidade e a competitividade do setor (Mo, Haviarova e Kitek Kuzman 2024).

Em 2020, o setor das indústrias da madeira e mobiliário representou 11,8% das empresas da Indústria Transformadora em Portugal, com 8.015 empresas, 48.884 trabalhadores e um volume de negócios de 3107 milhões de euros (IAPMEI 2022).

A Cadeia de Valor refere-se ao conjunto de atividades interligadas que geram valor, começando nas fontes de matérias-primas, passando pelos fornecedores de componentes, até chegar ao produto final entregue ao consumidor (AIMMP 2010d). A cadeia de valor consiste num conjunto de etapas produtivas que conectam as matérias-primas aos produtos finais, envolvendo diversos atores e podendo abranger desde o nível local até o global. Diferentes setores, como a construção ou a fabricação de móveis, possuem suas próprias cadeias de valor, mas frequentemente compartilham etapas iniciais e fornecedores em comum (Parobek e Paluš 2024).

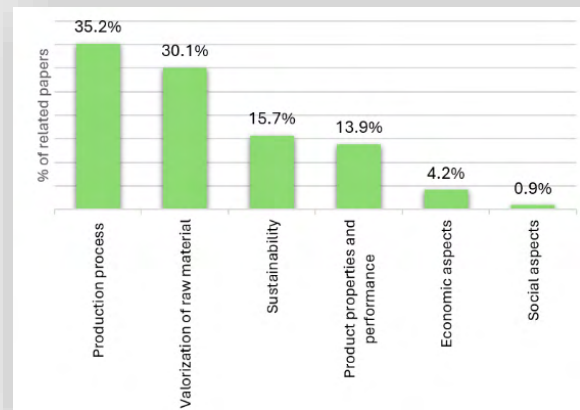
O controlo sobre toda a cadeia de desenvolvimento de produtos (desde a produção até ao produto final) potencia a geração de valor acrescentado, promovendo a inovação no desenvolvimento de novos produtos (AIMMP 2010e).

O conceito de valor agregado é mais frequentemente discutido em produtos de madeira não estruturais, que permitem maior inovação devido às menores restrições regulamentares. Os métodos mais comuns para agregar valor identificados nos estudos por Calvano et al. (2025) e exibidos na

Figura a seguir são:

Figura - Métodos de agregação de valor aos produtos derivados da madeira

Fonte: (Calvano et al. 2025)



Inovação nos processos produtivos (35,2%), através da melhoria no fabrico e pré-tratamento. Valorização da madeira como matéria-prima (30,1%), através da utilização de espécies menos conhecidas, madeira local e resíduos, com vista à sustentabilidade e à redução da pressão sobre os recursos tradicionais. Práticas sustentáveis (15,7%), através da reciclagem, utilização em cascata e diversificação dos destinos dos resíduos de madeira, indo além da incineração, como produção de carvão vegetal ou novos produtos. Melhoria das propriedades do produto (13,9%), por meio de modificações químicas ou térmicas para aumentar durabilidade e o desempenho, permitindo o uso de espécies de menor qualidade. Fatores económicos (4,2%), com foco na economia circular, nas cadeias curtas e na competitividade. Aspectos sociais (0,9%), através da colaboração, capacitação e valorização do capital humano, embora pouco abordados (Calvano et al. 2025).

O uso em cascata da madeira consiste no aproveitamento sucessivo desse recurso, dando prioridade a aplicações de maior valor e longa duração - como construção e mobiliário - e destinando a produção de energia apenas a resíduos ou materiais reciclados. Quanto mais vezes a madeira e os seus subprodutos são reutilizados ou reciclados, maiores são os benefícios gerados ao longo da cadeia de valor. O conceito abrange também a coprodução, em que diferentes produtos são obtidos a partir da mesma biomassa, maximizando o seu potencial e promovendo a utilização eficiente e sustentável dos recursos florestais (Parobek e Paluš 2024).

Os estudos geralmente não consideram a importância da qualificação da mão-de-obra de trabalho, apesar de ser fundamental para agregar valor em produtos de madeira. As diferentes estratégias de agregação de valor são interligadas e, quando integradas, podem gerar benefícios ambientais, económicos e sociais, como novos mercados e mais empregos. Uma abordagem mais integrada é recomendada para maximizar o valor agregado nas cadeias produtivas da madeira (Calvano et al. 2025).

A maior parte dos estudos sobre valor agregado em produtos de madeira destaca sobretudo os benefícios ambientais - como sustentabilidade, renovabilidade e capacidade de armazenamento de carbono. Esse valor pode ser gerado em todas as etapas do ciclo de vida, desde a produção sustentável até a reciclagem e o prolongamento da vida útil, contribuindo para a mitigação das emissões de CO₂. Os impactos económicos, embora menos enfatizados, incluem ganhos de competitividade, crescimento e novas oportunidades de negócio, além da melhoria das propriedades e desempenho dos produtos, do desenvolvimento de novos usos e da diversificação do setor. Já os benefícios sociais são pouco explorados, apesar da sua relevância no contexto da Indústria 5.0, que valoriza inclusão, condições de trabalho e desenvolvimento local. Assim, recomenda-se uma abordagem mais multidisciplinar que integre de forma equilibrada as dimensões ambiental, económica e social. (Calvano et al. 2025).

O Valor Acrescentado representa a diferença entre as vendas e os custos com matérias-primas e serviços externos, considerando apenas os produtos finais para evitar duplicidades. É um indicador essencial para avaliar a performance da empresa, orientar estratégias e aumentar o valor percebido pelo cliente em todas as etapas da cadeia produtiva, seja por processos produtivos ou serviços adicionais (AIMMP 2010d).

Aumentar o valor acrescentado passa pela otimização dos processos produtivos e redução de custos. Em Portugal, a modernização e a aposta em processos de segunda transformação elevaram a produtividade das serrações, mas muitas empresas tradicionais ainda enfrentam dificuldades técnicas para competir. O aumento da produtividade deve traduzir-se em melhor qualidade e menores custos variáveis, principalmente de matérias-primas, cujo consumo nem sempre acompanha

proporcionalmente o volume produzido, devido a perdas e flutuações na produtividade da mão-de-obra (AIMMP 2010d).

Por outro lado, o valor acrescentado também pode ser ampliado pelo aumento do preço de venda, mas isso só é possível se houver operações que realmente agreguem valor ao produto. Em Portugal, uma fração relevante da madeira é direcionada para setores de maior valor, como carpintaria e mobiliário, sendo que a maior parte ainda se destina à produção de paletes, embalagens e construção civil. No entanto, para sustentar preços mais elevados e crescer na cadeia de valor, é fundamental investir em etapas produtivas adicionais que permitam oferecer produtos mais elaborados (AIMMP 2010d).

Na sua investigação, Mo, Haviarova e Kitek Kuzman (2024) realizaram uma extensa revisão da literatura e, a partir dela, desenvolveram diferentes mapas e diagramas, combinando imagens próprias e infográficos de domínio público, posteriormente validados por especialistas da área. Além de facilitarem a análise dos fluxos de materiais e das cadeias produtivas, esses recursos visuais servem como base para futuras inovações, apoiando a compreensão do setor, a identificação de novas oportunidades económicas e a definição de estratégias para uma gestão mais sustentável dos recursos na indústria de produtos de madeira. O estudo também testou a viabilidade de um mapa em cascata para caracterizar o estado atual da indústria, recorrendo a artigos científicos revistos por pares, publicados ou em processo de publicação em revistas internacionais.

Entre os resultados, destaca-se a elaboração de um mapa genérico que representa o percurso dos produtos de madeira desde a floresta até ao consumidor final, estruturado em quatro grandes etapas: floresta, operações no local, principais cadeias produtivas e produtos acabados (Figura - *Visão geral das cadeias de valor de produtos de madeira genéricos em forma gráfica*). A seleção das cadeias produtivas centrais - serração, produção de folheados, madeira reconstituída e fábricas de pasta e papel - foi orientada pela sua relevância económica, representatividade e diversidade de produtos resultantes. Em cada fase foram identificados os processos de transformação da madeira em semiprodutos e produtos finais, abrangendo tanto aplicações tradicionais como soluções emergentes, por exemplo, materiais biogénicos e mobiliário inteligente. O mapa também destaca a geração de subprodutos e o seu reaproveitamento em outros processos, evidenciando o potencial de eficiência, sustentabilidade e circularidade na indústria de produtos de madeira.

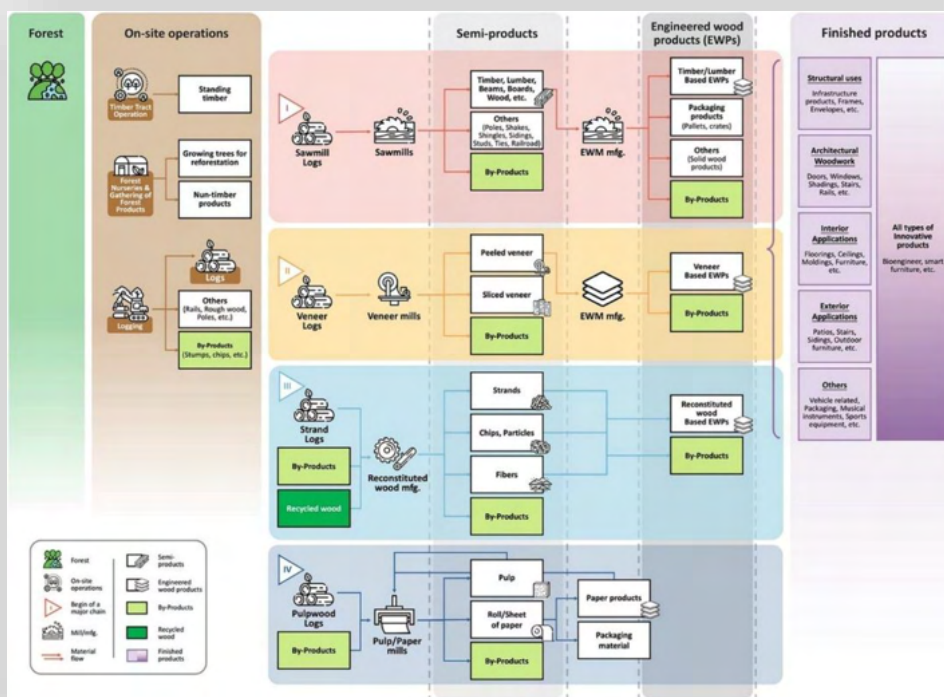


Figura - Visão geral das cadeias de valor de produtos de madeira genéricos em forma gráfica

FONTE: (Mo, Haviarova e Kitek Kuzman 2024)

Antes das quatro principais cadeias produtivas, destacam-se ainda as atividades diretamente ligadas à floresta, como operações em áreas florestais, viveiros, recolha de produtos florestais e exploração madeireira, representadas no fluxo como “operações locais” (Figura - Operações locais). As áreas florestais correspondem a zonas onde a madeira em pé é cultivada, gerida ou comercializada. Nessas áreas, as operações incluem desde o cultivo e a melhoria dos povoamentos até ações de prevenção e combate a incêndios, bem como a gestão orientada para a venda de madeira em pé (Mo, Haviarova e Kitek Kuzman 2024).

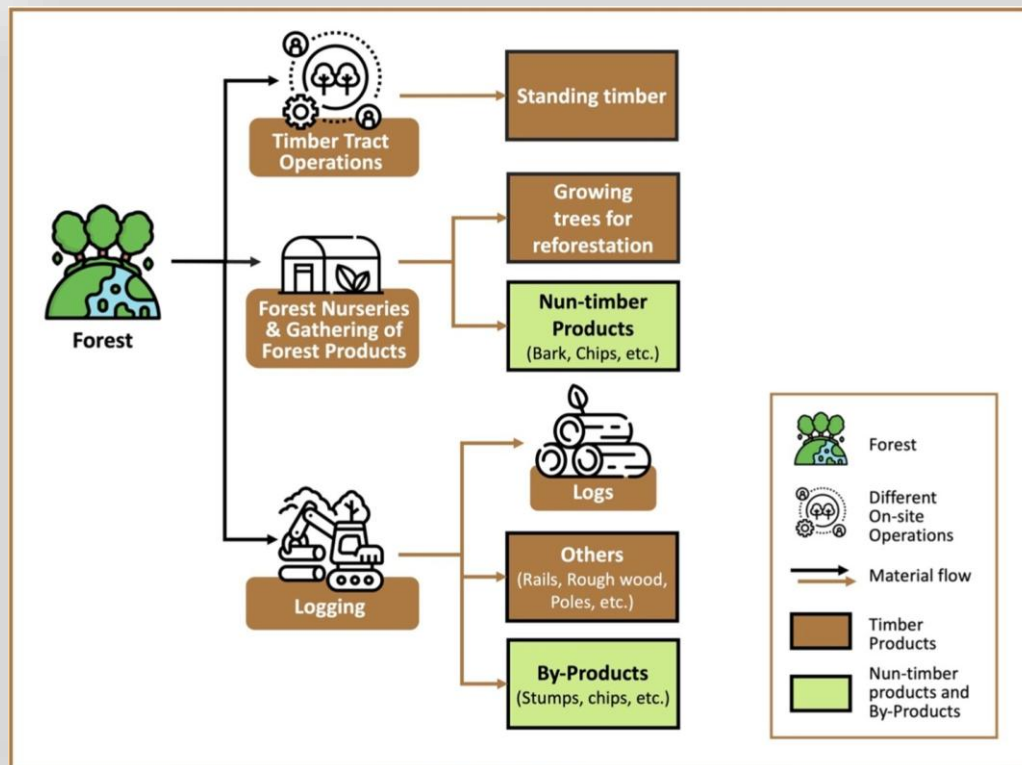


Figura - Operações locais

FONTE: (Mo, Haviarova e Kitek Kuzman 2024)

Os viveiros florestais e a recolha de produtos florestais dedicam-se principalmente ao cultivo de árvores para reflorestação e à recolha de produtos não madeiros. A exploração madeireira envolve atividades como o corte, transporte e produção de aparas de madeira no local. Os toros colhidos são então transportados para serrações e unidades de fabrico, iniciando o seu percurso nas cadeias produtivas (Mo, Haviarova e Kitek Kuzman 2024).

Compreender quanto e de que forma a madeira é utilizada possui importantes implicações para a gestão florestal, para a formulação de políticas económicas e para estratégias de ação climática. O fluxo de madeira na economia reflete não apenas benefícios económicos e geração de emprego, mas também desempenha um papel central na transição para uma economia mais sustentável. Além disso, está profundamente interligado à gestão dos recursos florestais, que oferecem múltiplos benefícios à sociedade. Embora diferentes fontes registem fluxos específicos de madeira, uma visão abrangente é essencial para maximizar o aproveitamento sustentável desse recurso (Brownell, Iliev e Bentsen 2023).

A transição para cadeias de valor mais circulares e sustentáveis exige maior articulação entre governos, empresas e trabalhadores. O diálogo social é uma ferramenta estratégica para promover novos modelos de produção e emprego verde, sendo essencial para atingir os objetivos do Pacto Ecológico Europeu e da bio economia circular (Good Wood Project 2020).

Os processos de fabrico no setor da Madeira e do Mobiliário, especialmente nos subsectores industriais analisados, envolvem várias etapas que podem ser agrupadas em cinco fases principais: i) preparação da matéria-prima, onde a madeira é transformada em peças aptas para processamento posterior; ii) tratamento, destinado a aumentar a durabilidade e melhorar as características naturais da madeira; iii) maquinaria, que consiste na produção das peças; iv) montagem, em que as diferentes partes são unidas para formar o produto final; e, por fim, v) os acabamentos, que incluem a aplicação de revestimentos ou produtos de proteção para melhorar a qualidade e a durabilidade do produto acabado (INETI 2001).

A preparação da matéria-prima no setor da madeira envolve operações como descasque, serragem, secagem e outras etapas que variam conforme o produto final e o subsector, sendo que na produção de painéis há procedimentos específicos como cozimento, desenrolamento e moagem. O tratamento, geralmente por impregnação, visa aumentar a durabilidade da madeira e protegê-la contra fungos e insetos, podendo ser temporário e preventivo, especialmente na serração. A maquinaria compreende operações mecânicas como calibração, fresagem e furação, preparando as peças para as fases seguintes. O acabamento melhora o aspeto visual e a resistência do produto final, recorrendo a técnicas como lixagem, lacagem, envernizamento e aplicação de revestimentos. Por fim, a montagem consiste na união das várias peças, utilizando colagem e fixação de elementos metálicos ou plásticos, formando o produto acabado (INETI 2001).

Os recursos florestais, especialmente a madeira, são fundamentais para promover renda e empregos sustentáveis, principalmente em regiões afastadas dos grandes centros. Atividades como serração, fabricação de móveis, artesanato, produção de papel, compensados e lâminas formam a base da cadeia produtiva madeireira, gerando oportunidades económicas relevantes mesmo em setores predominantemente informais. Essas atividades são essenciais para o desenvolvimento local, especialmente onde há pouca oferta de serviços e alternativas de trabalho (Sharma e Thoudam 2024).

Em síntese, a análise das cadeias de valor e dos processos fabris apresentada neste capítulo oferece uma visão detalhada e prática dos outputs de cada fase produtiva, constituindo uma base sólida para identificar oportunidades de otimização. Quando colocados em perspetiva com os resultados da Fase A, que destacou aspetos como o perfil empresarial dominado por PME, a grande dependência energética da eletricidade e biomassa, a baixa adoção de certificações de saúde e segurança e a orientação exportadora do setor, estes outputs revelam não só pontos de continuidade, mas também áreas onde não foi possível obter informação anterior. Por exemplo, certas etapas críticas de eficiência energética ou de aproveitamento de resíduos não surgiram claramente mapeadas na Fase A, e esta ausência é em si reveladora da necessidade de maior monitorização e sistematização de dados. Assim, o paralelismo entre as duas fases permite compreender melhor as dinâmicas do setor, reforçando a necessidade de consolidar informação, aprofundar a análise energética e operacional e desenvolver estratégias direccionadas para colmatar as fragilidades identificadas, assegurando que a indústria da madeira avança de forma coordenada para os objetivos de descarbonização e economia circular.

Serração de madeira

O CAE 16101 compreende a atividade das serrações e outras unidades de trabalho mecânico da madeira, sejam fixas ou móveis, independentemente do local onde operam. Inclui a produção de madeiras serradas para construção (como madeiras esquadriadas, régua para parquet e tábuas para chão), madeiras para paletes, tábua para embalagem, travessas para caminho de ferro, bem como derivados como farinha, lã, estilha e partículas de madeira. Não inclui a exploração florestal (CAE 02200), a fabricação de folheados e contraplacados (CAE 16213) nem a fabricação de ripas e caixilharia de madeira (CAE 16230). O CAE 16102 abrange também o aplainamento, corte e secagem da madeira, associados à serração ou realizados autonomamente (INE 2007).

A serração de madeira em Portugal fornece uma grande diversidade de produtos fundamentais para setores como construção, mobiliário e embalagens, entre outros. Entre os principais itens fabricados destacam-se as pranchas, tábuas e barrote, utilizados em construção civil, carpintaria, marcenaria e móveis, disponíveis em diferentes tamanhos e espessuras; vigas e caibros, que funcionam como elementos estruturais em edifícios, pontes e outras obras, adaptando-se a várias exigências técnicas; ripados e sarrafos, peças longas e estreitas empregues em telhados, pisos, revestimentos, bem como na produção de paletes e embalagens; dormentes de madeira, essenciais para linhas ferroviárias, fabricados com madeiras duráveis e resistentes às condições ambientais; lamelas e ripas para pavimentos, pequenas peças empregues em pisos de madeira maciça ou laminada; entre outros (INEGI e SerQ 2024).

A serragem é o processo de converter a madeira, originalmente com formato tronco-cilíndrico, em pranchas de linhas retas, caracterizadas por faces planas e paralelas (AIMMP 2015). Um diagrama do processo de fabrico típico do subsector de Serração de Madeira é apresentado na Figura - Diagrama do processo de fabrico típico do subsector de Serração de Madeira.

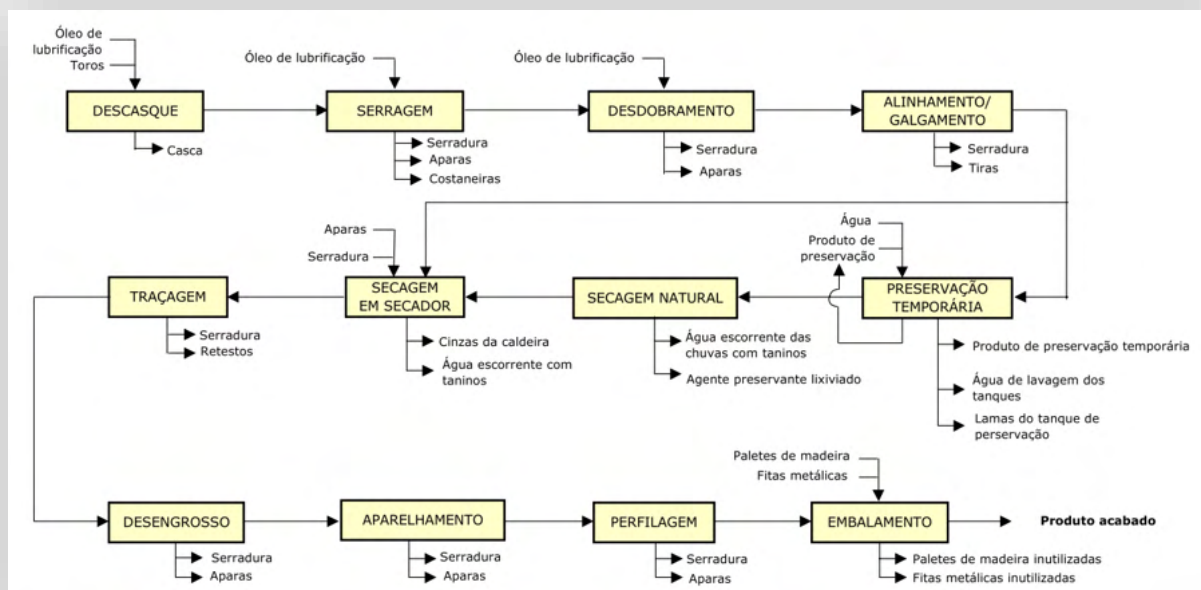


Figura - Diagrama do processo de fabrico típico do subsector de Serração de Madeira

FONTE: (INETI 2001)

Uma breve descrição dos principais processos de fabrico associados à Serração de madeira é apresentada na Tabela - Descrição dos processos de fabrico relativos à 'Serração de madeira'.

Etapas	Descrição
Receção e armazenamento da madeira em toro	Os toros de madeira são recebidos e armazenados em áreas adequadas.
Descascamento	A remoção da casca dos toros é realizada com equipamentos mecânicos ou manualmente, preparando a madeira para as etapas seguintes.
Corte inicial (serragem bruta)	Os toros são cortados longitudinalmente em tábuas ou pranchas grossas, utilizando serras de fita ou circulares, podendo ser feitos cortes radiais ou tangenciais conforme o tipo de madeira e o uso final.
Classificação e separação	As peças resultantes do corte são separadas e classificadas segundo o tamanho e a qualidade, destinando-se a diferentes aplicações como construção, mobiliário ou embalagens.
Secagem	A madeira é seca ao ar livre ou em estufas, reduzindo o teor de humidade para evitar deformações e fissuras, sendo o processo monitorizado para garantir uniformidade.
Serragem	Após a secagem, as pranchas podem ser novamente cortadas em dimensões específicas, recorrendo a serras de precisão para assegurar cortes exatos e de alta qualidade.
Planeamento e aplainamento	As superfícies das peças são planadas e aplainadas para obter uniformidade e suavidade, incluindo o corte das bordas para eliminar imperfeições e garantir medidas precisas.
Classificação final e qualidade	Realiza-se uma inspeção final para identificar eventuais defeitos e confirmar o cumprimento dos padrões de qualidade, classificando a madeira conforme o tipo, qualidade e aplicação.
Tratamento e conservação	Se necessário, a madeira recebe tratamentos químicos para proteção contra pragas e fungos, sendo aplicados tratamentos específicos para exportação, em conformidade com normas internacionais como a ISPM 15.
Embalagem e armazenamento	As peças são embaladas para facilitar o transporte e protegidas durante o armazenamento, que ocorre em locais secos e ventilados para manter as propriedades da madeira até à entrega.
Logística e distribuição	Organiza-se o transporte da madeira serrada até aos clientes ou pontos de venda, coordenando com empresas de transporte para garantir entregas seguras e dentro dos prazos estipulados.

Tabela - Descrição dos processos de fabrico relativos à 'Serração de madeira'

FONTE: (INEGI e SerQ 2024)

As serrações são instalações onde os toros são processados e integrados na cadeia de abastecimento I, conforme ilustrado na Figura 7. Após o abate, os toros são transportados da floresta e armazenados em parque até serem processados. Antes da primeira transformação, normalmente são descascados e cortados em dimensões iniciais para otimizar o aproveitamento da madeira. Após o processamento primário, a madeira serrada pode necessitar apenas de ajustes de largura (aparo) e comprimento (corte final), embora muitas serrações realizem uma segunda transformação para converter cantos e pranchas em tábuas. Os produtos são então classificados por tamanho, tipo e qualidade, empilhados para secagem e, posteriormente, sujeitos a aplainamento ou tratamentos preservativos que garantem superfícies lisas e maior durabilidade (Mo, Haviarova e Kitek Kuzman 2024).

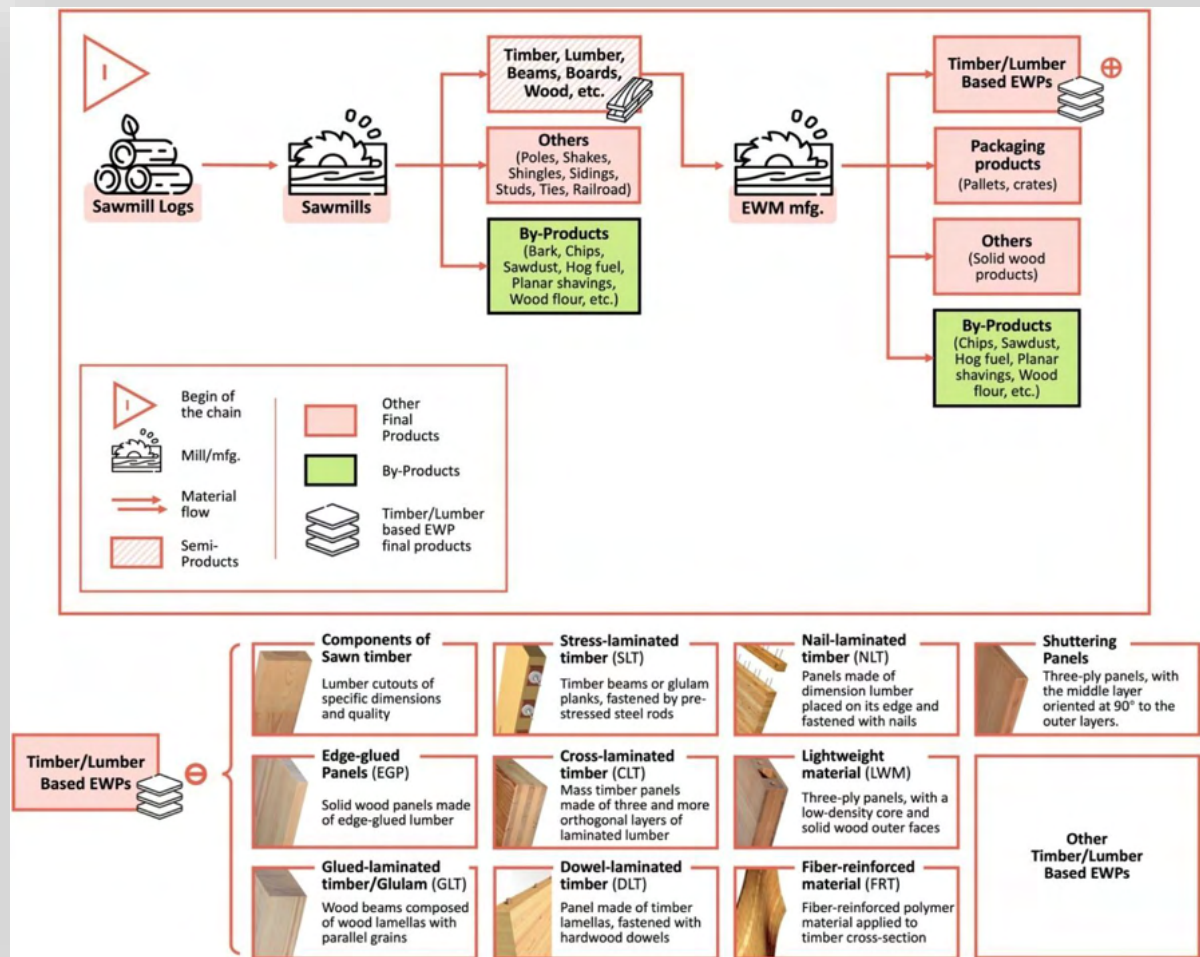


Figura - Serração e produtos à base de madeira serrada

FONTE: (Mo, Haviarova e Kitek Kuzman 2024)

Uma serração pode produzir uma variedade de produtos de madeira. Os principais produtos incluem: 1) Madeira serrada: o produto principal da serração, que pode ser processado em vários tamanhos e classes, dependendo do uso pretendido e da qualidade do toro; 2) Pranchas: peças maiores de madeira, frequentemente utilizadas para fins estruturais na construção, mais espessas e largas do que a madeira padrão; 3) Tábuas: mais finas do que as pranchas e geralmente usadas para prateleiras, painéis ou pavimentos. Estes produtos são posteriormente encaminhados para fábricas de madeira transformada e instalações de tratamento de madeira, para a produção de produtos de maior valor acrescentado (lamelado-colado, CLT, etc.) (Mo, Haviarova e Kitek Kuzman 2024).

Os produtos de madeira transformada representam um avanço significativo no processamento global da madeira. Foram desenvolvidos para lidar com a heterogeneidade e o comportamento anisotrópico dos materiais, aumentando a sua adequação para diversas aplicações em construções residenciais e

comerciais, permitindo o desenvolvimento de projetos inovadores de construção. Conforme ilustrado na *Figura - Serração e produtos à base de madeira serrada*, destacam-se entre os principais produtos de madeira transformada: componentes de madeira serrada, painéis colados pelos bordos (EGP), madeira lamelada-colada (GLT), madeira lamelada sob tensão (SLT), madeira lamelada cruzada (CLT), madeira amelada com cavilhas (DLT), madeira lamelada com pregos (NLT), material leve (LWM), madeira reforçada com fibras (FRT) e painéis de cofragem (Mo, Haviarova e Kitek Kuzman 2024).

Dentro da lógica da cadeia de valor, a serração representa o estágio inicial, onde a madeira em toro é recebida e classificada de acordo com a sua qualidade, dando origem a uma variedade de atividades subsequentes. Entre os exemplos de produtos resultantes desse processo, destacam-se material escolar, cabos de ferramentas, utensílios domésticos, madeira tratada para passadiços e vedações, caixas para charutos e vinho, urnas, camas para animais, instrumentos musicais, fósforos, entre outros (AIMMP 2010d).

A indústria de serração pura da madeira, de primeira transformação, situa-se entre a floresta e setores como carpintaria, produção de painéis, embalagens, mobiliário e construção civil. Em Portugal, está dispersa por todo o território, com maior presença em Aveiro, Leiria, Porto, Setúbal e Viseu, e caracteriza-se pela diversidade de objetivos e produção. As serrações podem ser tradicionais, com oferta variada e voltadas ao mercado local, ou modernas, especializadas, organizadas e orientadas para mercados mais exigentes. Distinguem-se ainda pelo tipo de matéria-prima utilizada, entre pinho bravo e folhosas (temperadas, europeias, americanas e exóticas), dispondo geralmente de um parque para a madeira (toros/rolaria) e um armazém para produtos acabados. Em Portugal, predominam as serrações de pinho bravo, sendo as folhosas menos expressivas (AIMMP 2006).

A produção industrial da Fileira do Pinho em Portugal registou uma redução, com o consumo de madeira a cair 17%. As maiores descidas ocorreram na produção de madeira serrada e de pellets, ambas com quebras de 25%, influenciadas, no caso dos pellets, pela menor procura de eletricidade na Europa e pela redução da procura no Reino Unido. No entanto, apesar deste cenário, o número de empresas de primeira transformação de madeira de pinho bravo manteve-se estável, totalizando 306 unidades. Em 2022, houve ainda um crescimento no emprego e no número de empresas do setor, que passou a contar com 60.315 trabalhadores e 8.497 empresas (Centro PINUS 2024).

Algumas serrações também realizam trabalhos de carpintaria, especialmente aquelas que trabalham sob encomenda, embora sejam uma minoria, sendo a principal diferença entre serração e carpintaria o produto final e o nível de acabamento. Desde 1985, a Europa tem registado crescimento na produção e consumo de produtos de carpintaria, impulsionado por mudanças nos hábitos de consumo, maior procura por produtos de qualidade e avanços tecnológicos (AIMMP 2006). Os principais produtos do subsector incluem casas pré-fabricadas, paletes, madeira de pinho e eucalipto serrada, artigos de carpintaria, embalagens de madeira, produtos para a construção (vigas, barrotes, soalhos), derivados de madeira, estilha, madeiras tratadas, estruturas em madeira, mobiliário urbano, barreiras acústicas e madeira serrada para caixas (AIMMP 2010b).

A tabela da Figura - Portfólio de produtos (serração) apresenta o portfólio usual de produtos/estrutura dos produtos de serração em Portugal classificando-os por categoria de utilização e respetivas dimensões. Para cada tipo de produto, a tabela especifica a espessura, a largura e o comprimento, em milímetros. Esta organização permite uma rápida consulta das medidas padrão para aplicações em carpintaria tosca, carpintaria de construção civil e marcenaria, facilitando a seleção do material adequado para cada projeto.

DESI GNAÇÃO	DIMENSÕES (mm)		
	Espessura	Largura	Comprimento
CONSTRUÇÃO CIVIL			
SOLHO DE COFRAGEM TOSCO	25 e 27	100 a 300	2200-2600-3000-3500
SOLHO PRÉ-AROS	25	100 ACIMA	2200-2600
SOLHO DE COFRAGEM APARELHADO	22 e 25	100 a 250	2200-2600-3000-3500
SOLHO APARELHADO M/F OU 4 FACES	22 e 28	100 a 250	2200-2600-3000-3500
MOLDURA DE ANDAIME	40	120 a 250	2200-2600-3000-3500
RIPA EM TOSCO	25	40	2200-2600-3000
RIPA APARELHADA	22	35-40	2600-3000
PRUMOS/BARROTES	70	100	2000 - 4000
VIGAS MEIA QUADRA	70-80	140 ou 160	2000 a 6000
VIGAS	50-120	100-220	2600-3000-3500
CARPINTARIA (TOSCO)			
RIPA	22	35 ou 40	2600-3000
SERRAFÕES 4 FACES	35-70	35-70	2600-3000
SERRAFÕES CHANFRADOS	40	50	2600
TABUÍ NHA	20	140 a 260	2200-2600
SOLHO	22 ou 27	140 a 200	2600
TACOS	22	70	210
MOLDURA	35-40	120 a 280	2200-2600-3000-3500
TABUADO	55	140 a 280	2200-2600-3000-3500
PRANCHA	80	160 a 300	2600-3000-5000-6000
PRANCHÃO OU MEIA FALCA	120	255	2200-2600-3000-3500
BARROTES	70	100	2600-3000-3500
BARROTES	50	70-90	2600-3000-3500
BARROTES OU TERÇAS	50	50	2600-3000-3500
MADEIRAS APLAI NADAS			
FORRO APARELHADO 3 FIOS	10	80 a 200	2200-3000-3500
FORRO APARELHADO 2 FIOS	15	80 a 200	2200-3000-3500
TABUA DE FORRO	12	120-200	2200-3000-3500
SOLHO APARELHADO	8	120-200	2200-3000-3500
MADEIRA PARA MOBILIÁRIO			
MOLDURA	16-50	80-300	2200-2600
PALETE			
MADEIRA DE PALETE	16 - 18 -22	80 a 145	800 - 1000 - 1200
OBS: Com exceção de vigas e barrotes, os produtos têm larguras medidas de 1 cm em 1 cm.			

Figura -
Portfólio
de
produtos (serração)

FONTE: (AIMMP 2006b)

Estudos destacam que o aproveitamento integral da madeira serrada exige uma rastreabilidade eficiente desde a origem florestal, o que permite planejar melhor o destino de subprodutos como serrim e costaneiros (Malinverno et al. 2024). A disponibilidade de madeira depende de florestas bem geridas e em expansão, com a Europa apresentando um crescimento líquido de área florestal nos últimos 25 anos, o que deverá assegurar matéria-prima sustentável para as serrações (CEI-Bois e EOS 2019).

Além disto, a logística do pinho é fortemente dependente dos fornecedores, que apresentam alguma concentração em Portugal, sendo decisivos na determinação do preço da madeira e que atuam como intermediários entre os silvicultores e a indústria de transformação. Antigamente, as empresas de serração possuíam frotas próprias, mas a tendência atual é a terceirização do transporte, restringindo o uso da frota ao escoamento dos produtos acabados. Desta forma, o fornecimento é afetado por: sazonalidade da colheita, regulações ambientais e certificação florestal (ex.: FSC, PEFC). Além disso, a crescente substituição de áreas de pinho por eucalipto, incentivada por modelos de negócio baseados em lucros partilhados, levanta preocupações quanto à sustentabilidade da fileira do pinho (AIMMP 2010d).

Em 2021, o consumo de madeira de pinho sem casca em Portugal atingiu 4,1 milhões de metros cúbicos, um aumento de 1,3% em relação a 2020, mantendo a tendência dos últimos cinco anos. Quanto à repartição por subsetores, a serração liderou, representando 41% do consumo total de madeira de pinho enquanto indústrias de painéis e papel de embalagem corresponderam a 31%, e o setor energético (pellets e biomassa) ficou com 24%. A serração foi o único setor que registou aumento no consumo de madeira em 2021, crescendo 7% (Centro PINUS 2022).

O défice estrutural de madeira (diferença entre o consumo industrial e a quantidade disponível para corte) manteve-se em 57% em 2021, reflexo da diminuição dos recursos florestais, especialmente do pinheiro-bravo, cujo volume em crescimento caiu 37% entre 2005 e 2019 o que levou à importação de madeira. O défice de madeira, agravado pelo contexto económico da pandemia, tornou-se mais evidente no segundo semestre de 2021, dificultando o abastecimento das empresas do setor. Para mitigar este cenário, aumentou-se a utilização de materiais reciclados: o consumo de resíduos de madeira cresceu 19% e o de papel e cartão reciclados subiu 2% no setor de painéis e papel de embalagem, promovendo práticas de economia circular (Centro PINUS 2022).

A serração é o principal processo de transformação da madeira, no qual, após o processamento, os resíduos gerados são usualmente utilizados para produção de calor nas próprias instalações ou enviados a outras indústrias (painéis e celulose), o que contribui para o reaproveitamento total da matéria-prima (AIMMP, 2010a).

Na serração, as operações de transformação dividem-se em dois grandes grupos: as que envolvem a conversão do toro descascado em peças paralelepípedicas por meio de serragem (incluindo operações como abrir, desdobrar e alinhar), e aquelas realizadas preferencialmente após a secagem, destinadas a eliminar partes das peças com defeitos que possam comprometer a sua qualidade. Assim, considera-se a primeira transformação como o processo inicial de corte do toro de madeira verde para obtenção de pranchas, alinhadas ou não. Já a segunda transformação refere-se ao corte adicional dessas peças, visando adequá-las para posterior processamento, através de operações de traçagem (no comprimento) e galgamento (na largura), sendo estas as últimas etapas antes da laboração final das peças (AIMMP 2006b).

O conjunto de máquinas e ferramentas utilizadas nas serrações tem-se tornado progressivamente mais especializado e automatizado, com o objetivo de reduzir custos e aumentar a qualidade e a rentabilidade dos processos. Exemplos dessa evolução incluem alinhadeiras-multisserra, linhas de cubicagem e triagem, resserradeiras com disco móvel ajustável ao comprimento das peças, equipamentos a laser, entre outros (AIMMP 2006b).

As principais atividades desta indústria incluem a preparação, que envolve a medição e triagem de toros, seguida do armazenamento das madeiras classificadas; o descasque; o corte e aplainamento, com a extração de costaneiros e a serragem em pranchas ou régua húmidas; o empilhamento; e, por fim, a seleção das peças produzidas (AIMMP 2010d). A Figura apresenta um fluxograma sintético dos processos adotados na serração.

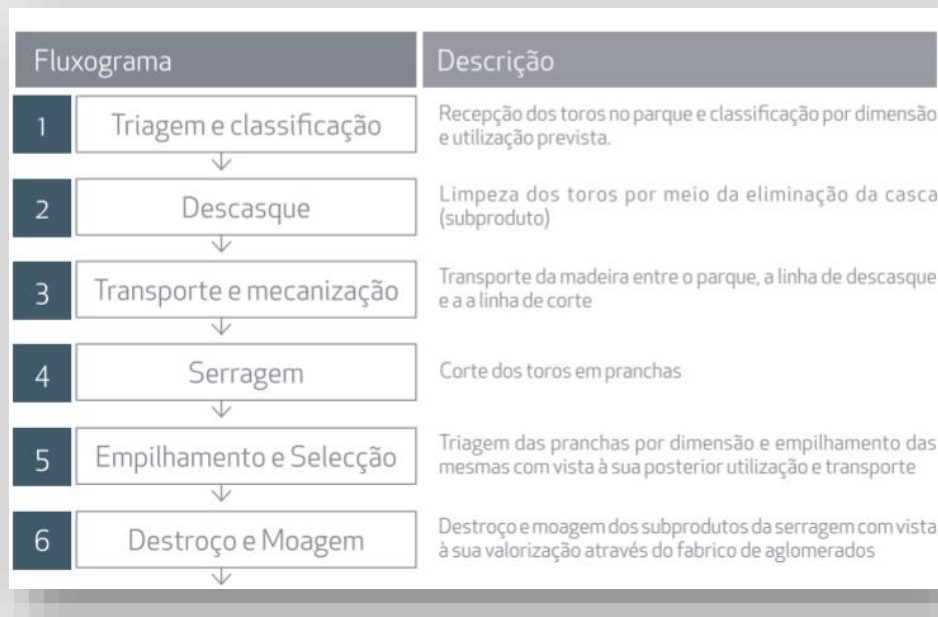


Figura – Fluxograma - Serração

Fonte: (AIMMP 2010d)

A Figura apresenta um fluxograma que resume os principais vetores da cadeia de valor da serração.

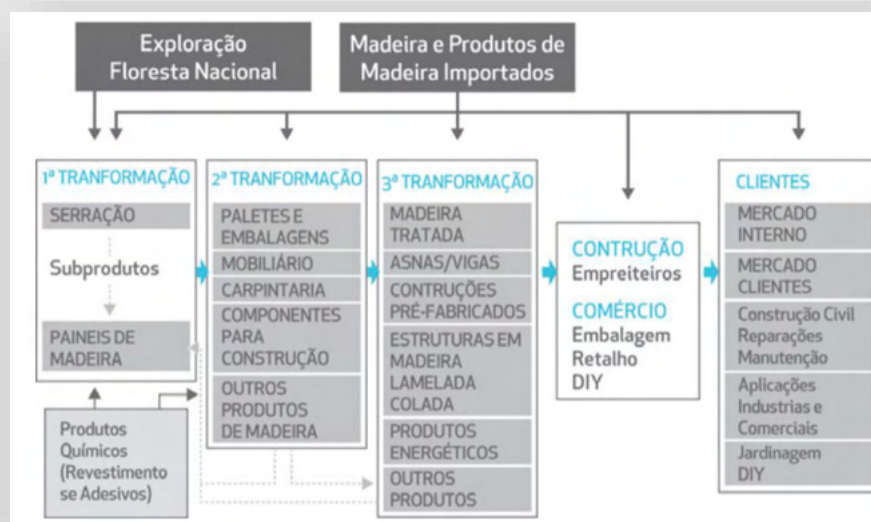


Figura - Cadeia de valor - Serração

Fonte: (AIMMP 2010d)

Os produtos são usualmente distribuídos por venda direta para empresas da construção civil, fábricas de móveis e revendedores de madeira. Também ocorre a exportação, embora em menor escala. No início do século XX, a exportação de madeira serrada para embalagens foi decisiva para a multiplicação e expansão das serrações em Portugal (AIMMP 2010d). Entre os destinos mais relevantes da madeira serrada destacam-se também os setores de postes, varas, vedações e componentes para mobiliário e construção (AIMMP 2010d).

As formas de transporte mais comuns incluem camiões de médio e grande porte. A logística do pinho é frequentemente executada por empresas terceirizadas, uma vez que as serrações deixaram de manter frotas próprias, concentrando-se no escoamento dos produtos acabados (AIMMP 2010d). A leveza dos produtos de madeira serrada reduz custos logísticos e as emissões associadas ao transporte, promovendo uma distribuição ambientalmente eficiente (CEI-Bois e EOS 2019).

A triagem no parque de madeiras (manual ou mecanicamente) é fator crítico para a produtividade da serração, impactando diretamente a eficiência do fluxo logístico e a organização da distribuição (AIMMP 2010d). A logística de distribuição da madeira serrada depende da triagem eficaz e do planeamento dos fluxos, o que impacta diretamente a produtividade (Malinverno et al., 2024).

A madeira serrada é amplamente utilizada na construção civil e na produção de móveis, sendo seu uso intensificado pela procura por materiais com menor pegada de carbono (Boiger et al. 2024). Os principais consumidores da madeira serrada são as indústrias da construção civil (estrutura e revestimento), mobiliário (matéria-prima para peças) e de embalagens (paletes, caixas), além de consumidores energéticos, como usinas de biomassa. Durante a produção de madeira serrada, os resíduos como costaneiros, estilha e serradura são utilizados internamente para geração de calor ou enviados a indústrias de painéis e pasta de papel, além de centrais de biomassa (AIMMP 2010d).

A valorização dos subprodutos tem permitido à indústria explorar novos mercados, como a fabricação de blocos para paletes e produtos de aglomerado, ou a produção de energia sob forma de pellets. A madeira, ao final de sua vida útil, pode ainda ser reutilizada, reciclada ou convertida em energia de forma ambientalmente neutra, reafirmando sua vocação como recurso sustentável e circular (AIMMP 2010d). A serração da madeira em Portugal está sujeita a um conjunto de normas técnicas nacionais e europeias, com destaque para os regulamentos e normas listadas na Tabela Regulamentações para a serração, que abrangem desde as condições de funcionamento industrial e segurança, até à classificação, qualidade, rastreabilidade e sustentabilidade dos produtos. O cumprimento destas normas é essencial para garantir a qualidade dos produtos, a segurança dos trabalhadores e a conformidade legal e ambiental do setor.

Norma/Regulamento	Objetivo principal	Aplicação
Decreto n.º 46318/1965	Regulamento da indústria de serração	Instalação, funcionamento
EN 14081-1	Marcação CE e classificação estrutural	Madeira para construção
EN 408:2010	Ensaio físicos e mecânicos	Madeira estrutural
EN 12246/12248/12249	Classificação e tolerâncias para embalagens/paletes	Madeira industrial
EN 844-6/844-9	Terminologia e singularidades	Madeira serrada
NP EN ISO 9001:2015	Gestão da qualidade	Processos industriais
RUEM (UE 995/2010)	Legalidade e rastreabilidade	Toda a cadeia da madeira

Tabela – Regulamentações para a serração

Pellets

A produção global de pellets de madeira apresentou forte expansão nas últimas décadas, impulsionada principalmente pelas metas de bioenergia estabelecidas por países europeus, Coreia do Sul e Japão. Em 2023, a Europa foi responsável por 70% do consumo global de pellets de madeira, enquanto a região Ásia-Pacífico respondeu por 26% (FAO 2024).

No processo de produção de pellets, o serrim é submetido a compressão mecânica, adquirindo a forma cilíndrica característica deste combustível sólido. O material é transportado por tapetes até às granuladoras, onde atravessa prensas que, com a adição controlada de vapor de água, favorecem a aglutinação das partículas e a formação dos grânulos. Após esta etapa, os pellets são encaminhados para silos de armazenamento ou para linhas de ensacamento e paletização. Os pellets rejeitados regressam à moagem a seco, sendo reintegrados no ciclo produtivo sem desperdício (SGCIE 2019).

Para o processo de produção de pellets, tradicionalmente são adotados os processos detalhados na Tabela - Descrição dos processos relativos ao fabrico de pellets e sintetizados no fluxograma simplificado do processo apresentado na Figura Fluxograma simplificado do processo – Pelletização (Produção de pellets).

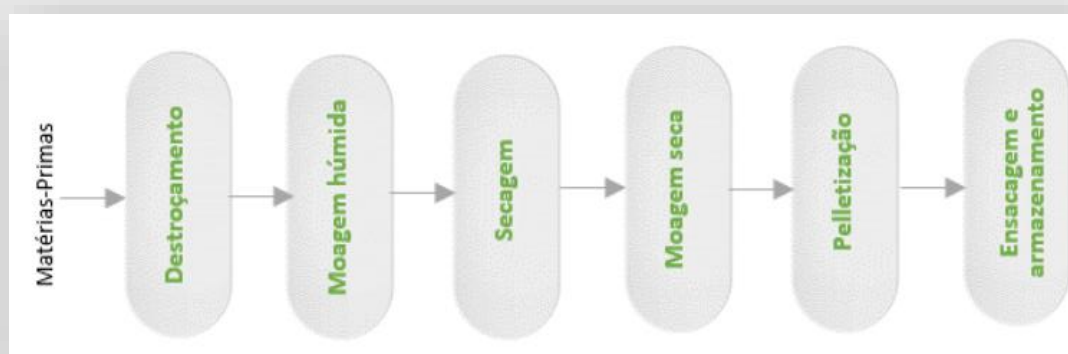


Figura- Fluxograma simplificado do processo – Pelletização (Produção de pellets)

FONTE: (SGCIE 2019)

Etapa	Descrição
Destroçamento	O processo tem início com o transporte da madeira por tapetes e redlers até aos descascadores e destroçadores, que convertem a rolaria em estilha de pinho (fragmentos entre 3 e 10 cm). Em seguida, o material é armazenado e misturado com outros resíduos, como serrim.
Moagem húmida	A mistura de estilha e serrim passa por um crivo que separa o serrim da estilha de tamanho adequado; a estilha mais grossa é descartada e o serrim é armazenado. A estilha restante é moída nos chamados moinhos de verdes para redução do tamanho.
Secagem	O serrim húmido é colocado num secador rotativo horizontal, onde é seco utilizando os gases provenientes das fornalhas de biomassa. Após atingir um teor de humidade entre 8% e 12%, o material segue por tapetes até ao silo de armazenamento ou para os moinhos secos.
Moagem seca	O material passa por um crivo que separa as partículas mais finas (serrim). O restante é processado em moinhos de martelos de diferentes configurações, assegurando a uniformidade do tamanho, sendo preferível que fique com textura semelhante a pó de pellet.

Pelletização	O serrim é comprimido mecanicamente, adquirindo a forma cilíndrica dos pellets. É transportado até às granuladoras e prensas, onde, com a adição de vapor de água, ocorre a aglutinação e formação dos pellets.
Ensacagem e armazenamento	Os pellets já formados são armazenados em silos, prontos para posterior ensacamento e/ou distribuição.

Tabela 1 - Descrição dos processos relativos ao fabrico de pellets

FONTE: Adaptado de (SGCIE 2019)

As formas de energia mais utilizadas nesta atividade são a energia elétrica, que representa 39,8% do consumo energético, sendo utilizada como força motriz em diversos equipamentos dos processos produtivos, iluminação, ar comprimido, sistemas de ventilação e ciclones. A biomassa primária sólida corresponde a 37,0% e a madeira ou resíduos de madeira a 21,5%, ambas empregues principalmente na produção de ar quente para a secagem da matéria-prima. Já o gasóleo, com uma representatividade de 1,7%, é utilizado na frota automóvel, em máquinas de transporte de madeira, biomassa florestal e outros usos (SGCIE 2019).

Os pellets de madeira produzidos e comercializados em Portugal devem cumprir critérios de qualidade e padronização reunidos nos documentos listados na Tabela - Regulamentações e certificações para pellets. Embora a certificação ENplus para garantir elevados padrões de qualidade, segurança e sustentabilidade, seja voluntária, ela é altamente valorizada tanto no mercado nacional quanto internacional, promovendo a confiança dos consumidores e a competitividade do setor. O cumprimento rigoroso das normas técnicas e ambientais é fiscalizado por entidades nacionais e organismos de certificação independentes, assegurando que os pellets portugueses apresentem desempenho consistente e provenham de matérias-primas sustentáveis.

Norma/Certificação	Objetivo principal	Parâmetros-chave	Aplicação
ISO 17225-2	Requisitos técnicos para pellets	Qualidade, composição, ensaios	Produção e comercialização
ENplus	Certificação de qualidade europeia	Classes A1, A2, B; rastreabilidade	Cadeia completa
DINplus	Certificação de qualidade alemã	Parâmetros similares à ENplus-A1	Produção e comercialização
EN 14961-2	(Obsoleta) Requisitos para pellets	Substituída pela ISO 17225-2	Histórico

Tabela - Regulamentações e certificações para pellets

Impregnação da madeira

O CAE 16102 refere-se à impregnação e ao tratamento químico da madeira com agentes de conservação ou outros produtos (INE 2007).

A procura por madeira tratada tem vindo a crescer, mas condicionada à comprovação de baixo impacto ambiental e à rastreabilidade (Gangsø et al. 2025). Há uma procura crescente por produtos de madeira tratada que cumpram requisitos de rastreabilidade, rotulagem ambiental e responsabilidade social. Destaca-se que consumidores e compradores institucionais estão

priorizando produtos impregnados que demonstrem transparência quanto à origem da madeira e segurança química de uso final (Good Wood Project 2020). A madeira tratada é preferida em aplicações estruturais, particularmente em ambiente exterior, pela sua durabilidade e por substituir materiais baseados em combustíveis fósseis (CEI-Bois e EOS 2019).

O processo de impregnação da madeira consiste numa técnica destinada a aumentar a sua durabilidade, protegendo-a contra a ação de insetos, fungos e outros agentes de degradação. Em Portugal, este procedimento é realizado em várias fases, assegurando um tratamento eficaz que torna a madeira mais durável e adequada para múltiplas utilizações, como construção civil, mobiliário de exterior, postes, cercas e outras aplicações que exigem elevada resistência às condições ambientais adversas. Existem diversos métodos para impregnar conservantes na madeira, conforme ilustrado na Tabela, sendo que a eficácia da proteção está diretamente relacionada com o grau de penetração do conservante no material (INEGI e SerQ 2024).

Método	Descrição
Pincelagem	A madeira recebe uma aplicação superficial do produto de tratamento por meio de pincelamento, resultando numa impregnação apenas na camada externa.
Imersão	O método consiste em submergir completamente a madeira num reservatório com conservantes; quanto mais tempo permanecer imersa, maior será a penetração do produto.
Impregnação a quente e a frio	A madeira é alternadamente mergulhada em banhos de conservante quente e frio. No banho quente, o ar interno expande-se e, ao passar para o banho frio, ocorre um efeito de sucção que facilita a entrada do conservante na madeira.
Processo de osmose	Baseado na difusão, utiliza-se um conservante pastoso aplicado sobre madeira ainda húmida. As peças são empilhadas e cobertas cuidadosamente, permanecendo assim até três meses para permitir a penetração gradual do produto.
Impregnação por pressão/vácuo	O conservante é introduzido na madeira sob alta pressão (até 10 bar), permitindo uma distribuição mais uniforme e uma penetração mais profunda do agente de proteção.

Tabela - Principais métodos para impregnar conservantes na madeira
FONTE: Adaptado de (INEGI e SerQ 2024)

Um diagrama do processo de fabrico típico do subsector de impregnação de madeira é ilustrado na Figura - Diagrama do processo de fabrico típico do subsector de impregnação de madeira.

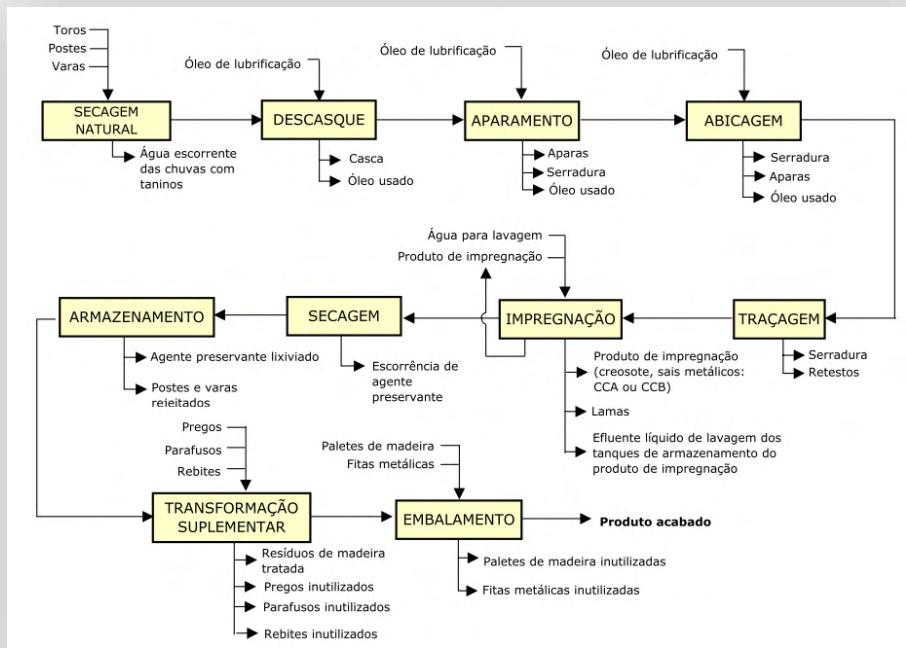


Figura - Diagrama do processo de fabrico típico do subsector de impregnação de madeira
FONTE: (INETI 2001)

O processo de impregnação é variável a depender do método adotado. As principais etapas estão descritas na Tabela - Descrição dos processos relativos a impregnação de madeira.

Processo	Descrição
Seleção e Preparação da Madeira	Seleção da madeira apropriada para o tratamento, considerando a espécie e o uso final pretendido, seguida do corte e dimensionamento conforme as necessidades do processo.
Secagem da Madeira	Secagem da madeira até atingir o teor de humidade ideal, podendo ser realizada ao ar livre ou em estufas controladas.
Inspeção	Avaliação visual e mecânica para identificar possíveis defeitos ou danos na madeira antes do tratamento.
Preparação do substrato	Limpeza completa da madeira para remover sujidade, poeira e resíduos, seguida de lixagem (granulometria 150–200) para garantir uma superfície lisa; o pó resultante é cuidadosamente eliminado.
Verificação da concentração	Confirmação da concentração de substância ativa na solução de impregnação a ser utilizada.
Aplicação da solução	Aplicação da solução de impregnação conforme o método previamente selecionado.
Remoção do excesso de solução e secagem	Após a impregnação, o excesso de solução é removido e a madeira passa por uma secagem lenta e uniforme para estabilização.
Inspeção Final e Qualidade	Realização de inspeção final para assegurar a eficácia do tratamento, podendo incluir testes de penetração e retenção do conservante para garantir a qualidade.
Embalagem e Armazenamento	Embalagem e armazenamento da madeira tratada em condições adequadas, em ambientes secos e ventilados, para evitar contaminação ou danos até à distribuição.
Distribuição	Organização logística para a entrega da madeira tratada aos clientes ou pontos de venda, assegurando transporte seguro e cumprimento dos prazos estabelecidos.

Tabela - Descrição dos processos relativos a impregnação de madeira

FONTE: Adaptado de (INEGI e SerQ 2024)

Na Europa, os produtos químicos destinados à preservação da madeira devem ser aprovados e validados pela Agência Europeia dos Produtos Químicos (ECA), sendo autorizadas diferentes substâncias com aplicações e níveis de toxicidade variados. As formulações comerciais geralmente consistem em misturas de biocidas, fungicidas e bactericidas. Em Portugal, desde a deteção do nemátodo-da-madeira-do-pinheiro em *Pinus pinaster* na Península de Setúbal em 1999, toda a madeira impregnada com produtos preservadores utilizada em travessas ferroviárias, postes, cercas, telhas, decks, revestimentos, janelas, casas de madeira e muitas outras aplicações também precisa ser submetida a um tratamento térmico (HT) adicional, conforme os requisitos da ISPM 15, o que resulta em aumento dos custos e do tempo de produção (Fonseca, Silva e Abrantes 2023).

Em Portugal, a preservação da madeira e o tratamento de produtos derivados seguem normas técnicas nacionais e europeias, além de regulamentação fitossanitária e ambiental, com destaque para os regulamentos e normas listadas na Tabela - Regulamentações para preservação da madeira.

Norma/Regulamento	Objetivo principal	Aplicação
NP 4487:2012	Tratamento térmico fitossanitário	Madeira de resinosas, embalagens
NP EN 335:2018	Classes de risco biológico	Escolha do tipo de preservação
Decreto-Lei n.º 95/2011	Controlo fitossanitário (nemátodo do pinheiro)	Madeira de coníferas
Decreto-Lei n.º 123/2015	ISPM 15 – Tratamento e marcação	Embalagens de madeira para exportação
RUEM (UE)	Legalidade e rastreabilidade	Toda a cadeia de valor da madeira

Tabela – Regulamentações para preservação da madeira

Destaca-se a norma portuguesa NP 4487:2012, que define os procedimentos de tratamento térmico para madeira de resinosas, especialmente para embalagens, alinhando-se com os requisitos internacionais da ISPM 15. A norma europeia NP EN 335:2018 estabelece as classes de risco biológico, orientando a escolha do tipo de preservação e do produto químico mais adequado ao uso final da madeira.

Além das normas, a legislação nacional, como o Decreto-Lei n.º 95/2011 e o Decreto-Lei n.º 123/2015, impõe obrigações de tratamento, rastreabilidade e marcação, especialmente para o controlo do nemátodo da madeira do pinheiro e para exportação de embalagens de madeira. O Regulamento da UE sobre a Madeira também exige rastreabilidade e legalidade em toda a cadeia de valor. Os tratamentos mais comuns incluem o uso de soluções de sais hidrossolúveis aplicados por autoclave, sendo obrigatória a certificação das empresas e o cumprimento rigoroso das normas técnicas e legais. O controlo e a fiscalização destes processos são assegurados por entidades como a DGAV (Direção-Geral da Alimentação e Veterinária) e o ICNF (Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas).

A disponibilidade de produtos químicos seguros e a rastreabilidade da madeira influenciam diretamente o fornecimento de madeira para impregnação (Gangsø et al. 2025). Além disto, a sustentabilidade do fornecimento de madeira tratada depende do uso de produtos químicos ambientalmente mais benignos e de madeiras de florestas certificadas (CEI-Bois e EOS 2019)

O setor europeu de tratamento de madeira busca tecnologias que permitam simultaneamente desempenho técnico e menor impacto ambiental. Isso inclui o desenvolvimento de produtos preservadores menos tóxicos, a implementação de sistemas de reaproveitamento de produtos químicos e a recomendação de políticas públicas de incentivo à modernização verde dessas tecnologias (CEI-Bois e EOS 2024a). Tratamentos modernos como modificações térmicas e químicas têm ampliado a durabilidade da madeira, reduzindo a dependência de materiais de alto impacto (CEI-Bois e EOS 2019).

O acesso ao mercado depende da conformidade com normas de rotulagem ambiental e segurança química, o que influencia as redes de distribuição (Gangsø et al. 2025). Produtos tratados de alto desempenho expandem a viabilidade comercial para usos exigentes, aumentando sua competitividade no mercado (CEI-Bois e EOS 2019).

A indústria da madeira tratada enfrenta crescente pressão regulamentar por soluções que eliminem substâncias tóxicas e reduzam os riscos ambientais do tratamento químico. A revisão das diretivas sobre produtos químicos, em especial no contexto do Pacto Ecológico Europeu, afeta diretamente a formulação dos produtos preservadores utilizados em processos industriais como a impregnação sob pressão (CEI-Bois e EOS 2024b).

A dinâmica do setor é moldada por um cenário regulamentar e económico cada vez mais exigente, com normas rigorosas para o uso de produtos químicos, gestão de resíduos e efluentes, além de exigências específicas para rotulagem, transporte e manuseio desses materiais. A volatilidade nos preços de insumos químicos e energia impacta diretamente os custos operacionais, enquanto preocupações sociais relacionadas à saúde e à exposição a substâncias tóxicas impulsionam a busca por inovações tecnológicas e o desenvolvimento de preservantes menos agressivos e processos mais seguros.

Restrições ao uso dos produtos preservadores tradicionais exigem reconfigurações produtivas e substituição de insumos, implicando ajustes técnicos e financeiros significativos. Ao mesmo tempo, a evolução das regulamentações ambientais demanda investimentos contínuos em tecnologias limpas para garantir conformidade e sustentabilidade. Nesse contexto, é fundamental equilibrar a eficácia dos tratamentos com requisitos ambientais, segurança e saúde ocupacional ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos, promovendo o desenvolvimento de agentes preservadores menos tóxicos, a otimização dos processos de aplicação para minimizar a exposição ocupacional e a integração de metodologias de avaliação de risco ambiental e de impacto à saúde humana em toda a cadeia produtiva.

Painéis derivados de madeira

O CAE 1621 abrange a fabricação de folheados e painéis à base de madeira, incluindo a produção de painéis de partículas de madeira (CAE 16211), que compreende também o seu revestimento por pintura ou outras técnicas de decoração, e a atividade de painéis de partículas com cimento, bem como a fabricação de painéis de fibras de madeira (CAE 16212). Inclui ainda a fabricação de folheados, contraplacados, lamelados e outros painéis (CAE 16213), que envolve a produção de folhas de madeira finas obtidas por serragem, corte ou outros processos, podendo estas ser pintadas, revestidas, impregnadas ou reforçadas com papel ou tecido, assim como o revestimento de folheados, contraplacados, lamelados e outros painéis. Esta classificação não inclui a fabricação de madeira serrada com espessura superior à utilizada nos contraplacados (CAE 16101) (INE 2007).

Esta secção abrange vários produtos e diversos critérios são utilizados para classificar os produtos principais dentro destas divisões, como a tecnologia usada no processo produtivo, a origem das espécies arbóreas, a densidade dos painéis e uso do produto final (FAO 2022).

O setor de painéis fabrica uma variedade de produtos versáteis. Esses materiais estão cada vez mais avançados tecnologicamente, com versões resistentes à humidade e ao fogo, o que amplia suas aplicações tanto na indústria como na construção civil, incluindo mobiliário, produtos manufaturados e componentes estruturais e não estruturais de edifícios. Acompanhando a tendência de reciclagem, a Federação Europeia de Painéis estabeleceu padrões rigorosos quanto ao teor de impurezas permitido nos produtos finais, garantindo que sejam seguros e ambientalmente responsáveis (CEI-Bois e EOS 2019).

Os painéis à base de madeira foram originalmente desenvolvidos para valorizar madeiras de baixa qualidade e, atualmente, representam produtos amplamente consolidados no mercado. Hoje, resíduos e subprodutos provenientes da produção primária de madeira serrada, bem como parte da madeira reaproveitada, são aproveitados na fabricação desses painéis, exemplificando de forma clara a aplicação do conceito de utilização em cascata. Além disso, resíduos de madeira e adesivos à base de epóxi podem ser aproveitados a partir das sobras do processo produtivo, o que diminui a necessidade de adesivos convencionais e favorece a produção de painéis mais fáceis de reutilizar e reciclar. Estudos demonstram que a utilização de 30% a 40% de resíduos de madeira em combinação com adesivos epóxi preserva propriedades mecânicas e físicas satisfatórias nos painéis, equiparando-se àqueles fabricados com adesivos tradicionais. Essa abordagem contribui tanto para a sustentabilidade ambiental quanto para a eficiência dos processos industriais (Lima et al. 2024).

O painel de madeira reúne todas as características positivas da madeira serrada, com o benefício adicional de minimizar problemas típicos como empenos e fissuras após o corte. A qualidade final do painel está diretamente relacionada à eficiência da ligação entre as peças, que depende do processo de secagem dos adesivos utilizados. Existem diversas técnicas e recursos empregados na sua produção, desde diferentes tipos de máquinas e colas até métodos variados de fabricação (AIMMP 2006b).

O segmento de painéis de madeira é o que mais ampliou o uso de materiais reciclados. Em 1970, os fabricantes europeus de aglomerados empregavam cerca de um terço de madeira reciclada e dois terços de fibra virgem. Hoje, a indústria de painéis na União Europeia é o segundo maior consumidor de fibras secundárias, perdendo apenas para o setor de bioenergia, com metade das matérias-primas provenientes de fontes pós-consumo. Além disso, alguns produtores já estão aptos a utilizar 100% de resíduos industriais e madeira recuperada (CEI-Bois e EOS 2019).

Uma vez que a cadeia de fornecimento para painéis utiliza madeira reciclada, resíduos de serração e madeira pós-consumo (CEI-Bois e EOS 2019), pode favorecer a circularidade e a sustentabilidade ao estender a vida útil dos recursos florestais e reduzir a necessidade de extração de matéria-prima virgem.

A fabricação de painéis de partículas consiste em compactar e colar partículas de madeira para formar placas que servem como matéria-prima para móveis e construção. O processo normalmente envolve etapas como preparação e secagem das partículas, fibras, strands ou folheado, mistura com resina, formação de camadas, prensagem a quente para garantir a compactação e a cura, além do resfriamento, lixamento e corte final dos painéis. Para isso, utiliza-se tecnologia avançada, incluindo linhas de produção contínua automatizadas, sistemas de controle de temperatura, pressão e humidade, e prensas industriais. O processo exige o trabalho de técnicos operacionais, operadores de máquinas e engenheiros de produção e pode envolver processos tecnicamente avançados, com variações que incorporam resistência à umidade, ao fogo e a agentes biológicos.

O diagrama do processo de fabrico típico do subsector de Fabricação de Painéis de Fibras e de Partículas de Madeira é demonstrado na *Figura - Diagrama do processo de fabrico típico do subsector de Fabricação de Painéis* e do subsector de Fabricação de Folheados, Contraplacados, Lamelados e Outros Painéis na *Figura - Diagrama do processo de fabrico típico do subsector de Fabricação de Folheados, Contraplacados, Lamelados e Outros*.

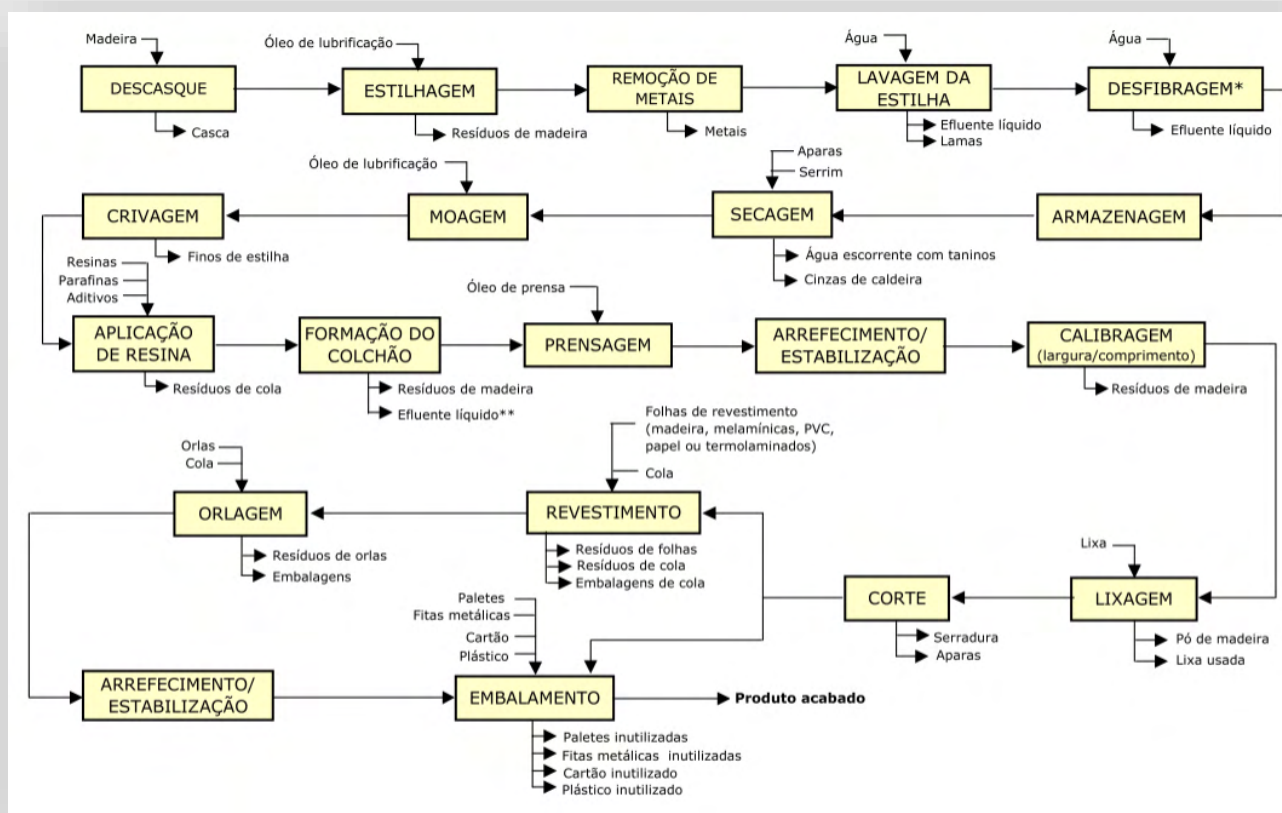


Figura - Diagrama do processo de fabrico típico do subsector de Fabricação de Painéis

FONTE: (INETI 2001)

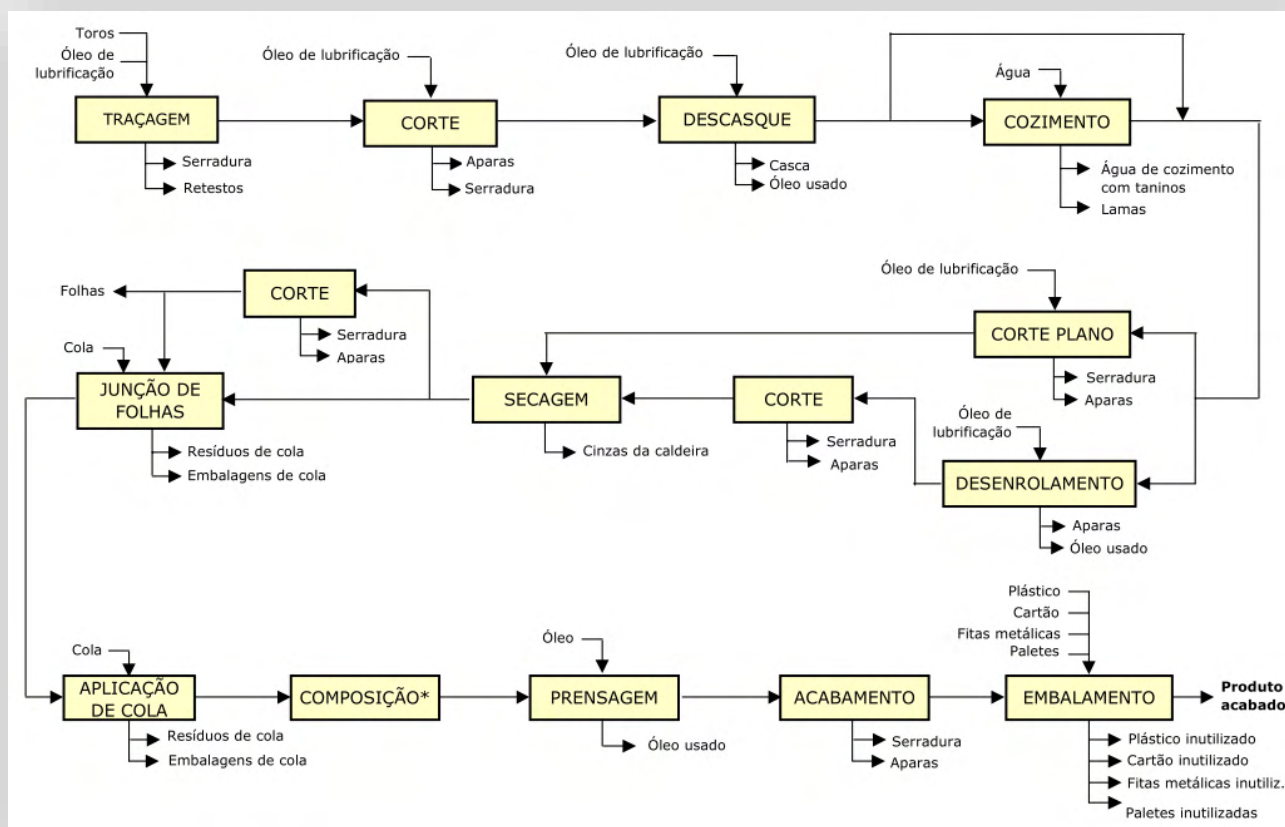


Figura 1- Diagrama do processo de fabrico típico do subsector de Fabricação de Folheados, Contraplacados, Lamelados e Outros

FONTE: (INETI 2001)

Nas tabelas a seguir estão detalhadas as etapas principais relacionadas a produção de painéis de partículas (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**- Descrição dos processos relativos ao fabrico de painéis de partículas de madeira), fibras (Tabela - Descrição dos processos relativos ao fabrico de painéis de fibras de madeira) e folheados, contraplacados, lamelados e de outros painéis (Descrição dos processos relativos ao fabrico de folheado e contraplacado).

Processo		Descrição
Receção da Matéria-Prima		Receção de madeira, incluindo resíduos, aparas, cavacos e serragem provenientes de serrações e outras indústrias do setor.
Produção de partículas de madeira	Descascamento	As toras passam por um processo de descasque, já que a casca não é adequada para a produção de painéis derivados de madeira.
	Fragmentação	Na fragmentação em duas etapas, a madeira roliça é inicialmente picada em cavacos, cujo tamanho influencia o comprimento das partículas ou fibras geradas posteriormente.
	Picagem	Um picador de tambor multifacas transforma os cavacos em partículas menores.
	Seleção e Classificação	As partículas de madeira são selecionadas e classificadas para garantir uniformidade de tamanho e qualidade, sendo impurezas como metais e pedras removidas com detetores magnéticos e outros equipamentos de triagem.

	Secagem	A secagem das partículas e “strands” é feita em secadores de tambor ou de esteira, reduzindo o teor de humidade para níveis adequados à prensagem.
	Classificação Pós-Secagem	Após a secagem, as partículas são separadas por tamanho em peneiras vibratórias, dividindo-se em frações finas e grossas para otimizar a estrutura dos painéis.
Produção dos painéis	Colagem	As partículas classificadas são misturadas com resinas sintéticas (geralmente ureia-formaldeído) e aditivos como endurecedores e repelentes de água, utilizando misturadores rotativos para assegurar distribuição homogênea da resina.
	Deposição - Formação do Colchão	A mistura de partículas e resina é distribuída sobre uma esteira, formando um colchão em várias camadas para garantir densidade uniforme e propriedades desejadas; o sistema de deposição assegura distribuição homogênea longitudinal e transversal, bem como a criação de camadas nos estratos de cobertura e intermediários do painel.
	Aplicação de líquido	Podem ser aplicados água, desmoldantes e outros aditivos antes da prensagem.
	Medição de peso por superfície	Uma balança de superfície com raios X verifica o colchão antes da prensa, controlando o perfil de densidade e detetando corpos estranhos.
	Prensagem	O colchão é prensado em prensas contínuas ou de ciclo, sob alta pressão e temperatura, endurecendo o adesivo e comprimindo o colchão até à espessura desejada.
	Arrefecimento	Após a prensagem, os painéis são condicionados em dissipadores de calor até atingirem a temperatura de armazenamento, sendo o resfriamento gradual essencial para evitar deformações e tensões internas; este processo pode ser realizado em racks ou por ar forçado.
	Corte e Dimensionamento	Os painéis arrefecidos são cortados nas dimensões finais com serras longitudinais e transversais, eliminando imperfeições e garantindo medidas precisas.
	Lixagem e Acabamento	Os painéis passam por lixagem para obter uma superfície lisa e uniforme, podendo ser aplicados revestimentos decorativos ou laminados para melhorar o aspeto e a durabilidade.
	Inspeção de Qualidade	Realiza-se uma inspeção final para garantir o cumprimento dos padrões de qualidade e das especificações do cliente, incluindo testes físicos e mecânicos como resistência à flexão e à tração.
	Embalamento e Armazenamento	Os painéis são embalados para proteção durante o transporte e armazenamento, sendo guardados em locais apropriados até à distribuição.
Expedição		Por fim, os painéis embalados estão prontos para expedição aos clientes ou pontos de venda.

Tabela - Descrição dos processos relativos ao fabrico de painéis de partículas de madeira

FONTE: Adaptado de (INEGI e SerQ 2024)

Processo		Descrição
Receção e limpeza da Matéria-Prima		Receção de madeira, incluindo resíduos, aparas, cavacos e serragem provenientes de serrações e outras indústrias, seguida de limpeza das toras para eliminar sujidade e pedras que possam danificar os equipamentos.
Produção de fibras de madeira	Descascamento	A casca das toras é removida, pois não é adequada para a produção de painéis derivados de madeira.
	Fragmentação	A madeira roliça passa por um processo de fragmentação em duas etapas, sendo inicialmente picada em cavacos; o tamanho desses cavacos influencia o comprimento das partículas ou fibras geradas posteriormente.
	Refinação	As partículas secas são refinadas em equipamentos mecânicos, onde calor e pressão são aplicados para separar as fibras e preparar a massa fibrosa.
	Secagem	A secagem das fibras é realizada em secadores de tambor ou esteira, reduzindo o teor de humidade para níveis adequados à prensagem.
	Seleção e Classificação	As fibras passam por um processo de seleção e classificação, garantindo uniformidade de tamanho e qualidade, com remoção de impurezas como metais e pedras através de detetores magnéticos e outros sistemas de triagem.
Produção dos painéis	Colagem	As fibras selecionadas são misturadas com resinas e aditivos, como endurecedores e repelentes de água, em misturadores rotativos para assegurar distribuição homogênea da resina.
	Deposição - Formação do Colchão	A massa de fibras é distribuída uniformemente sobre uma esteira, formando um colchão contínuo em camadas para garantir densidade e uniformidade.
	Prensagem	O colchão de fibras é prensado em prensas contínuas ou de ciclo, sob alta pressão e temperatura, endurecendo o adesivo e comprimindo o colchão até à espessura desejada.
	Arrefecimento	Os painéis ainda quentes são arrefecidos gradualmente em racks ou sistemas de ar forçado, evitando deformações e tensões internas.
	Corte e Dimensionamento	Após o arrefecimento, os painéis são cortados nas dimensões finais com serras longitudinais e transversais, ajustando as bordas para eliminar imperfeições e garantir medidas precisas.
	Lixagem e Acabamento	Os painéis passam por lixagem para obter uma superfície lisa e uniforme, podendo receber revestimentos decorativos, laminados ou pintura, conforme necessário, para melhorar o aspeto e a durabilidade.
	Inspeção de Qualidade	Realiza-se uma inspeção final para garantir o cumprimento dos padrões de qualidade e das especificações do cliente, incluindo testes físicos e mecânicos, como resistência à flexão, tração, densidade e absorção de água.
	Embalamento e Armazenamento	Os painéis são embalados para proteção durante transporte e armazenamento, sendo guardados em locais adequados até à distribuição.
Expedição		Por fim, os painéis embalados estão prontos para expedição aos clientes ou pontos de venda.

Tabela - Descrição dos processos relativos ao fabrico de painéis de fibras de madeira

FONTE: Adaptado de (INEGI e SerQ 2024)

Processo		Descrição
Folheamento	Seleção da Madeira	Seleção criteriosa de toras de madeira de elevada qualidade, acompanhada de avaliação visual e mecânica para identificar eventuais defeitos.
	Corte das Toras	Corte das toras em blocos com dimensões apropriadas para o processo de folheamento.
	Descascamento	Remoção da casca das toras através de equipamentos mecânicos específicos.
	Cozimento ou Vaporização	As toras são submetidas a cozedura ou vaporização para amaciar a madeira e facilitar o corte em lâminas finas.
	Folheamento	Corte das toras em lâminas finas com máquinas de folheamento, podendo ser realizado por métodos como corte rotativo, faqueamento longitudinal ou corte plano.
	Secagem das Lâminas	As lâminas obtidas são secas para ajustar o teor de humidade.
	Classificação e Inspeção	Classificação das lâminas segundo critérios de qualidade, cor e textura, com inspeção visual para garantir ausência de defeitos.
	Empilhamento e Armazenamento	Empilhamento cuidadoso das lâminas para prevenir deformações e armazenamento em condições controladas até ao uso em contraplacados ou para expedição.
Contraplacado	Preparação das Lâminas	Seleção de lâminas de folheado de diferentes espécies de madeira, conforme a aplicação pretendida.
	Aplicação de Cola	Aplicação de adesivo, geralmente resina fenólica ou ureia-formaldeído, sobre as lâminas.
	Montagem das Lâminas	As lâminas são dispostas em camadas alternadas, com os veios cruzados para aumentar a resistência, sendo o número de camadas ajustado conforme a espessura desejada do contraplacado.
	Prensagem a Quente	Prensagem a quente da pilha de lâminas coladas, com controlo rigoroso de pressão e temperatura para garantir a formação de um painel sólido.
	Corte e Dimensionamento	Corte dos painéis prensados nas dimensões finais, com ajuste das bordas para eliminar imperfeições.
	Lixagem e Acabamento	Lixagem dos painéis para obter uma superfície uniforme, podendo ser aplicados acabamentos como verniz ou laminados, se necessário.
	Inspeção de Qualidade	Inspeção final para verificar a conformidade com os requisitos de qualidade estabelecidos.
	Embalamento e Armazenamento	Embalagem adequada dos painéis para proteção durante o transporte e armazenamento em condições controladas até à expedição.
	Embalamento e Expedição	Os painéis já embalados estão prontos para a expedição.

Tabela - Descrição dos processos relativos ao fabrico de folheado e contraplacado

FONTE: Adaptado de (INEGI e SerQ 2024)

A cadeia de produção de folheados (Figura - Produção de folheados e EWPs à base de madeira folheada) inicia-se com a escolha criteriosa da matéria-prima, podendo envolver tanto madeiras de coníferas quanto de folhosas, selecionadas conforme o objetivo de uso e a disponibilidade de toros com características adequadas. O condicionamento dos toros, que pode ser realizado antes ou depois do descasque, normalmente consiste no seu aquecimento por imersão em água ou exposição ao vapor, o que aumenta a sua flexibilidade e facilita as etapas seguintes de corte ou desenrolamento. Dependendo da qualidade, dimensão e finalidade, os toros são processados em tornos para desenrolamento ou em máquinas de corte. Após essa etapa, as folhas de folheado passam por aparagem para padronizar as dimensões e eliminar imperfeições. Posteriormente, são submetidas à secagem para reduzir a humidade, tornando-as mais apropriadas para processos de colagem e prensagem a quente. Por fim, as folhas secas são classificadas segundo critérios de tamanho, qualidade e outros parâmetros, sendo então empilhadas para posterior processamento ou comercialização (Mo, Haviarova e Kitek Kuzman 2024).

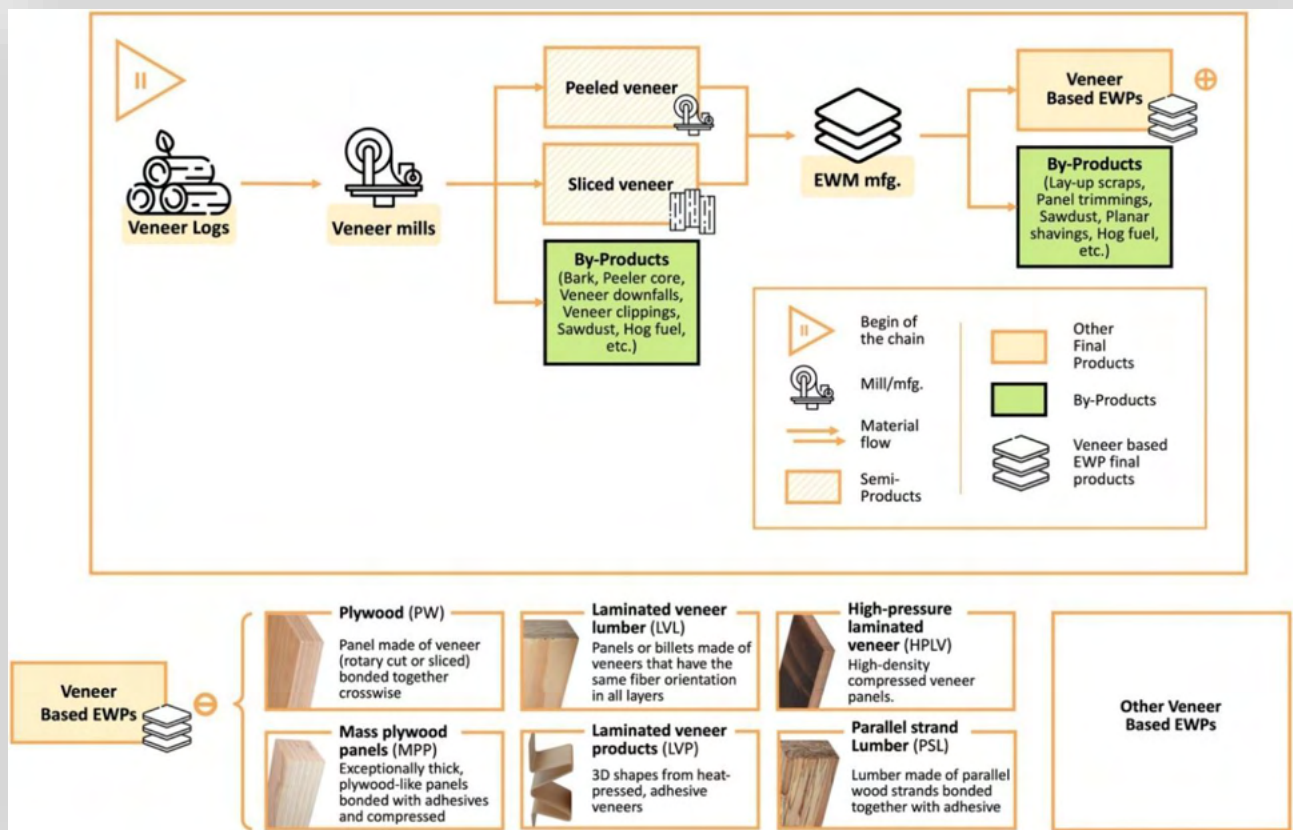


Figura - Produção de folheados e EWPs à base de madeira folheada

FONTE: (Mo, Haviarova e Kitek Kuzman 2024)

As folhas de folheado, sejam cortadas ou desenroladas, constituem os principais semiprodutos das fábricas de folheados e têm aplicações diversificadas em múltiplos setores industriais. Para que esses folheados se transformem em produtos finais, a utilização de adesivos é indispensável, sendo o fenol-formaldeído o adesivo termofixo mais comum na produção de painéis à base de folheado. O folheado cortado destaca-se pelo seu valor decorativo, sendo amplamente utilizado em mobiliário, armários e instrumentos musicais. Já o folheado desenrolado é geralmente destinado à produção de Produtos de Madeira Transformada (*Engineered Wood Products* - EWP, Figura) para aplicações estruturais, como contraplacado (plywood, PW), painéis de folheado maciço (mass-plywood panels, MPP), madeira lamelada de folheado (laminated veneer lumber, LVL), produtos lamelados de folheado (laminated veneer products, LVP), folheado laminado de alta pressão (high-pressure laminated veneer, HPLV) e madeira de fios paralelos (parallel strand lumber, PSL) (Mo, Haviarova e Kitek Kuzman 2024).

A produção de madeira reconstituída Figura - Fabricação de madeira reconstituída e EWP à base de madeira reconstituída para EWP começa com a seleção de matérias-primas lenhosas, classificadas em *strands* (lascas longas), *chips* (fragmentos menores), partículas e fibras. Os *strands* são obtidos de toros descascados de diversas espécies, enquanto *chips* e partículas geralmente provêm de resíduos de serrações ou toros de menor qualidade, e as fibras são originadas de resíduos industriais ou madeira reciclada, maximizando o aproveitamento de materiais. Após a escolha do material, são aplicados adesivos estruturais, como ureia-formaldeído, melamina ureia-formaldeído, resinas fenólicas e MDI, podendo ser combinados com cera, conforme o tipo de produto desejado. A mistura é moldada em mantas ou blocos e prensada para atingir as características físicas pretendidas. O acabamento inclui corte, lixagem e, se necessário, laminação para maior resistência ou aspecto visual (Mo, Haviarova e Kitek Kuzman 2024).

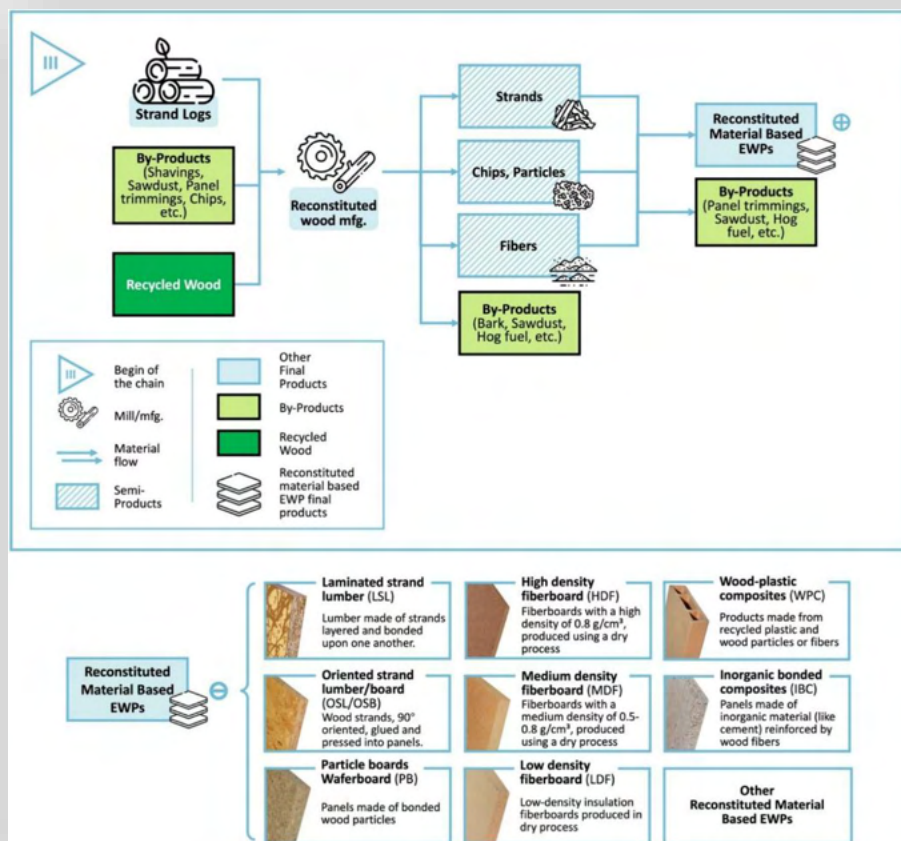


Figura -
Fabricação de
madeira
reconstituída e
EWP à base de
madeira
reconstituída

Fonte: (Mo,
Haviarova e Kitek
Kuzman 2024)

O resultado são diversos EWPs à base de madeira reconstituída (figura), como a madeira lamelada de lascas (laminated strand lumber, LSL), painéis de lascas orientadas (oriented-strand boards, OSB), aglomerados de partículas (particleboards, PB), painéis de lâminas - wafer (waferboard, WB) e painéis de fibras de alta (high-density fiberboard, HDF), média (medium-density fiberboard, MDF) e baixa densidade (low-density fiberboard, LDF). Esses semiprodutos podem ainda ser combinados com outros materiais para formar compósitos, como *wood-plastic composites* (WPCs) e compósitos com ligantes inorgânicos (IBCs). A engenharia desses produtos permite valorizar materiais que, caso contrário, seriam queimados para obter energia ou depositados em aterros sanitários como resíduos, oferecendo soluções modernas e versáteis para construção, mobiliário e outras aplicações onde a madeira maciça pode não ser a alternativa mais eficiente ou sustentável (Mo, Haviarova e Kitek Kuzman 2024).

Resinas à base de formaldeído são frequentemente utilizadas para a produção de painéis, o que revela um padrão de uso de materiais potencialmente prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. No entanto, cresce a necessidade de desenvolver produtos mais sustentáveis, impulsionada pela preocupação crescente com a qualidade, bem como pelos impactos económicos, sociais e ambientais dos processos e produtos (Sugahara et al. 2022).

O formaldeído é uma substância muito bem estudada que pertence ao grupo dos compostos orgânicos voláteis e pode ser liberado no ambiente por processos naturais, como incêndios florestais ou decomposição natural. No entanto, em suas aplicações industriais, possui potencial para causar efeitos adversos à saúde e, por isso, é considerado um agente químico perigoso. O formaldeído é utilizado na produção de vários tipos de resinas que são empregues como adesivos e aglutinantes em muitas indústrias, incluindo a de produtos de madeira. Assim, foi assinado em 2018 entre a Federação Europeia de Painéis e a Federação Europeia de Construtores e Trabalhadores da Madeira o “Acordo Autónomo sobre um Guia de Ação Europeu para a prevenção da exposição ao formaldeído na indústria europeia de painéis e cumprimento dos limites de exposição ocupacional” (Good Wood Project 2020).

Além disso, prevendo-se uma futura escassez de madeira devido aos elevados volumes de produção industrial utilizando espécies específicas, é necessário estudar o uso de diferentes tipos de recursos lenhocelulósicos, bem como adesivos de origem renovável sem compostos orgânicos voláteis na sua composição, e alternativas mais ecológicas aos produtos preservadores químicos (Sugahara et al. 2022).

Neste contexto, a evolução tecnológica das resinas assume um papel crítico, podendo traduzir-se numa vantagem competitiva para algumas empresas ou implicar investimentos significativos para outras. Paralelamente, as oscilações abruptas na procura do mercado do mobiliário colocam desafios à gestão da produção e ao planeamento estratégico, exigindo respostas rápidas que garantam a competitividade e a sustentabilidade do setor. A evolução tecnológica nos processos de classificação de madeira, com a integração de sensores avançados e aprendizagem automática, traz diversas vantagens, como a deteção precisa e eficiente de impurezas, o aumento do controlo de qualidade, a redução do desperdício e a promoção de práticas mais sustentáveis, além de proporcionar escalabilidade e adaptabilidade a diferentes ambientes industriais. No entanto, essa evolução também apresenta desvantagens, como a necessidade de conjuntos de dados de treino altamente diversificados e de qualidade, além das elevadas exigências computacionais para garantir o processamento em tempo real, fatores que podem dificultar a implementação e exigir investimentos significativos em infraestrutura e capacitação técnica (Zorzos et al. 2025).

A distribuição dos painéis é direcionada para mercados como as indústrias do mobiliário, construção civil através principalmente de meios logísticos terrestre como o transporte terrestre através de camiões com os painéis empilhados e embalados.

Os painéis de madeira comercializados e utilizados em Portugal devem cumprir as normas técnicas europeias, assegurando qualidade, segurança e adequação ao uso pretendido. A marcação CE e a rastreabilidade da matéria-prima são requisitos essenciais para o setor, sendo o cumprimento dessas normas rigorosamente fiscalizado por organismos nacionais e europeus, o que garante a confiança dos consumidores e reforça a competitividade do setor português de painéis de madeira. Os principais documentos normativos estão listados na Tabela - Instrumentos normativos de painéis de madeira.

Norma/Certificação	Objetivo principal	Parâmetros-chave	Aplicação
MDP	EN 312	Requisitos técnicos para painéis de partículas	Mobiliário, construção
MDF	EN 622-5	Classes técnicas e propriedades de MDF	Mobiliário, pavimentos
OSB	EN 300	Classes técnicas e requisitos de OSB	Construção, uso estrutural
Compensado	EN 636	Classes técnicas e requisitos de plywood	Construção, mobiliário
Todos	EN 13986	Requisitos gerais, marcação CE, desempenho	Construção, exportação

Tabela - Instrumentos normativos de painéis de madeira

_ Parqueteria

O CAE 1622 refere-se à parqueteria, abrangendo a fabricação de madeira para soalhos montada em painéis, não incluindo a produção de madeira para pavimentos não montados, que se enquadra no CAE 16101 (INE 2007).

A parqueteria em Portugal refere-se ao ofício e à arte de criar pisos de madeira com padrões decorativos complexos, conhecidos como parquet. Este tipo de piso é composto por pequenas peças de madeira que são montadas para formar desenhos geométricos ou artísticos, resultando em um acabamento visualmente atraente e sofisticado (INEGI e SerQ 2024).

O parquet é um revestimento de pavimentos em madeira, fabricado de acordo com critérios técnicos rigorosos para garantir qualidade e autenticidade. Segundo a Federação Europeia do Parquet (FEP), apenas produtos cuja camada superior de madeira maciça possua pelo menos 2,5 mm de espessura podem ser classificados como “parquet”, iniciativa que visa proteger a reputação do produto face à variedade de imitações existentes (FEP 2025b).

De acordo com a FEP (FEP 2025b) existem dois tipos principais de parquet, o parquet de madeira multicamada que é composto por duas ou três camadas de madeira dispostas em ângulos retos,

apresenta uma camada superior de madeira nobre e camadas inferiores em produtos à base de madeira, como HDF ou pinho e sua classificação depende da espessura da camada nobre sendo parquet (>2,5 mm), pavimento de madeira (<2,5 mm) e revestimento folheado (<0,7 mm). Já o parquet de madeira maciça é constituído por uma única peça de madeira extraída diretamente do toro, processada em tábuas com encaixe macho-fêmea, podendo ser pré-acabada ou finalizada no local. As normas distinguem esse produto como parquet mosaico (8 mm), lamparquet (6–13 mm) e parquet maciço (>13 mm).

Na instalação, distinguem-se três padrões principais de parquet. O de uma faixa, obtido a partir de um único tronco, transmite o efeito de tábua contínua: com nós e veios marcados cria um aspeto rústico, enquanto em grão limpo é associado a ambientes contemporâneos e exclusivos. Os de duas ou três faixas dividem a superfície em régua de largura uniforme, ampliando visualmente espaços pequenos e adaptando-se a interiores modernos ou tradicionais. Já os decorativos permitem composições mais elaboradas, como espinha de peixe, trama de cesto ou convés de navio, podendo ser instalados de forma flutuante ou colados ao solo, o que possibilita padrões personalizados e combinações únicas de cores (FEP 2025b).

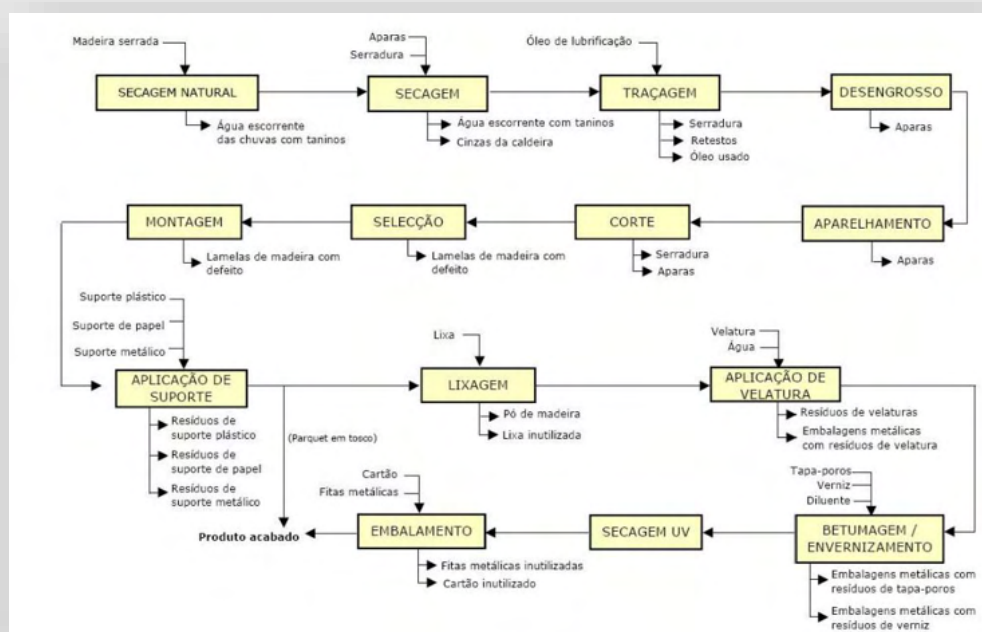
O Programa de Reacabamento de Parquet da FEP é uma certificação voluntária administrada pela Federação Europeia de Parquet que visa identificar e certificar produtos de parquet, sólidos ou multicamadas, com camadas de desgaste suficientemente espessas para permitir o reacabamento, estabelecendo critérios técnicos claros (como espessura mínima da camada superior de 2,5 mm) e requisitos de elegibilidade para fabricantes europeus membros da FEP, além de definir padrões de instalação, manutenção e uso, permitindo aos fabricantes certificados o uso do logótipo FEP Certified Refinishable em seus produtos aprovados (FEP 2025a).

Os mercados europeus de parquet mostram sinais de estabilização após um período de baixos resultados, com alguns países a registarem melhorias graças à implementação de medidas antidumping provisórias sobre as importações de pavimentos de madeira multicamadas da China, promovidas pela Comissão Europeia. Apesar dessa recuperação gradual, a incerteza permanece elevada devido à atual guerra comercial, cujos efeitos ainda são difíceis de prever tanto para produtores quanto para consumidores. A situação varia significativamente entre os diferentes mercados nacionais, refletindo as diversas realidades do setor na Europa (FEP 2025c).

O Diagrama do processo de fabrico típico do subsector da Parqueteria é apresentado na Figura - Diagrama do processo de fabrico típico do subsector da Parqueteria.

Figura - Diagrama do processo de fabrico típico do subsector da Parqueteria

FONTE: (INETI 2001)



Uma breve descrição dos processos relativos ao fabrico e instalação de parquet é demonstrada na Tabela- Descrição dos processos relativos ao fabrico e instalação de parquet.

	Processo	Descrição
Fabrico do parquet	Seleção da Madeira	Seleção de madeiras de alta qualidade, adequadas ao padrão pretendido e com boa resistência ao desgaste.
	Secagem e Tratamento	Secagem da madeira até atingir o teor de humidade ideal, prevenindo deformações futuras; podem ser aplicados tratamentos adicionais para aumentar a resistência a pragas e à humidade.
	Corte e Preparação	Corte das peças de madeira em dimensões exatas, geralmente em formatos pequenos e retangulares, podendo incluir cortes especiais para padrões mais elaborados.
	Esquadreamento	Caso as pranchas apresentem irregularidades, estas são removidas por serragem.
	Pré-aplainamento	Pré-aplainamento das faces superior e inferior das pranchas, tornando mais visíveis eventuais defeitos na madeira.
	Corte e eliminação de defeitos	Eliminação de defeitos como nós, fissuras ou manchas, conforme os critérios de qualidade exigidos.
	Aplainamento	Dependendo da qualidade do material e do pré-aplainamento, pode ser realizado um novo aplainamento nesta fase do processo.
	Calafetação	Se surgirem novos defeitos durante o aplainamento, estes são novamente calafetados manualmente.
	Lixagem de massa de calafetar	Após a calafetação, resíduos salientes são removidos por lixagem.
	Perfilhamento	As tábuas recebem o perfil de instalação em todos os lados, sendo possível realizar chanfros ou ranhuras de alívio, se desejado.
	Escovação das tábuas corridas de madeira maciça	Para obter uma superfície rústica ou áspera, as tábuas são processadas com uma máquina de escovar.
	Lixagem	Para garantir uma superfície ideal para envernizamento, a madeira é lixada com lixadeiras de banda larga ou de perfis, tornando-a extremamente uniforme.
	Revestimento da superfície	O revestimento superficial é feito em processos contínuos, envolvendo aplicação, secagem e lixagem intermediária, utilizando materiais como verniz, óleo ou cera.
	Controle final	Após o tratamento da superfície, realiza-se sempre um controlo de qualidade final.
	Embalamento	Elementos de piso, por serem sensíveis e de alta qualidade, são embalados de forma segura, especialmente após o tratamento da superfície.
Instalação	Montagem do Padrão	As peças são dispostas manualmente ou com auxílio de moldes para criar o padrão desejado, podendo a montagem ser feita diretamente no local ou em painéis pré-fabricados que depois são fixados ao pavimento.
	Fixação	As peças de parquet são fixadas ao contrapiso ou sobre uma base de madeira compensada utilizando adesivos apropriados. O processo de instalação exige precisão para garantir encaixe perfeito e evitar desalinhamentos.
	Lixagem e Acabamento	Após a colocação, o piso é lixado para nivelar e eliminar imperfeições, seguido da aplicação de verniz, óleo ou cera, protegendo a madeira e valorizando o seu aspeto natural.

Tabela- Descrição dos processos relativos ao fabrico e instalação de parquet

FONTE: Adaptado de (INEGI e SerQ 2024)

Os pavimentos de parquet em Portugal devem cumprir as normas técnicas europeias e os requisitos de marcação CE, garantindo qualidade, segurança e conformidade legal. O cumprimento destas normas é fundamental para assegurar a durabilidade, o desempenho e a confiança dos consumidores no setor de parqueteria. As principais normas relacionadas aos pavimentos de parquet em Portugal estão listadas na Tabela - Regulamentações para pavimentos de parquet.

Norma/Regulamento	Objetivo principal	Aplicação
EN 13489	Parquet multicamadas	Dimensões, qualidade
EN 13226	Parquet maciço	Dimensões, qualidade
EN 14342	Produtos de pavimento de madeira	Marcação CE, desempenho
EN 14293 / ISO 17178	Colas elásticas para parquet	Instalação, segurança
UE n.º 305/2011	Regulamento dos Produtos de Construção	Marcação CE, requisitos

Tabela - Regulamentações para pavimentos de parquet

Fabrico de Mobiliário de Madeira

O CAE 310 compreende a fabricação de todo o tipo de móveis (móveis para usos domésticos, escritório, hotelaria, restaurantes, hospitais, salas de espetáculo, etc.), feitos em qualquer material (exceto cerâmica, cimento e pedra) e para qualquer fim. Compreende também a fabricação de colchoaria e de mobílias estofadas, qualquer que seja o material utilizado na sua estrutura. Enquanto o CAE 31091 Compreende a fabricação de mobiliário de madeira para salas de estar, quartos de dormir, casas de banho e fins diferentes das atividades anteriores. Inclui mobiliário urbano (bancos), sofás, cadeiras e assentos com armação de madeira, assim como acabamentos (estofamento, pintura, polimento, lacagem e envernizamento) (INE 2007).

O diagrama do processo de fabrico típico dos subsectores de Fabrico de Mobiliário de Madeira é ilustrado na Figura - Diagrama do processo de fabrico típico dos subsectores de Fabrico de Mobiliário de Madeira.

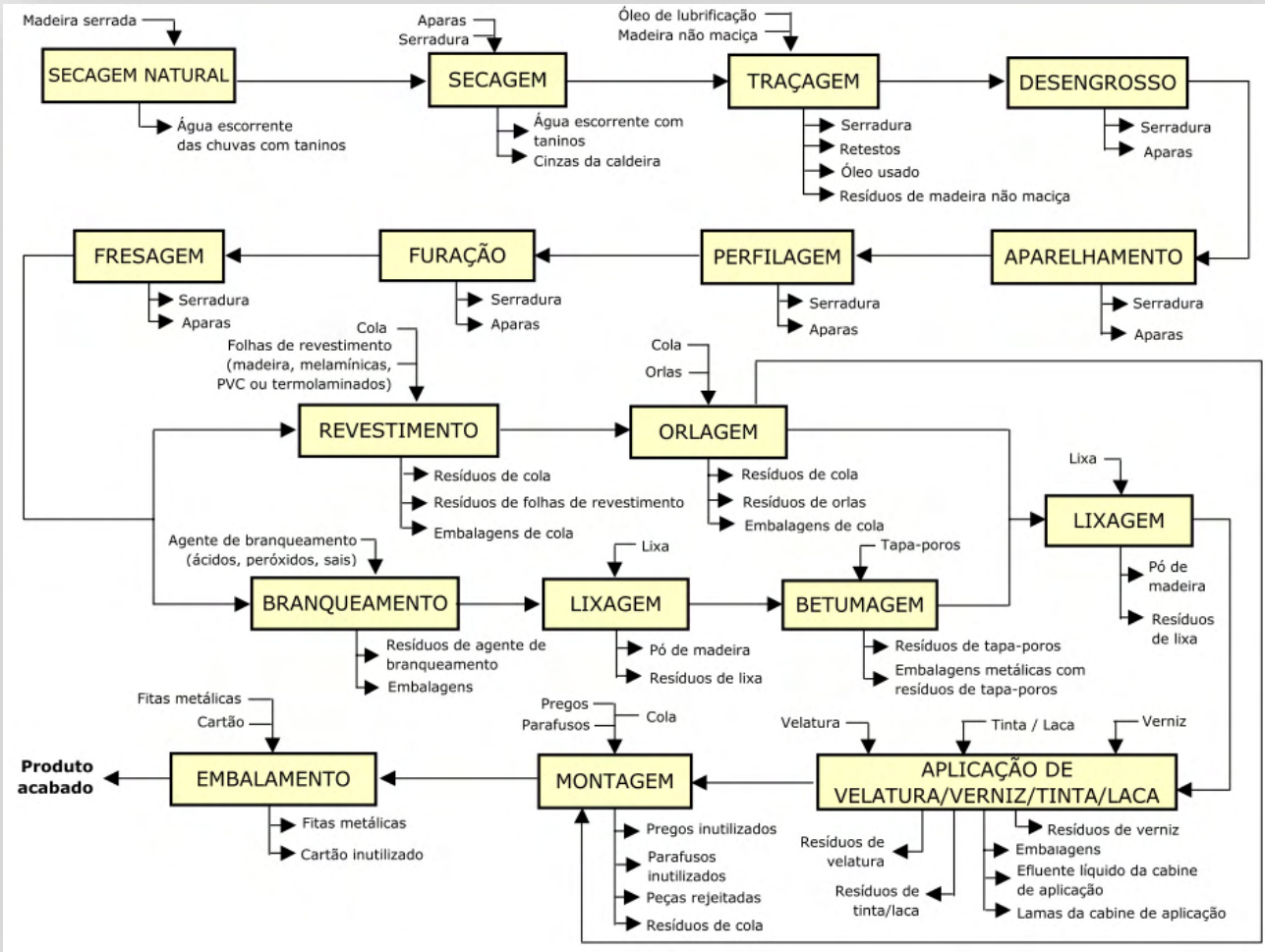


Figura - Diagrama do processo de fabrico típico dos subsectores de Fabrico de Mobiliário de Madeira

FONTE: (INETI 2001)

A produção de mobiliário de madeira integra um conjunto de operações que partilham etapas fundamentais com outros setores da fileira, como a serração, a impregnação e a fabricação de painéis derivados. Processos como corte, folheamento, orlagem, montagem e acabamento recorrem a tecnologias e equipamentos semelhantes aos utilizados noutras indústrias, envolvendo madeira serrada, painéis como MDF e aglomerado, bem como componentes tratados para maior durabilidade. Esta articulação evidencia a transversalidade das atividades ao longo da cadeia de valor, potenciando sinergias produtivas, melhor aproveitamento de recursos e padronização de critérios de qualidade.

Em Portugal, o mobiliário de madeira está sujeito a normas técnicas europeias e requisitos legais nacionais que asseguram qualidade, segurança, rastreabilidade e sustentabilidade em toda a cadeia produtiva. O cumprimento destas normas é obrigatório para fabricantes, importadores e comerciantes, sendo fiscalizado por entidades nacionais e comunitárias. Elementos como a marcação CE, a certificação da origem da madeira e o respeito pela legislação ambiental são determinantes para a competitividade e a credibilidade do setor do mobiliário português

Norma/Regulamento	Objetivo principal	Aplicação
EN 14074 / EN 14749	Requisitos de segurança e desempenho	Mobiliário doméstico/office
EN 12520 / EN 16139	Ensaaios de resistência e durabilidade	Assentos e bancos
EN 312 / EN 622-5 / EN 636	Especificações para materiais derivados de madeira	Componentes de mobiliário
EN 13986	Requisitos gerais, marcação CE	Construção e exportação
RUEM (UE 995/2010)	Legalidade e rastreabilidade da madeira	Toda a cadeia de valor
DL n.º 84/2021	Garantia legal de bens móveis	Consumidor final

Tabela - Normas para mobiliário de madeira em Portugal

Fabrico de Outras Obras de Carpintaria para a Construção

O CAE 1623 - fabricação de outras obras de carpintaria para a construção compreende a fabricação de artigos em madeira, principalmente destinadas à indústria da construção, como peças de carpintaria (caibros, cofragens, armações, vedações, barrotes, vigas de madeira, etc.), obras de carpintaria de limpos (portas, janelas, persianas, escadas em madeira, com ou sem ferragens, etc.), caixilhos e lambris. Inclui a pré-fabricação de casas em madeira e suas partes e não inclui a parqueteria (16220) e a colocação na obra destes produtos (43320) (INE 2007).

A fabricação de outras obras de carpintaria para a construção inclui uma ampla gama de componentes de madeira para a construção civil, tais como caibros, cofragens, armações, vedações, vigas, portas, janelas, persianas, escadas, corrimões, andaimes, caixilhos, lambris, forros, revestimentos, tetos, pisos, molduras, guarnições e mobiliário fixo. Também contempla a produção de elementos estruturais, como vigas, colunas e travessas, além da pré-fabricação de casas e respetivas partes. O processo produtivo envolve etapas padronizadas, desde a receção e seleção da madeira até ao acabamento e controlo de qualidade, assegurando uniformidade e eficiência (INEGI e SerQ 2024).

O CAE 1623 envolve a produção de componentes de carpintaria fundamentais para a construção e acabamento de habitações. Estes elementos são essenciais para a funcionalidade, estética, conforto e eficiência energética das casas, além de abrangerem serviços de reabilitação e adaptação de espaços. O setor está profundamente integrado com outros processos da fileira da madeira, como serração, impregnação, produção de painéis e tratamentos de superfície, partilhando técnicas, materiais e etapas produtivas. Esta integração favorece sinergias, otimização de recursos, padronização de qualidade, sustentabilidade e rastreabilidade, fortalecendo a competitividade e a inovação do setor madeireiro português na construção residencial.

Este CAE relaciona-se com a fabricação industrial de casas pré-fabricadas em madeira e suas partes, abrangendo a produção de módulos habitacionais completos ou parciais, como paredes, coberturas, pisos, divisórias e acessórios prontos para montagem. Esta atividade inclui tanto casas completas quanto sistemas modulares e kits de montagem, com elevado controlo de qualidade, precisão dimensional e cumprimento das normas técnicas europeias e nacionais aplicáveis à construção em madeira. As casas pré-fabricadas devem apresentar marcação CE, rastreabilidade da matéria-prima e práticas de fabrico sustentável, sendo uma solução eficiente, flexível e sustentável para habitação, turismo ou edifícios de apoio, com vantagens em rapidez de execução, qualidade e sustentabilidade ambiental.

_Fabricação de embalagens de madeira

O CAE 16240 compreende a fabricação de paletes, caixas e outras embalagens, estrados de madeira e bobinas para cabos. Inclui tonéis, barricas, dornas, cubas e outros produtos (incluindo as suas partes) de tanoaria e não inclui a fabricação de artigos de cestaria (CAE 16292) (INE 2007).

No mercado nacional, os principais consumidores de paletes são os setores da distribuição alimentar, indústria química, papel, siderurgia, cimentos, vidro e materiais de construção. As paletes de duas entradas são especialmente utilizadas pela indústria da construção, enquanto as indústrias metalomecânica e de bens de equipamento recorrem frequentemente a este tipo de embalagem. A produção destas paletes é maioritariamente realizada por empresas de menor dimensão, que se destacam pela flexibilidade e menor grau de automação, sendo que estas embalagens exigem um padrão de qualidade mais elevado, como a utilização de tampos em contraplacado (AIMMP 2006b).

O setor de embalagens em Portugal está presente em várias regiões do país, com maior concentração nos distritos de Leiria, Porto, Braga, Setúbal e Viseu, e apresenta diferentes perfis de produção. As serrações de embalagem dividem-se entre as tradicionais, com produção diversificada e circuitos pouco definidos, focadas na produção de réguas e barrotes, e as serrações/fábricas de paletes, que têm uma estrutura mais moderna e organizada, produção em série e foco em produtos de maior valor acrescentado, como paletes montadas e certificadas. No país, destaca-se a produção de madeira serrada de resinosas, especialmente pinho bravo, para fins de embalagem (AIMMP 2006b).

As serrações de madeira em Portugal abastecem principalmente dois segmentos: a embalagem pesada, que inclui paletes, caixas-paleta e embalagens especiais para bens de equipamento, produzindo tábuas não secas de pequenas dimensões e barrotes, com requisitos de qualidade centrados no posicionamento dos nós, tolerâncias de serragem e tratamentos antifúngicos; e a embalagem ligeira, destinada a caixas para frutas, legumes, brindes e vinho, caracterizada por peças finas, geralmente secas para evitar fungos, onde se exige ausência de nós, precisão nos cortes e, em alguns casos, aplainamento das faces (AIMMP 2006b).

Os principais processos na fabricação de embalagens de madeira são bastante semelhantes aos descritos anteriormente, destacando-se as etapas de receção e escolha da espécie de madeira apropriada, inspeção visual para detetar defeitos, secagem e tratamento, corte e dimensionamento, modelagem e montagem, personalização e marcação, lixagem e acabamento, controlo de qualidade, embalamento, armazenamento, bem como logística e distribuição (INEGI e SerQ 2024).

A indústria de paletes em Portugal apresenta uma produção diversificada de componentes, destacando-se as réguas de paleta com espessuras entre 16 a 22 mm, largas de 80 a 145 mm e comprimentos de 800, 1000 ou 1200 mm, além de calços de 100 x 100 mm com comprimentos de 2200, 2600 ou 3000 mm, e barrotes de 35 x 70 mm com comprimentos entre 900 e 1200 mm. Existem dois tipos principais de paletes: as de quatro entradas, com largas de 760 a 1100 mm e comprimentos de 1200 a 1350 mm, e as de duas entradas, com largas de 900 ou 950 mm e comprimentos de 950 ou 1200 mm (AIMMP 2006b).

O processo de produção em serrações de tabuinhas é mais complexo, exigindo uma organização fabril rigorosa. A primeira etapa é o descasque e a triagem mecânica dos troncos, que podem ser integrados com sistemas de cubagem e detetores de metais. Para otimizar o aproveitamento, os troncos são cortados em segmentos menores antes do processamento principal. As máquinas usadas para o corte incluem serrotes de pêndulo, serras de fita dupla e serras de terceiro fio. O uso de quadros com várias lâminas permite cortes múltiplos e simultâneos, aumentando a eficiência. Após o corte, o material pode ser submetido a tratamentos em tanques, e a sua movimentação entre fases é feita por

rolos, tapetes ou empilhadores, com alguns locais a já utilizarem sistemas de paletização automatizados. Por ser uma atividade intensiva em mão-de-obra, estas serrações destinam-se principalmente à produção de madeiras para embalagem e cercas (AIMMP 2006b).

A madeira utilizada em embalagens para o comércio internacional pode estar infestada por pragas se não tiver sido tratada adequadamente. Como essas embalagens são frequentemente reutilizadas e reparadas, é quase impossível rastrear a sua origem e garantir que estão livres de pragas. Por essa razão, a norma ISPM 15-4 foi criada. Esta norma estabelece medidas internacionalmente aceites para o tratamento da madeira de embalagem, garantindo que o risco de disseminação de pragas quarentenárias em todo o mundo é minimizado (FAO e IPPC 2019).

Os tratamentos aprovados pela ISPM 15-4 para material de embalagem de madeira incluem o tratamento térmico convencional (HT), em que a madeira é aquecida em estufa ou câmara de vapor até atingir pelo menos 56 °C por 30 minutos em todo o perfil; o aquecimento dielétrico (DH), que utiliza micro-ondas ou radiofrequência para aquecer a madeira a 60 °C durante 1 minuto, sendo indicado para processos rápidos e peças de menor espessura; a fumigação com brometo de metilo (MB), que expõe a madeira ao gás por 24 horas sob condições controladas, não sendo permitida para peças com mais de 20 cm de espessura e com uso restrito devido a questões ambientais; e a fumigação com fluoreto de sulfúrio (SF), realizada por 24 ou 48 horas, também sob parâmetros específicos de concentração e temperatura, não sendo indicada para peças muito grossas ou com alta umidade (FAO e IPPC 2019).

Todos os tratamentos exigem o uso de madeira descascada, exceto pequenos fragmentos permitidos pela norma, e o rigoroso controle de temperatura, tempo e umidade é essencial para garantir a eficácia contra pragas. Com o surgimento de novas informações técnicas, tratamentos existentes podem ser revisados ou modificados, e novos tratamentos podem ser aprovados pela CPM. Se um novo tratamento for incorporado à ISPM, materiais tratados anteriormente não precisam ser retratados ou remarcados (FAO e IPPC 2019).

A EPAL assegura que as paletes Euro mantenham um padrão de qualidade elevado e uniforme internacionalmente, graças a um sistema rigoroso de controle e inspeção. Durante o processo de fabricação, essas paletes são submetidas a tratamento térmico (HT) conforme o padrão ISPM 15, eliminando pragas e protegendo o meio ambiente contra infestações. Esse tratamento garante que as paletes possam ser utilizadas no transporte internacional de mercadorias sem restrições. Quando danificadas, as paletes EPAL podem ser reparadas de maneira eficiente e sustentável por operadores autorizados. Após o reparo, cada paleta recebe um prego de identificação com a marca “EPAL” e o número de licença do operador, assegurando a rastreabilidade e a conformidade do serviço realizado (EPAL 2023).

Um estudo da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto analisou os fabricantes portugueses de embalagens de madeira. A investigação revelou que a maioria das empresas do setor são pequenas e médias, com grande variação de dimensão. Em relação à sustentabilidade, o setor nacional de embalagens de madeira utiliza, em média, 15% de material reciclado, com um máximo de 25%. Estes valores são inferiores aos de outros setores, mas estão em linha com a tendência europeia. O potencial de reciclagem é bastante variável e as empresas raramente ultrapassam a taxa de 15%. Em 2019, a Europa gerou cerca de 12,5 milhões de toneladas de resíduos de embalagens de madeira, o que corresponde a 67% da produção total. Em Portugal, o setor tem um volume de negócios de aproximadamente 98 milhões de euros, destacando a sua importância económica no mercado de embalagens (FEUP 2022).

No segmento da madeira, os ramos mais propícios para a integração de material reciclado abrangem os setores de bebidas, comércio e retalho, madeira e cortiça, pasta de papel e cartão, borrachas e materiais plásticos. As empresas relataram que as taxas máximas de incorporação atingem até 15%.

Entre os principais fatores que impulsionam o uso de material reciclado destacam-se a pressão exercida por clientes e consumidores, a conscientização ambiental das empresas e a redução de custos. Por outro lado, as principais dificuldades apontadas envolvem as especificações dos produtos, especialmente no que tange à cor, aspetos estéticos e desempenho, além de requisitos técnicos e regulatórios, baixa durabilidade, desafios na obtenção de matéria-prima reciclada adequada e limitações relacionadas à reutilização de resíduos e aos processos técnicos envolvidos (FEUP 2022).

A atuação da Associação Europeia de Paletes (EPAL), em conjunto com seus Comitês Nacionais e licenciados, oferece uma base sólida para o funcionamento eficiente e aberto do sistema de troca de paletes, viabilizando a circulação internacional dos suportes de carga EPAL. A meia-paleta EPAL 7, recentemente lançada, apresenta maior resistência e vida útil em comparação ao modelo “Düsseldorfer” atualmente disponível no mercado. Este novo formato tem sido amplamente adotado nos segmentos de bebidas, alimentos, lojas de descontos e no varejo em geral. O rigor no controle de qualidade e a seleção de materiais superiores garantem segurança e confiabilidade tanto para os usuários quanto para o transporte de mercadorias. Além disso, a reutilização dessas paletes proporciona uma significativa redução no consumo de recursos ambientais e financeiros (EPAL 2023).

Em 2022, a Comissão Europeia propôs o novo Regulamento de Embalagens e Resíduos de Embalagens (PPWR), com o objetivo de reduzir o impacto ambiental do setor. A nova legislação visa promover a prevenção e a reutilização de embalagens, garantindo também que todas sejam recicláveis até 2030. Esta proposta terá um impacto significativo em toda a cadeia de valor da madeira, especialmente no setor de embalagens e paletes. Por esse motivo, a CEI-Bois e a Federação Europeia dos Fabricantes de Paletes e Embalagens de Madeira (FEFPEB) uniram-se para defender os interesses do setor. O objetivo é assegurar que o PPWR reconheça os benefícios ambientais das embalagens de madeira, evitando a imposição de encargos que possam prejudicar a sua contribuição para um mercado de embalagens mais sustentável.

Em 2022, a Comissão Europeia propôs um novo regulamento para reduzir os impactos ambientais das embalagens e seus resíduos, promovendo a prevenção, reutilização e reciclagem até 2030. O regulamento estabelece metas de redução e reutilização para os Estados-Membros e operadores económicos. O setor de embalagens e paletes de madeira será especialmente impactado, por isso entidades do setor estão atuando junto aos legisladores para garantir que os benefícios ambientais da madeira sejam reconhecidos e evitar exigências administrativas e financeiras excessivas (CEI-Bois 2024).

A fabricação de embalagens de madeira em Portugal, enquadrada no CAE 16240, está sujeita a um conjunto rigoroso de normas técnicas, fitossanitárias e ambientais, tanto nacionais quanto europeias. O cumprimento dessas normas é fundamental para garantir a qualidade, segurança, rastreabilidade e legalidade dos produtos, bem como para assegurar a aceitação das embalagens no mercado internacional e a proteção fitossanitária dos ecossistemas. As principais normas relacionadas à fabricação de embalagens de madeira estão listadas na Tabela- Normas relacionadas a embalagens de madeira.

Norma/Regulamento	Objetivo principal	Aplicação
EN 13698-1/2, EN 12246	Paletes e caixas de madeira	Dimensões, resistência, ensaios
ISPM 15 (NIMF 15)	Tratamento fitossanitário e marcação	Exportação/importação
Decreto-Lei n.º 123/2015	Transposição da ISPM 15	Embalagens para exportação
RUEM (UE 995/2010)	Legalidade e rastreabilidade da madeira	Toda a cadeia de valor
Decreto-Lei n.º 95/2011	Medidas fitossanitárias para madeira de coníferas	Produção nacional
EN 13427 a EN 13432	Requisitos gerais de embalagens	Desempenho ambiental

Tabela- Normas relacionadas a embalagens de madeira

Fabricação de caixões mortuários em madeira

Caixões de madeira são utilizados para inumação em sepultura ou em local de consumpção aeróbia facilmente destrutível por ação do calor para cremação (Portugal 1998). Os caixões mortuários em madeira devem ser fabricados com madeira facilmente degradável, não sendo permitidas madeiras densas, dificilmente deterioráveis, nem caixões com tintas ou vernizes que atrasem a decomposição em sepulturas temporárias (GONTA 2022).

A fabricação de caixões mortuários em madeira é dada pelo CAE 32995 (INE 2007). Na fabricação de caixões mortuários em madeira, as principais fases envolvem a receção e inspeção da matéria-prima, seguida da secagem e tratamento da madeira, corte e dimensionamento das peças, montagem estrutural com reforço, lixagem e acabamento, forragem interna e acolchoamento, aplicação de acessórios como alças, fechos e detalhes, além do controlo de qualidade, embalagem e expedição do produto final (INEGI e SerQ 2024).

A fabricação de caixões mortuários em Portugal, sob o CAE 32995, cujas principais normas e regulamentações estão detalhadas na Tabela 2, está sujeita a um conjunto rigoroso de normas técnicas, sanitárias e ambientais. É fundamental garantir que os caixões sejam fabricados com materiais e processos adequados ao destino final, respeitando as exigências legais, ambientais e de saúde pública, bem como as especificações dimensionais e de segurança impostas pelos regulamentos nacionais e municipais.

Norma/Regulamento	Objetivo principal	Aplicação
DL n.º 411/98, DL n.º 274/89	Requisitos para materiais e tipos de caixão	Inumação, cremação, trasladação
Regulamentos municipais	Dimensões, materiais, procedimentos	Cemitérios locais
Regulamento n.º 472/2022	Proibições e regras ambientais	Sepulturas temporárias
Acordos internacionais	Estanquidade e absorção	Trasladação internacional

Tabela 2 - Normas para fabricação de caixões mortuários de madeira

Em síntese, a análise das cadeias de valor e dos processos fabris apresentada neste capítulo oferece uma visão detalhada e prática dos outputs de cada fase produtiva, constituindo uma base sólida para identificar oportunidades de otimização. Quando colocados em perspetiva com os resultados da Fase A, que destacou aspetos como o perfil empresarial dominado por PME, a grande dependência energética da eletricidade e biomassa, a baixa adoção de certificações de saúde e segurança e a orientação exportadora do setor, estes outputs revelam não só pontos de continuidade, mas também áreas onde não foi possível obter informação anterior. Por exemplo, certas etapas críticas de eficiência energética ou de aproveitamento de resíduos não surgiram claramente mapeadas na Fase A, e esta ausência é em si reveladora da necessidade de maior monitorização e sistematização de dados. Assim, o paralelismo entre as duas fases permite compreender melhor as dinâmicas do setor, reforçando a necessidade de consolidar informação, aprofundar a análise energética e operacional e desenvolver estratégias direcionadas para colmatar as fragilidades identificadas, assegurando que a indústria da madeira avança de forma coordenada para os objetivos de descarbonização e economia circular.

III ECONOMIA CIRCULAR

A Economia circular propõe um modelo industrial que procura integrar processos produtivos com desenvolvimento sustentável, minimizando a exploração de recursos naturais, a poluição e a geração de resíduos. No cenário atual, é fundamental reduzir os impactos ambientais das atividades industriais, como as emissões de gases de efeito estufa e o uso excessivo de recursos não renováveis (Adi Wicaksono e Ahmad Kadafi 2020).

A economia circular valoriza o uso eficiente e a reutilização de recursos e resíduos para gerar produtos com maior valor. A madeira, por ser renovável, destaca-se como um dos principais trunfos das indústrias florestais e associadas, que buscam práticas produtivas sustentáveis. O aproveitamento otimizado dos materiais e a transformação dos resíduos de madeira em novos produtos beneficiam toda a cadeia produtiva. Além do uso direto da madeira, a análise dos seus fluxos inclui também o reaproveitamento de subprodutos e resíduos, que podem servir como matéria-prima em setores como construção, processamento e produção de energia (Parobek e Paluš 2024).

O setor da madeira apresenta uma grande diversidade, refletida na variedade de seus atores, campos de aplicação e tipos de produtos gerados. No entanto, a ausência de informações relevantes ao longo da cadeia de valor é um dos principais entraves para a economia circular e a sustentabilidade dos produtos. Para superar esse desafio, a Comissão Europeia propõe o Passaporte Digital de Produto (DPP), que utiliza identificadores únicos para garantir a rastreabilidade e o acesso a dados essenciais durante todo o ciclo de vida do produto. Integrado ao Regulamento de Ecodesign para Produtos Sustentáveis, o DPP tem como objetivo impulsionar a circularidade, fomentar modelos de negócio inovadores, apoiar escolhas de consumo mais sustentáveis e facilitar a fiscalização pelas autoridades, consolidando-se como uma ferramenta fundamental para a transição para a economia circular (Steinwender et al. 2024).

Nos últimos anos, a digitalização tem impactado diversos setores ao transformar processos internos, exigir novas competências e redefinir a competitividade das empresas, especialmente diante de desafios como a sustentabilidade. Apesar dos benefícios já demonstrados pelas aplicações da Indústria 4.0, a indústria da madeira ainda enfrenta dificuldades para explorar plenamente esse potencial, devido à necessidade de inovação, adaptação a novos modelos de negócio e superação de obstáculos na gestão de dados e interconectividade das cadeias de abastecimento. A indústria da madeira enfrenta desafios sob múltiplas perspectivas, especialmente devido à rápida mudança dos ambientes de mercado, às exigências de políticas e conformidade, e, de modo geral, à digitalização dos seus processos centrais. Uma área particularmente desafiante é a transição para uma gestão digitalizada e integrada da cadeia de abastecimento (Steinwender et al. 2024).

No contexto das estratégias circulares “Reduzir” (R strategies), a madeira e outros materiais de base biológica estão sendo priorizados para substituir materiais de construção de origem mineral, como cimento, aço e vidro. Essa tendência é impulsionada pelo baixo perfil de carbono dos produtos de madeira, o que é favorável nas avaliações de ciclo de vida (ACV). Além disso, ao considerar a madeira como material de construção, uma abordagem verdadeiramente circular está associada à prática do uso em cascata. Esse conceito, alinhado com as estratégias circulares, consiste em transferir produtos de madeira de alta qualidade para aplicações progressivamente menos exigentes ao longo de sua vida útil, mudando a finalidade do produto em cada etapa, em vez de promover apenas a reciclagem para o mesmo fim. Dessa forma, a madeira contribui não só para a redução do impacto ambiental na fase inicial, mas também para a maximização do valor e da eficiência dos recursos ao longo de todo o seu ciclo de vida (Lima et al. 2024).

A definição de circularidade expandiu-se do modelo 3R (Reduzir, Reutilizar, Reciclar) para o modelo 10R (Figura), que abrange dez estratégias, desde evitar o consumo até recuperar materiais no fim de vida do produto. As primeiras estratégias focam em minimizar o uso de recursos e compartilhar

funções do produto; as seguintes visam prolongar ou renovar o ciclo de vida do produto por meio de manutenção, reparação e remanufatura; e as últimas concentram-se em recuperar materiais quando o produto já não pode ser reutilizado ou reparado (Kans e Löfving 2024).

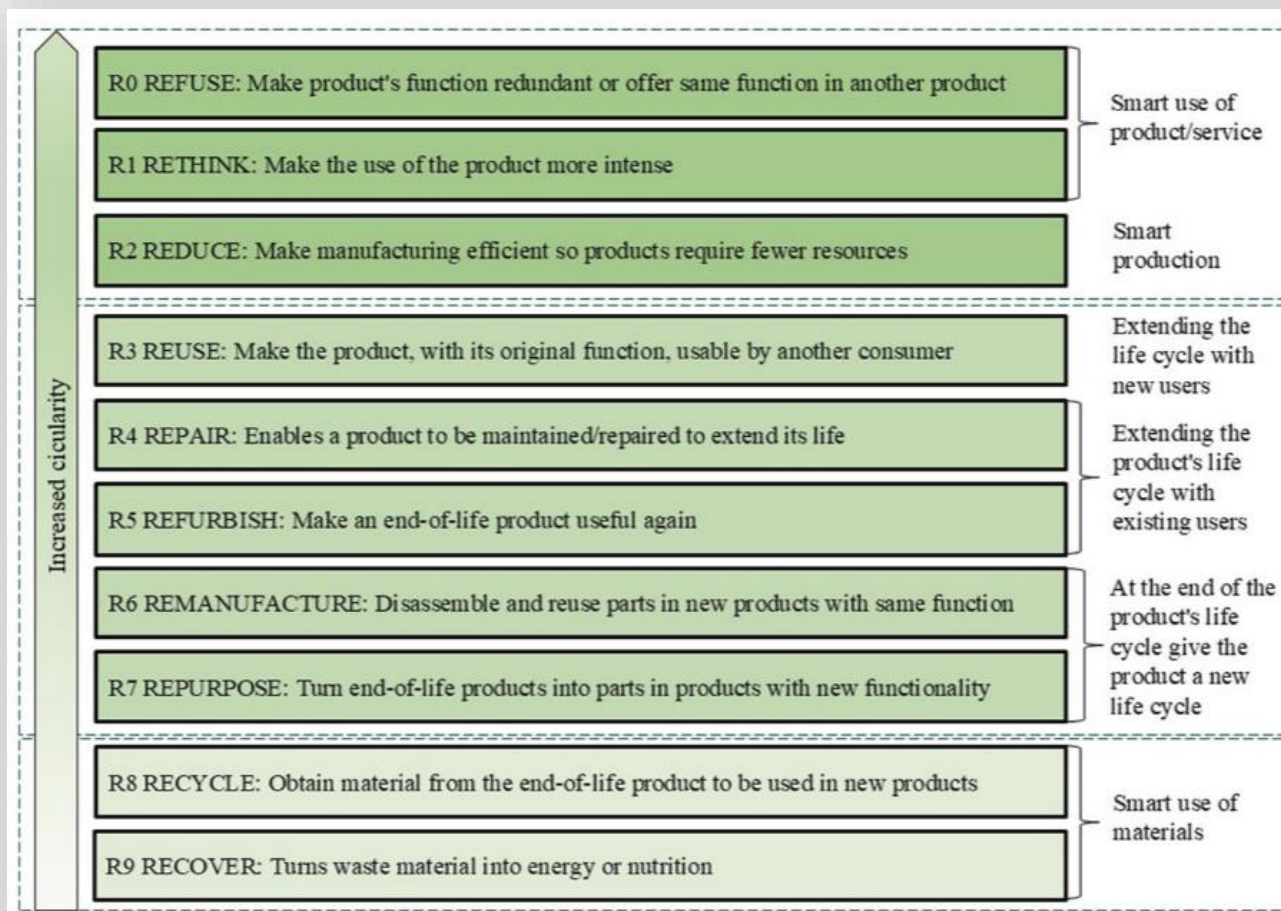


Figura - Estratégias circulares segundo o framework 10R

FONTE: (Kans e Löfving 2024)

A Figura - Estratégias circulares segundo o framework 10R apresenta o modelo 10R de estratégias para a circularidade, organizado em ordem crescente de intensidade. As primeiras estratégias - Recusar (R0), Repensar (R1) e Reduzir (R2) - centram-se no uso inteligente de produtos e serviços, eliminando necessidades, intensificando a utilização ou aumentando a eficiência da produção. Seguem-se as estratégias de prolongamento do ciclo de vida, como Reutilizar (R3), Reparar (R4) e Refabricar (R5), que permitem manter o produto em uso por mais tempo, seja pelo mesmo ou por novos utilizadores. Já Remanufaturar (R6) e Reaproveitar (R7) procuram dar um novo ciclo de vida a produtos em fim de uso, através da desmontagem, reaproveitamento de peças ou transformação em novos produtos. Por último, Reciclar (R8) e Recuperar (R9) incidem no aproveitamento máximo dos materiais, convertendo resíduos em matérias-primas, energia ou nutrientes. Em conjunto, estas estratégias promovem a transição de um consumo eficiente para o uso integral dos recursos. (Kans e Löfving 2024).

Muitas soluções de economia circular estão a ser aplicadas na indústria da madeira. A partir de resíduos, como o serrim, são criados novos produtos, incluindo mobiliário, isolamentos e compósitos, o que ajuda a poupar matéria-prima. A reciclagem em circuito aberto é uma prática comum, na qual os resíduos de madeira são transformados em painéis de partículas e fibras. Quando já não é possível reutilizar a madeira, a solução mais frequente é a recuperação energética. No final do seu ciclo de vida,

a madeira pode ser reaproveitada em novos produtos como compósitos e mobiliário de exterior. A madeira proveniente da demolição de edifícios, por exemplo, é reciclada em cerca de 25%, principalmente em painéis que não requerem alta qualidade. Embora a reutilização estrutural da madeira apresente desafios técnicos e regulamentares, a maior parte da madeira recuperada na UE é utilizada para geração de energia. Este facto destaca a importância da valorização energética no ciclo de vida deste material, seguindo o princípio de uso em cascata. (Lima et al. 2024).

O uso em cascata da madeira é uma estratégia inovadora que visa otimizar o aproveitamento dos recursos e a gestão de resíduos na indústria madeireira. Consiste em utilizar matérias-primas de alta qualidade para produtos de maior valor e, posteriormente, empregar os resíduos e materiais reciclados em aplicações de menor valor, prolongando assim a disponibilidade e utilidade da biomassa. No âmbito da economia circular, procura-se prolongar ao máximo a vida útil da madeira por meio de sucessivos ciclos de reutilização, recuperação e reciclagem, mantendo a integridade do material e aumentando a eficiência dos recursos (Mo, Haviarova e Kitek Kuzman 2024). A Figura apresenta um Diagrama da Roda de Gestão de Subprodutos.

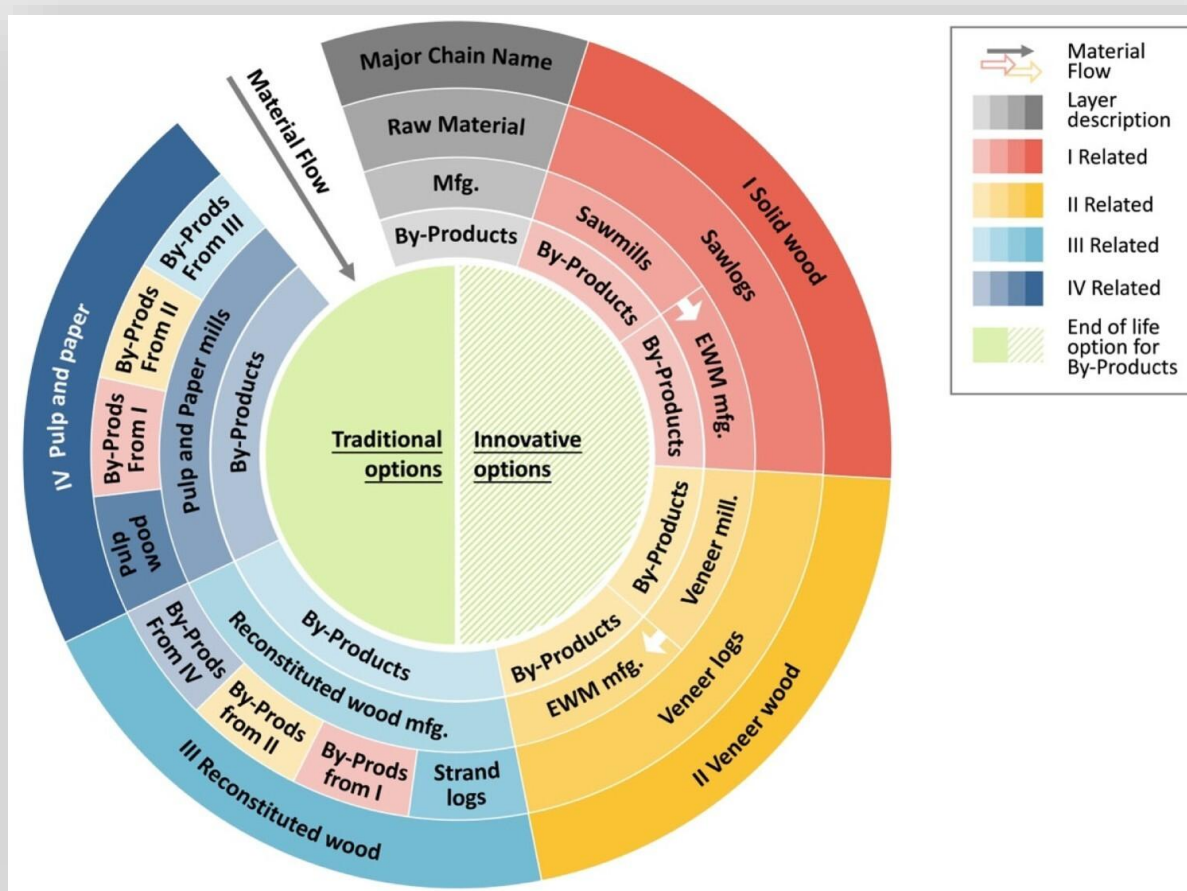


Figura - Diagrama da Roda de Gestão de Subprodutos

FONTE: (Mo, Haviarova e Kitek Kuzman 2024)

Nas diferentes cadeias de produção da madeira, diversos subprodutos são gerados e reaproveitados. Na Cadeia I (madeira maciça), destacam-se cascas, aparas, serrim, resíduos para caldeiras, aparas de plaina e farinha de madeira, que são vendidos ou utilizados como combustível ou matéria-prima para outros processos. Na Cadeia II (madeira para folheados), surgem subprodutos semelhantes, como cascas, núcleos de toras, refugos e recortes de folheados, sobras de montagem, recortes de painéis, serrim e resíduos para caldeiras, sendo aproveitados para venda, uso energético ou processamento adicional. Já na Cadeia III (madeira reconstituída), os subprodutos incluem cascas, recortes de painéis, serrim e resíduos para caldeiras, com destaque para a utilização de resíduos industriais e madeira reciclada na produção de painéis à base de partículas e fibras, transformando subprodutos e madeira em novos produtos (Mo, Haviarova e Kitek Kuzman 2024).

Conforme demonstrado no diagrama de gestão de subprodutos, esses materiais desempenham um papel fundamental como recursos secundários. Subprodutos como as aparas provenientes das cadeias I e II são utilizados como matéria-prima na cadeia III, impulsionando a fabricação de produtos de madeira transformada (EWP's). Além disso, até mesmo as partículas mais finas e outros resíduos de madeira são reaproveitados, sendo incorporados na produção de painéis de partículas, painéis de fibras e outros novos produtos (Mo, Haviarova e Kitek Kuzman 2024).

A Figura - Estrutura conceitual da remanufatura na indústria de produtos de madeira apresenta a estrutura conceitual da remanufatura na indústria de produtos de madeira, evidenciando os principais fatores que a influenciam: colaboração entre os atores da cadeia de valor, localização geográfica, políticas públicas, comportamento do cliente, propriedades do produto e modelos de negócio circulares. A colaboração é crítica tanto a montante (gestão de resíduos, ecodesign) como a jusante (reciclagem, logística reversa), sendo reforçada pela proximidade com os clientes. Regulamentação governamental e políticas de gestão de resíduos exercem forte impacto, enquanto o design, a marca e o preço influenciam a aceitação dos produtos remanufaturados. Por sua vez, características como remanufaturabilidade, durabilidade e robustez condicionam o ciclo de vida e o desempenho ambiental e económico. Também os aspetos estéticos e os valores extrínsecos são determinantes na percepção do consumidor e na inovação empresarial (Kans e Löfving 2024).

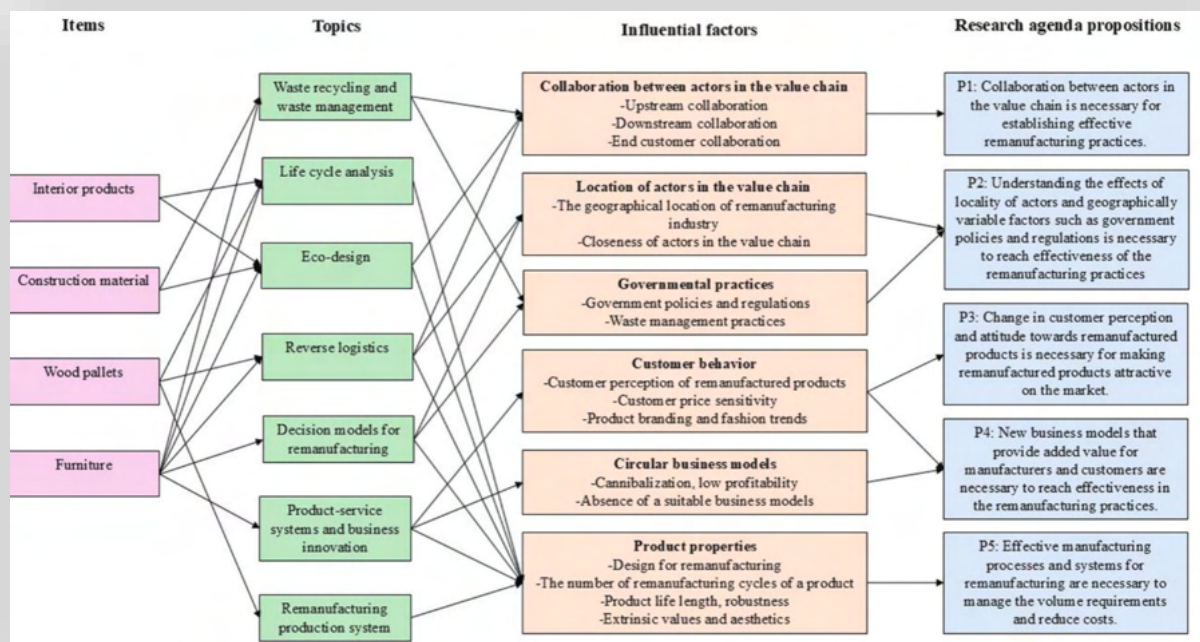


Figura - Estrutura conceitual da remanufatura na indústria de produtos de madeira

O estudo de Kans e Löfving (2024) aponta para a falta de investigação aprofundada sobre a remanufatura no setor dos produtos de madeira, apesar do crescente interesse no tema. Os autores propõem uma agenda de pesquisa que prioriza três áreas-chave para desenvolver modelos de negócio circulares e inovadores: a colaboração entre todos os intervenientes da cadeia de valor, a compreensão do comportamento dos consumidores e o desenvolvimento de estratégias economicamente viáveis. O estudo realça ainda a importância de usar soluções digitais e automação para facilitar a transição para a economia circular, alinhando-se com as prioridades europeias e sugerindo que estas diretrizes podem ser aplicadas globalmente.

Na indústria do mobiliário, que transforma madeira em produtos de maior valor, grande parte das matérias-primas acaba se tornando resíduo, o que representa desperdício económico e causa danos ambientais e sociais, especialmente quando descartados de forma inadequada. Além disso, o uso de matérias-primas e insumos com substâncias químicas potencializa esses impactos, tornando essencial a escolha de materiais mais ecológicos para reduzir os efeitos negativos ao meio ambiente e à sociedade (Adi Wicaksono e Ahmad Kadafi 2020).

III METAS DE DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR

A evolução da descarbonização no setor da madeira em Portugal segue uma trajetória alinhada com os compromissos assumidos no Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030) e no Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC 2050). Estes documentos estratégicos definem metas graduais de redução de emissões, estabelecendo um caminho progressivo rumo à neutralidade carbónica.

A trajetória traçada prevê uma diminuição gradual e consistente das emissões até 2050, começando por reduções mais modestas no curto prazo e evoluindo para metas mais ambiciosas à medida que as tecnologias limpas se tornam mais acessíveis, as infraestruturas energéticas se modernizam e as práticas industriais se adaptam. Em 2030, a meta de redução de 55% das emissões de gases com efeito de estufa marca um ponto de viragem, refletindo o esforço acumulado das primeiras fases da transição. Já em 2050, prevê-se uma redução de 73%, num cenário em que o setor deverá operar maioritariamente com base em fontes de energia renovável, processos otimizados e princípios de economia circular (APA 2019; 2024b).

Estas metas, embora desafiantes, traduzem uma visão de longo prazo que combina sustentabilidade ambiental com competitividade económica. A sua concretização exigirá não só investimento em inovação e eficiência, mas também uma forte articulação entre políticas públicas, iniciativas empresariais e envolvimento de toda a cadeia de valor.

Na Tabela - Redução das emissões de gases com efeito de estufa para setor da madeira apresentam-se as metas de redução de emissões de gases com efeito de estufa para setor em análise.

Ano	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Redução de emissões (%)*	30	41	55	57	60	66	73

*face a 2005

Tabela - Redução das emissões de gases com efeito de estufa para setor da madeira

Fonte: (APA 2024b; 2019)

Vetores descarbonização

Para o cumprimento dos objetivos de descarbonização e sustentabilidade, é necessária uma transição energética no setor da madeira. Na

Tabela descreve-se a evolução dos principais vetores energéticos que irão apoiar essa transição entre os anos de 2030, 2040 e 2050, evidenciando uma mudança progressiva para fontes de energia mais limpas, eficientes e renováveis.

Ano	Vetor energético	Descrição
2030	Eletricidade	Prevê-se uma intensificação da eletrificação no setor da madeira, impulsionada sobretudo pela crescente disponibilidade de eletricidade proveniente de fontes renováveis, como a energia eólica e solar. A evolução das tecnologias de armazenamento de energia – nomeadamente baterias mais eficientes e soluções integradas – tornará a produção descentralizada de eletricidade (<i>on-site</i>) uma opção cada vez mais fiável para os processos industriais. Esta transição contribuirá significativamente para a redução da dependência de combustíveis fósseis, promovendo uma matriz energética mais limpa e resiliente.
	Gás Natural	O gás natural continuará a desempenhar um papel relevante, contudo é esperado que devido às suas emissões de carbono relativamente baixas comparadas ao GPL e ao petróleo, este vetor energético substitua os restantes. No entanto, a sua utilização será otimizada para maior eficiência, possivelmente em aplicações combinadas com biometano.
	Biomassa	A biomassa, já utilizada como subproduto do setor, terá um crescimento na sua participação, especialmente com o aumento do aproveitamento de resíduos florestais, reduzindo desperdícios e promovendo uma economia circular.
	Gases renováveis	A integração de gases renováveis, como o biometano e o hidrogénio verde, na rede de gás natural será impulsionada até 2030, permitindo a sua utilização crescente no setor da madeira para substituir combustíveis de origem fóssil.
	Outras energias renováveis	Tecnologias como coletores solares para processos de baixa temperatura tornar-se-ão mais acessíveis e amplamente adotadas à medida que os custos de investimento diminuam.
	Diesel	O diesel continuará a ser utilizado, sobretudo para equipamentos de transporte interno das instalações, mas com tendência à substituição gradual por alternativas mais sustentáveis.
2040	Biomassa	A biomassa consolidar-se-á como um vetor energético essencial para processos térmicos, permitindo que localidades remotas sem acesso à rede de gás natural utilizem esta fonte de energia e eliminem a dependência de combustíveis fósseis.
	Outras energias renováveis	Tecnologias de armazenamento térmico estarão mais avançadas, permitindo sistemas energéticos mais flexíveis para todas as empresas, garantindo maior eficiência e estabilidade.
	Eletricidade	O consumo de eletricidade continuará a crescer, impulsionado pelo avanço da energia renovável e da infraestrutura elétrica. Além disso, equipamentos de transporte interno serão convertidos para versões elétricas, reduzindo a necessidade de diesel.

Ano	Vetor energético	Descrição
	Gases renováveis	A adoção de gases renováveis na rede de gás natural intensificar-se-á, permitindo uma transição progressiva para combustíveis sustentáveis no setor.
2050	Elettricidade	A eletricidade de fontes renováveis será o principal vetor da matriz energética do setor. Redes inteligentes e tecnologias avançadas de armazenamento garantirão maior estabilidade e confiança no fornecimento.
	Gases renováveis	O hidrogénio verde e o biometano deverão substituir quase totalmente o gás natural, desempenhando um papel crucial na descarbonização do setor.
	Gás natural	O uso do gás natural reduzir-se-á drasticamente, sendo limitado a aplicações específicas, como sistemas de backup.
	Biomassa	A biomassa será utilizada de forma totalmente otimizada dentro de um modelo de economia circular, garantindo máxima eficiência e aproveitamento de resíduos do setor, minimizando impactos ambientais.

Tabela - Identificação dos principais vetores de descarbonização

Fonte: (APA 2019; 2024b)

Em suma, em 2030, prevê-se um aumento significativo da eletrificação, a eletricidade passará a ser uma alternativa viável para vários processos industriais, impulsionada pelos avanços no armazenamento energético. O gás natural continuará a ser utilizado, destacando-se como uma solução de menor impacto carbónico face a outros combustíveis fósseis, especialmente em aplicações combinadas com biogás/biometano. A biomassa ganhará maior relevância, com um melhor aproveitamento dos resíduos do próprio setor, promovendo práticas circulares. Paralelamente, surgem os gases renováveis, como o biogás/biometano e o hidrogénio verde, cuja integração na rede de gás será intensificada. Tecnologias de energia renovável, como coletores solares, tornar-se-ão mais acessíveis para processos de baixa temperatura. Já o diesel manterá algum uso residual, sobretudo no transporte interno, mas com tendência à substituição por tecnologias mais sustentáveis, que utilizam eletricidade e hidrogénio.

Em 2040, a biomassa consolidar-se-á como uma fonte energética fundamental, especialmente em regiões sem acesso à rede de gás, contribuindo para a eliminação do uso de combustíveis fósseis. As tecnologias de armazenamento térmico permitirão maior flexibilidade energética, impulsionando o uso de energias renováveis em processos industriais. A eletricidade continuará a crescer, não só em consumo, mas também na substituição de equipamentos movidos a diesel por alternativas elétricas. A penetração dos gases renováveis será intensificada, fortalecendo a transição para uma matriz energética mais limpa.

Em 2050, a eletricidade proveniente de fontes de energia renovável será a principal fonte de energia do setor, com o suporte de redes inteligentes e tecnologias de armazenamento avançadas, garantindo estabilidade e segurança no fornecimento. Os gases renováveis, nomeadamente o hidrogénio verde e o biometano, substituirão quase por completo o gás natural, assumindo um papel central na descarbonização. O uso do gás natural será drasticamente reduzido, reservado a aplicações muito específicas. A biomassa será plenamente integrada num modelo de economia circular, otimizando os recursos e minimizando os impactos ambientais.

Este percurso ilustra um setor da madeira em transição contínua, onde a diversificação energética, aliada à inovação tecnológica e à valorização de subprodutos, é determinante para alcançar a neutralidade carbónica nas próximas décadas.

_Tecnologias emergentes para a descarbonização

O setor da madeira e mobiliário em Portugal é composto predominantemente por pequenas e médias empresas, muitas das quais de cariz familiar. Estas empresas têm vindo a experienciar um processo de modernização, impulsionado por uma geração mais jovem e pelo aumento das exigências do mercado em termos de sustentabilidade. A pressão regulatória e de mercado tem vindo a aumentar, de forma a que as empresas cumpram metas de sustentabilidade e reduzam as emissões de dióxido de carbono (CO₂). Neste âmbito, a implementação de tecnologias emergentes de descarbonização até 2050 é imperativa para assegurar a competitividade e a conformidade do setor, sendo crucial considerar tanto as tecnologias já consolidadas como a monitorização contínua do surgimento de soluções disruptivas nos próximos anos. A integração de tecnologias com TRL (*Technology Readiness Level*) $\geq 8-9$ até 2050 irá contribuir para a mitigação das emissões, através do aumento da eficiência energética e da melhoria da competitividade.

A elaboração deste capítulo teve por base uma metodologia de revisão bibliográfica, incluindo fabricantes e fornecedores do tipo de equipamentos em questão. Como base e ponto de partida consideraram-se vários documentos disponibilizados pela AIMMP (AIMMP 2010a; 2010b; 2006a; 2010c), bem como os resultados obtidos na Fase A do presente projeto, cujo objetivo era uma caracterização do setor da Madeira e Mobiliário em Portugal (INEGI e SerQ 2025).

Algumas das soluções tecnológicas identificadas são as seguintes:

- **IoT e Inteligência artificial (IA):** Para monitorização ambiental, controlo de humidade, logística e inventário, essas soluções já têm maturidade crescente (TRL 5-7 em 2040) e ajudam a evitar desperdícios e otimizar processos, podendo ser integradas gradualmente em todas as etapas competitivas até 2050. Otimização logística (até 10% de ganhos), gestão energética inteligente, redução de perdas e transporte desnecessário.
- **Digitalização e automação de corte:** O uso de 3D e laser scanning, corte automatizado, robots colaborativos e redes neurais para deteção de falhas internas já demonstra maturidade relevante (TRL 7-8) e deverá ser dominante até 2040-2050, elevando a precisão, rendimento e reduzindo desperdício de material.
- **Serragem e motores de alto rendimento:** A implementação de serras automatizadas com controlo em tempo real, motores de alto rendimento e integração de robótica trará ganhos em eficiência e redução de consumo energético. Espera-se que o desempenho continue a evoluir, com maturidade tecnológica consolidada entre 2030 e 2040. Aumento do rendimento em toros, menos desperdício, redução de 20–30% no consumo energético, maior precisão e qualidade da madeira.
- **Aparagem e classificação automatizadas:** Soluções de CNC avançado com visão computacional, inspeção visual por IA e scanners de defeitos permitirão cortes mais precisos, menos retrabalho e redução significativa de erros, estando maduras e economicamente viáveis até 2040.
- **Secagem e recuperação energética:** Novas tecnologias como secagem a vácuo automatizada, recuperação de calor e IoT para controlo integrado prometem reduzir em até 30% o consumo de energia nas próximas duas décadas, sendo a maturidade esperada entre 2030 e 2040.
- **Armazenamento e logística inteligentes:** Monitorização IoT, automação de armazéns e AGVs para movimentação de matéria-prima e produtos finais, já apresentam grau de maturidade elevado e devem ser integrados à maioria das unidades até 2050, com ganhos logísticos e energéticos de 10-15%.
- **Tratamento de resíduos e valorização energética:** Produção de pellets, bio-óleo, utilização de caldeiras de biomassa de alta eficiência e sistemas modulares terão papel central na autoprodução de energia (potenciais de 50-70% de redução emissões até 2050).

Evolução Temporal até 2050

Até 2030: Tecnologias de digitalização inicial, sensorização, automação básica e motores eficientes estarão amplamente implementadas, com ganhos de 10–20% em eficiência e reduções modestas de emissões

Até 2040: Adoção em larga escala de inspeção automatizada, robótica, secagem eficiente e logística inteligente, já com retorno financeiro consolidado para as empresas. Reduções de 30-40% em energia e emissões

Até 2050: Integração completa de soluções de IA, automação avançada, autoprodução energética e otimização em tempo real. Redução de 50-70% nas emissões, alinhando com neutralidade carbônica.

Vantagens e Potencial de Descarbonização:

- **Redução direta de CO₂** pela substituição de combustíveis fósseis por biomassa, bio-óleo e eletrificação.
- **Eficiência energética:** ganhos acumulados de até 55% até 2050.
- **Menor desperdício:** otimização de corte, classificação e reaproveitamento de resíduos.
- **Competitividade:** produtos de maior qualidade, adaptados às exigências de sustentabilidade da construção e mercados internacionais.
- **Sustentabilidade:** integração em cadeias circulares, valorizando resíduos e reduzindo custos operacionais.

Tecnologias emergentes disruptivas

Como complemento às tecnologias identificadas anteriormente, que serão aquelas com maior probabilidade de maturidade tecnológica até 2050, para implementação na indústria e no mercado, incluem-se outras tecnologias emergentes, que podem, no entanto, apresentar um nível de maturação incerto e/ou um desenvolvimento variável. Apesar disso, pelo seu potencial, devem ser consideradas e acompanhado o seu desenvolvimento.

Do ponto de vista de desenvolvimento, podem considerar-se 3 horizontes temporais:

- **Horizonte 2030-2035: Consolidação de Tecnologias Digitais** – As tecnologias que estarão comercialmente maduras neste período incluem sistemas avançados de inteligência artificial, robótica colaborativa de nova geração e nanotecnologia aplicada.
- **Horizonte 2035-2045: Biotecnologia e Materiais Avançados** – Neste período, emergirão tecnologias baseadas em modificação molecular da madeira, incluindo técnicas CRISPR para edição genética que permitirão alterar a composição da lignina. Esta inovação revolucionará a eficiência do processamento de fibras (Sulis et al. 2023; Beims et al. 2023; Rowell 2017).

A bioengenharia de painéis vivos representará um salto qualitativo, permitindo cultivar madeira em laboratório com propriedades específicas programadas. Investigadores do MIT já demonstraram a capacidade de crescer material semelhante à madeira em condições controladas, ajustando propriedades como rigidez e densidade através da manipulação hormonal ("Toward customizable timber, grown in a lab | MIT News | Massachusetts Institute of Technology" s.d.).

- **Horizonte 2045-2050: Tecnologias Disruptivas e Energia de Fusão** – O horizonte 2050 trará tecnologias verdadeiramente disruptivas. A energia de fusão nuclear estará previsivelmente

disponível comercialmente, fornecendo energia limpa e abundante para processamento industrial (EUROfusion 2018).

A nanotecnologia avançada para materiais de madeira permitirá criar estruturas com propriedades funcionais programáveis, incluindo materiais autocurativos, condutores elétricos e com capacidades de armazenamento de energia. O desenvolvimento de nanoceluloses funcionais oferecerá alternativas sustentáveis aos materiais sintéticos em múltiplas aplicações (Saritha, Anju e Kumar 2022).

A robótica *swarm* revolucionará a montagem, utilizando múltiplos robôs pequenos que trabalham coordenadamente, inspirados no comportamento de enxames naturais. Esta tecnologia permitirá montagem distribuída e adaptativa, reduzindo drasticamente os tempos de produção (Zelinka et al. 2022; Kučerka, Očkajová e Kminiak 2024).

Outras tecnologias de descarbonização emergirão, mas serão mais adequadas a outras indústrias grandes emissoras de CO₂. Exemplo disso são os sistemas de captura e utilização de carbono (CCU).

III TRAJETÓRIAS ENERGÉTICAS SUSTENTÁVEIS PARA O SETOR DA MADEIRA

_ Modelo energético – OSeMOSYS

O Open Source Energy Modeling System (OSeMOSYS) é um modelo de otimização de sistemas energéticos amplamente utilizado para o planeamento energético de longo prazo. A sua flexibilidade, tanto em termos do âmbito (definição das fronteiras do sistema energético) como na caracterização detalhada do sistema (tecnologias, custos e metas), torna-o especialmente adequado para análises setoriais (Optimus, s.d.).

No contexto da indústria da madeira, o OSeMOSYS permite avaliar a evolução futura do setor, quer ao nível dos processos produtivos, quer no consumo de energia útil. O principal objetivo da sua aplicação é identificar rotas de transição que sejam custo-eficazes, orientando a indústria no caminho da descarbonização e do cumprimento dos compromissos climáticos, através da redução das emissões de gases com efeito de estufa.

Assim, na construção do modelo energético apresentado neste relatório, recorreu-se ao OSeMOSYS para simular a evolução do sistema energético da indústria da madeira, de 2023 a 2050, com o objetivo de identificar as soluções que asseguram o fornecimento de energia conforme as necessidades do setor, ao mesmo tempo que minimiza os custos totais do sistema ao longo de todo o horizonte de modelação. A estrutura do modelo assenta em vários elementos fundamentais: a evolução das necessidades energéticas por processo (em termos de energia útil), a previsão do desenvolvimento tecno-económico das tecnologias de uso final, a disponibilidade e os preços projetados dos diferentes vetores energéticos, bem como as metas de descarbonização de curto, médio e longo prazo. Adicionalmente, é possível incorporar restrições que reflitam limitações reais, como restrições de investimento, indisponibilidade de determinadas tecnologias à escala industrial ou limites no fornecimento de vetores energéticos específicos, como o biometano ou o hidrogénio. A introdução destas restrições contribui para uma representação mais realista do sistema energético simulado. Importa ressaltar que os resultados obtidos através do modelo OSeMOSYS estão intrinsecamente dependentes da qualidade, disponibilidade e atualidade dos dados de entrada, bem como dos pressupostos adotados. As projeções futuras representam cenários possíveis e não previsões determinísticas, estando associadas a um grau de incerteza inerente à natureza dos modelos de planeamento energético de longo prazo. Assim, os resultados devem ser interpretados como orientações para apoiar a tomada de decisão, e não como garantias de evolução futura.

Modelo energético para Setor da Madeira

Com o objetivo de identificar as trajetórias mais custo-eficazes para a descarbonização do setor da madeira até 2050, a modelação centrou-se nas tecnologias aplicadas aos diversos processos do setor, considerando um horizonte temporal até 2050.

É importante salientar que, no âmbito da otimização, apenas são considerados os custos associados ao sistema energético das unidades industriais. A componente de fornecimento dos diferentes vetores energéticos – incluindo a sua transformação e distribuição – é introduzida no modelo como um dado de entrada, sendo caracterizada pela sua disponibilidade, emissões associadas e preço. Deste modo, o modelo não realiza a otimização da produção de eletricidade, hidrogénio, biometano ou outros vetores energéticos a nível do sistema energético nacional. A única exceção são as unidades de geração de eletricidade e calor destinadas ao autoconsumo (exemplo: fotovoltaico, coletores solares,

motores de cogeração, etc.) cuja operação e custos são integrados na otimização do sistema industrial.

Para o setor da madeira, foram definidos cinco cenários principais de análise:

- *Business-As-Usual (BAU)*: Representa uma evolução inercial, onde a procura de energia aumenta ao longo do tempo, a rede elétrica continua o seu processo de descarbonização e novas tecnologias tornam-se disponíveis. No entanto, não são impostas restrições às emissões de GEE, nem aplicadas taxas de carbono.
- *Regulação de Emissões (EMIS-ONLY)*: Cenário em que são introduzidas limitações às emissões de GEE, mas sem aplicação de taxas de carbono.
- *Taxas de Carbono (TAX-ONLY)*: Cenário em que são introduzidas as taxas de carbono sem as limitações das emissões de GEE.
- *Política Climática Combinada (EMIS-TAX)*: Inclui simultaneamente limites às emissões de GEE e a aplicação de taxas de carbono, representando um cenário de políticas climáticas mais restritivas.
- *Eletrificação (ELE)*: Considerando que o setor da madeira tem potencial para uma eletrificação quase total, este cenário visa avaliar os impactos e benefícios de uma estratégia de eletrificação completa dos seus processos energéticos.

Cenário	Limite de emissões	Taxas de carbono	Forçar eletrificação	Descrição
BAU	×	×	×	"Business as usual" – sem novas políticas
EMIS-ONLY	✓	×	×	Apenas políticas de limite de emissões
TAX-ONLY	×	✓	×	Apenas políticas de taxas de carbono
EMIS-TAX	✓	✓	×	Políticas de mitigação com taxa de carbono + limite de emissões
ELE	✓	✓	✓	Políticas + eletrificação forçada

Tabela - Cenários considerados para o setor da madeira

Adicionalmente aos cenários principais, foi definido um cenário fictício designado por *Cenário de Referência (REF)*. Neste panorama, a procura de energia evolui de forma semelhante aos restantes cenários; no entanto, não se verifica qualquer desenvolvimento tecnológico adicional, mantendo-se em operação apenas as tecnologias atualmente instaladas. Da mesma forma, não são implementadas novas políticas e não existem esforços sociais no sentido da descarbonização, refletindo assim uma situação de estagnação tecnológica e ausência de ação climática. Na tabela seguinte, apresentam-se as principais diferenças entre o cenário de REF e o cenário BAU.

Cenário	Vetores energéticos neutros em carbono	Tecnologias novas	Políticas climáticas	Rede elétrica descarbonizada	Objetivo
REF (Referência)	✗	✗	✗	✗	Mundo "congelado"
BAU	✓	✓	✗	✓	Progresso tecnológico, mas sem políticas

Tabela - Cenário de referência vs BAU

Além destes cenários, os quatro principais e o cenário REF, considerou-se ainda um outro cenário, o *Business as Usual - TAX* (BAU-TAX), semelhante ao *Business as Usual* (BAU), no qual além do custo acumulado, se incorpora também o custo associado às emissões de GEE.

Inputs do modelo

Este subcapítulo apresenta os principais dados de input considerados na modelação com o OSeMOSYS, bem como o respetivo racional de seleção. Dado que os resultados obtidos estão diretamente dependentes dos dados introduzidos, a definição rigorosa e fundamentada desses inputs é essencial para assegurar a robustez e a credibilidade dos cenários modelados.

Procura de energia útil

A caracterização do setor no ano-base (2023) teve como ponto de partida o balanço energético da Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG) para o setor madeira (Direção Geral de Energia e Geologia s.d.). Este conjunto de dados foi considerado como referência para o consumo energético do setor, uma vez que se tratam de estatísticas oficiais e validadas. Contudo, esta informação está disponível apenas ao nível do consumo de energia final, sem detalhar a distribuição dos vetores energéticos pelos processos industriais específicos. Para ultrapassar esta limitação, a análise foi complementada com dados do *Joint Research Centre* (JRC), também relativos ao mesmo setor (European commission s.d.). Esta segunda fonte fornece uma desagregação dos vetores por processo industrial, permitindo traçar os fluxos energéticos entre os níveis de energia final e o serviço energético.

Apesar de o JRC também disponibilizar dados de consumo energético final, optou-se por priorizar os valores da DGEG, dada a sua natureza oficial. Assim, a utilização combinada das duas bases de dados permitiu conjugar as vantagens de ambas: uma representação detalhada dos processos industriais (JRC), alicerçada em valores oficiais de consumo final de energia (DGEG), resultando numa caracterização energética mais robusta e precisa do setor. Nesta análise, o consumo de *Lubrificantes-Parafinas* (DGEG) foi ignorado por representarem uma fração muito pouco significativa (inferior a 0.3%) do respetivo consumo energético global. Assim a desagregação do consumo final de energia por vetor energético para o setor da madeira para o ano base encontra-se representada na Figura - Consumo final de energia por vetor energético para o sector da madeira.

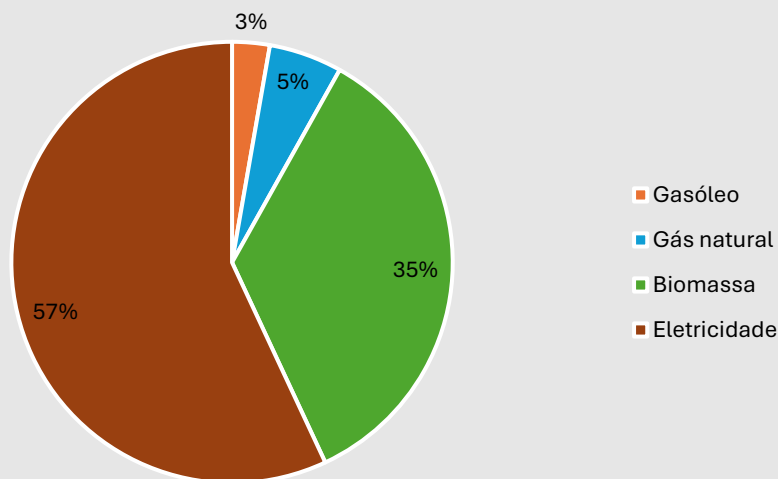


Figura - Consumo final de energia por vetor energético para o sector da madeira

Com base no balanço energético para o setor da madeira, o consumo de energia final associado a cada um dos vetores foi desagregado pelos diferentes processos industriais: *Iluminação*, *Ar comprimido*, *Maquinaria de Processo*, *Calor direto*, *Secagem*. Por forma a complementar os serviços energéticos indicados, incluiu-se o consumo de energia para *Transporte* (exemplo: empilhadores), tendo sido destinada, para este fim, o consumo de *Diesel* apresentado na desagregação do consumo de energia. Na Figura, é apresentada a desagregação pelos diferentes processos industriais.

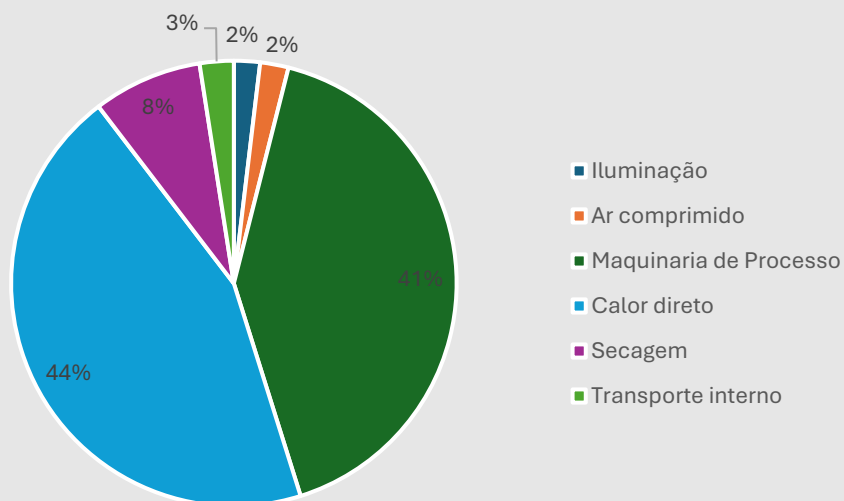


Figura - Desagregação do consumo de energia por processo de fabrico

Relacionando os vetores energéticos utilizados no setor com os principais processos de fabrico, para o ano base, obtém-se a seguinte correspondência entre tipo de energia e aplicação:

- Energia elétrica: utilizada principalmente para *Iluminação*, *Ar comprimido* e *Maquinaria de Processo*;
- Energia térmica (proveniente de gás natural e biomassa): aplicada em *Calor Direto* e processos de *Secagem*;
- Combustíveis para transporte (como o gasóleo): *Transporte interno*.

Evolução de procura de energia útil

As projeções de procura de energia até 2050 foram calculadas com base no indicador económico Valor Acrescentado Bruto (VBA). A partir dos dados históricos entre 2006 e 2021, que correlacionam o consumo energético com o valor do VBA extrapolado até 2050, foi possível estimar a procura energética, a energia útil dos consumidores ao longo dos próximos anos (Direção Geral de Energia e Geologia s.d.). Na Figura - Projeção de crescimento do VBA até 2050, é apresentado graficamente o crescimento estimado para o valor do VBA até 2050.

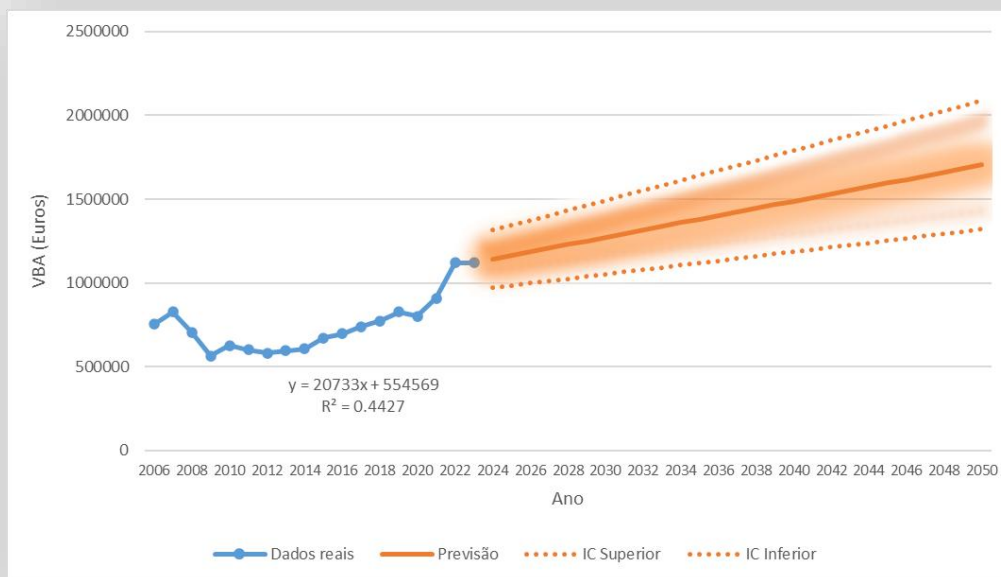


Figura - Projeção de crescimento do VBA até 2050

O crescimento esperado para o VAB é de cerca de 30%, assim, estima-se que, face ao ano base, o consumo de energia possa aumentar cerca de 30%. Na Figura - Estimativa de crescimento do consumo energia até 2050 ilustra-se a estimativa de crescimento do consumo energético, em toneladas equivalentes de petróleo (tep), para o setor no mesmo horizonte temporal.

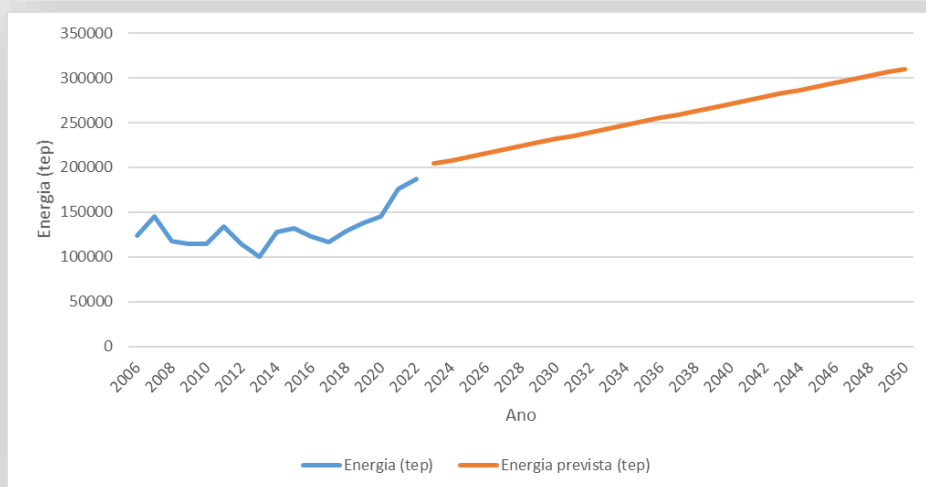


Figura - Estimativa de crescimento do consumo energia até 2050

Estas projeções são fundamentais para a calibração do modelo, contribuindo para a obtenção de resultados mais alinhados com a realidade esperada.

A Figura - Evolução de energia desagregada pelos diferentes consumidores/processos apresenta a evolução da procura de energia útil, desagregada pelos diferentes consumidores/processos de fabrico.

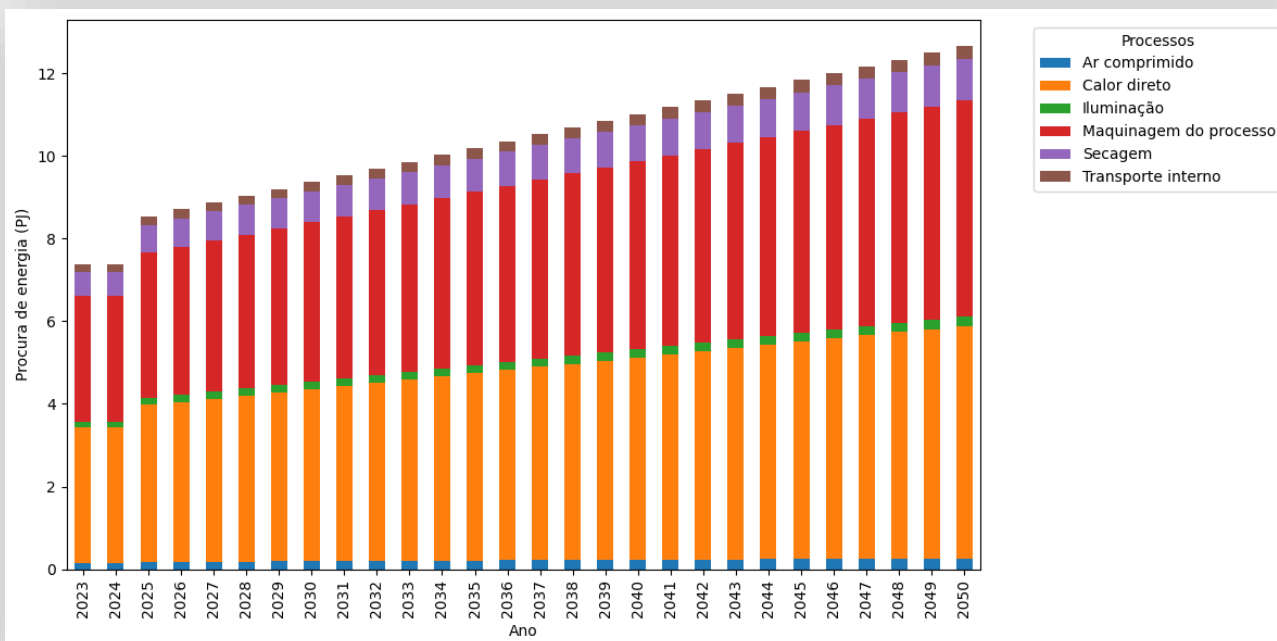


Figura - Evolução de energia desagregada pelos diferentes consumidores/processos

Vetores energéticos

No caso dos vetores energéticos, foi realizada uma análise de sensibilidade que considerou todos os vetores passíveis de serem introduzidos no setor, com foco nos processos de fabrico. Foram considerados os seguintes vetores: *eletricidade, gás natural, biometano, gasóleo, hidrogénio e biomassa*. Com esses vetores previamente identificados, procedeu-se à análise da sensibilidade em termos da evolução dos preços e das emissões associadas a cada um.

Para além disso, neste setor é comum as empresas utilizarem os próprios resíduos para a geração de energia. Esta particularidade foi considerada no modelo, assumindo-se que esses resíduos não teriam um custo associado por ser considerado resíduo, contudo, têm um fator de emissão equivalente ao da biomassa.

Os preços de mercado dos diferentes combustíveis, bem como a sua projeção futura, foram incorporados no modelo, de forma a refletir a competitividade económica de cada opção energética.

A Tabela - Estimativa de evolução de preços dos diferentes combustíveis, entre 2023 e 2050 apresenta a estimativa da evolução dos custos dos diferentes combustíveis considerados.

Custo [euro/kWh]	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Biometano	-	-	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05
Elettricidade	0,12	0,15	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11
Hidrogénio	-	-	0,10	0,08	0,06	0,05	0,04
Diesel	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14	0,16	0,16
Gás natural	0,06	0,06	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02
Biomassa	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03

Tabela - Estimativa de evolução de preços dos diferentes combustíveis, entre 2023 e 2050

Fonte: (Ruiz et al. 2019; Mathias Mier, s.d.; pwc s.d.; Selectra s.d.; água&ambienteonline s.d.; Stream s.d.)

O preço do biometano e do hidrogénio mostra uma redução contínua, refletindo os avanços tecnológicos e o aumento da eficiência na produção destes combustíveis. O biometano diminui de 0,06 €/kWh em 2030 para 0,05 €/kWh em 2050, enquanto o hidrogénio reduz de 0,10 €/kWh em 2030 para 0,04 €/kWh até 2050. A eletricidade, inicialmente tem uma subida para 0,15 €/kWh em 2030, depois diminui para 0,11 €/kWh até 2050, refletindo o aumento de procura de eletricidade para a eletrificação de processos. Por outro lado, o gás natural apresenta uma redução do preço de 0,06 €/kWh para 0,02 €/kWh em 2050, devido à redução da procura (e manutenção da oferta). Por sua vez, a biomassa mantém um custo estável de 0,03 €/kWh. Além dos custos mencionados, importa realçar que foram aplicadas restrições no modelo em termos da disponibilidade do biometano e do hidrogénio, pelo que o biometano e biomassa só estarão disponíveis a partir do ano 2026, enquanto o hidrogénio só estará disponível a partir do ano 2028. Na Figura seguinte, encontra-se representada graficamente a evolução dos custos dos vetores energéticos de 2023-2050.

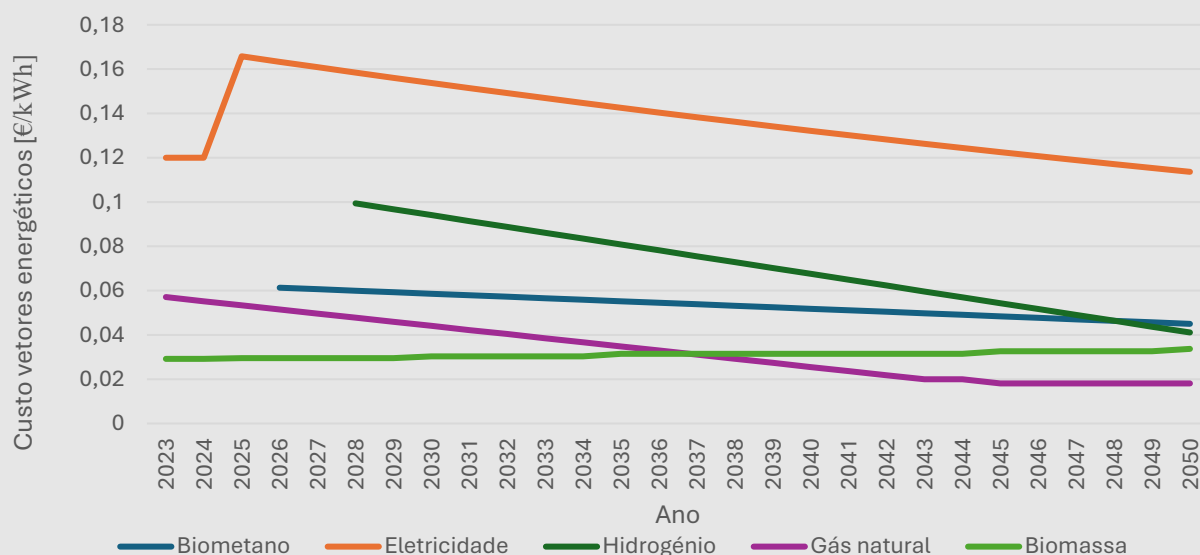


Figura - Evolução dos custos dos vetores energéticos de 2023-2050

No que toca aos fatores de emissão associados aos vetores energéticos, encontra-se na Tabela - Fator de emissão dos vetores energéticos os diferentes valores utilizados, assumindo-se que estes permanecem constantes ao longo de todo o período considerado. No entanto, no caso da eletricidade, prevê-se uma progressiva descarbonização ao longo dos anos. Assim, o fator de emissão da eletricidade é reduzido gradualmente entre 2021 e 2050, em conformidade com as metas estabelecidas pelo PNEC 2030 e pelo RNC 2050, conforme ilustrado na Tabela - Evolução do fator de emissão de GEE da eletricidade entre 2023 e 2050.

Fator de emissão	[MtCO ₂ /PJ]
Diesel	0,074
Gás Natural	0,056
Biometano	0,011
Biomassa	0,002

Tabela 3 - Fator de emissão dos vetores energéticos

Fator de emissão	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Eletricidade [MtCO ₂ /PJ]	0,036	0,034	0,026	0,020	0,015	0,009	0,003

Tabela - Evolução do fator de emissão de GEE da eletricidade entre 2023 e 2050

Fonte: (APA 2019)

Tendo em conta que, a partir de 2027, entrará em vigor o novo regime ETS 2 (segundo regime do Comércio Europeu de Licenças de Emissão – CELE), que abrangerá setores como os transportes rodoviários, o aquecimento de edifícios e pequenas empresas, considerou-se importante incluir neste modelo energético também os impactos associados a esta medida.

Embora a responsabilidade direta recaia sobre os fornecedores de combustíveis, os custos serão inevitavelmente repercutidos nos preços pagos pelos consumidores finais. Assim, o modelo incorpora as taxas de carbono previstas (Tabela - Taxas de carbono), replicando a lógica do Imposto Especial de Consumo de Gás Natural (IECGN)¹. As indústrias estão sujeitas ao IECGN, mas podem beneficiar de reduções ou isenções. Nomeadamente, as instalações já abrangidas pelo CELE podem ficar isentas da componente de carbono do IECGN, uma vez que já internalizam os custos das emissões através da compra de licenças, evitando assim dupla tributação.

Deste modo, tanto através do IECGN como do futuro ETS 2, o custo associado às emissões de CO₂ deverá continuar a aumentar nos próximos anos, refletindo o esforço europeu de descarbonização da economia.

Custo de emissões	2030	2035	2040	2045	2050
[euro/tCO ₂]	134	150	162	172	184

Tabela - Taxas de carbono

Fonte: (Carbon Credit Markets s.d.)

Assim, espera-se que, durante o período em análise, os custos de emissão aumentem de 134 euros/tCO₂ em 2030 para 184 euros/tCO₂ em 2050, representando um crescimento de 37%. A figura seguinte apresenta graficamente a evolução esperada dos custos das taxas de carbono entre 2027 e 2050.

¹ O IECGN é um imposto nacional aplicado ao consumo de gás natural em Portugal e inclui uma componente de carbono, que é calculada com base no preço do CO₂ no mercado europeu de emissões (CELE). À medida que o preço do carbono aumenta, o valor do IECGN também tende a subir.

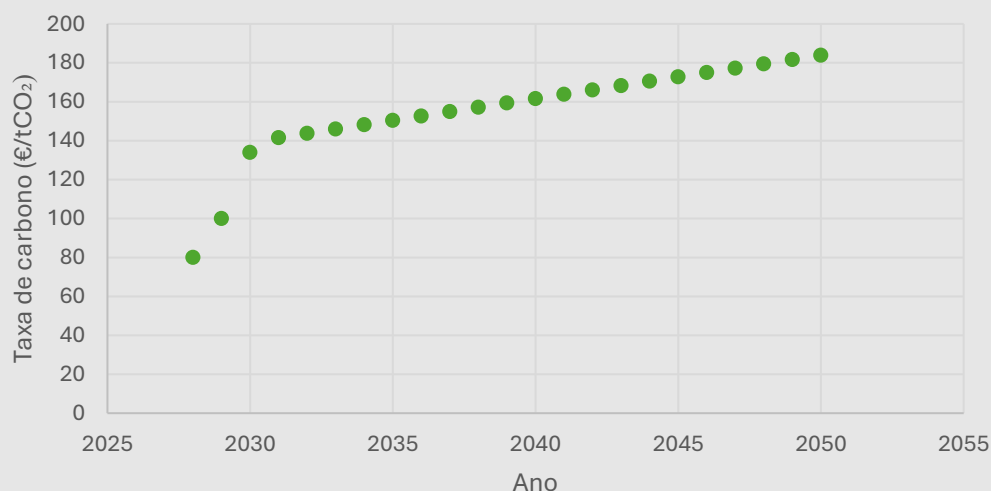


Figura2 - Evolução esperada dos custos das taxas de carbono entre 2027 e 2050

Metas de descarbonização

De forma a assegurar o cumprimento das metas de emissões de gases com efeito de estufa para o setor da madeira (considerando os âmbitos 1 e 2), as emissões anuais do sistema, no período de análise de 2023 a 2050, foram limitadas no modelo de acordo com os valores apresentados na Tabela 4. A Figura - Evolução das metas de emissões de GEE para setor de 2023 até 2050 apresenta graficamente a evolução das metas de emissões de GEE para o setor.

Emissões de CO ₂	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
[MtCO ₂]	0,29	0,26	0,12	0,11	0,10	0,09	0,07

Tabela 4 - Metas de emissões de GEE para setor até 2050

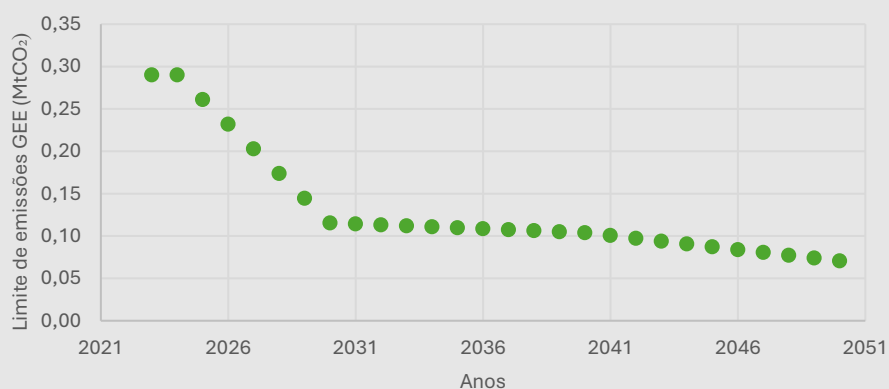


Figura 3 - Evolução das metas de emissões de GEE para setor de 2023 até 2050

Tecnologias

Antes da elaboração do modelo OSeMOSYS, foram identificadas as tecnologias atualmente utilizadas, bem como as tecnologias emergentes e futuras, mais eficientes, com potencial de redução de custos e alinhadas com os objetivos de descarbonização para cada processo de fabrico.

Motores elétricos + Variadores de velocidade

No caso dos processos que requerem energia mecânica gerada a partir de energia elétrica, foram considerados motores elétricos das classes de eficiência IE2, IE3 e IE4. Adicionalmente, foram incluídos variadores de velocidade (VFD) associados a estes motores, cuja incorporação permite otimizar a operação dos motores, resultando numa melhoria significativa da eficiência energética do sistema, contudo, com um custo superior. Na tabela seguinte encontra-se a estimativa de evolução de custos para motores elétricos e variadores de velocidade acoplados ("ADAJUSA" s.d.; "EXPONDO" s.d.; "REIMAN" s.d.; "Advanced systems" s.d.).

Custo		2023	2030	2040	2050
IE2	CAPEX (EUR/kW)	78	73	60	49
	OPEX (EUR/kW)	4	4	3	2
IE3	CAPEX (EUR/kW)	94	87	73	59
	OPEX (EUR/kW)	5	4	4	3
IE4	CAPEX (EUR/kW)	172	160	134	109
	OPEX (EUR/kW)	9	8	7	5
IE2 + VFD	CAPEX (EUR/kW)	338	315	263	215
	OPEX (EUR/kW)	17	16	13	11
IE3 + VFD	CAPEX (EUR/kW)	354	330	275	225
	OPEX (EUR/kW)	18	17	14	11
IE4 + VFD	CAPEX (EUR/kW)	433	403	336	274
	OPEX (EUR/kW)	22	20	17	14

Tabela - Estimativa de evolução de custos para motores elétricos e variadores de velocidade acoplados

Coletores solares + Painéis fotovoltaicos

As tecnologias solares, tanto fotovoltaicas (PV) como térmicas (coletores solares), apresentam um elevado potencial para fornecimento de energia elétrica e térmica, respetivamente, no setor industrial. Estas tecnologias são especialmente relevantes para setores com elevado potencial de eletrificação e processos com exigências térmicas até médias temperaturas.

- **Painéis Fotovoltaicos (PV):** Os sistemas fotovoltaicos são atualmente considerados uma das soluções mais custo-eficazes para a geração descentralizada de eletricidade, em grande parte devido à sua elevada maturidade tecnológica (TRL 9), redução contínua de custos, baixo custo de operação e manutenção (OPEX), bem como à sua modularidade e adaptabilidade a diferentes escalas de instalação.

A evolução estimada dos custos para PV é apresentada na tabela seguinte.

Custo		2023	2030	2040	2050
PV	CAPEX (EUR/kW)	645	450	270	160
	OPEX (EUR/kW)	128	89	54	32

Tabela - Estimativa de evolução de custos para painéis fotovoltaicos

Fonte: (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, s.d.)

- **Coletores solares:** No que respeita à geração de calor industrial, os coletores solares térmicos constituem uma solução tecnicamente viável para processos com requisitos térmicos entre os 30 °C e os 400 °C. Esta tecnologia também se encontra em estado de maturidade elevado (TRL 9), com diferentes tipologias de coletores adaptadas a diferentes gamas de temperatura:
 - Placas planas: adequadas para temperaturas até cerca de 100 °C, típicas de processos de aquecimento de água e pré-aquecimento de fluidos;
 - Tubo de vácuo: eficientes para temperaturas entre 80 °C e 150 °C, adequadas para processos térmicos mais exigentes;
 - Concentradores solares (CPC, Fresnel, Parabólicos): utilizados para aplicações industriais que requerem temperaturas médias a elevadas (150 °C a 400 °C).

A Figura seguinte apresenta a correspondência entre os intervalos de temperatura dos processos industriais e os tipos de coletores solares adequados.

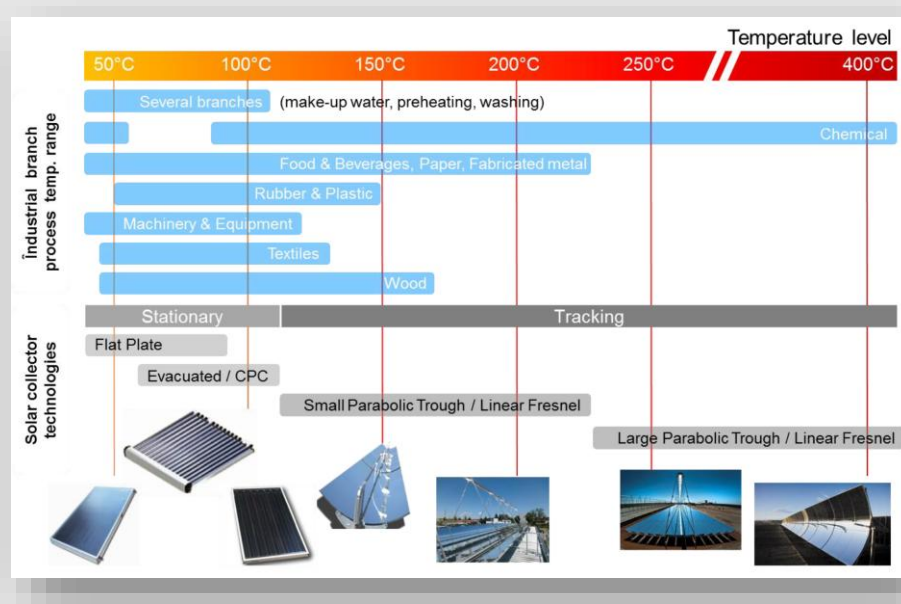


Figura - Identificação de coletores solares por gama de temperatura e por setor a aplicar

Fonte: (Bie et al. 2020)

A evolução prevista do CAPEX/OPEX destas tecnologias é apresentada na tabela que se segue.

Custo		2023	2030	2040	2050
Placa plana	CAPEX (EUR/kW)	452	382	299	235
	OPEX (EUR/kW)	45	38	30	23
Tubo de vácuo	CAPEX (EUR/kW)	1092	785	602	473
	OPEX (EUR/kW)	109	79	60	47
Concentrador solar	CAPEX (EUR/kW)	1059	856	672	527
	OPEX (EUR/kW)	106	86	67	53

Tabela - Estimativa de evolução de custos para coletores solares

Fonte: (Universidade de Evora, s.d.)

Armazenamento elétrico e térmico

A integração de sistemas de armazenamento de energia, tanto térmica como elétrica, é fundamental para aumentar a flexibilidade e a fiabilidade dos sistemas energéticos industriais, especialmente quando se utiliza produção renovável descentralizada, como é o caso dos sistemas solares (fotovoltaicos e térmicos). Estas soluções permitem adaptar a oferta à procura, reduzir picos de consumo e melhorar a eficiência global dos sistemas energéticos.

- **Armazenamento elétrico:** O armazenamento elétrico desempenha um papel chave na maximização do autoconsumo da energia produzida por sistemas fotovoltaicos, permitindo a sua utilização diferida no tempo e reduzindo a dependência da rede elétrica. Atualmente, existem várias tecnologias comerciais e em desenvolvimento, com diferentes características técnicas em termos de tempo de descarga, eficiência de carga/descarga, tempo de vida útil, segurança e sustentabilidade ambiental. As principais tecnologias incluem:
 - Baterias de iões de lítio;
 - Baterias Redox de Vanádio;
 - Baterias de Sódio-Enxofre;
 - Baterias de Cloreto de Sódio-Níquel.

A estimativa de evolução do custo para armazenamento elétrico está apresentada na tabela.

Custo		2023	2030	2040	2050
Armazenamento elétrico	CAPEX (EUR/kW)	1282	895	536	321
	OPEX (EUR/kW)	5	5	5	5

Tabela - Estimativa de evolução de custos para o armazenamento elétrico

Fonte: (The Danish Energy Agency s.d.)

- **Armazenamento térmico:** Os sistemas de armazenamento de energia térmica (TES) são fundamentais para a flexibilização do fornecimento de calor em processos industriais, permitindo a separação temporal entre a produção e o consumo de energia térmica. Existem três categorias principais de tecnologias de TES, classificadas com base no princípio físico de armazenamento:
 1. **Armazenamento por Calor Sensível:** Este é o tipo de armazenamento térmico mais comum, caracterizado por uma variação de temperatura do material de armazenamento proporcional à energia acumulada. A energia é armazenada através do aumento da temperatura de um material, geralmente com alta capacidade térmica específica, como água, óleos térmicos ou materiais sólidos (ex: rochas).
 - **Tecnologia madura:** TRL 9;
 - **Vantagens:** baixo custo, simplicidade técnica, elevada fiabilidade;
 - **Desvantagens:** densidade energética relativamente baixa, maiores perdas térmicas em longos períodos de armazenamento;
 - **Exemplo típico:** tanques de armazenamento de água quente.
 2. **Armazenamento por Calor Latente:** Este sistema utiliza materiais de mudança de fase (PCM – *Phase Change Materials*), que armazenam energia na forma de calor latente durante a transição de fase (geralmente fusão/solidificação). Durante este processo, a temperatura permanece quase constante.
 - **TRL:** 6–8;

- **Vantagens:** elevada densidade energética por volume, estabilidade térmica na operação;
- **Desvantagens:** maior complexidade no projeto, condutividade térmica limitada dos PCMs;
- **Exemplo típico:** ceras ou sais hidratados usados em tanques.

3. Armazenamento Termoquímico: Baseia-se em reações químicas endotérmicas e reversíveis para armazenar energia. A energia é armazenada na forma de ligações químicas e libertada quando a reação inversa ocorre.

- **TRL:** 3–5;
- **Vantagens:** altíssima densidade energética, perdas mínimas durante o armazenamento a longo prazo, adequado para transporte de calor;
- **Desvantagens:** elevada complexidade técnica, desenvolvimento ainda incipiente, sensível a condições ambientais;
- **Exemplo típico:** reações reversíveis entre óxidos metálicos e vapor de água.

Na figura seguinte é possível observar as diferenças entre as três tecnologias de armazenamento térmico, no que toca à complexidade do armazenamento e capacidade de armazenamento térmico volumétrico, perdas na conversão e perdas no armazenamento. A evolução prevista dos custos associados a estas tecnologias é apresentada na Tabela - Estimativa de evolução de custos para armazenamento térmico.

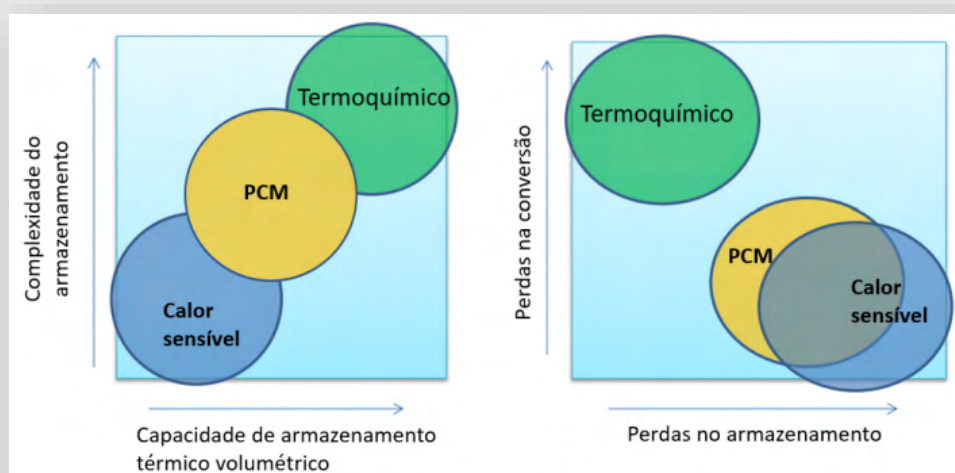


Figura 4 - Comparação entre as diferentes tecnologias de armazenamento térmico

Fonte: (Patrick Ferreira, s.d.)

Custo		2023	2030	2040	2050
Armazenamento sensível	CAPEX (EUR/kW)	150	150	150	150
	OPEX (EUR/kW)	5	5	5	5
Armazenamento latente	CAPEX (EUR/kW)	450	314	188	153
	OPEX (EUR/kW)	5	5	5	5

Tabela - Estimativa de evolução de custos para armazenamento térmico

Fonte: (The Danish Energy Agency s.d.)

Bombas de calor

As bombas de calor têm vindo a ganhar destaque na indústria devido à sua capacidade de melhorar significativamente a eficiência energética dos processos térmicos. Esta tecnologia baseia-se na transferência de calor de uma fonte de baixa temperatura para um fluido de processo a uma temperatura superior, utilizando energia elétrica como vetor energético. Em comparação com os métodos convencionais de geração de calor – nomeadamente caldeiras alimentadas por combustíveis fósseis – as bombas de calor apresentam um desempenho energético substancialmente superior.

A eficiência das bombas de calor é geralmente expressa através do Coeficiente de Performance (COP), que representa a razão entre a energia térmica fornecida e a energia elétrica consumida. Para aplicações industriais de baixa e média temperatura, é comum observar valores de COP superiores a 3, ou seja, por cada 1 kWh de energia elétrica consumida, a bomba de calor pode fornecer 3 kWh de energia térmica útil. As bombas de calor industriais distinguem-se ainda pela sua versatilidade funcional, podendo ser integradas em múltiplas aplicações, tais como:

- Geração de calor: utilizando fontes térmicas de baixa temperatura;
- Geração de frio: em processos de arrefecimento ou climatização.

Em termos de maturidade tecnológica, as bombas de calor de baixa temperatura (até 90 °C) já se encontram amplamente desenvolvidas (TRL 9), estando disponíveis no mercado e com aplicação consolidada na indústria. Espera-se que, com a sua maior adoção e economias de escala resultantes, o custo por kW térmico instalado continue a diminuir. As bombas de calor de média temperatura (90 – 150 °C) estão em fase avançada de desenvolvimento (TRL 8) e próximas da comercialização. À medida que a tecnologia evolui, é também esperada uma redução gradual nos custos, tornando estas soluções cada vez mais competitivas. Já as bombas de calor de alta temperatura (acima de 150 °C) estão ainda numa fase inicial de desenvolvimento (TRL 5–6). Apesar do seu potencial para descarbonizar processos exigentes, estas tecnologias enfrentam atualmente custos elevados e desafios técnicos, como a escolha de materiais e fluidos adequados para operar em condições extremas.

A evolução prevista do custo desta tecnologia é apresentada na tabela seguinte.

Custo		2023	2030	2040	2050
Bombas calor	CAPEX (EUR/kW)	822	801	1049	700
	OPEX (EUR/kW)	1	0.9	0.8	0.7

Tabela - Estimativa de evolução de custos para bomba de calor

Fonte: (The Danish Energy Agency s.d.)

Motores de cogeração

A cogeração (ou produção combinada de calor e eletricidade – CHP: *Combined Heat and Power*) é um processo que permite a produção simultânea de energia elétrica e térmica a partir de uma única fonte de energia primária. Este conceito tem como principal vantagem a maximização do aproveitamento da energia contida no combustível, reduzindo significativamente as perdas associadas aos sistemas convencionais de produção separada de eletricidade e calor.

Em sistemas tradicionais, a produção de eletricidade e de calor ocorre de forma independente, com rendimentos globais inferiores. Já nos sistemas de cogeração, parte da energia térmica que normalmente seria desperdiçada (sob a forma de calor nos gases de escape ou nas superfícies quentes dos equipamentos) é captada e utilizada em processos industriais ou para aquecimento de

espaços, resultando em eficiências globais superiores a 80%. A figura seguinte ilustra a comparação entre as eficiências de um sistema separado e um sistema de cogeração.

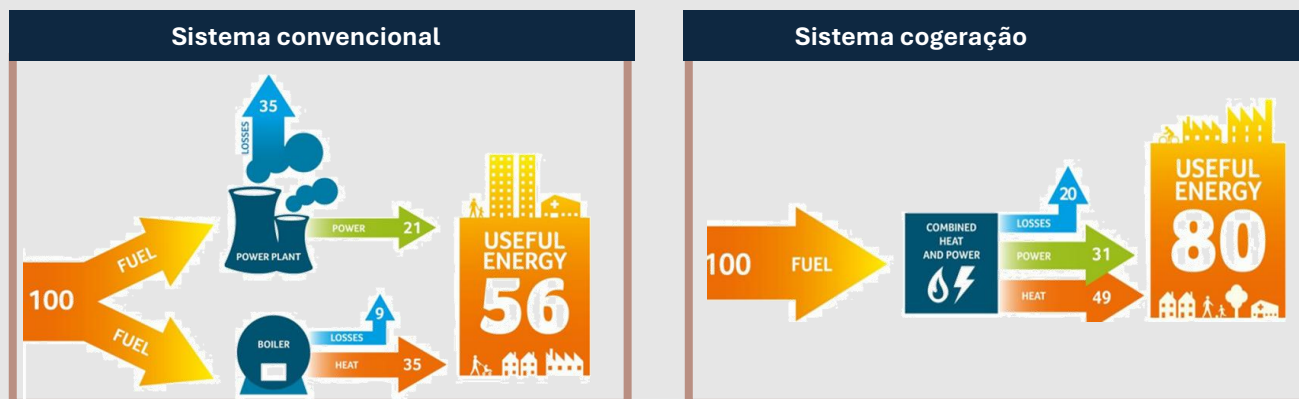


Figura 5- Sistema convencional de produção de eletricidade e calor vs Sistema de cogeração

Fonte: (Direção-Geral de Energia e Geologia - ISQ 2016)

Do ponto de vista técnico, a cogeração assenta na integração de um gerador de eletricidade (motor ou turbina) com um sistema de recuperação de calor. As tecnologias de cogeração podem ser classificadas em três tipos: Motores alternativos, Turbinas a gás e Turbinas a vapor (Direção-Geral de Energia e Geologia - ISQ 2016). As centrais de cogeração são ainda classificadas conforme o tipo de ciclo termodinâmico adotado (Direção-Geral de Energia e Geologia - ISQ 2016):

- Ciclo simples: quando a instalação opera com um único tipo de equipamento motriz (motor alternativo, turbina a gás ou turbina a vapor);
- Ciclo combinado: quando há integração entre dois ciclos – tipicamente uma turbina a gás (ou motor alternativo) e uma turbina a vapor. O calor contido nos gases de escape da turbina a gás é aproveitado numa caldeira de recuperação para produzir vapor, que por sua vez alimenta uma turbina a vapor, aumentando a eficiência global do sistema.

As diferentes tecnologias de cogeração apresentam características específicas em termos de rendimento térmico e elétrico, que variam consoante o tipo de combustível, o dimensionamento e o perfil de carga da instalação. A Tabela- Eficiências parciais e globais para as várias tecnologias de cogeração apresenta os valores típicos de eficiência elétrica, térmica e global para cada tipologia.

Sistemas de cogeração	Eficiência elétrica [%]	Eficiência térmica [%]	Eficiência global [%]
Turbina a gás	38	47	85
Turbina a vapor	33	52	85
Microturbinas	30	50	80
Ciclo combinado	57	33	90
Motor alternativo	40	30	70

Tabela- Eficiências parciais e globais para as várias tecnologias de cogeração

Fonte: (Direção-Geral de Energia e Geologia - ISQ 2016)

Neste modelo, foram considerados sistemas de cogeração acionados por motores que operam com gás (nomeadamente gás natural, biometano e biogás), hidrogénio e/ou biomassa como fonte energética. Tal como seria de esperar, o custo de investimento e operação associado a cada tipologia de equipamento varia consoante o vetor energético utilizado, refletindo diferenças em termos de tecnologia, disponibilidade do combustível, requisitos de tratamento e desempenho operacional.

Custo		2023	2030	2040	2050
Cogeração gás	CAPEX (EUR/kW)	938	938	938	938
	OPEX (EUR/kW)	94	94	94	94
Cogeração biomassa	CAPEX (EUR/kW)	3231	2990	2750	2540
	OPEX (EUR/kW)	323	299	275	254
Cogeração hidrogénio	CAPEX (EUR/kW)	-	3585	3297	3046
	OPEX (EUR/kW)	-	85	78	72

Tabela - Estimativa de evolução de custos para sistemas de cogeração

Fonte: (The Danish Energy Agency s.d.)

Caldeira de vapor

No setor da madeira, é comum a utilização de caldeiras a vapor para a produção de energia térmica, essencial em processos como secagem, e utilização de calor direto. O princípio de funcionamento baseia-se na combustão do combustível, gerando gases de exaustão que transferem calor para um fluido de processo (geralmente água ou vapor) através de superfícies metálicas de permuta térmica. Contudo, nem toda a energia química contida no combustível é convertida em calor útil para o fluido de aquecimento. Em sistemas convencionais, apenas cerca de 75% a 77% da energia do combustível é efetivamente aproveitada, sendo o restante dissipado sob a forma de perdas térmicas, nomeadamente:

- Perdas nos gases de exaustão: aproximadamente 18%;
- Perdas por radiação e convecção nas superfícies da caldeira: cerca de 4%;
- Perdas por condução térmica através das estruturas metálicas: cerca de 3%.

No âmbito do modelo energético desenvolvido, considerou-se que todas as caldeiras de vapor a instalar incorporariam as principais medidas de eficiência energética atualmente disponíveis e tecnicamente viáveis. A implementação destas medidas permite reduzir significativamente as perdas térmicas e aumentar a eficiência global do sistema.

As principais medidas de eficiência energética consideradas incluem:

- Instalação de economizadores (permutadores de calor) para pré-aquecimento da água de alimentação ou do ar de combustão;
- Minimização e controlo das purgas da caldeira, reduzindo perdas de calor e de água tratada;
- Recuperação de calor das purgas através de permutadores dedicados;
- Recuperação e reintegração dos condensados, reduzindo o consumo de água e energia;
- Reutilização do vapor flash, aproveitando o vapor gerado pela redução de pressão dos condensados quentes;

- Programas de monitorização e manutenção dos purgadores, garantindo o seu funcionamento eficiente;
- Melhoria do isolamento térmico em válvulas, tubagens, flanges e outros componentes da rede de distribuição;
- Otimização do *layout* da rede de distribuição de vapor, reduzindo perdas por percurso.

Estas intervenções permitem aumentar significativamente o rendimento térmico da caldeira, contribuindo para a redução do consumo de combustível e das emissões de gases com efeito de estufa associadas à produção de calor industrial.

Na tabela que se segue são apresentados os custos estimados para caldeiras de vapor operando com diferentes vetores energéticos. Estes custos refletem tanto o nível de maturidade tecnológica como a expectativa de evolução do mercado e das economias de escala associadas a cada tecnologia.

Custo		2023	2030	2040	2050
Caldeira a gás natural/biometano	CAPEX (EUR/kW)	53	45	45	45
	OPEX (EUR/kW)	2	2	2	2
Caldeira a biomassa	CAPEX (EUR/kW)	366	354	338	321
	OPEX (EUR/kW)	35	34	34	33
Caldeira a hidrogénio	CAPEX (EUR/kW)	205	167	117	82
	OPEX (EUR/kW)	7	6	4	3
Caldeira elétrica	CAPEX (EUR/kW)	206	186	186	186
	OPEX (EUR/kW)	1	1	1	1

Tabela - Estimativa de evolução de custos para caldeiras de vapor

Fonte: (The Danish Energy Agency s.d.)

Caldeira de termofluído

As caldeiras de termofluído são equipamentos amplamente utilizados em processos industriais que requerem temperaturas médias a elevadas (normalmente entre 150 °C e 400 °C), mas onde não se pretende operar sob alta pressão, como seria o caso em sistemas equivalentes com vapor de água. O princípio de funcionamento baseia-se na circulação de um fluido térmico orgânico, aquecido por um queimador a gás, biomassa ou outro combustível. O calor gerado na câmara de combustão é transferido ao fluido térmico por convecção e radiação, permitindo-lhe atingir temperaturas elevadas com riscos de pressão muito inferiores aos associados ao vapor.

Este tipo de caldeira apresenta várias vantagens técnicas e operacionais, nomeadamente:

- Maior segurança operacional, uma vez que o sistema pode operar a altas temperaturas a baixa pressão;
- Melhor controlo de temperatura, essencial para processos industriais sensíveis;
- Elevada estabilidade térmica, com baixa variação na temperatura do fluido em regimes contínuos;
- Menor necessidade de tratamento do fluido térmico, em comparação com os sistemas de caldeiras a vapor (sem purgas nem problemas de incrustações ou corrosão);
- Eficiência térmica superior, dado que não existem perdas associadas à geração e purga de vapor, sendo possível atingir eficiências globais superiores às caldeiras de vapor equivalentes em muitas aplicações industriais.

No modelo energético considerado, as caldeiras de termofluído foram incluídas como opção para processos industriais de secagem e calor direto. Na tabela seguinte são apresentados os custos associados a este tipo de caldeiras por vetor energético.

Custo		2023	2030	2040	2050
Caldeira a gás natural/biometano	CAPEX (EUR/kW)	50	36	23	21
	OPEX (EUR/kW)	2	2	2	2
Caldeira a biomassa	CAPEX (EUR/kW)	366	354	338	321
	OPEX (EUR/kW)	35	34	34	33
Caldeira a hidrogénio	CAPEX (EUR/kW)	205	167	117	82
	OPEX (EUR/kW)	7	6	4	3
Caldeira elétrica	CAPEX (EUR/kW)	198	186	152	124
	OPEX (EUR/kW)	1	1	1	1

Tabela - Estimativa de evolução de custos para caldeiras de termofluido

Fonte: (The Danish Energy Agency s.d.)

Captura de carbono

A Captura e Sequestro de Carbono (CCS – *Carbon Capture and Storage*) é um conjunto de tecnologias destinadas a capturar o dióxido de carbono (CO₂) proveniente de fontes industriais e energéticas, evitando a sua emissão para a atmosfera, e garantindo o seu armazenamento seguro em formações geológicas subterrâneas. Este processo inclui a separação do CO₂ dos gases de exaustão, o seu tratamento (para remoção de impurezas), compressão ou liquefação, transporte e, finalmente, o armazenamento em reservatórios subterrâneos adequados, como aquíferos salinos ou reservatórios de petróleo e gás esgotados.

Embora a separação e captura de CO₂ não sejam tecnologias novas – sendo já utilizadas em diversas aplicações industriais –, o seu uso com fins de mitigação climática é relativamente recente e ainda não se encontra amplamente disponível em escala industrial (nível de maturidade tecnológica TRL 6–7). Prevê-se, no entanto, que estas soluções ganhem tração até 2030, podendo vir a contribuir para a mitigação de até 25% das emissões globais de CO₂ até 2050.

Apesar do potencial, a tecnologia CCS apresenta ainda desafios técnicos e económicos:

- Elevado consumo energético, especialmente na fase de separação e compressão do CO₂.
- Necessidade de infraestruturas dedicadas para transporte (gasodutos ou navios) e armazenamento.
- Manutenção da dependência de combustíveis fósseis, quando aplicada a centrais convencionais.
- Custo de investimento e operação elevado, dificultando a sua competitividade face a outras soluções de descarbonização.
-

A tabela seguinte apresenta uma estimativa dos custos associados à tecnologia CCS (CAPEX e OPEX) em função do horizonte temporal, considerando o progresso esperado até 2050.

Custo		2023	2030	2040	2050
Captura de carbono	CAPEX (EUR/kW)	770	840	700	500
	OPEX (EUR/kW)	193	210	175	125

Tabela - Estimativa de evolução de custos para captura de carbono

Fonte: (The Danish Energy Agency s.d.)

Sistemas de gaseificação

Os sistemas de gaseificação constituem numa tecnologia que permite converter combustíveis sólidos, como a biomassa ou resíduos de biomassa, num gás sintético – o *syngas*. O *syngas* é composto maioritariamente por monóxido de carbono (CO), hidrogénio (H₂), metano (CH₄) e pequenas quantidades de outros gases.

Este processo ocorre em ambiente com quantidade controlada de um agente gasificante, como por exemplo: vapor ou ar ambiente. A matéria-prima é então submetida a temperaturas elevadas, geralmente entre 800 °C e 1 200 °C, promovendo assim a decomposição do material, gerando o *syngas*. O *syngas* pode ser utilizado diretamente para produção de calor e eletricidade, ou ainda como matéria-prima para síntese de combustíveis líquidos e químicos.

Do ponto de vista energético e ambiental, a gaseificação apresenta várias vantagens:

- Redução das emissões de poluentes atmosféricos (como partículas e NO_x), devido à queima mais limpa do *syngas*;
- Flexibilidade de aplicação, podendo alimentar equipamentos de geração de energia térmica;
- Potencial para produção descentralizada de energia.

Apesar do seu potencial, a tecnologia de gaseificação ainda apresenta desafios técnicos e económicos, nomeadamente:

- Necessidade de controlo rigoroso da qualidade do *syngas*;
- Custos de investimento relativamente elevados, especialmente em soluções com purificação de gás.

Atualmente, os sistemas de gaseificação têm um nível de maturidade tecnológica variável consoante a escala e aplicação, sendo classificados entre TRL 6-9.

No modelo energético considerado, os sistemas de gaseificação foram incluídos como opção de geração de *syngas* que seria posteriormente fornecido aos equipamentos dedicados aos processos industriais de secagem e calor direto. Na tabela seguinte são apresentados os custos de associados aos sistemas de gaseificação.

Custo		2023	2030	2040	2050
Sistemas gaseificação	CAPEX (EUR/kW)	1478	1400	1300	1200
	OPEX (EUR/kW)	22	21	19	18

Tabela - Estimativa de evolução de custos para sistemas gaseificação

Fonte: (The Danish Energy Agency s.d.)

Sistemas de geração de ar de queima

Os sistemas de geração de ar quente utilizados na indústria podem recorrer a diferentes tecnologias, nomeadamente: resistências elétricas, queimadores a gás natural, queimadores a biomassa e queimadores a hidrogénio.

No caso das tecnologias de combustão (gás natural, biomassa ou hidrogénio), o calor gerado é transferido para o ar de processo geralmente através de permutadores de calor, uma vez que os gases de exaustão não podem ser diretamente utilizados em muitos processos industriais devido a requisitos de qualidade do ar ou contaminação. Esta necessidade de permuta térmica introduz perdas de eficiência, reduzindo a eficácia global do sistema. Por outro lado, os sistemas baseados em resistências elétricas permitem a transferência direta de calor ao ar, sem necessidade de

permutadores, o que pode resultar numa maior eficiência energética global, especialmente em aplicações onde o fornecimento de calor preciso e limpo é crítico.

Todos os equipamentos considerados têm TRL elevados e estão disponíveis no mercado. A tabela seguinte apresenta uma estimativa dos custos associados ao equipamento de geração de ar quente.

Custo		2023	2030	2040	2050
Queimador a gás natural/biometano	CAPEX (EUR/kW)	15	15	15	15
	OPEX (EUR/kW)	0.2	0.2	0.2	0.2
Queimador a biomassa	CAPEX (EUR/kW)	220	220	220	220
	OPEX (EUR/kW)	3.4	3.3	3.2	3.1
Queimador a hidrogénio	CAPEX (EUR/kW)	66	75	61	50
	OPEX (EUR/kW)	0.2	0.2	0.2	0.2
Resistências elétrica	CAPEX (EUR/kW)	60	54	46	40
	OPEX (EUR/kW)	0.1	0.1	0.1	0.1

Tabela - Estimativa de evolução de custos para equipamentos de geração de ar quente

Fonte: (The Danish Energy Agency s.d.)

Transporte interno

No contexto do transporte interno, as tecnologias baseadas em gasóleo são amplamente utilizadas devido à sua infraestrutura já estabelecida. Contudo, os motores a gasóleo são responsáveis por emissões significativas de GEE, o que impulsiona a procura por tecnologias sustentáveis.

As tecnologias elétricas têm ganho destaque como uma solução promissora para o transporte interno, especialmente em veículos de pequeno e médio porte, graças à sua eficiência energética e à ausência de emissões diretas. Paralelamente, o hidrogénio surge como uma alternativa inovadora, combinando alta autonomia com emissão zero, ao utilizar células de combustível para gerar eletricidade a partir do hidrogénio. Apesar dos desafios relacionados à produção, armazenamento e infraestrutura, o hidrogénio representa uma potencial rota para a descarbonização do setor de transportes internos, mas estima-se que só a partir de 2030.

A tabela seguinte apresenta uma estimativa dos custos associados ao equipamento de transporte interno.

Custo		2023	2030	2040	2050
Transp. Gasóleo	CAPEX (EUR/kW)	350	320	260	200
	OPEX (EUR/kW)	30	30	30	30
Transp. Elétrico	CAPEX (EUR/kW)	1050	1020	960	900
	OPEX (EUR/kW)	30	30	30	30
Transp. Hidrogénio	CAPEX (EUR/kW)	-	1500	1700	1000
	OPEX (EUR/kW)	-	-	30	30

Tabela - Estimativa de evolução de custos para equipamentos de transporte interno

Ar comprimido

Os sistemas de ar comprimido são amplamente utilizados na indústria para diversas aplicações, desde o acionamento de ferramentas pneumáticas até processos de controlo e automação. Uma evolução significativa nestes sistemas foi a introdução dos compressores de velocidade variável, que representam um avanço importante em termos de eficiência energética e redução de custos operacionais.

Ao contrário dos compressores convencionais, que operam em regime de ligado/desligado com velocidade fixa, os compressores VFD ajustam automaticamente a velocidade do motor conforme a procura de ar comprimido, evitando ciclos frequentes e perdas de energia associadas ao funcionamento fora do ponto ótimo. Este controlo dinâmico permite um ajuste preciso da potência entregue, minimizando o desperdício energético.

Estudos e aplicações industriais demonstram que os compressores VFD podem reduzir o consumo de energia em até 30–35% quando comparados com compressores de velocidade fixa. Para além disso, essa tecnologia contribui para:

- Maior estabilidade da pressão de ar na rede, essencial em processos sensíveis.
- Menor desgaste mecânico dos componentes, uma vez que as variações de carga são mais suaves.
- Redução das necessidades de manutenção, resultando em menor tempo de paragem.
- Maior vida útil do equipamento.

A adoção de compressores de velocidade variável representa, assim, uma estratégia eficaz de eficiência energética em sistemas pneumáticos, particularmente relevante em indústrias com consumo elevado ou variável de ar comprimido.

A tabela seguinte apresenta uma estimativa dos custos associados ao equipamento de ar comprimido.

Custo		2023	2030	2040	2050
Ar comprimido	CAPEX (EUR/kW)	6	7	6	5
	OPEX (EUR/kW)	1	1	1	1

Tabela - Estimativa de evolução de custos para equipamentos de ar comprimido
Fonte: (Cheayb et al. 2022; METALPLAN s.d.)

Trajetórias de descarbonização: resultados

Com base nos cenários previamente definidos, este subcapítulo apresenta os principais resultados obtidos através da modelação com o OSeMOSYS. Entre os cenários analisados, destaca-se aquele que considera a implementação de limites de emissões de CO₂ e a introdução de taxas de carbono (EMIS-TAX), por ser considerado o mais provável de ocorrer. Assim, este cenário será explorado com maior detalhe nas seções seguintes.

EMIS-TAX

Nesta secção são apresentados os resultados do cenário EMIS-TAX, modelado com restrições às emissões GEE e com a aplicação de taxas de carbono. Este cenário permite analisar a evolução do consumo energético, os custos do sistema e a utilização dos diferentes vetores energéticos num contexto em que há limitações impostas às emissões de GEE.

A Figura seguinte ilustra a evolução do consumo de energia final no cenário EMIS-TAX, expressa em Peta Joule (PJ), no período compreendido entre 2023 e 2050.

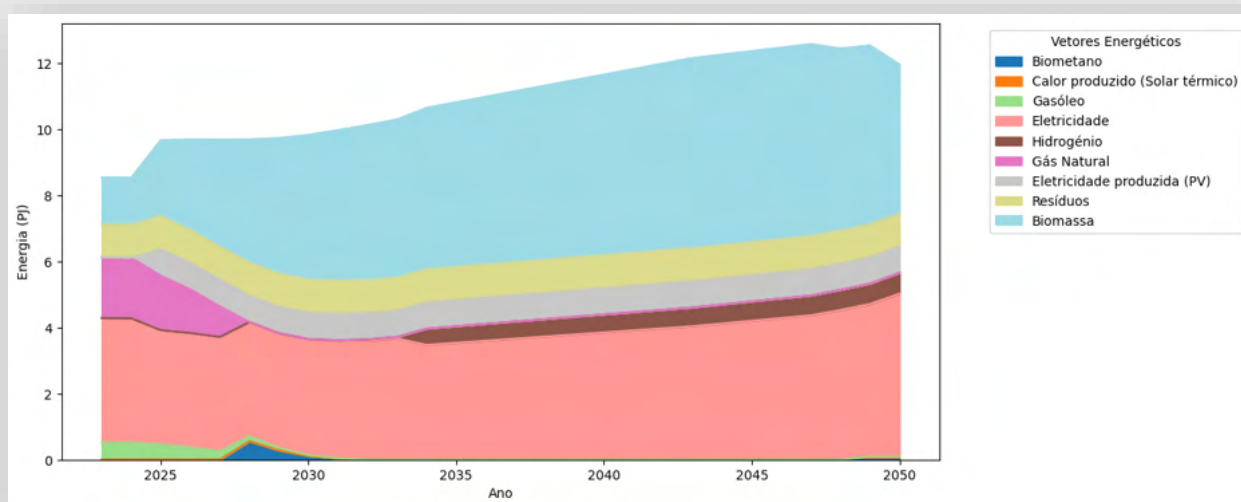


Figura - Evolução do consumo de energia final, por vetor energético, no cenário EMIS-TAX

Inicialmente, o mix energético do setor da madeira e derivados é caracterizado por uma predominância do consumo de eletricidade, seguido pela utilização de biomassa. O gás natural também representa uma fração significativa, enquanto o consumo de diesel apresenta-se como residual.

- No caso da **eletricidade**, representada pela área azul, destaca-se a sua predominância na matriz energética ao longo de todo o período analisado. Mesmo com as restrições impostas às emissões, o setor mantém uma forte dependência deste vetor energético, sobretudo devido à natureza dos equipamentos utilizados nos processos de fabrico. Entre 2023 e 2050, o consumo médio anual de eletricidade situa-se nos 3,85 PJ, refletindo um crescimento acumulado de cerca de 30%. Apesar desta tendência de aumento, a introdução de equipamentos elétricos mais eficientes, como variadores de velocidade e bombas de calor, tem um impacto relativamente modesto no consumo total do setor. Ainda assim, esta modernização tecnológica acompanha a tendência global de eletrificação da indústria, contribuindo para uma utilização mais racional e eficiente da energia elétrica ao longo do tempo;

- A **energia fotovoltaica**, representada a cinzento, corresponde à geração de eletricidade para autoconsumo. Durante o período modelado, a sua utilização mantém-se limitada a cerca de 0,8 PJ/ano, principalmente devido a restrições físicas, como a disponibilidade limitada de área nas instalações industriais – por exemplo, nas coberturas dos edifícios – para a instalação de painéis solares. Apesar dessa limitação, o facto de o modelo optar por investir na totalidade da capacidade disponível indica que a energia fotovoltaica se revela uma solução custo-eficaz para o setor. Ou seja, sempre que tecnicamente viável, esta tecnologia é aproveitada, refletindo a sua competitividade económica no contexto de descarbonização analisado;
- No que diz respeito ao **gás natural**, representado a rosa, a sua utilização está limitada ao período entre 2023 e 2030. Após este intervalo, este vetor deixa de ser utilizado, como consequência direta das restrições impostas no cenário EMIS-TAX. A sua eliminação da matriz energética reflete a substituição progressiva por vetores mais limpos, como a eletricidade e a biomassa, alinhando-se com os objetivos de descarbonização definidos para o setor;
- O **diesel**, representado a verde, surge em quantidades muito reduzidas quando comparado com os restantes vetores energéticos. Esta tendência deve-se, por um lado, ao aumento previsto do custo do diesel nos próximos anos e, por outro, às restrições às emissões de gases com efeito de estufa impostas. Estas condições tornam economicamente desvantajoso o uso continuado deste combustível, levando à substituição automática, a curto prazo, de tecnologias associadas ao transporte interno, como empilhadores, por alternativas que utilizam vetores energéticos mais limpos, como a eletricidade ou eventualmente o hidrogénio;
- A **biomassa e os resíduos industriais**, representados respetivamente a azul claro e verde claro, mantêm-se, ao longo de todo o período modelado, como vetores energéticos essenciais para o setor. Ambos têm fatores de emissão de GEE bastante reduzidos, o que permite, por um lado, cumprir os objetivos de descarbonização e, por outro, garantir a viabilidade económica do sistema energético, graças ao seu baixo custo de utilização. No caso dos resíduos industriais, a sua utilização é limitada a 1 PJ pela disponibilidade de matéria-prima. Esta restrição é colmatada pela utilização complementar de biomassa, que surge como alternativa viável e abundante, assegurando a continuidade do abastecimento energético com baixo impacto ambiental e custo competitivo. A utilização de biomassa no setor, cresce de 2023 a 2050, mais de 200%;
- O **biometano**, representado a cor azul escuro, surge de forma pontual no mix energético entre os anos de 2028 e 2031. Esta presença discreta deve-se à utilização da capacidade residual existente em equipamentos já instalados, nos quais o modelo opta por não realizar novos investimentos em tecnologias, limitando-se apenas a alterar o vetor energético para o biometano. Contudo, à medida que estes equipamentos atingem o fim da sua vida útil, o modelo passa a investir em novas tecnologias mais eficientes e alinhadas com os objetivos de descarbonização, o que leva ao desaparecimento do biometano do mix energético do setor nos anos seguintes;
- O **hidrogénio**, representado a castanho, surge de forma discreta no mix energético, com início de utilização em 2031. Embora seja amplamente reconhecido como um vetor com elevado potencial para a descarbonização a longo prazo, a sua adoção enfrenta desafios técnicos e económicos significativos, que limitam a sua penetração

em larga escala no setor. No cenário modelado, a sua aplicação verifica-se sobretudo em operações de transporte interno, onde pode representar uma alternativa de baixo carbono. No entanto, os custos de investimento e infraestrutura, bem como a disponibilidade de tecnologia adequada, restringem o seu papel no curto e médio prazo;

- Por fim, em 2049, surge no **mix energético** o calor proveniente de coletores solares térmicos, representado a laranja. Esta tecnologia aparece de forma pontual e tardia, refletindo uma adoção limitada, motivada por restrições de custo-benefício e de viabilidade técnica ao longo do horizonte temporal do modelo.

A Figura seguinte apresenta a projeção da evolução das emissões de GEE associadas ao uso de energia no cenário EMIS-TAX, entre 2023 e 2050. Em 2023, o gás natural (representado a cor rosa) é responsável por 36% das emissões de GEE do setor, a eletricidade (representada a roxo), é responsável por 49% das emissões, e o diesel (representado a verde) com um peso de 13%, sendo o restante devido ao consumo de resíduos industriais e biomassa.

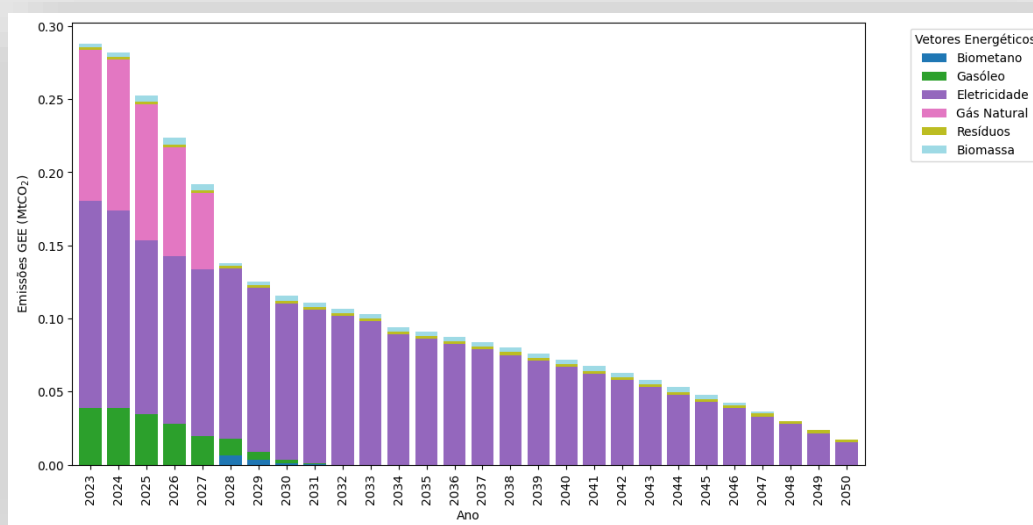


Figura - Evolução das emissões de GEE associadas ao uso de energia no cenário EMIS-TAX

Ao longo do período de análise, observa-se uma tendência clara de redução nas emissões de GEE associadas aos diferentes vetores energéticos, o que resulta da restrição de emissões imposta no modelo. Esta redução é mais acentuada nos primeiros anos, até 2030, momento a partir do qual se verifica uma redução quase linear das emissões de GEE associadas ao setor. Além disso, verifica-se:

- uma queda total nas emissões associadas ao uso de combustíveis fósseis: gás natural e diesel;
- a contribuição da eletricidade nas emissões apresenta uma diminuição progressiva ao longo dos anos, totalizando uma redução de 91%. Esta não se deve a uma redução no uso de eletricidade, mas sim à previsão de uma descarbonização gradual do sistema eletroprodutor nacional até 2050. Além disso, prevê-se também que parte da eletricidade necessária no setor da madeira e derivados da madeira será proveniente de instalações solares fotovoltaicas para autoconsumo;
- a biomassa e os resíduos industriais, sendo considerados vetores energéticos com baixo teor de emissões, são utilizados para a substituição do gás natural. Por isso, prevê-se um aumento gradual da sua utilização, acompanhado de um acréscimo nas emissões associadas – embora estas se mantenham dentro dos limites sustentáveis e compatíveis com os objetivos de descarbonização.

Ao longo dos próximos parágrafos e respetivos diagramas, apresentam-se os fluxos de energia entre as diferentes tecnologias utilizadas na produção de energia necessária para o processo de fabrico, através de diagramas de *Sankey*. Esta análise é realizada para os anos 2023, 2030, 2040 e 2050, permitindo uma visualização clara da evolução tecnológica e do papel de cada equipamento ao longo do tempo no cenário EMIS-TAX.

Estes diagramas oferecem uma representação intuitiva e simplificada das etapas do sistema energético industrial, evidenciando quando determinadas tecnologias são introduzidas, qual o seu peso relativo no fornecimento energético e como evoluem em função das restrições de descarbonização. Esta representação ajuda a compreender de forma mais direta as trajetórias tecnológicas e as prioridades de transição energética ao longo do horizonte modelado.

Em 2023, com o resultado apresentado na Figura , o sistema energético do setor da madeira e derivados é caracterizado por um parque industrial envelhecido, em que se utilizam tecnologias de baixa eficiência. A produção de energia térmica, essencial para o processo de calor direto, é assegurada por caldeiras a gás natural (Cald_V_NG) e a biomassa/resíduos (Cald_V_WD), que convertem estes vetores em vapor. Este vapor é depois utilizado diretamente no processo de fabrico que requer calor direto (Calor_dire). De forma semelhante, o processo de secagem (Secagem) também depende da geração de ar quente (Ar_quente), obtido a partir de queimadores (Q_NG e Q_WD) alimentados por gás natural e biomassa, respetivamente. No que diz respeito à energia elétrica (ELE), esta é maioritariamente utilizada para alimentar motores elétricos IE2, sendo que uma parte já se encontra equipada com variadores de velocidade (IE2_VFD). Ambos os grupos alimentam as máquinas de processo (Maq), responsáveis por grande parte das operações industriais (Maq_proc). A restante eletricidade é distribuída por sistemas de ar comprimido (Ar_Comp) e iluminação (Ilum). Por fim, o transporte interno (Transp_int) é assegurado exclusivamente por tecnologia a diesel (Transp_Diesel), alimentada por combustível fóssil (DIE).

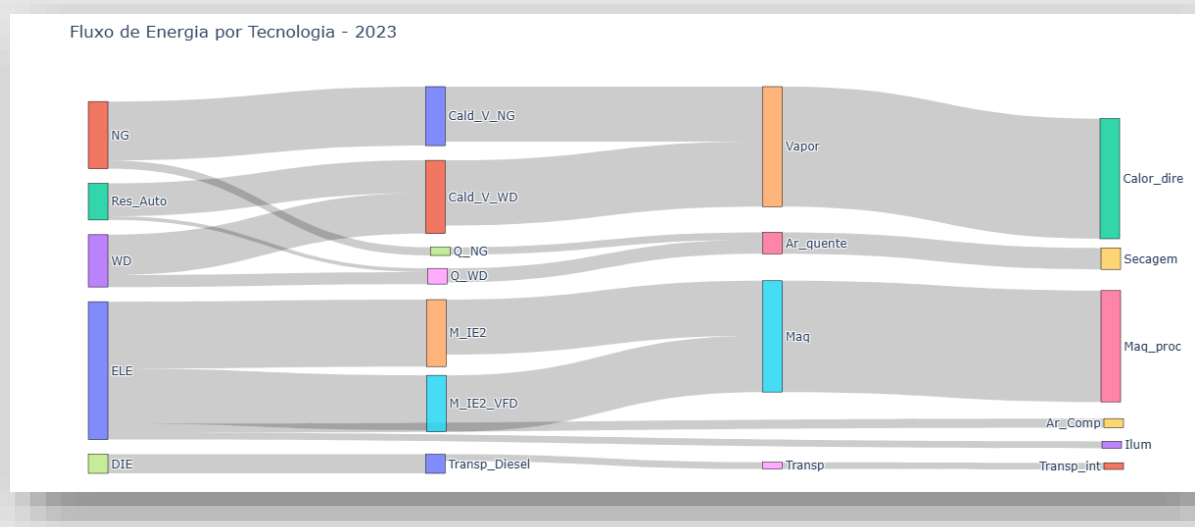


Figura - Fluxo de energia por tecnologia para o ano de 2023

Em 2030, como é possível observar na Figura seguinte, os efeitos das metas de descarbonização começam a refletir-se de forma mais clara no sistema energético do setor da madeira e derivados. Verifica-se uma redução do uso de vetores fósseis, com a consequente substituição por fontes renováveis e tecnologias mais eficientes.

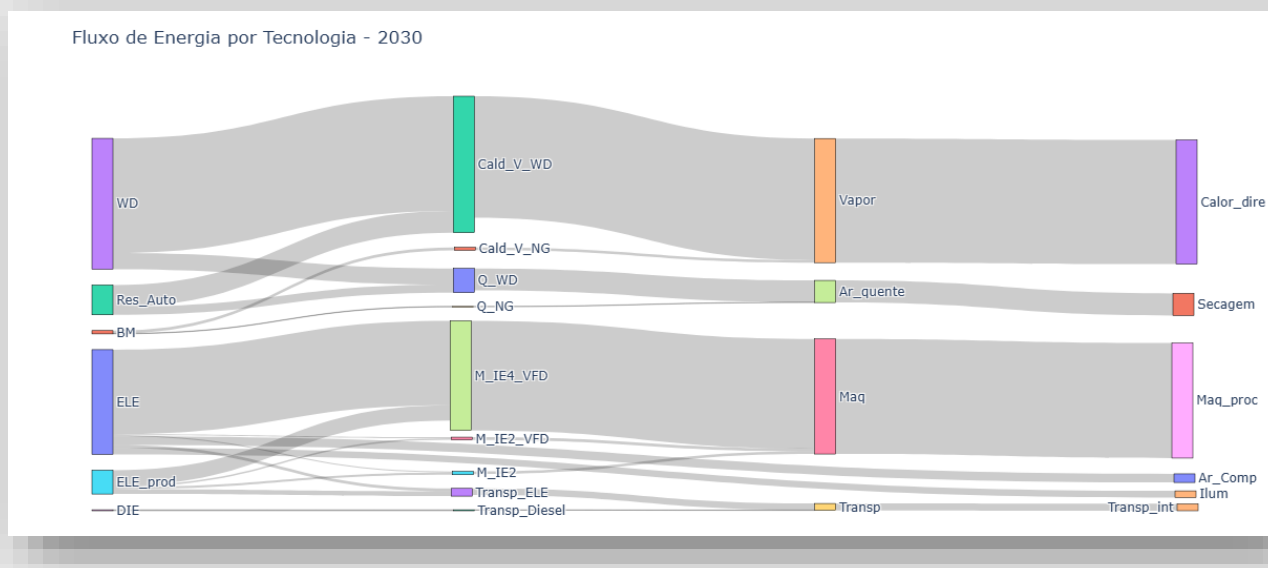


Figura - Fluxo de energia por tecnologia para o ano de 2030

No domínio da energia térmica, a biomassa e os resíduos industriais (WD e Res_Auto) passam a ser os principais vetores energéticos utilizados para a geração de vapor, através das caldeiras a biomassa (Cald_V_WD). O gás natural, embora ainda presente, perde relevância, sendo usado de forma residual em caldeiras (Cald_V_NG) e queimadores (Q_NG), sobretudo no processo de secagem (Secagem). O uso de biomassa (Q_WD) nos queimadores continua a complementar esta necessidade. Na componente elétrica, observa-se uma evolução tecnológica significativa. Os motores IE2 menos eficientes começam a ser progressivamente substituídos por motores IE4 com variadores de velocidade (M_IE4_VFD), refletindo uma estratégia de eletrificação eficiente. Estes motores alimentam as máquinas de processo (Maq_proc), reforçando o papel central da eletricidade no funcionamento das operações industriais. A eletricidade passa a ser também parcialmente proveniente de produção descentralizada (ELE_prod), como sistemas fotovoltaicos para autoconsumo. A utilização de eletricidade mantém-se nos sistemas de ar comprimido (Ar_Comp) e na iluminação (Ilum), mas destaca-se, em especial, a eletrificação progressiva do transporte interno (TranspELE). Este começa a substituir os sistemas a diesel, que ainda têm alguma presença residual (Transp_Diesel), mas em forte declínio.

Em 2040, o sistema energético do setor da madeira e derivados mostra sinais claros de maturidade na transição energética, com uma quase eliminação dos combustíveis fósseis e uma forte aposta em fontes renováveis e eletrificação eficiente como é possível observar na figura.

Fluxo de Energia por Tecnologia - 2040

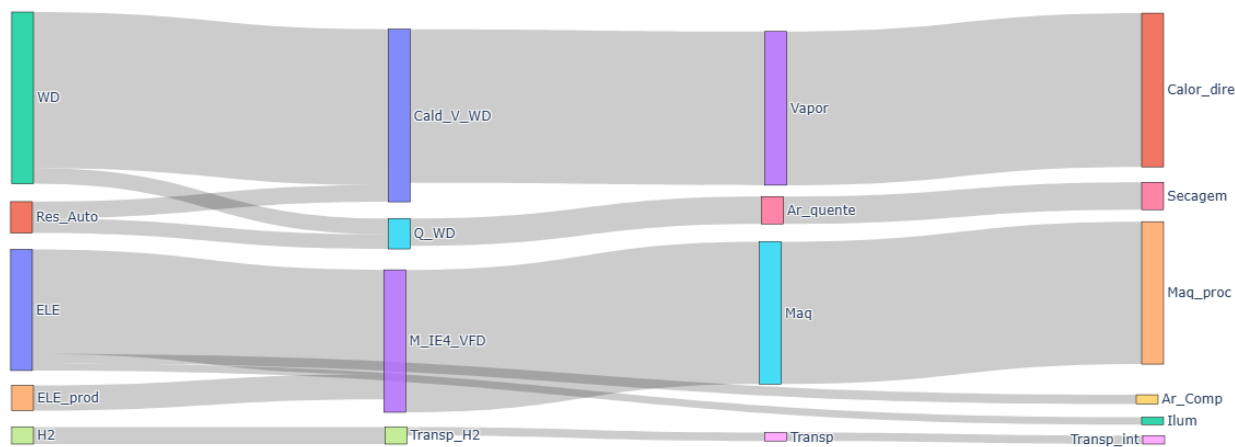


Figura - Fluxo de energia por tecnologia para o ano de 2040

A biomassa e os resíduos industriais (WD e Res_Auto) assumem um papel dominante, especialmente na geração de vapor por meio das caldeiras a biomassa (Cald_V_WD), que continuam a fornecer energia térmica essencial para o processo de calor direto (Calor_dire). Da mesma forma, a secagem (Secagem) continua a depender do ar quente gerado a partir de queimadores alimentados por biomassa (Q_WD), refletindo uma consolidação do uso de fontes com baixo teor de emissões. Na vertente elétrica, a eletricidade (ELE) continua a ser amplamente utilizada, com uma proporção crescente proveniente de produção descentralizada (ELE_prod), o que sugere uma integração mais robusta de sistemas fotovoltaicos para autoconsumo. A conversão elétrica é realizada quase exclusivamente através de motores de alta eficiência IE4 com variadores de velocidade (M_IE4_VFD), que alimentam as máquinas de processo (Maq_proc). Este dado reforça a consolidação da eletrificação eficiente como pilar do processo produtivo. Uma novidade importante neste ano é a introdução do hidrogénio (H2) como vetor energético, embora com presença ainda discreta. O Transporte interno (Transp_H2) passa a utilizar esta fonte, marcando uma diversificação tecnológica no setor da mobilidade interna, que até então era dominada por eletricidade e diesel. A eletricidade continua a suportar serviços auxiliares como iluminação (Ilum) e ar comprimido (Ar_Comp), que se tornam mais eficientes ao longo dos tempos tendo em conta a evolução tecnológica esperada para estes equipamentos, que são essenciais à função transversal na operação fabril.

Em 2050, ver figura seguinte, o setor da madeira e derivados apresenta um sistema energético fortemente consolidado em torno da eficiência energética, adoção de vetores energéticos de baixo impacto carbónico, soluções renováveis e de novas tecnologias, refletindo uma maturidade plena na transição energética.

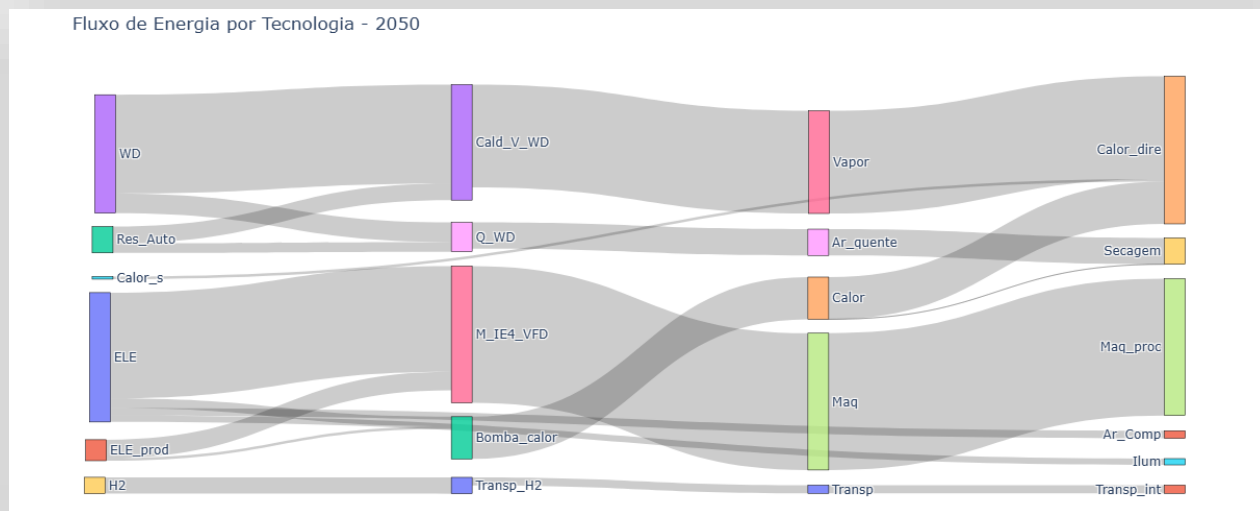


Figura - Fluxo de energia por tecnologia para o ano de 2050

A biomassa e os resíduos industriais (WD e Res_Auto) mantêm-se como principais fontes térmicas, direcionados sobretudo para as caldeiras a biomassa (Cald_V_WD), que geram vapor. Este vapor continua a desempenhar um papel determinante no processo de fabrico: calor direto (Calor_dire). Simultaneamente, os queimadores alimentados por biomassa (Q_WD) produzem ar quente, utilizado nos sistemas de secagem (Secagem). O vetor elétrico (ELE) mantém um peso significativo, com a energia a ser maioritariamente direcionada para motores elétricos de elevada eficiência com variadores de velocidade (M_IE4_VFD), os quais alimentam diretamente as máquinas de processo (Maq_proc). Esta configuração evidencia a consolidação da eletrificação eficiente como espinha dorsal do sistema produtivo. Além disso, a eletricidade alimenta uma nova tecnologia; as bombas de calor, que se tornam custo eficazes entre 2040 e 2050, garantindo que parte do calor necessário nos processos industriais provenha destes equipamentos. Os serviços auxiliares, como iluminação (Ilum) e ar comprimido (Ar_Comp), continuam a ser suportados por eletricidade, beneficiando de avanços tecnológicos que promovem maior eficiência e redução de consumo. O hidrogénio (H2) continua a ser utilizado no Transporte interno (Transp_H2).

Finalmente, destaca-se que os resultados apresentados neste documento vão ao encontro dos resultados da Fase A do Roteiro de descarbonização das indústrias da madeira – DECARBWOOD, relacionados com as respostas voluntárias das empresas do setor ao inquérito, que revelavam uma forte dependência de combustíveis fósseis e a utilização predominante de tecnologias envelhecidas e ineficientes. Por isso, no mesmo sentido, os resultados do modelo reforçam a necessidade de uma transformação urgente e estruturada do setor, com modernização tecnológica e adoção de vetores energéticos de baixo carbono, sem a qual será extremamente difícil garantir o alinhamento com as metas nacionais de descarbonização.

Comparação de custos

A Figura seguinte apresenta a evolução dos custos totais do sistema energético do setor da madeira, entre 2023 e 2050. A análise cobre todos os cenários simulados, permitindo observar o impacto das diferentes estratégias de descarbonização ao longo do tempo.

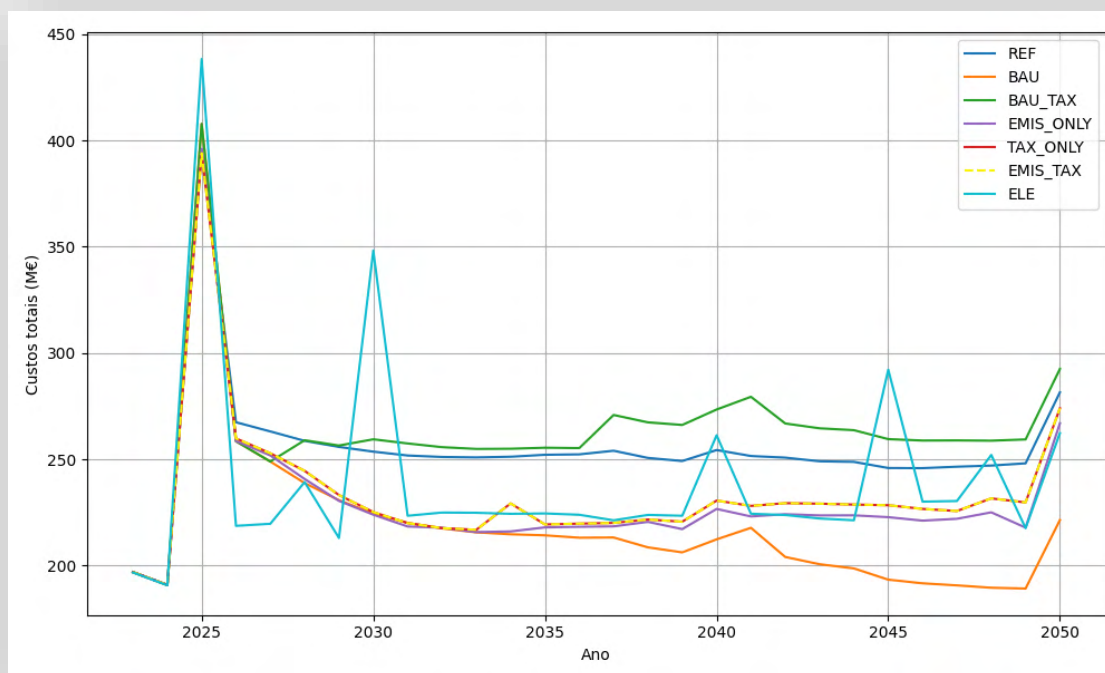


Figura - Evolução dos custos totais de 2023 a 2050 para os cenários em análise

Em 2023, todos os cenários apresentam custos praticamente idênticos, dado que se trata do ano base, sem alterações significativas no portefólio tecnológico ou implementação de políticas de descarbonização.

A partir de 2025, começam a evidenciar-se divergências nos custos totais, resultantes da introdução de políticas climáticas, investimentos em novas tecnologias e alterações no mix energético. Os principais destaques por cenário são:

- **BAU:** Apresenta os custos totais mais baixos ao longo de todo o período analisado. Este cenário reflete a ausência de políticas climáticas, resultando em investimentos mínimos em tecnologias de baixo carbono;
- **BAU-TAX:** A simples introdução de taxas de carbono sobre o cenário BAU leva a um aumento substancial dos custos totais. Este resultado evidencia o impacto significativo das taxas de carbono sobre sistemas que não estão preparados tecnologicamente para a transição energética, forçando as empresas a suportar elevados encargos sem reestruturação eficiente;
- **REF:** Apesar de utilizar tecnologias já existentes e, teoricamente, mais baratas em termos de investimento inicial, este cenário revela-se ineficiente a longo prazo, com custos operacionais elevados. Isso resulta na segunda maior despesa total acumulada, destacando os limites de um sistema estagnado e com baixa eficiência energética;
- **EMIS-ONLY:** Com a imposição de limites de emissões, mas sem taxas de carbono, este cenário mostra-se custo-efetivo, sendo o segundo cenário com menores custos

totais. A necessidade de descarbonizar leva à adoção de tecnologias mais eficientes e com menores custos operacionais, sem a penalização fiscal das emissões;

- EMIS-TAX e TAX-ONLY: Estes dois cenários apresentam trajetórias de custo semelhantes, demonstrando que a simples introdução de taxas de carbono já é suficiente para induzir mudanças no comportamento tecnológico e na estratégia de investimento. Ambos exigem a implementação de soluções de baixo carbono para evitar penalizações, o que promove a eficiência, apesar do aumento de CAPEX;
- ELE: Este cenário exibe maior variabilidade nos custos ao longo do tempo, com picos associados a investimentos intensivos em tecnologias de eletrificação e substituição de equipamentos. No entanto, essas tecnologias são altamente eficientes e, a médio prazo, levam a uma redução significativa dos custos operacionais, equilibrando os custos totais e permitindo ganhos ambientais substanciais.

Estas variações são claramente visíveis na figura seguinte onde se pode observar a divergência entre os cenários em termos de impacto económico.

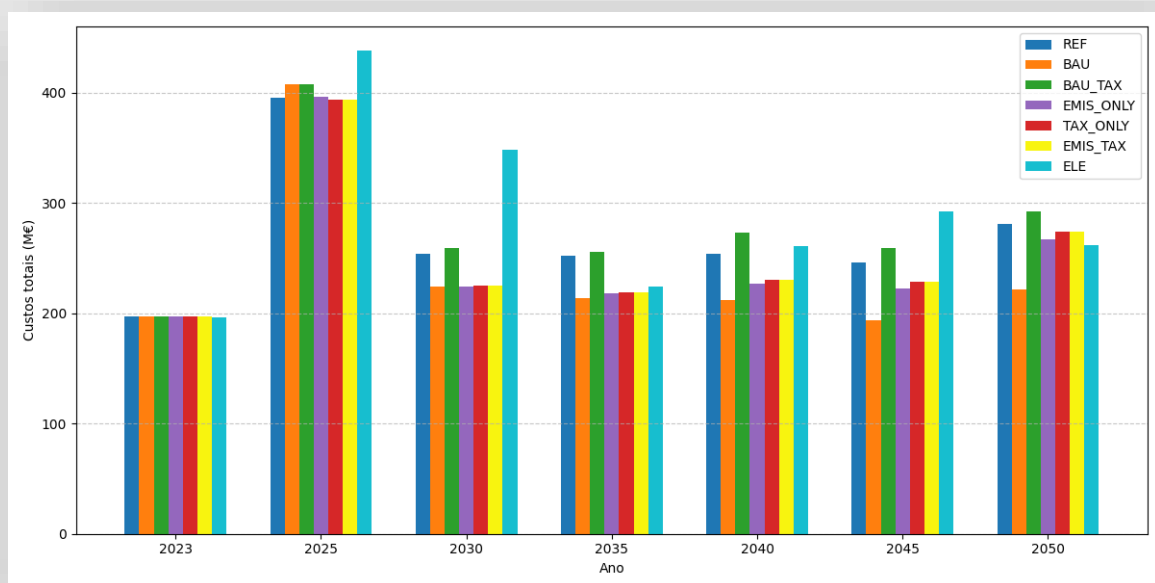


Figura - Comparação dos custos anuais dos cenários por quinquênio

O ano de 2025 marca um salto abrupto nos custos em todos os cenários, refletindo a introdução de políticas climáticas e investimentos iniciais. O cenário ELE apresenta o maior custo (438 M€), 7% superior ao cenário de BAU (REF, 407 M€). Este aumento resulta da substituição imediata de tecnologias convencionais por alternativas elétricas, que, embora mais eficientes, ainda são significativamente mais dispendiosas. Por outro lado, os cenários TAX-ONLY e EMIS-TAX apresentam custos ligeiramente inferiores ao BAU (cerca de -0,4%). Nestes casos, a adoção de vetores energéticos e tecnologias mais limpas permite uma mitigação eficaz das emissões com impacto económico neutro ou até ligeiramente positivo no curto prazo – sugerindo que certas medidas climáticas, quando bem integradas, não penalizam financeiramente o setor.

Entre 2030 e 2045, os custos no cenário BAU diminuem cerca de 14%, enquanto os cenários EMIS-ONLY e TAX-ONLY mantêm os custos relativamente estáveis ou com ligeiras reduções. O EMIS-ONLY, por exemplo, apresenta um custo de 223 M€ em 2030, praticamente inalterado até 2045, revelando-se um dos cenários mais eficientes em termos económicos ao longo do tempo.

O cenário ELE, após o pico de 2025, demonstra uma redução de custos significativa, passando de 438 M€ para 292 M€ em 2045 – uma queda de 33%. Esta tendência reflete não só a maturação e ganho de

escala das tecnologias elétricas, como também a redução progressiva dos custos da eletricidade e a maior eficiência dos equipamentos eletrificados, tornando a eletrificação mais custo-eficaz a médio prazo.

Em 2050, o cenário BAU apresenta o custo mais baixo, embora seja importante destacar que não assegura a descarbonização do setor. Seguem-se os cenários ELE e EMIS-ONLY. O cenário REF, no qual não são introduzidas alterações tecnológicas ao setor, revela-se, a longo prazo, economicamente desfavorável. Apesar dos custos de investimento iniciais mais baixos, os equipamentos utilizados são menos eficientes, o que conduz a um consumo de energia significativamente superior ao dos restantes cenários. Essa ineficiência energética resulta num aumento acumulado dos custos operacionais, refletindo-se num custo total elevado em 2050. O BAU-TAX mantém-se como o cenário mais oneroso (+32% em relação ao BAU), indicando que taxas de carbono aplicadas de forma isolada podem representar encargos financeiros significativos, especialmente sem o apoio de medidas estruturais ou tecnológicas.

O cenário EMIS-TAX, que combina restrições de emissões com a aplicação de taxas, apresenta um custo de 274 M€ – 24% acima do BAU. Já o ELE, que começou como o mais dispendioso, termina com um custo apenas 5% superior ao EMIS-TAX, evidenciando a competitividade da eletrificação no longo prazo, resultado de equipamentos mais eficientes, economias de escala e da redução contínua do custo da eletricidade ao longo do tempo.

A tabela seguinte apresenta a comparação dos custos totais acumulados entre os diferentes cenários de transição energética no setor da madeira, para o horizonte temporal de 2023 a 2050. Os valores são expressos em termos relativos, com o cenário BAU (Business As Usual) como referência (0%).

Cenário	Diferença vs. BAU
BAU	-
EMIS-ONLY	+5%
TAX-ONLY	+7%
EMIS-TAX	+7%
ELE	+10%
BAU-TAX	+20%

Tabela 5 - Comparação dos custos totais acumulados entre os cenários considerados

O cenário BAU mantém-se como o de menor custo acumulado ao longo do horizonte analisado. Este resultado decorre da ausência de políticas climáticas e da continuidade do uso de tecnologias convencionais, com investimentos reduzidos. No entanto, importa salientar que este aparente custo reduzido está associado à inação climática e à manutenção de níveis elevados de emissões. O cenário EMIS-ONLY, que impõe apenas limites de emissões, apresenta um aumento marginal de 5% face ao BAU. Este resultado demonstra que implementar metas de descarbonização, mesmo sem recorrer a instrumentos de mercado como taxas de carbono, pode ser uma medida eficaz e relativamente económica. A obrigatoriedade de reduzir emissões leva à adoção de tecnologias mais eficientes, que por sua vez contribuem para a redução dos custos operacionais ao longo do tempo.

Os cenários TAX-ONLY e EMIS-TAX registam ambos um acréscimo de 7% nos custos totais acumulados. Esta semelhança sugere que a introdução de taxas de carbono, seja de forma isolada ou combinada com limites de emissões, gera respostas semelhantes em termos de investimento tecnológico e custos de operação. A penalização fiscal das emissões de carbono induz mudanças no sistema energético, promovendo a adoção de tecnologias de baixo carbono, mas também impõe encargos adicionais ao sistema. O cenário ELE, que representa a combinação de todas as políticas anteriores com a eletrificação forçada dos consumos energéticos, apresenta um custo acumulado

10% superior ao BAU. Este aumento reflete os investimentos necessários na substituição de equipamentos e na adaptação das infraestruturas energéticas. No entanto, este cenário permite, a médio e longo prazo, uma redução significativa dos custos operacionais, devido à elevada eficiência energética das tecnologias eletrificadas. Por fim, o cenário BAU-TAX, no qual são aplicadas taxas de carbono a um sistema que não foi previamente adaptado nem tecnologicamente modernizado, revela-se o mais oneroso, com um custo total 20% superior ao cenário de referência. Este resultado evidencia que a simples introdução de instrumentos de mercado, sem políticas complementares de incentivo à modernização tecnológica, pode tornar o sistema energeticamente ineficiente e economicamente penalizador.

Em síntese, a análise mostra que estratégias de mitigação baseadas em planeamento e incentivos à descarbonização, como nos cenários EMIS-ONLY e EMIS-TAX, são mais custo-efetivas do que abordagens baseadas apenas na penalização fiscal, especialmente quando aplicadas a sistemas pouco preparados. A eletrificação, embora mais exigente em termos de investimento inicial, revela-se uma estratégia promissora ao permitir ganhos operacionais relevantes e uma maior sustentabilidade a longo prazo.

Comparação de emissões

A Figura seguinte apresenta a evolução das emissões de GEE no setor da madeira entre 2023 e 2050, para os diferentes cenários modelados. À medida que são aplicadas as políticas de descarbonização previstas nos vários cenários, observa-se uma tendência clara de redução das emissões, com magnitudes e ritmos distintos consoante as estratégias adotadas.

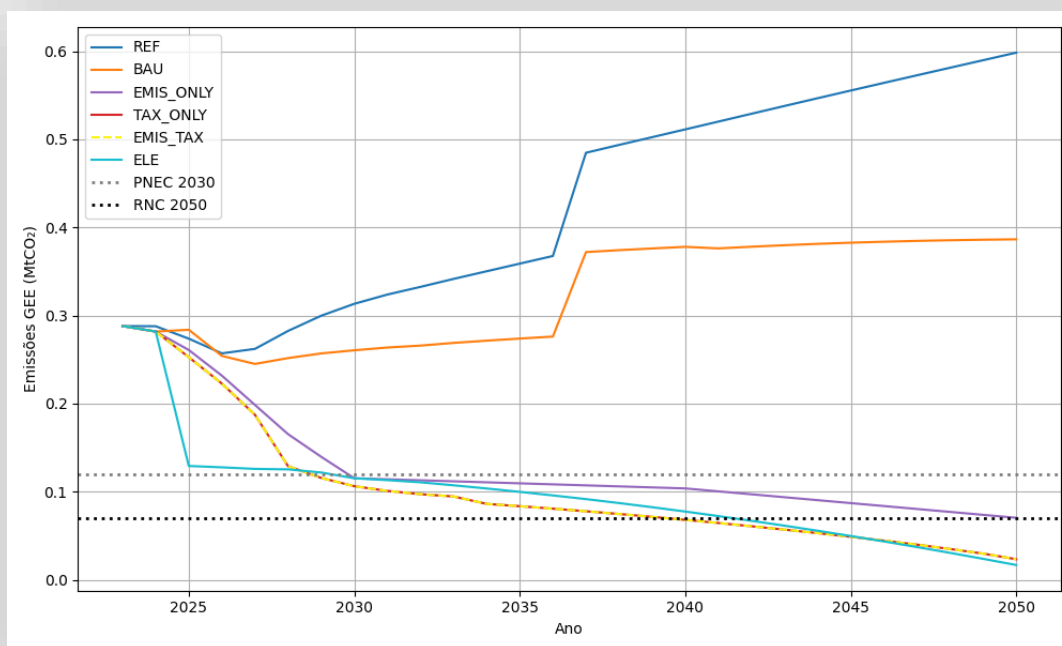


Figura - Evolução das emissões de GEE de 2023 a 2050 para os cenários em análise

Nos cenários REF e BAU, onde não são impostas restrições às emissões nem existem políticas climáticas em vigor, verifica-se uma tendência crescente das emissões ao longo do tempo. Esta evolução reflete a continuidade da dependência de combustíveis fósseis e a ausência de incentivos para a adoção de tecnologias mais limpas ou eficientes.

O cenário ELE, que combina limites de emissões, taxas de carbono e eletrificação forçada, é o que apresenta a trajetória de redução de emissões mais acentuada. Este desempenho superior resulta, essencialmente, da conjugação de três fatores: a rápida descarbonização da rede elétrica, a substituição de equipamentos por tecnologias eletrificadas com elevada eficiência energética, e a implementação de produção descentralizada com fontes renováveis, como o fotovoltaico. Neste cenário, as emissões do setor reduzem-se de forma significativa e antecipada, indo além das metas estabelecidas no PNEC 2030 e no RNC 2050. Os cenários como EMIS-TAX e TAX-ONLY também apresentam reduções significativas de emissões, igualmente superiores às metas definidas. Esta tendência está fortemente associada à introdução de taxas de carbono, que têm um efeito económico considerável sobre os sistemas intensivos em emissões, incentivando uma transição mais rápida para tecnologias eficientes e vetores energéticos com menor intensidade carbónica.

Por outro lado, o cenário EMIS-ONLY, que se baseia exclusivamente na imposição de limites máximos de emissões, cumpre os objetivos climáticos nacionais, mas de forma mais gradual e conservadora. As metas do PNEC 2030 e do RNC 2050 são atingidas no limite, sem grandes excessos. Este comportamento sugere que o setor, na ausência de incentivos económicos como as taxas de carbono, adota uma abordagem mais cautelosa, promovendo a substituição progressiva de tecnologias e vetores energéticos sem recorrer, de forma significativa, a tecnologias emergentes ou menos maduras.

A Figura seguinte apresenta a evolução quinquenal das emissões GEE no setor da madeira entre 2023 e 2050, considerando todos os cenários simulados.

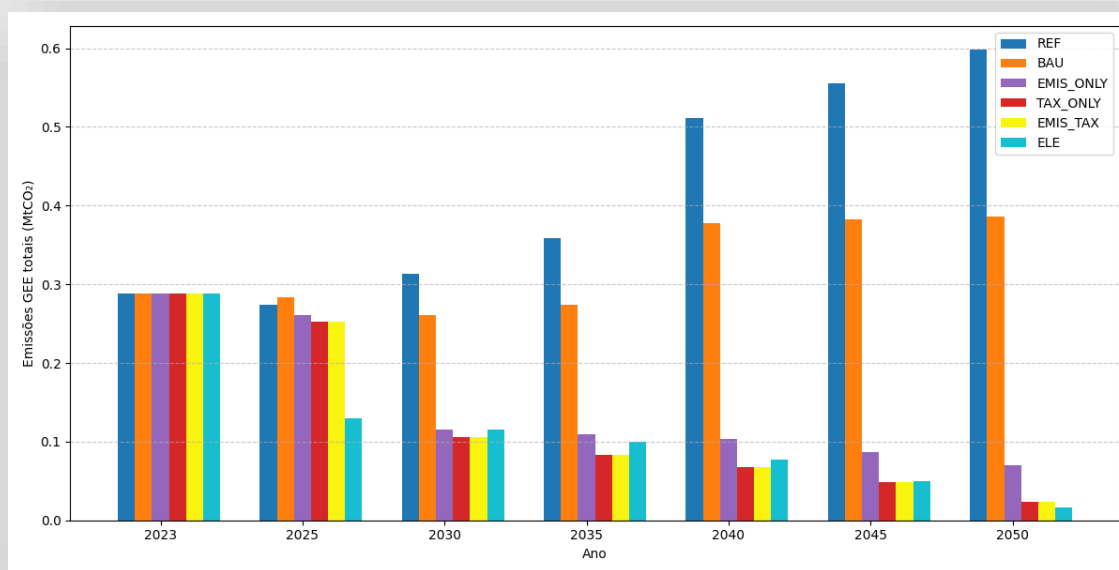


Figura - Comparação das emissões de GEE dos cenários por quinquénio

Em 2023, todos os cenários partem do mesmo ponto de referência, com emissões de 0,288 MtCO₂eq, uma vez que se trata do ano base. A partir de 2025, começam a observar-se reduções significativas nos cenários com políticas ativas. Em 2025, o cenário BAU apresenta uma redução muito ligeira de cerca de 1,5% face a 2023, situando-se em 0,284 MtCO₂eq, refletindo a ausência de políticas de mitigação significativas. Já os cenários EMIS-ONLY, TAX-ONLY e EMIS-TAX apresentam reduções mais substanciais, de aproximadamente 9,5%, 12,2% e 12,2%, respetivamente, indicando os primeiros efeitos das políticas de limitação e tributação das emissões de carbono. O cenário ELE destaca-se com uma redução acentuada de 55,1% já em 2025, fruto da eletrificação acelerada e da

incorporação de tecnologias mais eficientes. O cenário REF mantém emissões próximas às de 2023, com ligeira redução de 5%.

No quinquénio seguinte, 2030, as diferenças tornam-se ainda mais evidentes. O cenário BAU continua a descer, embora apenas 9,5% abaixo do nível inicial, chegando a 0,261 MtCO₂eq, o que traduz uma trajetória praticamente sem mitigação. O cenário REF, por sua vez, já excede em 8,8% as emissões de 2023, atingindo 0,313 MtCO₂eq, resultado da ausência de medidas de controlo. Por outro lado, os cenários EMIS-ONLY, TAX-ONLY e EMIS-TAX reduzem as emissões para níveis entre 0,106 e 0,115 MtCO₂eq, o que corresponde a reduções expressivas entre 60% e 63% relativamente ao ano base. O cenário ELE mantém a sua performance elevada, com uma redução de 60% face a 2023, posicionando-se em 0,115 MtCO₂eq, resultado da combinação de eletrificação e tecnologias eficientes. Em 2035, observa-se um aumento nas emissões do cenário BAU, que sobe para 0,274 MtCO₂eq, valor apenas 4,9% inferior ao ano base, refletindo uma trajetória de estagnação no controlo das emissões. Contrariamente, o cenário REF evidencia um crescimento mais acentuado, com emissões 24,6% superiores a 2023, atingindo 0,359 MtCO₂eq. Os cenários EMIS-ONLY, TAX-ONLY e EMIS-TAX apresentam emissões entre 0,084 e 0,110 MtCO₂eq, traduzindo-se em reduções entre 62% e 70%. O cenário ELE mante-se abaixo dos 0,1 MtCO₂eq, com uma redução de 65,3% relativamente ao ano base, continuando a evidenciar a maior eficácia na redução de emissões.

A tendência de aumento das emissões no cenário BAU acentua-se em 2040, atingindo 0,378 MtCO₂eq, ou seja, um aumento de 31,3% face a 2023, revelando a falta de políticas climáticas efetivas. O cenário REF acompanha esta tendência, com emissões a aumentarem 77,6%. Em contraste, os cenários EMIS-ONLY, TAX-ONLY e EMIS-TAX reduzem significativamente as suas emissões, situando-se entre 0,068 e 0,104 MtCO₂eq, equivalendo a reduções de 64% a 76%. O cenário ELE regista uma redução ainda mais expressiva de 73,1%, posicionando-se em 0,078 MtCO₂eq. Já em 2045, as emissões no cenário BAU mantêm-se elevadas, em 0,383 MtCO₂eq, correspondendo a um aumento de 32,9% face a 2023. O cenário REF ultrapassa 0,555 MtCO₂eq, representando uma subida de 92,9%. Os cenários com políticas climáticas rigorosas continuam a evidenciar reduções consideráveis, com EMIS-ONLY a diminuir as emissões em 69,7%, TAX-ONLY e EMIS-TAX em aproximadamente 83%, e ELE com a redução mais significativa, 82,7% face a 2023.

Finalmente, em 2050, o cenário BAU apresenta emissões de 0,386 MtCO₂eq, correspondendo a um aumento de 34,2% em relação ao ano base. O cenário REF atinge o valor mais elevado, com 0,598 MtCO₂eq, refletindo um crescimento de 107,7%. Em contraste, os cenários de mitigação apresentam reduções marcantes: o EMIS-ONLY reduz 75,5% face a 2023, enquanto TAX-ONLY e EMIS-TAX atingem reduções superiores a 91%, situando-se em torno de 0,023 MtCO₂eq. O cenário ELE destaca-se com a maior redução de todas, com emissões de apenas 0,017 MtCO₂eq, correspondendo a uma diminuição de 94,1% relativamente ao ano base.

A Figura - Custos acumulados vs Emissões GEE acumulados apresenta uma comparação, para os diferentes cenários do modelo, entre os custos totais acumulados e as emissões acumuladas de gases com efeito de estufa. A posição de cada cenário revela o trade-off entre o custo financeiro e o impacto ambiental.

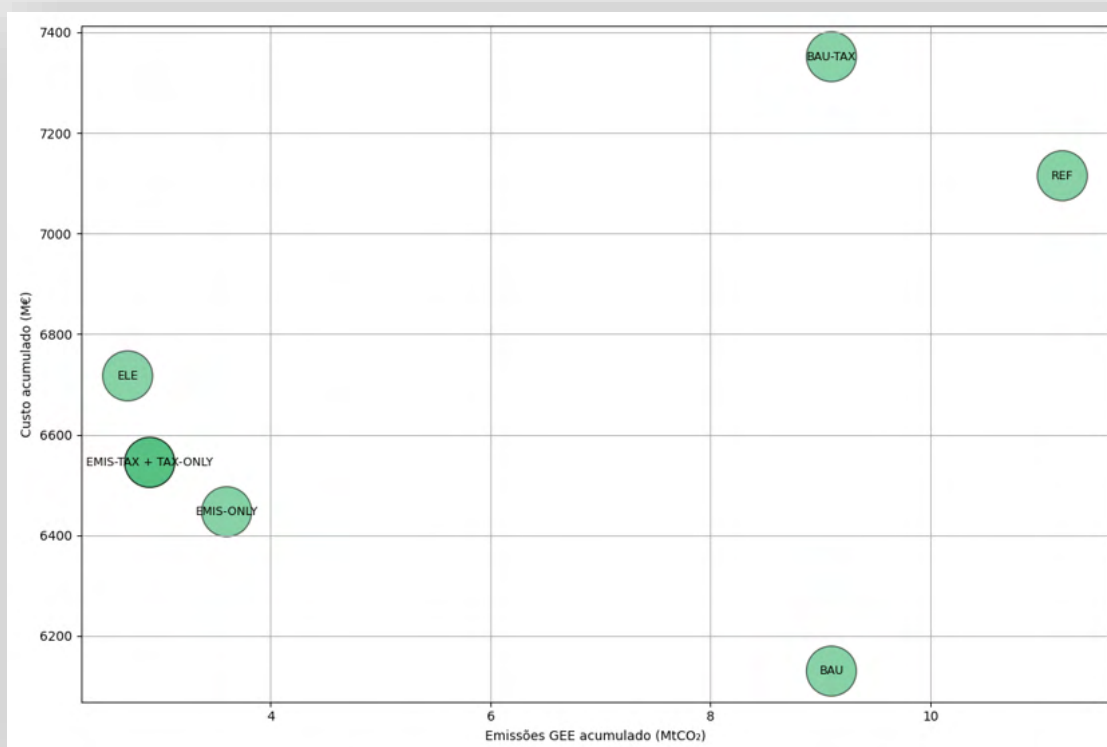


Figura - Custos acumulados vs Emissões GEE acumulados

Observa-se que os cenários REF e BAU-TAX se encontram no quadrante superior direito, indicando os maiores valores tanto de custos acumulados como de emissões de GEE, representando os cenários de menor intervenção e maior impacto ambiental e financeiro.

O cenário BAU, apesar de apresentar custos inferiores relativos aos restantes cenários, apresenta emissões significativamente mais elevadas que a maioria, refletindo a falta de políticas de mitigação. Por outro lado, os cenários EMIS-ONLY, TAX-ONLY e EMIS-TAX situam-se na zona inferior esquerda do gráfico, combinando custos acumulados relativamente baixos com emissões reduzidas. Isto demonstra que a aplicação combinada de limites de emissões e taxas de carbono pode ser uma estratégia eficiente para alcançar a descarbonização do setor, minimizando os custos totais.

O cenário ELE destaca-se como o mais eficiente em termos de custo-benefício, apresentando o menor nível de emissões acumuladas aliado a custos moderados, evidenciando que a eletrificação forçada e a introdução de tecnologias mais eficientes permitem uma descarbonização mais profunda com um investimento controlado.

Comparação de vetores energéticos

A Figura seguinte apresenta a evolução da energia final utilizada no setor da madeira entre 2023 e 2050, para os vários cenários analisados.

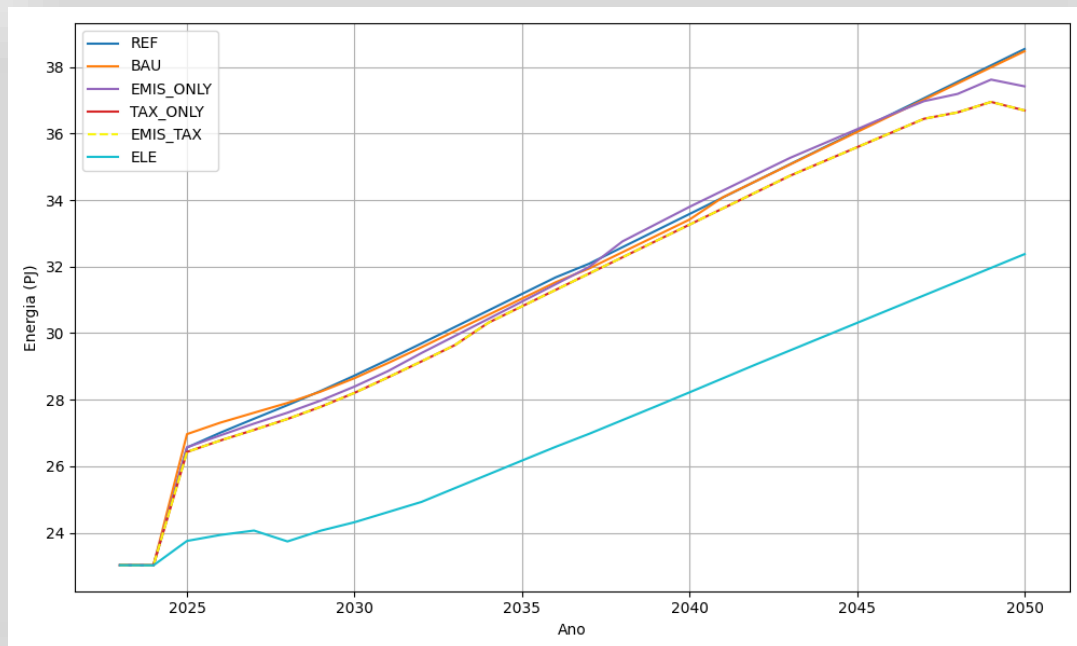


Figura - Evolução da energia final de 2023 a 2050 para os cenários em análise

De forma geral, observa-se uma tendência de crescimento da procura energética ao longo do tempo em todos os cenários, acompanhando o aumento da atividade setorial esperada. No entanto, esta trajetória não é uniforme entre os cenários. O cenário ELE, que pressupõe a eletrificação forçada do setor e a adoção de tecnologias mais eficientes, destaca-se por apresentar uma procura de energia final significativamente inferior à dos restantes cenários. Este cenário regista uma redução de cerca de 15% na procura energética acumulada face ao cenário BAU, resultado direto da maior eficiência energética das tecnologias eletrificadas e da substituição de vetores convencionais por eletricidade de origem renovável.

Por outro lado, os cenários EMIS-ONLY, TAX-ONLY e EMIS-TAX exibem perfis de procura energética bastante semelhantes entre si, situando-se apenas 1% abaixo do cenário BAU em termos de procura de energia. Isto sugere que a aplicação isolada ou combinada de políticas climáticas, sem a imposição direta de eletrificação, leva à adoção de melhorias incrementais em eficiência e substituição de vetores, mas sem provocar uma transformação estrutural tão profunda quanto a verificada no cenário ELE.

A análise da evolução dos vetores energéticos entre 2023 e 2050 evidencia trajetórias distintas consoante o cenário modelado, refletindo diferentes estratégias políticas, tecnológicas e ambientais. Os resultados obtidos para os diferentes cenários encontram-se resumidos na figura seguinte.

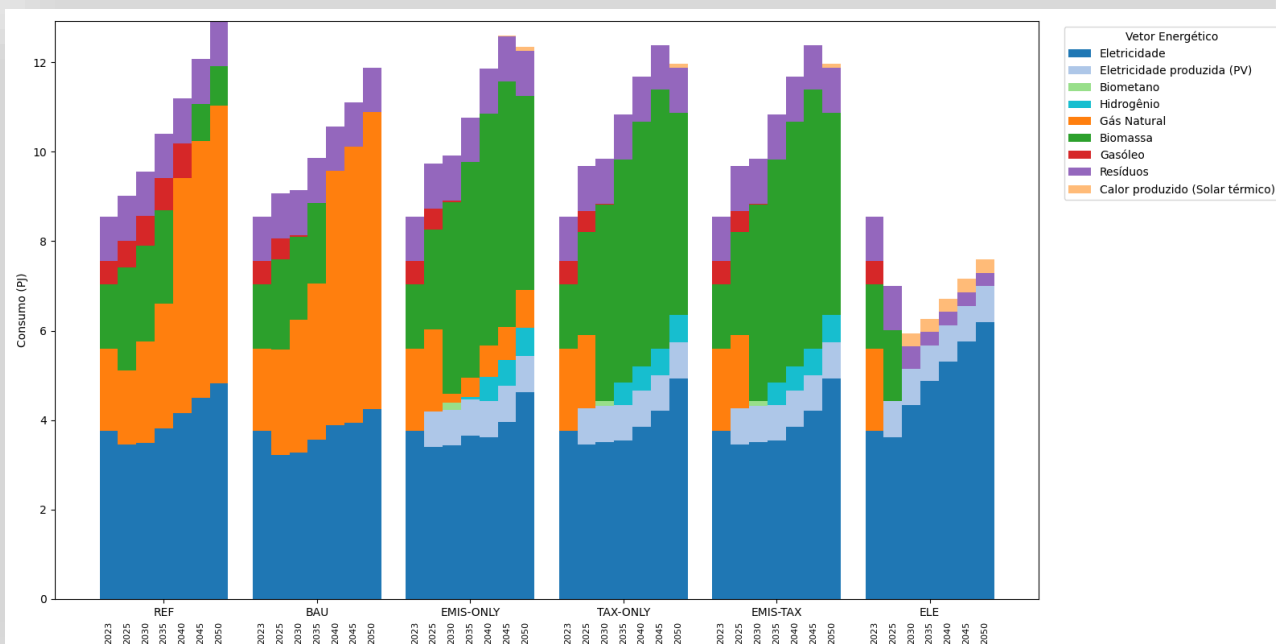


Figura - Comparação dos vetores energéticos utilizado nos cenários por quinquénio

No cenário BAU observa-se a manutenção da trajetória atual, sem alterações estruturais no sistema energético. O gás natural cresce de forma acentuada, com um aumento de +262% entre 2023 e 2050, tornando-se o vetor dominante no final do horizonte temporal. A biomassa e o gasóleo, por sua vez, são progressivamente eliminados a partir de 2040. A eletricidade cresce de forma moderada, com um acréscimo de apenas +12% em 2050 face a 2023, mantendo-se um vetor secundário. Não se verifica qualquer penetração de vetores emergentes, como hidrogénio, biometano ou solar térmico, o que resulta numa elevada dependência de combustíveis fósseis.

O cenário REF apresenta uma configuração semelhante ao BAU no que diz respeito aos vetores utilizados, embora com diferenças quantitativas. A biomassa mantém-se relevante até cerca de 2035, sendo depois parcialmente substituída por gás natural, o qual se torna dominante a partir de 2040. O gasóleo desaparece totalmente em 2045. A eletricidade regista um crescimento mais expressivo do que no BAU, com +28% até 2050 face ao valor de 2023.

Já no cenário EMIS-ONLY, delineado por restrições às emissões, verifica-se uma transformação relevante do mix energético. A biomassa regista um aumento acentuado, crescendo +203% entre 2023 e 2045, funcionando como vetor substitutivo face à redução do gás natural, que diminui 53% ao longo do período. O hidrogénio é introduzido a partir de 2035, atingindo 0,62 PJ em 2050, representando um avanço modesto, mas significativo. O biometano surge pontualmente em 2030, desaparecendo nos anos seguintes. O solar térmico aparece de forma marginal a partir de 2045. A eletricidade aumenta +23% face a 2023, mantendo-se um vetor em expansão. Este cenário evidencia uma diversificação moderada, com reforço da biomassa e início da incorporação de vetores renováveis emergentes.

O cenário TAX-ONLY, revela uma estrutura energética muito próxima do EMIS-ONLY. O hidrogénio é introduzido mais cedo, em 2035, com uma ligeira progressão até 2050. O biometano é utilizado apenas pontualmente em 2030. O gás natural é eliminado completamente após nesse ano, reforçando o carácter de descarbonização. A biomassa regista um crescimento ligeiramente superior ao do cenário anterior. A eletricidade cresce +31% até 2050 face ao valor base, demonstrando maior

elasticidade à penalização fiscal. A substituição de fósseis é quase total, com uma diversificação de fontes ligeiramente superior ao EMIS-ONLY.

No cenário EMIS-TAX, que conjuga restrições ambientais com penalizações económicas, verifica-se uma convergência com o cenário TAX-ONLY no que respeita à composição e evolução dos vetores energéticos. A eliminação do gás natural e do gasóleo ocorre até 2030, com a introdução progressiva do hidrogénio e do solar térmico a partir de 2035 e 2045, respetivamente. A eletrificação assume uma maior intensidade (+31% face a 2023), sendo parcialmente suportada por geração fotovoltaica (PV). Este cenário resulta num mix altamente descarbonizado e tecnologicamente mais evoluído, combinando robustez ambiental com racionalidade económica.

Por fim, o cenário ELE representa a opção mais disruptiva, com uma transformação estrutural do sistema energético. A eliminação total dos combustíveis fósseis (gás natural e gasóleo) ocorre até 2030, sendo substituídos por eletricidade e calor solar térmico. Não se verifica qualquer utilização de hidrogénio, biometano ou biomassa até 2050, apontando para uma opção energética centrada na eficiência e eletrificação. O PV é introduzido a partir de 2025 (0,8 PJ), enquanto o solar térmico se integra desde 2030 (0,3 PJ). A eletricidade cresce +64% até 2050 face ao valor de 2023, tornando-se o vetor dominante, ultrapassando 70% do mix energético estimado.

A Figura seguinte apresenta uma comparação para os diferentes cenários do modelo entre os custos totais acumulados e o consumo de energia.

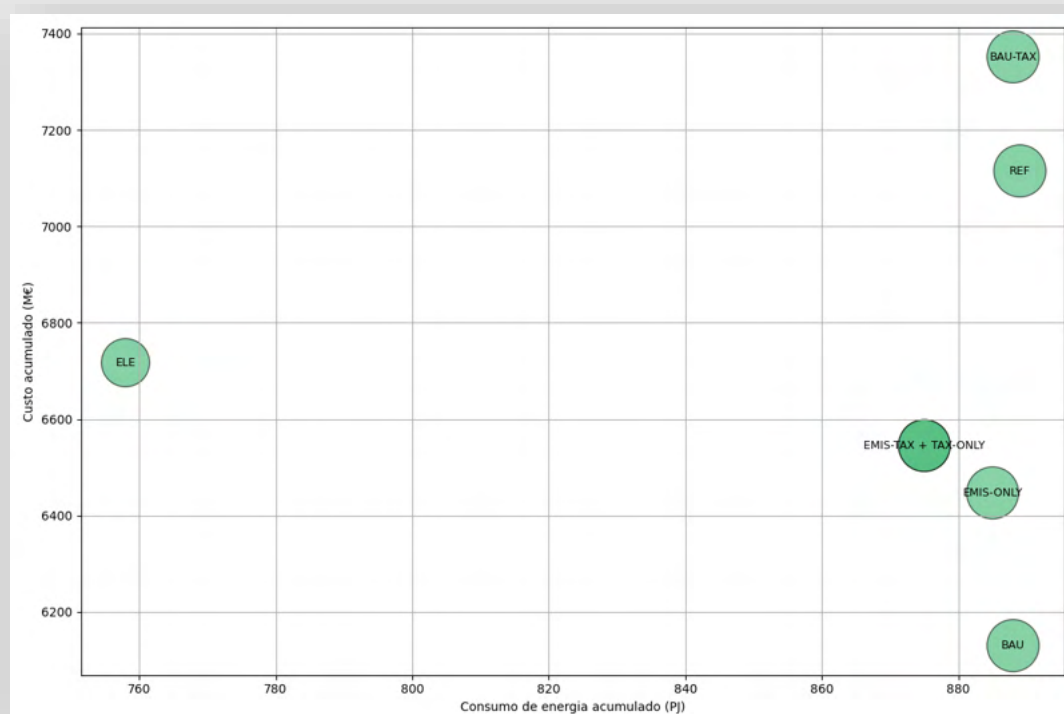


Figura - Custos acumulados vs Consumo de energia acumulada

Através da próxima figura observa-se que os cenários REF e BAU-TAX (quadrante superior direito) apresentam os valores mais elevados tanto de custos acumulados como de consumo de energia, sendo, por isso, os cenários com uso de tecnologias com menor eficiência energética. O cenário BAU (zona inferior do quadrante direito do gráfico), apesar de apresentar custos inferiores relativos aos restantes cenários, apresenta consumo de energia semelhantes aos cenários REF e BAU-TAX. Já os cenários EMIS-ONLY, TAX-ONLY e EMIS-TAX combinam custos acumulados intermédios aos

restantes cenários e com consumo de energia ligeiramente inferior espelhando a melhoria de eficiência das novas tecnologias. O cenário ELE destaca-se como o mais eficiente em termos de custo-benefício, apresentando o menor nível de emissões acumuladas aliado a custos moderados, evidenciando que a eletrificação forçada e a introdução de tecnologias mais eficientes permitem uma descarbonização mais profunda com um investimento controlado.

Comparação entre tecnologias

A presente secção analisa a evolução das tecnologias adotadas nos diferentes cenários, com especial foco nos principais sistemas de conversão energética utilizados no setor, nomeadamente: na maquinaria de processo, no transporte interno, na produção de vapor, na geração de ar quente, geração de calor e no calor de origem em fontes renováveis.

A figura seguinte apresenta a distribuição das tecnologias aplicadas nos sistemas de maquinaria de processo. De forma geral, verifica-se uma tendência clara do modelo para a seleção de tecnologias mais eficientes em todos os cenários, refletindo uma lógica de otimização tanto energética como económica.

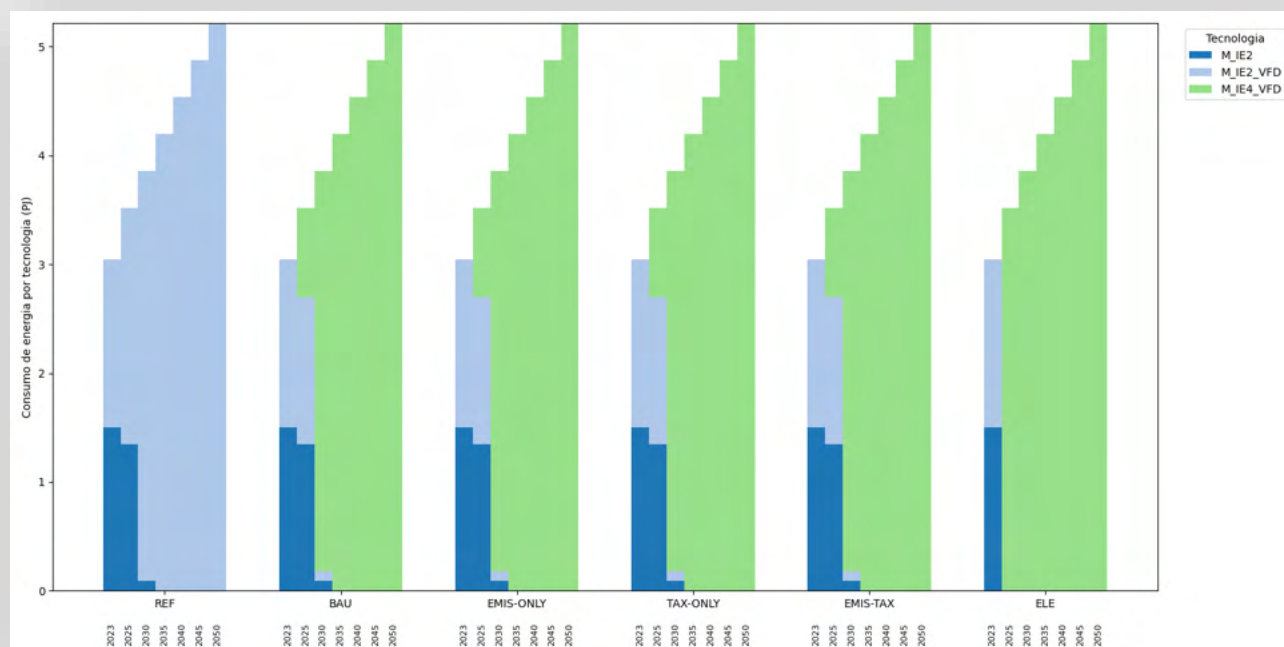


Figura - Distribuição das tecnologias aplicadas nos sistemas de maquinaria de processo

No cenário REF, que se caracteriza pela manutenção de uma trajetória estacionária, não se observam substituições estruturais ao nível das máquinas principais. Neste contexto, os motores menos eficientes (M_IE2) permanecem amplamente instalados ao longo do período de análise. A única alteração relevante consiste na adoção progressiva de variadores de velocidade (M_IE2_VFD), o que melhora marginalmente o desempenho sem a necessidade de substituição integral dos equipamentos. Nos restantes cenários – BAU, EMIS-ONLY, TAX-ONLY e EMIS-TAX – o perfil de substituição tecnológica é relativamente semelhante. Até 2030, os motores M_IE2 ainda dominam o parque instalado, refletindo a inércia tecnológica do sistema. Contudo, à medida que se introduzem restrições às emissões (como nos cenários EMIS-ONLY e EMIS-TAX) ou penalizações económicas sobre o uso de tecnologias menos eficientes (caso do TAX-ONLY), o modelo favorece

progressivamente a substituição por motores de elevada eficiência (M_IE4), tipicamente associados ao uso de variadores de velocidade (M_IE4_VFD). Esta transição torna-se economicamente vantajosa ao longo do tempo, fruto da redução dos custos operacionais. No caso particular do cenário ELE, a eletrificação rápida do sistema e a adoção de tecnologias de alta eficiência surgem de forma mais precoce. Entre 2025 e 2030 já se verifica uma ampla substituição dos motores de menor eficiência (M_IE2) por motores de alta eficiência em conjunto com variadores de velocidade (M_IE4_VFD). Esta antecipação da modernização tecnológica está alinhada com a lógica estrutural do cenário, que privilegia a eletrificação e a eficiência como vetores centrais da descarbonização.

No caso das operações de transporte interno, através da Figura seguinte observa-se uma tendência comum, transversal a praticamente todos os cenários, para a substituição progressiva de tecnologias convencionais por soluções mais eficientes e com menor intensidade carbónica.

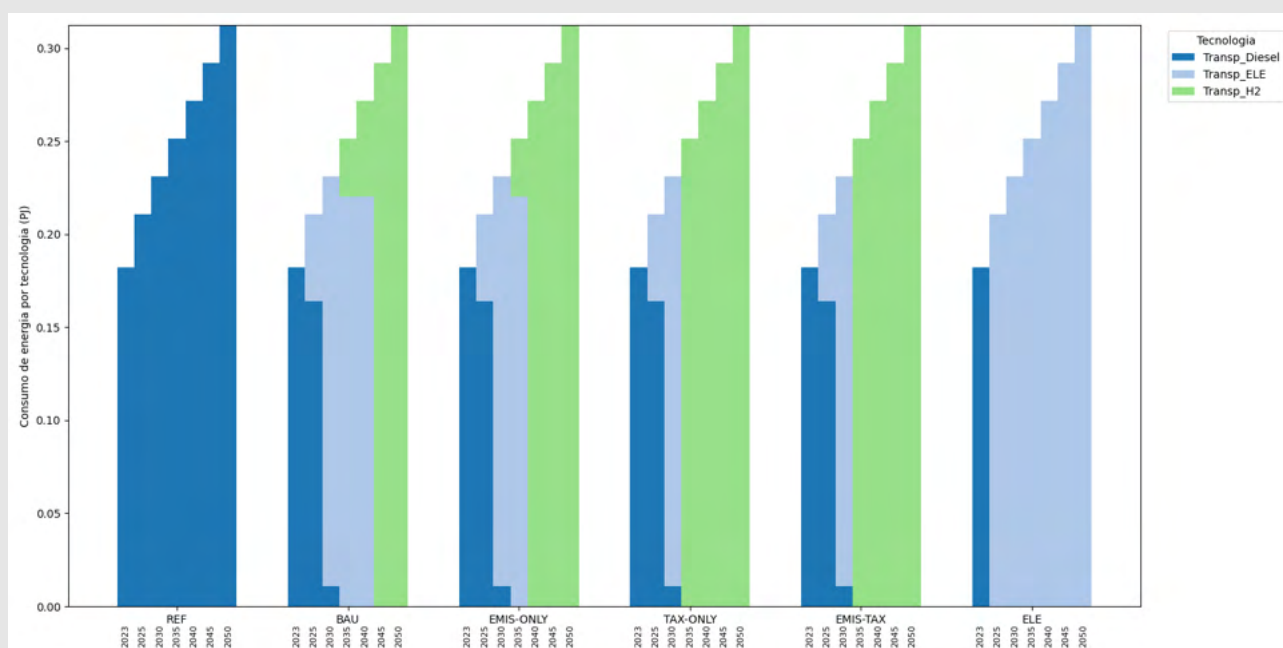


Figura - Distribuição das tecnologias aplicadas nas operações de transporte interno

No cenário REF, verifica-se a manutenção da tecnologia convencional ao longo de todo o horizonte temporal, com recurso continuado a veículos movidos a gasóleo (Transp_Diesel). Esta escolha está em linha com a natureza conservadora do cenário, que assume a não introdução de novas políticas ou inovações tecnológicas relevantes. Nos restantes cenários – BAU, EMIS-ONLY, TAX-ONLY e EMIS-TAX – o processo de substituição tecnológica inicia-se ainda antes de 2030, com a eletrificação do transporte interno a ganhar destaque (Transp_ELE). Esta transição resulta da maturidade tecnológica dos equipamentos elétricos, que apresentam já uma boa performance técnica e uma relação custo-benefício competitiva, que permite reduzir significativamente as emissões de gases com efeito de estufa. A partir de 2030, e estendendo-se até 2050, observa-se a substituição gradual dos sistemas elétricos (Transp_ELE) por soluções baseadas em hidrogénio (Transp_H2), refletindo uma nova fase de transição tecnológica. Esta mudança ocorre sobretudo quando os constrangimentos técnicos e económicos das tecnologias a hidrogénio são ultrapassados, tornando-se uma opção viável e atrativa para aplicações industriais de transporte interno.

No cenário ELE, que representa a aposta mais robusta na descarbonização e na eletrificação, a transição para transporte elétrico ocorre de forma mais célere. Entre 2025 e 2030, o gasóleo é completamente substituído por soluções elétricas (Transp_ELE), que se mantêm como vetor dominante até 2050. Ao contrário dos restantes cenários, neste caso não se verifica uma transição

posterior para o hidrogénio, uma vez que a eletrificação é suficientemente eficiente e robusta para responder às necessidades operacionais do setor ao longo de todo o período de análise.

No que respeita às tecnologias de produção de vapor, a figura seguinte mostra a evolução do consumo energético associado, entre 2023 e 2050.

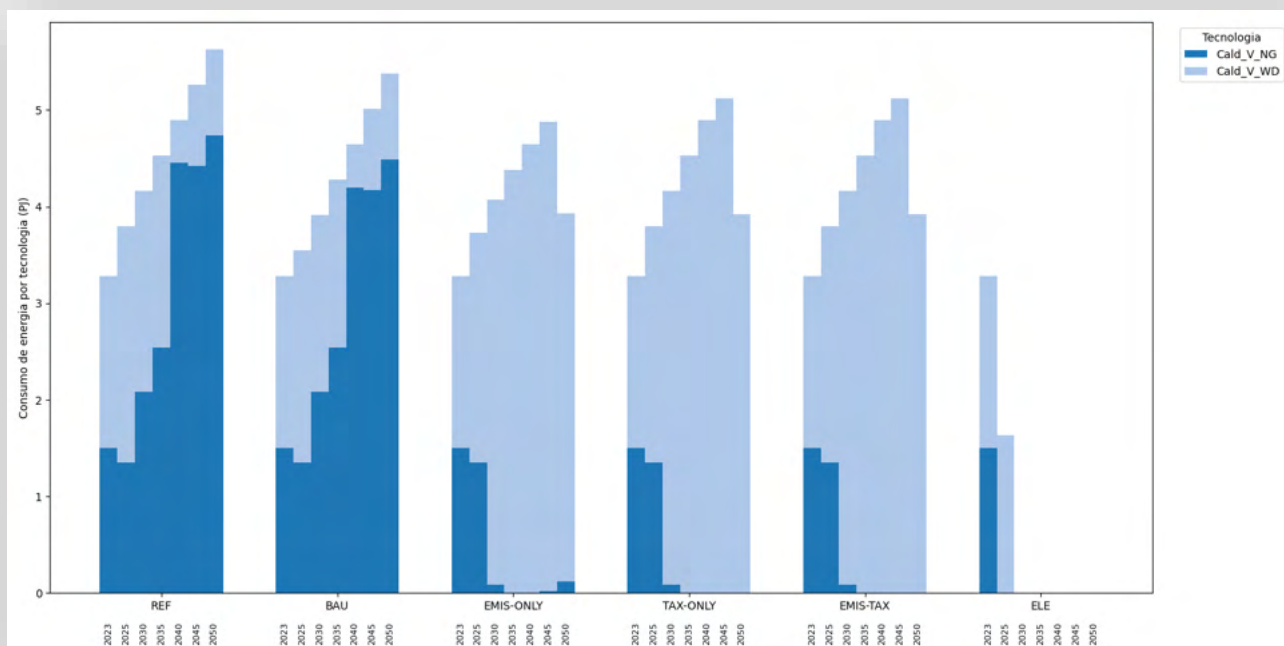


Figura - Distribuição das tecnologias aplicadas à produção de vapor

Nos cenários REF e BAU, observa-se uma forte dependência em caldeiras a gás natural (Cald_V_NG) ao longo do período de análise. Nos cenários onde são impostas políticas climáticas – EMIS-ONLY, TAX-ONLY e EMIS-TAX – a trajetória tecnológica é significativamente diferente. A utilização de caldeiras a gás natural (Cald_V_NG) é progressivamente eliminada, com valores residuais já a partir de 2035, sendo substituída quase integralmente por caldeiras a biomassa (Cald_V_WD). Este vetor energético assume um papel central na substituição dos fósseis, permitindo uma descarbonização efetiva do processo de produção de vapor, sobretudo após 2040. Esta transição é facilitada pela maior maturidade tecnológica das caldeiras a biomassa, bem como pela sua competitividade em termos de emissões e custo.

No cenário ELE, altamente centrado na eletrificação e descarbonização radical do sistema energético, a utilização de caldeiras é significativamente reduzida. As caldeiras a gás natural (Cald_V_NG) ainda aparecem no início do período, mas são rapidamente descontinuadas. Por outro lado, o contributo das caldeiras a biomassa (Cald_V_WD) é mínimo e tende a desaparecer, sugerindo que neste cenário a produção de calor possa ser garantida predominantemente por tecnologias elétricas (como bombas de calor ou resistências elétricas) ou por solar térmico, em consonância com a estratégia de eliminação total de combustíveis fósseis e de vetores convencionais.

Como é possível observar na Figura 50, a evolução de utilização de tecnologias de geração de ar quente varia consoante o cenário considerado, refletindo o grau de ambição das políticas energéticas e climáticas aplicadas.

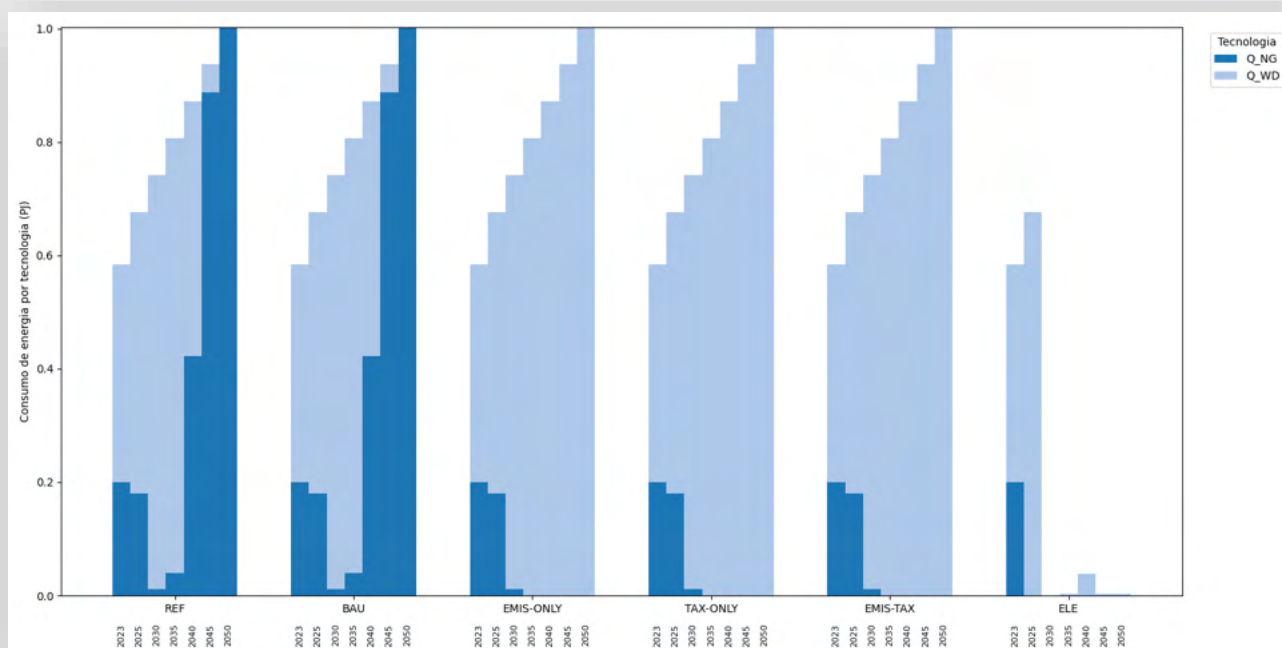


Figura - Distribuição das tecnologias aplicadas à geração de ar quente

Nos cenários REF e BAU, verifica-se a contínua utilização de tecnologias que usam o gás natural (Q_NG) como principal vetor energético. Em ambos os casos, o consumo de gás natural cresce de forma contínua até 2050, mantendo-se como a tecnologia dominante. A utilização de tecnologias a biomassa (Q_WD) também cresce, mas com menor expressão, funcionando como tecnologia complementar, sem nunca ultrapassar a predominância do gás natural. Já nos cenários com políticas climáticas – EMIS-ONLY, TAX-ONLY e EMIS-TAX –, observa-se uma clara substituição de tecnologias a gás natural (Q_NG) por tecnologia a biomassa (Q_WD) ao longo do tempo. A partir de 2030, as tecnologias a biomassa passam a representar quase a totalidade de tecnologias utilizadas na geração de ar quente, com as tecnologias a gás natural a desaparecer gradualmente.

No cenário ELE, a trajetória é ainda mais evidente: as tecnologias a gás natural (Q_NG) desaparecem completamente antes de 2030, e as tecnologias a biomassa (Q_WD) passam a ser as únicas tecnologias utilizadas para este fim, ainda que com uma presença inferior aos outros cenários. Isto deve-se ao facto de que, num sistema altamente eletrificado, o papel da geração de ar quente pode ser reduzido ou substituído por outras soluções mais eficientes (ex: bombas de calor ou ventilação com recuperação de calor), o que explica o menor volume global de consumo.

A geração alternativa de calor por novas tecnologias apresenta dinâmicas dispares entre os diferentes cenários, refletindo os pressupostos e restrições de cada um em termos de descarbonização, inovação tecnológica e eficiência, como é possível observar na seguinte figura.

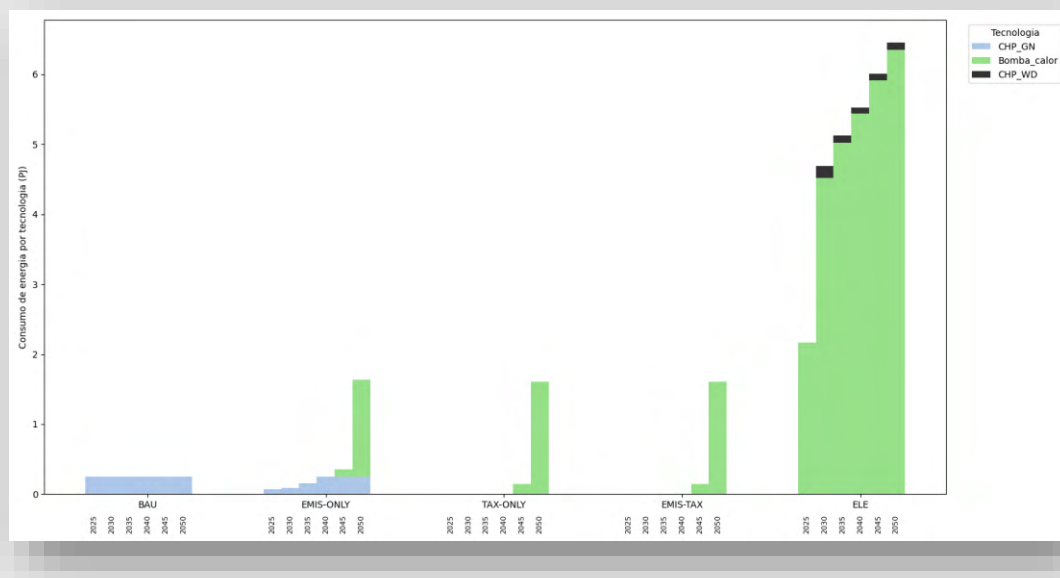


Figura - Distribuição das tecnologias aplicadas à geração de calor

No cenário BAU, observa-se uma manutenção da tecnologia convencional de cogeração a gás natural (CHP_GN) como principal solução para a produção de calor, com um consumo estável entre 2025 e 2050. No cenário com restrições de emissões – EMIS-ONLY – verifica-se a introdução gradual da cogeração a gás natural (CHP_GN) de 2025 a 2040, onde estabiliza a sua utilização até 2050. Para além disso, verifica-se a partir de 2035 a introdução gradual de bombas de calor (Bomba_calor). No caso dos cenários mais restritivos – TAX-ONLY e EMIS-TAX – a geração alternativa de calor é apenas possível pela utilização de bombas de calor, que só se tornam custo eficazes na década de 2040-2050. O cenário ELE apresenta a trajetória mais ambiciosa e disruptiva. A utilização de bombas de calor (Bomba_calor) cresce de forma acentuada logo a partir de 2025, consolidando-se como a única tecnologia relevante na geração de calor ao longo de todo o período. Esta opção reforça a lógica deste cenário de eletrificação total e abandono de combustíveis fósseis. Por outro lado, a cogeração a biomassa (CHP_WD) surge apenas de forma residual e complementar.

Na figura é representada a adoção de tecnologias solares para produção de calor ao longo do tempo tendo em conta os cenários em estudos. No caso dos cenários REF e BAU não há adoção de

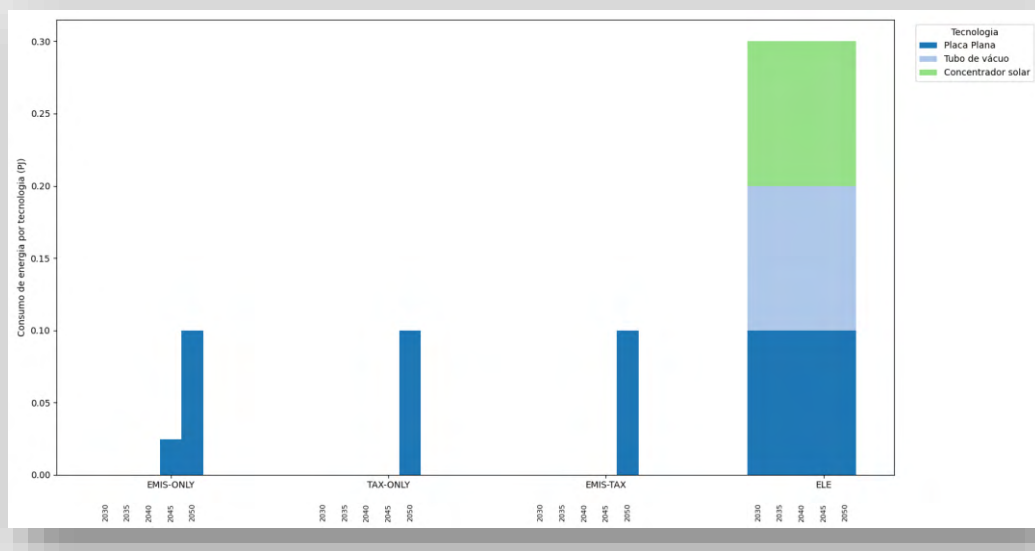


Figura - Distribuição de tecnologias solares térmicas para produção de calor

Nos restantes cenários analisados – EMIS-ONLY, TAX-ONLY, EMIS-TAX e ELE – observa-se uma evolução distinta da adoção de tecnologias solares térmicas para produção de calor, nomeadamente Placa Plana, Tubo de Vácuo e Concentrador Solar. Nos cenários EMIS-ONLY, TAX-ONLY e EMIS-TAX, a adoção de tecnologias solares é muito limitada e tardia. Até 2040, não se verifica qualquer integração. Apenas a partir de 2045 surge uma pequena penetração da tecnologia Placa Plana. O cenário ELE destaca-se como o único com uma adoção significativa, precoce e diversificada de tecnologias solares térmicas. Já em 2030, todas as três tecnologias – Placa Plana, Tubo de Vácuo e Concentrador Solar – são integradas de forma equilibrada, representando conjuntamente uma parcela substancial da produção de calor ao longo de todo o período de análise.

Como se pode observar, algumas das tecnologias referidas não foram selecionadas em nenhum dos cenários analisados, como por exemplo a captura de carbono e os sistemas de armazenamento de energia. No caso da captura de carbono, a ausência de integração justifica-se pela existência de alternativas tecnológicas e de vetores energéticos capazes de assegurar a descarbonização de forma mais direta e custo-eficaz. Assim, o modelo privilegia soluções com maior maturidade tecnológica e menor custo marginal, relegando a captura de carbono para contextos muito específicos. Relativamente ao armazenamento de energia, a não adoção decorre sobretudo dos pressupostos do modelo quanto ao perfil de funcionamento industrial e das limitações impostas à instalação de capacidade fotovoltaica. Contudo numa empresa onde o consumo energético é contínuo (24/7), e existe disponibilidade de área para maior penetração de PV, o armazenamento poderia tornar-se uma opção tecnicamente viável e economicamente justificável, assegurando a flexibilidade e a estabilidade do fornecimento.

É importante sublinhar que a não seleção destas tecnologias nos cenários modelados não implica a sua inviabilidade setorial. Pelo contrário, os resultados aqui apresentados devem ser entendidos como uma visão agregada e orientadora para o setor da madeira e derivados, evidenciando caminhos tecnológicos prioritários. Cabe, no entanto, a cada empresa realizar a sua própria análise técnico-económica, considerando as especificidades da sua operação, para determinar em que medida tecnologias identificadas podem ser adequadas e integradas na sua estratégia de descarbonização. Este roteiro deve, assim, ser encarado não como um manual rígido, mas como um ponto de partida para apoiar a tomada de decisão. O futuro da descarbonização do setor dependerá da capacidade de cada empresa em transformar esta visão em ação concreta, assegurando competitividade e sustentabilidade no longo prazo.

III CONSIDERAÇÕES, DESAFIOS E ESTRATÉGIAS PARA O FUTURO

A indústria da madeira e do mobiliário assume um papel cada vez mais relevante no contexto europeu e global da descarbonização. Por se tratar de um setor fortemente dependente de recursos naturais e, simultaneamente, de elevado valor económico, social e cultural, a sua evolução será determinante para a concretização dos objetivos climáticos e para a promoção de cadeias de valor sustentáveis.

A madeira, enquanto recurso renovável, reciclável e de baixo impacto carbónico, surge como um dos pilares centrais da bioeconomia florestal e uma alternativa sólida face a materiais concorrentes, como plástico e metal (Zhang, Ma e Yang 2023; Brownell, Iliev e Bentsen 2023). Contudo, o setor enfrenta desafios estruturais profundos, relacionados com a escassez de matéria-prima de qualidade, as exigências regulamentares cada vez mais rigorosas, a necessidade de modernização tecnológica e a pressão para integrar práticas circulares.

Sustentabilidade e Circularidade como Eixos Estruturantes

A madeira deve ser entendida e valorizada no seu ciclo completo. O princípio da utilização em cascata - privilegiando primeiro a construção e o mobiliário duradouro, depois a reutilização e a reciclagem, e apenas no fim a valorização energética - é fundamental para maximizar o sequestro de carbono e a eficiência de recursos (CEI-Bois et al. 2011).

Os avanços recentes mostram uma crescente aposta na reciclagem, reutilização e inovação em novos produtos derivados da madeira. Exemplos incluem compósitos com plásticos reciclados, biocombustíveis, aplicações em impressão 3D e embalagens inteligentes (Mo, Haviarova e Kitek Kuzman 2024). Ainda assim, persistem entraves na implementação de uma economia circular de ciclo fechado, principalmente devido a barreiras tecnológicas e custos elevados (Lima et al. 2024). A remanufatura, embora promissora, permanece pouco explorada e exige maior aceitação por parte dos consumidores e viabilidade económica para se tornar uma alternativa sólida de expansão da circularidade (Kans e Löfving 2024).

Desafios de Matéria-Prima e Resiliência Florestal

O abastecimento regular de madeira de qualidade é um dos pontos mais críticos para o setor. Incêndios florestais, pragas, doenças e sobre-exploração comprometem a estabilidade da oferta, com impactos diretos nos preços e na competitividade das empresas (AIMMP 2010a; Hoebe et al. 2025). A resposta poderá passar por uma gestão florestal adaptativa, assente na diversificação de espécies e na transição de monoculturas para sistemas mistos, aumentando a resiliência ecológica. No entanto, essas mudanças também alteram a disponibilidade e as tipologias de madeira, o que exigirá adaptações na indústria, tanto tecnológicas como de design e mercado.

Inovação Tecnológica e Digitalização da Cadeia de Valor

O setor madeireiro tem avançado em automação e digitalização, com destaque para a introdução de sistemas CNC, corte a laser e tecnologias de triagem por sensores, que aumentam a precisão e reduzem desperdícios (Zorzos et al. 2025; CEI-Bois e EOS 2019). Contudo, a adoção é desigual: muitas micro e pequenas empresas continuam com baixa automatização e forte dependência de mão de obra intensiva (Russell, Huff e Haviarova 2023).

A digitalização da cadeia de valor - incluindo plataformas de rastreabilidade, interoperabilidade tecnológica e transparência de dados - surge como condição indispensável para a competitividade e sustentabilidade do setor (Ma et al. 2025). O desafio não é apenas técnico, mas também organizacional, exigindo colaboração efetiva entre fornecedores, produtores e consumidores.

Certificação, Transparência e Regulamentação

Os consumidores e mercados internacionais exigem cada vez mais produtos certificados, rastreáveis e com impactos ambientais transparentes. Ferramentas como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), as Declarações Ambientais de Produto (EPD) e o Passaporte Digital de Produto (DPP) são hoje instrumentos estratégicos, não apenas de conformidade regulatória, mas também de diferenciação competitiva (CEI-Bois et al. 2011; Steinwender et al. 2024).

A implementação obrigatória do DPP, prevista para 2027, representa uma viragem estrutural no setor, pois integrará num registo digital único toda a informação sobre ciclo de vida, composição e circularidade dos produtos. O seu sucesso dependerá da capacidade das empresas em adaptar processos, investir em interoperabilidade tecnológica e assegurar a fiabilidade dos dados.

Capital Humano: Formação e Competências Futuras

O processo de descarbonização e digitalização só terá êxito se acompanhado por investimento no capital humano. O setor enfrenta envelhecimento da força de trabalho, escassez de jovens talentos e necessidade urgente de novas competências — tanto técnicas (digitalização, gestão de dados, segurança cibernética) como socioemocionais (criatividade, comunicação, resiliência) (AIMMP 2022; Sharma e Thoudam 2024).

Portugal e outros países europeus já têm apostado em programas de investigação, capacitação e inovação social (INOVA+ 2022), mas é necessário ampliar esforços, assegurando formação contínua, sistemas de gestão de carreiras e integração de competências de sustentabilidade e design circular no perfil dos profissionais.

Estratégias para o futuro

- i. **Integração Tecnológica** – acelerar a digitalização e automação, criando cadeias de valor inteligentes, resilientes e transparentes.
- ii. **Circularidade e Inovação** – expandir práticas de uso em cascata, reciclagem em circuito fechado e remanufatura, criando novos mercados para resíduos e subprodutos.
- iii. **Resiliência Florestal** – reforçar a gestão adaptativa, diversificação de espécies e prevenção de riscos climáticos e ecológicos.
- iv. **Transparência e Certificação** – consolidar o uso de ACV, EPD e DPP como instrumentos de competitividade internacional e confiança do consumidor.
- v. **Capital Humano** – investir em qualificação profissional, inovação social e novas competências que preparem o setor para os desafios tecnológicos e ambientais da próxima década.

AVALIAÇÃO CUSTO-BENEFÍCIO DE TECNOLOGIAS PARA A DESCARBONIZAÇÃO DA FILEIRA DA MADEIRA

||| AVALIAÇÃO CUSTO-BENEFÍCIO DE TECNOLOGIAS PARA A DESCARBONIZAÇÃO DA FILEIRA DA MADEIRA

_Enquadramento

A transição energética e climática representa um dos maiores desafios estratégicos e operacionais para a indústria transformadora europeia, sendo a fileira da madeira um dos setores com maior potencial de descarbonização pela via da eficiência energética, substituição de vetores e valorização de resíduos. Neste contexto, importa dotar as empresas do setor de ferramentas práticas e objetivas que permitam avaliar o retorno económico de investimentos em tecnologias de baixo carbono, minimizando riscos e acelerando a tomada de decisão.

A presente secção visa apoiar esse processo, **apresentando uma análise custo-benefício puramente financeira de um conjunto selecionado de tecnologias com aplicação relevante no setor, com base em pressupostos técnicos padronizados e valores de mercado atualizados.** O objetivo é facultar às empresas uma grelha comparativa clara que lhes permita:

- Identificar medidas com payback atrativo;
- Priorizar investimentos de descarbonização com impacto relevante;
- Apoiar decisões estratégicas e/ou processos de candidatura a incentivos públicos (PRR, PT2030, IFIC, entre outros).

As tecnologias analisadas abrangem soluções térmicas e elétricas, com foco na substituição de equipamentos ineficientes por alternativas mais sustentáveis e economicamente viáveis. Esta análise não substitui um estudo técnico detalhado, mas fornece um ponto de partida sólido para uma avaliação preliminar do potencial de retorno dos investimentos.

_Metodologias

A presente análise segue uma abordagem financeira simplificada e pragmática, com o objetivo de comparar diferentes tecnologias de descarbonização com base em indicadores económicos comparáveis. O foco incide sobre o retorno económico direto associado à sua adoção, sem consideração de externalidades ambientais ou critérios técnicos (como maturidade tecnológica, TRL ou viabilidade operacional).

Os valores de CAPEX, OPEX e preços da energia utilizados nesta análise correspondem a médias de mercado e projeções disponíveis à data, não refletindo potenciais alterações nas políticas energéticas, fiscais ou ambientais que possam ocorrer nos próximos anos.

Critérios de Avaliação Financeira

Para cada tecnologia, foram estimados os seguintes parâmetros financeiros:

Indicador	Descrição
CAPEX (Capital Expenditure)	Investimento inicial necessário para aquisição e instalação da tecnologia (€/kW), com base no relatório do INEGI
OPEX (Operational Expenditure)	Custos anuais associados à operação e manutenção (€/kW)
Poupança Anual Estimada	Redução de custos operacionais com energia (€/ano), resultante da maior eficiência energética ou substituição de vetores energéticos mais caros
Vida Útil da Tecnologia	Duração estimada da tecnologia, em anos, com base em dados de mercado e no relatório INEGI
Payback Simples (anos)	Tempo necessário para recuperar o investimento inicial através da poupança anual gerada ($\text{Payback} = \text{CAPEX} / \text{Poupança Anual}$)

Pressupostos Gerais Utilizados

Para garantir consistência e comparabilidade entre tecnologias, foram adotados os seguintes pressupostos técnicos e financeiros base:

Pressuposto	Valor / Consideração
Preço da eletricidade em 2023	0,12 €/kWh
Preço do gás natural em 2023	0,06 €/kWh
Preço da biomassa em 2023	0,03 €/kWh
Duração diária de utilização média	8 horas/dia (5 dias/semana), salvo indicação em contrário
Vida útil média das tecnologias	Entre 10 e 25 anos, conforme tipologia
Escala de referência	Instalações industriais típicas do setor da madeira (pequeno/médio porte)

Os valores de CAPEX utilizados constam na tabela em anexo (Anexo II) e, quando necessário, ajustados com base em valores de mercado e benchmarks europeus. Os custos operacionais e poupanças foram estimados com base na substituição direta de fontes energéticas convencionais (ex: substituição de caldeiras a gás por bombas de calor, ou de energia da rede por produção fotovoltaica). Relativamente ao preço da eletricidade e do gás natural, para projeções ao longo do tempo, não foram consideradas oscilações resultantes da alteração do contexto político português.

No caso específico da biomassa, foi considerado um custo genérico de mercado (0,03 €/kWh), que poderá não refletir a realidade de muitas empresas do setor da madeira, cuja atividade gera resíduos valorizáveis internamente. Nestes casos, o custo marginal da biomassa poderá ser substancialmente inferior, tornando os investimentos em substituição de vetores fósseis por biomassa ainda mais atrativos.

Limitações da Análise

A análise considera cenários médios e indicativos. Os valores reais podem variar significativamente conforme:

- Dimensão da empresa;
- Estado atual do equipamento a substituir;
- Custos de instalação específicos;
- Perfis horários e sazonais de consumo energético.

Esta abordagem não contempla critérios ambientais, técnicos ou estratégicos, nem considera os potenciais incentivos públicos que podem alterar significativamente a viabilidade financeira dos investimentos.

Todos os cálculos foram realizados por unidade de potência instalada (€/kW) ou por unidade de energia útil (€/kWh útil), de forma a permitir comparações consistentes entre diferentes tecnologias. Para efeitos desta análise, não foi considerada qualquer atualização monetária (ex: taxa de desconto, inflação), nem custos indiretos (ex: formação, licenciamento, paragens de produção), mantendo o foco numa lógica de payback simples e direto.

Esta análise tem natureza preliminar e não substitui a realização de um diagnóstico técnico-económico detalhado em contexto real de cada empresa. A sua principal utilidade reside na comparação entre soluções e na identificação de investimentos com maior potencial de retorno e impacto ambiental.

Tecnologias analisadas

As tecnologias selecionadas foram avaliadas com base na sua aplicabilidade à realidade da fileira da madeira, tendo sido considerados os seguintes critérios:

- Relevância para os consumos energéticos típicos do setor (térmicos e elétricos);
- Potencial de redução de emissões e/ou melhoria da eficiência energética;
- Maturidade tecnológica (TRL ≥ 7);
- Disponibilidade de dados técnicos e económicos fiáveis.

PV / UPAC – Sistema Fotovoltaico para Autoconsumo

Instalação de painéis fotovoltaicos com Unidade de Produção para Autoconsumo (UPAC), com ou sem injeção de excedente na rede. Esta solução permite reduzir os custos com eletricidade através da produção local de energia limpa, sendo especialmente vantajosa para empresas com consumo contínuo durante o dia.

Fórmulas de cálculo (por kW instalado):

- Poupança anual (€) = Produção (kWh/kW·ano) $\times$ (Autoconsumo $\times$ Preço eletricidade + (1–Autoconsumo) $\times$ Preço venda excedentes) – O&M² (€/kW·ano).
- Payback (anos) = CAPEX (€/kW) $\div$ Poupança anual (€).

² **Operação e Manutenção:** na ACB financeira é o custo recorrente para manter o sistema a funcionar, excluindo o custo da energia. Normalmente inclui mão-de-obra e visitas técnicas, consumíveis (filtros, lubrificantes, reagentes), inspeções, calibrações e ensaios, peças/pequenas substituições e contratos de manutenção, monitorização/telemetria e, por vezes, seguros.

Parâmetros de referência:

Parâmetro	Valor Assumido
Produção anual	1.500 kWh/kW·ano
Preço da eletricidade evitada	0,12 €/kWh
Preço da venda de excedentes	0,00 €/kWh
CAPEX de referência (2023)	645 €/kW
O&M de referência (2023)	15 €/kW·ano

Autoconsumo	Poupança (€/kW·ano)	Payback (anos)
50%	75,00	8,6
70%	111,00	5,8
90%	147,00	4,4

A instalação de sistemas fotovoltaicos apresenta um retorno financeiro atrativo, especialmente em instalações com elevados níveis de autoconsumo (superiores a 70%). Mesmo sem considerar a venda de excedentes, o payback pode ser inferior a 5 anos. A longo prazo (vida útil > 20 anos), esta tecnologia representa uma oportunidade de redução de custos operacionais e maior independência energética. Nota: Para manter a atualidade da análise, recomenda-se substituir o valor de CAPEX de 2023 (645 €/kW) pelo correspondente ao ano mais recente disponível (consultar tabela de custos do relatório INEGI).

Bombas de calor

As bombas de calor são equipamentos que utilizam energia elétrica para produzir calor de forma altamente eficiente, com aplicação em processos de secagem, aquecimento de água ou substituição de caldeiras convencionais. A sua viabilidade financeira depende da temperatura exigida no processo e do vetor energético substituído (tipicamente gás natural ou biomassa).

O que distingue as bombas de calor de baixa, média e alta temperatura?

- Temperatura de saída (faixa de uso): baixa temperatura (BT) ~30–60 °C (climatização, pré-aquecimentos); média temperatura (MT) ~60–90 °C (AQS/processo, secagem média); alta temperatura (AT) ~90–130 °C (processos exigentes, substituição parcial de vapor).
- COP esperado: quanto maior a temperatura de saída (ou menor a temperatura da fonte), maior o “salto térmico” e menor o COP.
- CAPEX por kW: normalmente sobe com a temperatura de saída (na tabela: BT 694, MT 773, AT 869 €/kW).
- Potência elétrica necessária: por kW térmico $\approx 1/\text{COP}$ → com COP mais baixo (AT) são necessários mais kW elétricos (impacta contrato de potência/tarifas).
- Cobertura da carga: BT pode não cobrir picos a alta temperatura (necessário % de carga coberta e/ou apoio com caldeira).
- Integração/obra: emissor/permuta, possíveis buffers/circuitos diferentes, e fonte térmica (ar/água/calor residual) — isto altera horas efetivas e COP real.
- O&M/complexidade: alta temperatura tende a ser mais exigente (refrigerantes/estágios/cascata), podendo ter O&M e riscos operacionais ligeiramente maiores.
- Sazonalidade/degelo (se ar-fonte): COP piora no frio e pode haver ciclos de descongelamento.

O que é o COP = Coeficiente de Desempenho (de bombas de calor)?

É a relação entre o calor útil produzido e a eletricidade consumida:

- COP 3 → com 1 kWh elétrico a bomba de calor entrega 3 kWh de calor.
- Quanto maior o COP, melhor (mais calor por cada kWh pago).

Regra rápida para custos:

- Custo do calor (€/kWh_{th}) $\approx$ preço da eletricidade (€/kWh) $\div$ COP.

Ex.: eletricidade 0,15 €/kWh e COP 3 → 0,05 €/kWh_{th} .

Valores típicos (indicativos):

- Baixa T (30–60 °C): COP $\sim$ 3,2–4,0
- Média T (60–90 °C): COP $\sim$ 2,7–3,3
- Alta T (90–130 °C): COP $\sim$ 2,2–2,8

O COP desce quando a temperatura de saída é mais alta ou a fonte está mais fria; sobe com boas condições de operação e bom dimensionamento.

Fórmulas de cálculo (por kW instalado):

- Custo base (€/kWh útil) = Preço combustível base $\div$ Eficiência base.
- Custo novo (€/kWh útil) = Preço eletricidade $\div$ COP.
- Poupança unitária (€/kWh útil) = Custo base – Custo novo.
- Poupança anual ($\text{€/kW}\cdot\text{ano}$) = Poupança unitária $\times$ Horas equivalentes de plena carga ($\text{kWh/kW}\cdot\text{ano}$).
- Payback (anos) = CAPEX (€/kW) $\div$ Poupança anual (€).

As análises financeiras das bombas de calor apresentadas neste relatório foram realizadas com base numa comparação direta com a solução convencional atualmente mais utilizada para produção de calor nos setores industriais: a caldeira a gás natural com uma eficiência média de 92%.

Assim, a poupança anual considerada resulta da diferença entre o custo do calor útil produzido pela bomba de calor (calculado como o preço da eletricidade dividido pelo COP da tecnologia) e o custo do calor útil gerado pela caldeira de referência (obtido dividindo o preço do gás natural pela sua eficiência térmica). Esta abordagem permite avaliar de forma objetiva o retorno do investimento nas bombas de calor, assumindo que estas substituem integralmente a função de aquecimento anteriormente assegurada por caldeiras a GN. É importante notar que, caso o sistema de origem utilize outro vetor energético (ex: biomassa, gásóleo, eletricidade direta), os resultados financeiros deverão ser ajustados em conformidade.

Nota: Estes valores consideram apenas custo de energia (sem diferença de O&M). Se houver O&M adicional na bomba de calor ou poupança de O&M face à caldeira, ajusta-se:

Poupança líquida anual (€) = Poupança energia – Δ O&M → entra no denominador do payback

Bomba de Calor de Baixa Temperatura

Parâmetros de referência:

- Preço eletricidade = 0.12 €/kWh;
- Preço Gás Natural (GN) = 0.06 €/kWh;
- Eficiência base (caldeira GN) = 92%;
- COP = 3.5.
- CAPEX em 2023 = 694 €/kW

Horas/ano (FLH)	Poupança unitária (€/kWh útil)	Poupança anual (€/kW·ano)	Payback (anos)
2.000	0,03093	61,86	11,2
3.500	0,03093	108,26	6,4
5.000	0,03093	154,66	4,5

Bomba de Calor de Média Temperatura

Parâmetros de referência:

- Preço eletricidade = 0.12 €/kWh;
- Preço GN = 0.06 €/kWh;
- Eficiência base (caldeira GN) = 92%;
- COP = 3.0.
- CAPEX em 2023 = 773 €/kW

Horas/ano (FLH)	Poupança unitária (€/kWh útil)	Poupança anual (€/kW·ano)	Payback (anos)
2.000	0,02522	50,43	15,3
3.500	0,02522	88,26	8,8
5.000	0,02522	126,09	6,1

Bomba de Calor de Alta Temperatura

Parâmetros de referência:

- Preço eletricidade = 0.15 €/kWh;
- Preço GN = 0.06 €/kWh;
- Eficiência base (caldeira GN) = 92%;
- COP = 2.5.
- CAPEX em 2023 = 869 €/kW

Horas/ano (FLH)	Poupança unitária (€/kWh útil)	Poupança anual (€/kW·ano)	Payback (anos)
2.000	0,01722	34,43	25,2
3.500	0,01722	60,26	14,4
5.000	0,01722	86,09	10,1

Conclusões

As bombas de calor de baixa e média temperatura revelam-se soluções com retorno financeiro razoável, sobretudo em processos onde a substituição direta de caldeiras a gás natural é possível.

As bombas de alta temperatura implicam investimentos mais elevados, com um payback superior a 10 anos, sendo mais indicadas para contextos onde existam apoios públicos ou necessidades térmicas específicas que inviabilizem outras opções.

Nota: Substituir GN por biomassa nos preços/eficiências, se a base for biomassa.

Cogeração (Produção Simultânea de Eletricidade e Calor)

A cogeração permite a produção simultânea de eletricidade e calor útil a partir de um único combustível (tipicamente gás natural), com rendimentos globais superiores a sistemas convencionais. Esta solução é particularmente eficaz em instalações com consumo simultâneo e significativo de eletricidade e energia térmica (ex: secagem, aquecimento de água, etc.).

Pressupostos de cálculo

Parâmetro	Valor
Preço da eletricidade da rede	0,12 €/kWh
Preço do gás natural	0,06 €/kWh
Preço da biomassa	0,03 €/kWh
Preço do hidrogénio (2030)	0,10 €/kWh
Rendimento elétrico	35%
Rendimento térmico	50%
Eficiência da caldeira substituída (GN)	92%
Horas anuais de operação	5.000 h

Tecnologia	2023 (€/kW)	2030 (€/kW)	2040 (€/kW)	2050 (€/kW)
Cogeração (gás natural)	938	938	938	938
Cogeração (biomassa)	3.162	2.990	2.750	2.540
Cogeração (hidrogénio)	3.792	3.586	3.298	3.046

Cogeração – Gás Natural

Ano	CAPEX (€/kW)	Preço combustível (€/kWh)	Poupança anual (€/kW·ano)	Payback (anos)
2023	938,0	0,06	178,7	5,2
2025	938,0	0,06	178,7	5,2
2030	938,0	0,04	309,13	3,0
2040	938,0	0,03	374,35	2,5
2050	938,0	0,02	439,57	2,1

Cogeração – Biomassa

Ano	CAPEX (€/kW)	Preço combustível (€/kWh)	Poupança anual (€/kW·ano)	Payback (anos)
2023	3162,0	0,03	374,35	8,4
2030	2990,0	0,03	374,35	8,0
2040	2750,0	0,03	374,35	7,3
2050	2540,0	0,03	374,35	6,8

Cogeração – Hidrogenio

Ano	CAPEX (€/kW)	Preço combustível (€/kWh)	Poupança anual (€/kW·ano)	Payback (anos)
2023	3792,0	–	–	–
2030	3586,0	0,1	-82,17	Não viável
2040	3298	0,06	178,7	18,5
2050	3046	0,04	309,13	9,9

A análise revela que a cogeração a gás natural é atualmente a tecnologia com melhor relação custo-benefício, apresentando um payback inferior a 3 anos a partir de 2030, beneficiando da redução projetada do custo do gás.

A cogeração a biomassa, embora com um investimento inicial mais elevado, revela uma poupança sólida e constante, com payback a descer abaixo dos 7 anos até 2050. Por outro lado, a cogeração com hidrogénio só se torna viável a partir de 2035, exigindo custos significativamente mais baixos deste vetor. A escolha da tecnologia deve considerar não apenas o payback, mas também os objetivos de descarbonização, acesso a apoios públicos, e perfil de consumo térmico e elétrico de cada unidade industrial.

Substituição de Caldeira – GN → Biomassa

A substituição de caldeiras a gás natural por caldeiras de vapor a biomassa surge como uma das estratégias mais promissoras para a descarbonização do setor industrial, especialmente em unidades com elevado consumo térmico contínuo. Esta medida permite não só reduzir significativamente as emissões de gases com efeito de estufa, como também beneficiar de menores custos operacionais, dado o menor preço da biomassa face ao gás natural.

Pressupostos utilizados

Parâmetro	Valor
CAPEX (caldeira a biomassa – 2023)	363 €/kW
Preço GN (vetor substituído)	0,06 €/kWh
Eficiência caldeira GN	92%
Preço Biomassa	0,03 €/kWh
Eficiência caldeira biomassa (estimada)	85%

Nota: se houver **ΔO&M** adicional na biomassa (limpezas/manuseamento), é necessário subtrair à “Poupança anual” antes de calcular o payback.

Horas/ano (FLH)	Poupança unitária (€/kWh útil)	Poupança anual (€/kW·ano)	Payback (anos)
2.000	0,02992	59,85	6,07
3.500	0,02992	104,73	3,47
5.000	0,02992	149,62	2,43

A caldeira a biomassa revela um potencial de poupança significativo, com payback abaixo de 4 anos para utilizações superiores a 3.500 horas/ano. Trata-se de uma opção financeiramente competitiva para empresas com grande consumo térmico contínuo.

Substituição de Caldeira – GN → Elétrica

Pressupostos utilizados

Parâmetro	Valor
Preço da eletricidade	0,12 €/kWh
Preço do gás natural	0,06 €/kWh
Eficiência caldeira GN (referência)	92%
Eficiência caldeira elétrica	100%
CAPEX caldeira elétrica (2023)	206,00 €/kW

Horas/ano (FLH)	Poupança unitária (€/kWh útil)	Poupança anual (€/kW·ano)	Payback (anos)
2.000	-0,05478	-109,57 €	Não viável
3.500	-0,05478	-191,74 €	Não viável
5.000	-0,05478	-273,91 €	Não viável

A substituição direta de uma caldeira a gás natural por uma caldeira elétrica não apresenta viabilidade financeira nas condições de preço atuais. O custo do calor útil da eletricidade é substancialmente superior ao do gás natural, resultando numa poupança negativa e, consequentemente, num payback inviável. Esta tecnologia só se tornará economicamente interessante em cenários de eletricidade muito mais barata ou com incentivos públicos substanciais.

Substituição de Queimador GN → Biomassa

A substituição de queimadores a gás natural por queimadores alimentados a biomassa surge como uma das medidas com maior impacto na redução de emissões e custos energéticos em processos térmicos industriais. A biomassa, sendo uma fonte renovável de baixo custo, permite uma poupança significativa face ao gás natural, especialmente em contextos de elevada utilização anual. Embora a eficiência dos queimadores a biomassa seja, em geral, inferior à dos queimadores a gás natural, o diferencial de preço do combustível tende a compensar largamente essa diferença.

Parâmetro	Valor
Preço do gás natural	0,06 €/kWh
Preço da biomassa	0,03 €/kWh
Eficiência queimador GN	92%
Eficiência queimador biomassa	80%
CAPEX queimador de biomassa (2023)	220,0 €/kW

Resultados financeiros por kW instalado

Horas/ano (FLH)	Poupança unitária (€/kWh útil)	Poupança anual (€/kW·ano)	Payback (anos)
2.000	0,02772	55,43	4,0
3.500	0,02772	97,01	2,3
5.000	0,02772	138,59	1,6

Motores – Upgrade IE2 → IE3/IE4

A substituição de motores elétricos de eficiência padrão (IE2) por motores de elevada eficiência (IE3 ou IE4) representa uma das medidas mais diretas e eficazes para reduzir o consumo energético em sistemas de bombagem, ventilação e acionamento mecânico contínuo. Dado que os motores elétricos representam uma fatia significativa do consumo industrial de eletricidade, pequenas melhorias no rendimento traduzem-se em poupanças consideráveis ao longo do tempo.

A tabela seguinte apresenta os valores típicos de rendimento para motores de 15 kW a 4 polos, em função da classe de eficiência:

Classe de eficiência	Rendimento típico (%)	Perdas (%)
IE2 (padrão)	91,0	9,0
IE3 (alta eficiência)	93,0	7,0
IE4 (premium)	95,0	5,0

Nota: os valores acima variam ligeiramente com a potência nominal, velocidade e fabricante, mas são representativos do intervalo médio do mercado.

O ganho de eficiência traduz-se numa redução proporcional do consumo energético para o mesmo trabalho mecânico realizado. Na prática:

- A substituição IE2 → IE3 permite uma redução de consumo de cerca de 2 a 3%;
- A substituição IE2 → IE4 permite poupanças na ordem dos 4 a 6%.

Diferenças entre IE2, IE3 e IE4

São classes de eficiência definidas pela IEC 60034-30-1 (50/60 Hz, motores assíncronos 2/4/6 polos, etc.).

Quanto maior o “IE”, menores perdas do motor (mais eficiente).

- **IE2** – “High efficiency” (antigo patamar mínimo em muitos países)
- **IE3** – “Premium efficiency” (hoje o mais comum como requisito mínimo)
- **IE4** – “Super premium efficiency” (perdas ainda menores; algumas tecnologias usam design otimizado, *synchronous reluctance* ou ímanes permanentes)

Fórmulas de cálculo (por kW instalado):

- Consumo IE2 (kWh/kWh útil) = $1 \div \text{Eficiência IE2}$
- Consumo IE3 (kWh/kWh útil) = $1 \div \text{Eficiência IE3}$
- Poupança unitária (€/kWh útil) = (Consumo IE2 – Consumo IE3) × Preço eletricidade
- Poupança anual (€/kW·ano) = Poupança unitária × Horas de operação
- Payback (anos) = Diferença de CAPEX ÷ Poupança anual

Nota: o payback deve comparar investimento incremental vs poupança incremental. Se a Empresa vai comprar IE2 de qualquer maneira, o custo “base” existe na alternativa. O que muda é só o custo extra para IE3/IE4.

Substituição de Motores IE2 → IE3

Parâmetros de referência

Parâmetro	Valor
Eficiência motor IE2	84%
Eficiência motor IE3	88%
Preço da eletricidade	0,12 €/kWh
CAPEX motor IE2	77 €/kW
CAPEX motor IE3	92 €/kW
Investimento adicional (IE3)	15 €/kW

Resultados financeiros por kW instalado

Horas/ano (FLH)	Poupança unitária (€/kWh útil)	Poupança anual (€/kW·ano)	Payback (anos)
4.000	0,01099	43,96	2,1
5.000	0,01099	54,95	1,7
6.000	0,01099	65,93	1,4

Substituição de Motores IE2 → IE4

Parâmetros de referência

Parâmetro	Valor
Eficiência motor IE2	84%
Eficiência motor IE4	91%
Preço da eletricidade	0,12 €/kWh
CAPEX motor IE2	77 €/kW
CAPEX motor IE4	169 €/kW
Investimento adicional (IE4)	92 €/kW

Resultados financeiros por kW instalado

Horas/ano (FLH)	Poupança unitária (€/kWh útil)	Poupança anual (€/kW·ano)	Payback (anos)
4.000	0,02126	85,05	2,0
5.000	0,02126	106,31	1,6
6.000	0,02126	127,58	1,3

Conclusão

A substituição de motores IE2 por modelos IE3 ou IE4 constitui uma medida com retorno rápido, principalmente em ambientes industriais com elevada utilização anual. O motor IE4, embora mais dispendioso, permite ganhos energéticos mais expressivos e pode ser especialmente vantajoso em setores com operação contínua.

A análise custo-benefício realizada evidencia que a fileira da madeira dispõe de um conjunto diversificado de soluções tecnológicas para avançar no processo de descarbonização, com níveis de atratividade financeira distintos consoante a tipologia do investimento e o perfil energético de cada empresa.

De forma geral, destaca-se que:

- Top 3 com melhor payback:
 - Substituição de queimadores GN → biomassa (1,6–4 anos),
 - Substituição de caldeiras GN → biomassa (2,4–6 anos),
 - Motores IE2 → IE4 (1,3–2 anos).
 Estas medidas apresentam retornos rápidos, baixo risco e elevada aplicabilidade, devendo ser consideradas prioritárias para empresas com consumo energético relevante.
- Tecnologias de médio prazo, como os sistemas fotovoltaicos para autoconsumo (PV/UPAC) e as bombas de calor de baixa e média temperatura, revelam-se competitivas em cenários de utilização intensiva, com paybacks entre 4 e 9 anos. Representam soluções equilibradas entre viabilidade financeira e impacto ambiental, especialmente quando combinadas com incentivos públicos.
- Tecnologias dependentes de apoios, nomeadamente as bombas de calor de alta temperatura e a cogeração a biomassa ou hidrogénio, apresentam atualmente um retorno mais alargado. A sua adoção será mais viável em contextos específicos, ou quando suportada por programas de financiamento que reduzam o esforço de CAPEX inicial.
- A substituição direta de caldeiras GN por caldeiras elétricas não se mostra financeiramente viável no cenário atual de preços da energia, gerando custos acrescidos e payback negativo. A sua atratividade dependerá de fortes reduções no preço da eletricidade ou da implementação de mecanismos de apoio robustos.

Em síntese, a estratégia de descarbonização para o setor deve privilegiar, no curto prazo, as medidas com retorno rápido e robusto (biomassa e eficiência de motores), combinadas com investimentos estruturais de médio prazo (PV e bombas de calor BT/MT). As tecnologias mais dependentes de apoios, embora menos competitivas hoje, deverão ser monitorizadas, pois poderão ganhar relevância à medida que os custos de capital diminuam e a regulação favoreça vetores de baixo carbono.

Esta análise constitui assim um guia preliminar de priorização, devendo ser complementada com diagnósticos técnico-económicos em contexto real de cada empresa, e articulada com os instrumentos de financiamento disponíveis (PRR, PT2030, IFIC), que podem reduzir substancialmente os períodos de retorno e acelerar a adoção destas soluções.

Anexos

Tabela de custos dos vetores energéticos

Vetor energético	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Biometano	–	–	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05
Elettricidade	0,12	0,15	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11
Hidrogénio	–	–	0,10	0,08	0,06	0,05	0,04
Diesel	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14	0,16	0,16
Gás natural	0,06	0,06	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02
Biomassa	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03

Tabela de custos das tecnologias

Tecnologias	Custos (€/kW)			
	2025	2030	2040	2050
Captura de carbono	790	840	700	500
Bombas de calor de baixa temperatura	694	650	600	580
Bombas de calor de media temperatura	773	778	730	700
Bombas de calor de alta temperatura	869	934	876	840
Coletor solar de placa plana	431	382	299	235
Coletor solar de tubos de vácuo	994	785	602	473
Coletor solar concentrador solar	996	856	672	527
Cogeração (gás natural)	938	938	938	938
Cogeração (biomassa)	3162	2990	2750	2540
Cogeração (hidrogénio)	3792	3586	3298	3046
Gaseificação	1456	1400	1300	1200
Caldeira de vapor (gás natural)	51	45	45	45
Caldeira de vapor (Elétrica)	200	186	186	186
Caldeira de vapor (hidrogénio)	200	167	117	82
Caldeira de vapor (biomassa)	363	354	338	321
Caldeira de termofluido (gás natural)	46	36	23	21
Caldeira de termofluido (Elétrica)	186	186	152	124
Caldeira de termofluido (hidrogénio)	200	167	117	82
Caldeira de termofluido (biomassa)	363	354	338	321
Queimador (gás natural)	15	15	15	15
Queimador (hidrogénio)	69	76	62	51
Queimador (biomassa)	220	220	220	220
Resistência elétricas	60	60	60	60
Ar comprimido	6	7	6	5
Iluminação	1	1	1	1
Motores elétricos (IE2)	77	73	61	50
Motores elétricos (IE3)	92	88	73	60
Motores elétricos (IE4)	169	161	134	110
Transporte (empilhadores: gasóleo)	350	350	350	350
Transporte (empilhadores: elétricos)	1050	1100	1000	900
Transporte (empilhadores: hidrogénio)	-	-	1400	1350
PV_UPAC	1157	895	536	321
Armazenamento térmico	152	137	130	125
Armazenamento elétrico	0,5	0,4	0,3	0,3

BIBLIOGRAFIA

- ADAJUSA. (n.d.). Retrieved July 31, 2025, from <https://adajusa.es/en/177-three-phase-electric-motors-230-400v-and-400-690v-ie1-ie2-and-ie3?q=Energy%20efficiency-IE2&page=3>
- Adi Wicaksono, P., & Ahmad Kadafi, C. (2020). The Improvement of Production Process Impact in Furniture Industry Toward Circular Economy. *E3S Web of Conferences ICENIS 2020*, 202. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020207052>
- Advanced systems. (n.d.). Retrieved July 31, 2025, from <https://asb-drives.eu/equipment/price.php?section=150>
- água&ambienteonline. (n.d.). *Fundo Ambiental aprova 17 projetos para gases renováveis, com destaque para o biometano*. Retrieved July 31, 2025, from <https://www.ambienteonline.pt/noticias/fundo-ambiental-aprova-17-projetos-para-gases-renovaveis-com-destaque-para-o-biometano>
- AIMMP. (2023). *INFORMAÇÃO SOBRE O COMÉRCIO INTERNACIONAL DA INDÚSTRIA DA MADEIRA E MOBILIÁRIO EM PORTUGAL* Fonte: INE. https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_destaques&DESTAQUESdest_boui=593889071&DESTAQUESmodo=2
- AIMMP. (n.d.-a). *COMPETITIVIDADE NAS INDÚSTRIAS DA FILEIRA DE MADEIRA*.
- AIMMP. (n.d.-b). *Exportações de madeira e mobiliário batem máximo histórico em 2022*. <https://Aimmp.Pt/Exportacoes-de-Madeira-e-Mobiliario-Batem-Maximo-Historico-Em-2022/>.
- AIMMP, Associação das Indústrias de Madeira e Mobiliário de Portugal. 2006. "Manual Tecnológico - Fileira da Madeira". Porto.
- AIMMP. (2006a). *Manual Tecnológico - Fileira da Madeira*.
- AIMMP. (2010a). *Equipamentos e Tecnologias para a Indústria de Serração | Vol. 1 - Processo de seleção e aquisição*.
- AIMMP. (2010b). *Equipamentos e Tecnologias para a Indústria de Serração | Vol. 2 - Fornecedores de Equipamentos*.
- AIMMP. (2010c). *Estado de Arte da Inovação na Indústria de Madeira e Mobiliário*.
- AIMMP. (2022). *Trends & Needs 2030 Como deve a fileira nacional da madeira e do mobiliário preparar-se para integrar a CASA DO FUTURO*.
- AIMMP, A. das I. de M. e M. de P. (2006b). *Manual Tecnológico - Fileira da Madeira*.
- AIMMP, A. das I. de M. e M. de P. (2010d). *Equipamentos e tecnologias para a indústria de serração - Vol.I*.
- AIMMP, A. das I. de M. e M. de P. (2010e). *Estado de Arte da Inovação na Indústria de Madeira e Mobiliário*.

- AIMMP, A. das I. de M. e M. de P. (2015). *A Riqueza das Madeiras Portuguesas - Guia de Utilização e Produtos*.
- APA. (2019). *ROTEIRO PARA A NEUTRALIDADE CARBÓNICA 2050 (RNC2050) ESTRATÉGIA DE LONGO PRAZO PARA A NEUTRALIDADE CARBÓNICA DA ECONOMIA PORTUGUESA EM 2050 PT Ambiente*.
- APA. (2024a). Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC). <https://Apambiente.Pt/Clima/Plano-Nacional-de-Energia-e-Clima-Pnec>.
- APA. (2024b). Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC). <https://Apambiente.Pt/Clima/Plano-Nacional-de-Energia-e-Clima-Pnec>.
- APFEC. (2018). *Mercados florestais*.
- Beims, R. F., Rizkalla, A., Kermanshahi-Pour B, A., & Xu, C. (2023). Reengineering wood into a high-strength, and lightweight bio-composite material for structural applications. *Chemical Engineering Journal*, 454, 139896. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139896>
- Bie, Y., Li, Z., Lei, J., Ma, Z., Li, M., Królczyk, G., & Li, W. (2020). Solar medium-low temperature thermal utilization and effect analysis of boundary condition: A tutorial. *Solar Energy*, 197, 238–253. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.016>
- Boiger, T., Mair-Bauernfeind, C., Asada, R., & Stern, T. (2024). Shifting wood between material and energy use: Modeling the effects of substitution. *Journal of Industrial Ecology*. <https://doi.org/10.1111/jiec.13530>
- Brownell, H., Iliev, B. E., & Bentsen, N. S. (2023). How much wood do we use and how do we use it? Estimating Danish wood flows, circularity, and cascading using national material flow accounts. *Journal of Cleaner Production*, 423. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138720>
- Calvano, S., Negro, F., Blanc, S., Bruzzese, S., Brun, F., & Zanuttini, R. (2025). Adding Value to Wood-Based Products: A Systematic Literature Review on Drivers. *Forests*, 16(4). <https://doi.org/10.3390/f16040590>
- Carbon Credit Markets. (n.d.). *Carbon Credit Markets*. Retrieved July 31, 2025, from <https://www.carboncreditmarkets.com/single-post/fitch-ratings-iniciativas-da-ue-e-pre%C3%A7o-do-carbono-us-200-t-at%C3%A9-2050>
- CEI-Bois, E. C. of W. I. (2024). *Advocacy report 2023-24*. https://www.cei-bois.org/_files/ugd/5b1bdc_1b8e3544902c49ab9a43198eef7e6b20.pdf
- CEI-Bois, E. C. of W. I., & EOS, E. O. of the S. I. (2019). *Wood – Building the Bioeconomy* (Mike Jeffree, Ed.).
- CEI-Bois, E. C. of W. I., & EOS, E. O. of the S. I. (2024a). *Biomanufacturing, the circular bioeconomy and the European woodworking and sawmill industries*.

- CEI-Bois, E. C. of W. I., & EOS, E. O. of the S. I. (2024b). *THE EUROPEAN WOODWORKING AND SAWMILL INDUSTRIES -MANIFESTO 2024-2029 political term*.
- CEIS-Bois, Belgian Woodforum, & Gunilla Beyer. (2011). *Tack le Climate Change : Use Wood*. <https://Europanel.Org/Wp-Content/Uploads/2018/09/Tackle-Climat-Change-EN.Pdf>.
- Centro PINUS, A. para a V. da F. de P. (2022, June 30). *Novos indicadores de consumo de madeira e reciclados*. Centro PINUS, Associação Para a Valorização Da Floresta de Pinho. <https://www.centropinus.org/news/novos-indicadores-de-consumo-de-madeira-e-reciclados>
- Centro PINUS, A. para a V. da F. de P. (2024). *A fileira do pinho em 2023 - Indicadores da fileira do pinho*. <https://www.centropinus.org/files/upload/indicadores/indicadores-2023-%281%29.pdf>
- Cheayb, M., Marin Gallego, M., Tazerout, M., & Poncet, S. (2022). A techno-economic analysis of small-scale trigenerative compressed air energy storage system. *Energy*, 239, 121842. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121842>
- Comissão Europeia. (n.d.-a). *EU rules against illegal logging*. https://Environment.Ec.Europa.Eu/Topics/Forests/Deforestation/Eu-Rules-against-Illegal-Logging_en.
- Comissão Europeia. (n.d.-b). *Forests*. https://Environment.Ec.Europa.Eu/Topics/Forests_en.
- Decreto-Lei n.o 411/98, de 30 de Dezembro, Diário da República n.o 300/1998, Série I-A de 1998-12-30 7251 (1998).
- Diário da República. (2011). Assegura a execução das obrigações decorrentes do Regulamento (CE) n.o 765/2008, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 9 de Julho, que estabelece os requisitos de acreditação e fiscalização do mercado relativos à comercialização de produtos - Artigo 5.o. <https://Diariodarepublica.Pt/Dr/Legislacao-Consolidada/Decreto-Lei/2011-157115289-157115220>.
- Direção Geral de Energia e Geologia. (n.d.). *Balanços Energéticos*. Retrieved July 31, 2025, from <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/balancos-energeticos/>
- Direção-Geral de Energia e Geologia - ISQ. (2016). *Medidas Transversais de Eficiência Energética para a Indústria*.
- EFI. (n.d.). *International Partnerships Facility*.
- EPAL, E. P. A. (2023). *EPAL 7 HALF PALLET - 800 x 600 mm*.
- EUROfusion. (2018). *European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy*.
- European Comission. (n.d.). *Energy Performance of Buildings Directive*. https://Energy.Ec.Europa.Eu/Topics/Energy-Efficiency/Energy-Performance-Buildings/Energy-Performance-Buildings-Directive_en.
- European commision. (n.d.). *Joint Research Centre Data Catalogue*. Industry. Retrieved July 31, 2025, from <https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset?collection=JRC-EU-TIMES>

European Union. (2008). Regulamento (CE) n. o 765/2008 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 9 Julho de 2008 , que estabelece os requisitos de acreditação e fiscalização do mercado relativos à comercialização de produtos, e que revoga o Regulamento (CEE) n. o 339/93 (Texto relevante para efeitos do EEE). <https://Eur-Lex.Europa.Eu/Legal-Content/PT/TXT/?Uri=CELEX:32008R0765>.

EXPONDO. (n.d.). Retrieved July 31, 2025, from <https://www.expondo.pt/search?query=Motores%20IE3%20trif%C3%A1sicos>

FAO, F. and A. O. of the U. N. (2022). Classification of forest products 2022. In Forestry Working Paper (Ed.), *Classification of forest products 2022* (Vol. 29). FAO. <https://doi.org/10.4060/cb8216en>

FAO, F. and A. O. of the U. N. (2024). *Global forest products facts and figures 2023*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cd3650en>

FEP, E. P. F. (2025a). *FEP Parquet Refinishable Program Program overview*.

FEP, E. P. F. (2025b). *Press Release FEP*. <https://www.parquet.net/p/press.html>

FEP, E. P. F. (2025c). *What is parquet ? FEP*. <https://www.parquet.net/p/what-is-parquet.html>

FEUP, F. de E. da U. do P. (2022). *ESTUDO SOBRE A DEFINIÇÃO DE TAXAS MÍNIMAS DE INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS RECICLADOS EM EMBALAGENS - Relatório Final*.

Floresta 2050 FUTURO+VERDE PLANO DE INTERVENÇÃO PARA A FLORESTA 2025-2050. (n.d.).

Fonseca, L., Silva, H., & Abrantes, I. (2023). Industrial assays to evaluate the efficacy of vacuum pressure impregnation with commercial wood preservatives to eliminate the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, and other nematodes from *Pinus pinaster* wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 81(5), 1147–1159. <https://doi.org/10.1007/s00107-023-01943-6>

FSC. (n.d.). *Dados e estatística* . <https://Pt.Fsc.Org/Pt-Pt/Sobre-a-Certificacao/Dados-e-Estatisticas>.

Gangsø, M. R. S., Lien, G., Mehmetoglu, M., Sjølie, H. K., & Størdal, S. (2025). Intentions of housing developers to reuse wood materials in buildings. *Journal of Industrial Ecology*. <https://doi.org/10.1111/jiec.13618>

GONTA, FREGUESIA DE PARADA DE GONTA. *Regulamento n.º 472/2022*.

Good Wood Project. (2020). *WOOD SECTOR, ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY AND SOCIAL DIALOGUE*. <https://goodwoodproject.eu/en/news-en.html>

IAPMEI. (2022). *Setor Madeira & Mobiliário – Classificação CAE, Estatísticas e Enquadramento Legal*.

ICNF. (n.d.-a). Plano de Ação FLEGT. <https://Www.Icnf.Pt/Florestas/Fileirasflorestais/Regimedelicenciamentoflegt>.

ICNF. (n.d.-b). Regime Florestal: O que é? <https://Www.Icnf.Pt/Florestas/Regimeflorestal/Regimeflorestaloquee>.

- ICNF. (2019). *Inventário Florestal Nacional*.
- INE, I. N. de E. I. P. (2007). *Classificação portuguesa das actividades económicas* (Rev.3, Trans.). Instituto Nacional de Estatística. https://www.ine.pt/ine_novidades/semin/cae/CAE_REV_3.pdf
- INEGI, I. de C. e I. em E. M. e E. I., & SerQ, C. de inovação e competências da floresta. (2024). *Projeto Decarbwood - Caracterização do setor* (Versão 1).
- INEGI, & SerQ. (2025). *CONTRIBUIÇÕES PARA O ROTEIRO DE DESCARBONIZAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DE MADEIRA – DECARBWOOD | Fase A- Relatório de encerramento e Análise de Inquéritos*.
- INETI. (2001). *PNAPRI PLANO NACIONAL DE PREVENÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS - VOLUME I*.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (n.d.). *Net Zero by 2050 - A roadmap for the global energy sector*.
- ISPM No. 15 - Regulation of Wood Packaging Material in International Trade (2019).
- James Wormald. (2023). 50 Projetos que mostram a ascensão da construção com madeira laminada cruzada. <https://www.archdaily.com.br/Br/996601/50-Projetos-Que-Mostram-a-Ascensao-Da-Construcao-Com-Madeira-Laminada-Cruzada>.
- Joana de Sales - Barato, Rápido e Sustentável: Portugueses Compram Cada Vez Mais Casas de Madeira. <https://www.nit.pt/fora-de-casa/na-cidade/barato-rapido-e-sustentavel-portugueses-compram-cada-vez-mais-casas-de-madeira> 2025.
- Jornal oficial da Comissão Europeia. (2023). *Parecer do Comité Económico e Social Europeu - Construção em madeira para reduzir as emissões de CO₂ no setor da construção (Parecer exploratório a pedido da Presidência sueca do Conselho)*. <https://www.iea.org/reports/buildings>
- Kans, M., & Löfving, M. (2024). Unlocking the circular potential: A review and research agenda for remanufacturing in the European wood products industry. *Heliyon*, 10(22). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40264>
- Kozowood Industries Construção Sustentável: A Revolução Das Casas Em Madeira Em Portugal.
- Kučerka, M., Očkajová, A., & Kminiak, R. (2024). Special Issue on Advances in Wood Processing Technology. *Applied Sciences* 2024, Vol. 14, Page 7863, 14(17), 7863. <https://doi.org/10.3390/APP14177863>
- Lima, A. T., Kirkelund, G. M., Lu, Z., Mao, R., Kunther, W., Rode, C., Slabik, S., Hafner, A., Sameer, H., Dürr, H. H., Flörke, M., Lowe, B. H., Aloini, D., Zerbino, P., & Simoes, S. G. (2024). Mapping circular economy practices for steel, cement, glass, brick, insulation, and wood – A review for climate mitigation modeling. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 202). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114697>
- Lusa. (2021a). *Matéria-prima é “problema forte” para indústria da madeira devido aos incêndios*. https://www.rtp.pt/noticias/economia/materia-prima-e-problema-forte-para-industria-da-madeira-devido-aos-incendios_n1324038.

- Lusa. (2021b). *Matéria-prima é “problema forte” para indústria da madeira devido aos incêndios*. https://www.rtp.pt/noticias/economia/materia-prima-e-problema-forte-para-industria-da-madeira-devido-aos-incendios_n1324038.
- Lusa. (2023a). *Exportações de madeira e mobiliário batem máximo histórico em 2022*. <https://www.jornaldenegocios.pt/empresas/detalhe/exportacoes-de-madeira-e-mobiliario-batem-maximo-historico-em-2022>.
- Lusa. (2023b). *Monocultura do eucalipto entre os maiores problemas ambientais na região de Aveiro*. <https://observador.pt/2023/01/12/monocultura-do-eucalipto-entre-os-maiores-problemas-ambientais-na-regiao-de-aveiro/>.
- Lusa. (2025). *Exportações de mobiliário caem 4% em 2024 mas superam 2 mil ME pelo 2.o ano consecutivo*. https://www.rtp.pt/noticias/economia/exportacoes-de-mobiliario-caem-4-em-2024-mas-superam-2-mil-me-pelo-2o-ano-consecutivo_n1639640.
- Ma, C., Gao, X., Zhang, L., & Kang, W. (2025). Optimizing Timber Supply Chains: Exploring the Potential of Digital Collaboration. *Sustainability (Switzerland)*, 17(1). <https://doi.org/10.3390/su17010015>
- Malinverno, N., Buschor, S., Vogel, K., Schwarze, F., Stadelmann, G., Thürig, E., Nowack, B., Nyström, G., & Som, C. (2024). Resolving complexity: Material flow analysis of a national wood flow system integrating the versatility of wood. *Journal of Industrial Ecology*. <https://doi.org/10.1111/jiec.13560>
- Marc Hanewinkel. (2012). Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nature Climate Change*.
- Mathias Mier. (n.d.). European Electricity Prices in Times of Multiple Crises. *Ifo WORKING PAPERS*.
- METALPLAN. (n.d.). *Compressor de velocidade variável reduz consumo de energia em até 35%*. Retrieved July 31, 2025, from <https://metalplan.com.br/blog/compressor-de-velocidade-variavel-reduz-consumo-de-energia-em-ate-35/>
- Ministério da Agricultura, do M. do A. e do O. do T. (2013). Decreto-Lei n.o 76/2013, de 5 de junho. <https://diariodarepublica.pt/Dr/Detalhe/Decreto-Lei/76-2013-513622>.
- Ministério da Agricultura e do Mar. (2015). Decreto-Lei n.o 123/2015, de 3 de julho. <https://diariodarepublica.pt/Dr/Detalhe/Decreto-Lei/123-2015-67664950>.
- Mo, J., Haviarova, E., & Kitek Kuzman, M. (2024). Wood-products value-chain mapping. *Wood Material Science and Engineering*, 19(4), 955–965. <https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2328787>
- Nuno Braga. (2025). *Indústria da madeira e mobiliário em Portugal cresce e participa no Dubai Wood Show 2025*. <https://jornaleconomico.sapo.pt/noticias/industria-da-madeira-e-mobiliario-em-portugal-cresce-e-participa-no-dubai-wood-show-2025/>.
- Optimus. (n.d.). Osemosys. <http://www.osemosys.org/>.

- Parobek, J., & Paluš, H. (2024). Wood-Based Waste Management -Important Resources for Construction of the Built Environment. In *Springer Tracts in Civil Engineering: Vol. Part F1844* (pp. 213–223). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45980-1_18
- Patrick Ferreira. (n.d.). *Desenvolvimento de um sistema de armazenamento de energia térmica com recurso a materiais de mudança de fase*.
- PDP. (2024). Sobre o passaporte digital de produto . <https://Pddp.Pt/Sobre-o-Passaporte-Digital-de-Produto/>.
- PEFC. (2013). *Regulamento Europeu da Madeira (EUTR)*. www.pefc.org
- PEFC. (2023a). *Construir o Futuro com Madeira Sustentável*. <https://Pefc.Pt/o-Que-Fazemos/o-Nosso-Impacto/Campanhas/Construir-o-Futuro-Com-Madeira-Sustentavel>.
- PEFC. (2023b). *Construir o Futuro com Madeira Sustentável*. <https://Pefc.Pt/o-Que-Fazemos/o-Nosso-Impacto/Campanhas/Construir-o-Futuro-Com-Madeira-Sustentavel?>
- PEFC. (2023c). *Relatório de atividade PEFC Portugal*.
- Pinhão, P. (2025). *Será que é este ano que a madeira ajuda a resolver a crise da habitação?* <https://Greensavers.Sapo.Pt/Sera-Que-e-Este-Ano-Que-a-Madeira-Ajuda-a-Resolver-a-Crise-Da-Habitacao/>.
- Presidência dos conselhos de ministros. (2020). Decreto-Lei n.º 31/2020, de 30 de junho. <https://Diariodarepublica.Pt/Dr/Detalhe/Decreto-Lei/31-2020-136900600>.
- pwc. (n.d.). *The green hydrogen economy*. Retrieved July 31, 2025, from <https://www.pwc.com/gx/en/industries/energy-utilities-resources/green-hydrogen-cost.html>
- Regulamento n.º 472/2022, Diário da República, 2.ª série PARTE H, N.º 95 356 (2022).
- REIMAN. (n.d.). Retrieved July 31, 2025, from <https://reiman.pt/pt/bct-three-phase-motor-ie4/>
- Reporter Linker. (n.d.). Portugal Wood Industry Outlook 2024 - 2028. <https://www.Reportlinker.Com/Clp/Country/6326/726376>.
- República Portuguesa. (2025). *Plano Floresta 2050: Compromisso para um Futuro mais Verde* . <https://www.Portugal.Gov.Pt/Pt/Gc24/Comunicacao/Noticia?l=plano-Floresta-2050-Um-Compromisso-Para-Um-Futuro-Mais-Verde>.
- Rowell, R. M. (2017). Stable and durable wood building materials based on molecular level chemical modification. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 5(6), 894–904. <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N6-894-904>
- Ruiz, P., Nijs, W., Tarvydas, D., Sgobbi, A., Zucker, A., Pilli, R., Jonsson, R., Camia, A., Thiel, C., Hoyer-Klick, C., Dalla Longa, F., Kober, T., Badger, J., Volker, P., Elbersen, B. S., Brosowski, A., & Thrän, D. (2019). ENSPRESO - an open, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar

- and biomass energy potentials. *Energy Strategy Reviews*, 26, 100379. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100379>
- Russell, J. D., Huff, K., & Haviarova, E. (2023). Evaluating the cascading-use of wood furniture: How value-retention processes can contribute to material efficiency and circularity. *Journal of Industrial Ecology*, 27(3), 856–867. <https://doi.org/10.1111/jiec.13284>
- Saritha, G. N. G., Anju, T., & Kumar, A. (2022). Nanotechnology - Big impact: How nanotechnology is changing the future of agriculture? *Journal of Agriculture and Food Research*, 10, 100457. <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2022.100457>
- Scholz, J., De Meyer, A., Marques, A. S., Pinho, T. M., Boaventura-Cunha, J., Van Orshoven, J., Rosset, C., Künzi, J., Kaarle, J., & Nummila, K. (2018). Digital Technologies for Forest Supply Chain Optimization: Existing Solutions and Future Trends. *Environmental Management*, 62(6), 1108–1133. <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1095-5>
- Selectra. (n.d.). *Tarifas de eletricidade e preço médio de uma fatura da luz | Julho 2025*. Retrieved July 31, 2025, from <https://selectra.pt/energia/precos/eletricidade>
- SGCIE, S. de G. dos C. I. de E. (2019). *CADERNOS SUBSETORIAIS - CAE 16101 - SERRAÇÃO DE MADEIRA*. <https://sgcie.pt/wp-content/uploads/2019/10/16101-SERRA%C3%87%C3%83O-Caderno.pdf>
- Sharma, H. I., & Thoudam, L. (2024). Wood-based furniture industry in Manipur, India: structure, employment intensity, technology and value chain. *Wood Material Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2430435>
- Sousa Diogo. (2024). Monocultura de Eucaliptos, Incêndios e Interesses Económicos. <https://www.noticiasdeaveiro.pt/Monocultura-de-Eucaliptos-Incendios-e-Interesses-Economicos/>
- Steinwender, A., Gallina, V., Litvyak, O., Lampoltshammer, T. J., Bachlechner, D., & Schlund, S. (2024). From Analogue to Digital Product Passports in the Furniture Industry. *IFAC-PapersOnLine*, 58(19), 229–234. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.09.175>
- Stream. (n.d.). *Produção e potencial do biometano*. Retrieved July 31, 2025, from <https://streamconsulting.pt/pt/noticia/produo-e-potencial-do-biometano#:~:text=Os%20custos%20atuais%20variam%20entre%2050%20EUR/MWh,utilizada%20e%20da%20escala%20da%20unidade%20industrial.&text=O%20biometano%20%C3%A9%20necess%C3%A1rio%20para%20complementar%20a,menos%20at%C3%A9%2030%20C%20os%20custos%20ser%C3%A3o%20elevados>
- Sugahara, E., Dias, A., Arroyo, F., Christoforo, A., Costa, M. L., Botelho, E. C., Dias, A. M. P. G., & Campos, C. (2022). Study of the Influence of Heat Treatment on OSB Panels Produced with Eucalyptus Wood in Different Layer Compositions. *Forests*, 1–18. <https://doi.org/10.3390/f13122083>

- Sulis, D. B., Jiang, X., Yang, C., Marques, B. M., Matthews, M. L., Miller, Z., Lan, K., Cofre-Vega, C., Liu, B., Sun, R., Sederoff, H., Bing, R. G., Sun, X., Williams, C. M., Jameel, H., Phillips, R., Chang, H. M., Peszlen, I., Huang, Y. Y., ... Wang, J. P. (2023). Multiplex CRISPR editing of wood for sustainable fiber production. *Science (New York, N.Y.)*, 381(6654), 216–221. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ADD4514>
- The Danish Energy Agency. (n.d.-a). *Analyses and statistics*. Retrieved July 31, 2025, from <https://ens.dk/en/analyses-and-statistics>
- The Danish Energy Agency. (n.d.-b). *Analyses and statistics*. Retrieved July 31, 2025, from <https://ens.dk/en/analyses-and-statistics>
- Toward customizable timber, grown in a lab | MIT News | Massachusetts Institute of Technology*. (n.d.). Retrieved August 2, 2025, from <https://news.mit.edu/2022/lab-timber-wood-0525>
- Universidade de Evora. (n.d.). *Solar TECH - Desenho de sistemas solar térmicos a média temperatura*.
- Vitor Poças. (2024). Indústria de madeira e mobiliário tem falta de mão de obra qualificada. <https://www.vidaeconomica.pt/Vida-Economica-1/Publicacoes/Edicao-Num-2015-Do-Vida-Economica-de-2022024/Mercados/Industria-de-Madeira-e-Mobiliario-Tem-Falta-de-Mao-de-Obra-Qualificada>.
- Zelinka, S. L., Altgen, M., Emmerich, L., Guigo, N., Keplinger, T., Kymäläinen, M., Thybring, E. E., & Thygesen, L. G. (2022). Review of Wood Modification and Wood Functionalization Technologies. *Forests* 2022, Vol. 13, Page 1004, 13(7), 1004. <https://doi.org/10.3390/F13071004>
- Zorzos, I., Konstantinidis, F. K., Arvanitakis, G., Tsimiklis, G., & Amditis, A. (2025). Wood-based sorting system for wood valorisation purposes. *Procedia Computer Science*, 253, 2337–2346. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.01.294>

Um setor descarbonizado é um setor mais competitivo.

Aceda aos relatórios
completos e resultados
em www.decarbwood.pt

