CARBON FREE GUIDE4METAL

Roteiros de Descarbonização da Indústria

METAL PORTUGAL

AIMMAP
ASSOCIAÇÃO DOS INDUSTRIAIS METALÚRGICOS, METALOMECÂNICOS E AFINS DE PORTUGAL

catim
centro de apoio tecnológico à indústria metalomecânica

Roteiro para a Descarbonização do METAL PORTUGAL



PRR
Plano de Recuperação e Resiliência

REPÚBLICA PORTUGUESA

Financiado pela União Europeia
NextGenerationEU

Ficha Técnica

Propriedade

METAL PORTUGAL®
DAMOS FORMA AO FUTURO

AIMMAP
ASSOCIAÇÃO DOS INDUSTRIAIS METALÚRGICOS, METALOMECÂNICOS E AFINS DE PORTUGAL

Ano
maio. 2025

Todos os direito reservados

INDICE

1. SUMÁRIO EXECUTIVO | 3

2. INTRODUÇÃO | 5

3. O SETOR METAL PORTUGAL | 7

3.1. AIMMAP | 7

3.2. Caracterização do Setor Metal | 9

3.2.1. Processos de fabrico – CAE's 25 e 282 | 11

3.2.2. Energia | 26

3.2.3. Matérias-primas | 30

3.2.4. Resíduos | 32

4. O ROTEIRO | 35

4.1. Enquadramento | 35

4.1.1. Sustentabilidade | 35

4.1.2. Descarbonização | 40

4.1.3. Economia Circular | 41

4.1.4. Roteiros: o que são e a sua importância | 44

4.2. Estrutura do Roteiro | 47

4.2.1. Quantificação das Emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE) | 47

4.2.2. Objetivos e âmbito | 51

4.2.3. Recolha de dados e metodologia de cálculo | 53

4.2.4. Seleção de fatores de emissão | 58

4.2.5. Cálculo de emissões e interpretação | 61

4.2.6. Análise de incerteza | 68

4.2.7. Conclusões | 70

4.3. Definição de metas e trajetórias de redução das emissões de GEE | 71

4.4. Mitigação das emissões de GEE | 73

4.4.1.Descabonização pela eficiência energética | 73

4.4.2. Recuperação de calor residual | 76

4.4.3. Eletrificação | 78

INDICE

4.4.4. Produção de energia por fontes renováveis | 79

4.4.5. Captura de carbono | 80

4.4.6. Utilização de combustíveis verdes | 81

4.4.7. Descarbonização de tecnologias de produção | 84

4.4.8. Economia Circular | 100

4.4.8.1 Ecodesign e eficiência de materiais | 100

4.4.8.2. Logística e Processos para a Economia Circular | 105

4.4.8.3. Gestão de resíduos | 107

4.4.8.4. Inovação e modelos de negócio | 109

4.4.8.5. Capacitação | 111

4.5. Neutralização das emissões de GEE residuais | 114

4.6. Monitorização e reporte de desempenho | 116

5. CENÁRIOS PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO SETOR METALÚRGICO E METALOMECÂNICO ATÉ 2050 | 119

6. RECOMENDAÇÕES E PLANO DE AÇÃO PARA O FUTURO | 139

7. APLICAÇÃO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA IMPLEMENTAÇÃO DE ROTEIROS | 147

8. RESUMO DO ROTEIRO | 151

8.1. Cálculo da pegada de carbono da empresa | 152

8.2. Cálculo do roteiro de descarbonização da empresa | 153

ANEXOS | 155

Anexo I – Inquérito | 157

Análise dos resultados ao inquérito | 160

Anexo II - Nomenclatura usada no modelo OSEMOSYS | 167

1.

SUMÁRIO EXECUTIVO

A Associação dos Industriais Metalúrgicos, Metalomecânicos e Afins de Portugal (AIMMAP), juntamente com o Centro de Apoio Tecnológico à Indústria Metalomecânica (CATIM), desenvolveram o presente Roteiro CarbonFree_Guide4Metal. Trata-se de um projeto apoiado pelo Programa de Recuperação e Resiliência (PRR), alinhado com o vetor estratégico da sustentabilidade e descarbonização do setor metalúrgico e metalomecânico (frequentemente designado METAL PORTUGAL), com especial enfoque nas empresas do segmento do fabrico de produtos metálicos, máquinas e equipamentos (CAE 25 e 282).

A sustentabilidade é um pilar que está há muito presente na estratégia das empresas do METAL PORTUGAL, pelo que o setor definiu metas de curto e longo prazo alinhadas com o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050) para a indústria e processos industriais. A ambição para o futuro é grande e as metas pressupõem uma redução de 72% das emissões de carbono até 2050 e de 50% até 2030, face a 2005.

O Roteiro de Descarbonização do METAL PORTUGAL tem como objetivo ajudar o setor metalúrgico e metalomecânico (SMM) a atingir tais metas, e engloba um conjunto de medidas e ações complementares e verdadeiramente diferenciadoras, que vão desde a identificação de trajetórias custo-eficazes de reduções de emissões, identificação e implementação de soluções tecnológicas como processos tecnológicos de baixo carbono, introdução de novas matérias-primas e de combustíveis derivados de resíduos e de biomassa, adoção de medidas de economia circular competitiva e resiliente, substituição e adoção de equipamentos e processos para novas tecnologias sustentáveis, adoção de sistemas de monitorização e gestão de consumos, promovendo, sempre mais e melhor investigação e inovação em áreas que potenciem a concretização do objetivo da neutralidade carbónica.

Além do Roteiro, e de forma complementar, foi criada uma página web - **https://carbonfreemetalportugal.pt/** - para apoio e dinamização de informação sobre esta matéria, tal como foram desenvolvidas duas ferramentas informáticas para auxiliar as empresas no cálculo da pegada de carbono da Organização e na determinação de um Roteiro de Descarbonização adaptado à realidade de cada empresa.



2.

INTRODUÇÃO

Com a entrada em vigor do Acordo de Paris a 4 de novembro de 2016, a comunidade internacional pretende dar uma resposta global e eficaz aos desafios ligados às alterações climáticas. O acordo que foi ratificado por todos os países da União Europeia (UE), tem como meta a descarbonização das economias mundiais. Um dos seus objetivos de longo prazo é estabelecer limites para o aumento da temperatura média global, substancialmente abaixo dos 2°C em relação aos níveis pré-industriais. Além disso, o acordo prevê a intensificação dos esforços para limitar o aumento da temperatura a 1.5°C, reconhecendo que essa medida contribuirá significativamente para a redução dos riscos e impactes das alterações climáticas.

O Acordo de Paris marca uma transformação paradigmática na execução da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, ao reconhecer de forma explícita que somente através da contribuição de todos é possível superar o desafio das alterações climáticas.

Em conformidade com este compromisso, foi estabelecido um acordo entre os países da UE, para esta se tornar a primeira economia e sociedade com impacto climático neutro. Em 2019, a Comissão Europeia anunciou o Pacto Ecológico Europeu (*Green Deal*), como a estratégia para alcançar a neutralidade climática da UE até 2050. Como parte do Pacto Ecológico Europeu, a Lei Europeia em matéria de Clima consagrou na legislação esse objetivo de uma UE com impacto neutro no clima até 2050.

A nível nacional, e dando resposta às exigências deste desígnio europeu, foi desenvolvido o Roteiro para a Neutralidade Carbónica (RNC2050), que identifica os principais eixos para a descarbonização em todos os setores da economia, políticas e medidas disponíveis, bem como a trajetória delineada para a redução de emissões com o objetivo de alcançar a neutralidade. Todos os setores, nomeadamente a indústria, são chamados a contribuir para a redução de emissões, aumentando a eficiência e promovendo a inovação.

O setor metalúrgico e metalomecânico (SMM), é verdadeiramente vital para a economia portuguesa, e desempenha um papel crucial na produção de bens e serviços. No entanto, o seu impacto ambiental, particularmente em termos de emissões de gases com efeito de estufa, exige uma transformação significativa. Este roteiro visa guiar as empresas do setor por uma jornada sustentável de longo prazo, onde se apontam caminhos concretos para a descarbonização partindo de um diagnóstico objetivo do setor.

Contexto e Compromissos Internacionais

1 **Acordo de Paris**

Entrada em vigor a 4 de novembro de 2016, visando limitar o aumento da temperatura global abaixo dos 2°C.

2 **Pacto Ecológico Europeu**

Anunciado em 2019, estabelece a estratégia para alcançar a neutralidade climática da UE até 2050.

3 **Roteiro Nacional**

Desenvolvimento do Roteiro para a Neutralidade Carbónica (RNC2050) a nível nacional.

O presente documento aborda os desafios específicos enfrentados pelo setor, destacando para isso a importância de se recorrer a uma metodologia estruturada partindo de um diagnóstico de práticas do setor e do cálculo das emissões de gases com efeito estufa. A partir daí serão traçadas metas de redução da pegada, trajetórias e soluções para se atingir o objetivo da neutralidade.

Neste cenário desafiador, é crucial que as empresas do SMM compreendam, não apenas os riscos associados aos impactos ambientais, mas sobretudo as oportunidades que surgem ao abraçarem modelos de negócio sustentáveis. A neutralidade não é meramente um compromisso ambiental, é uma estratégia para a resiliência empresarial, e apostar na inovação e na competitividade a longo prazo.

Ao avançarmos neste roteiro, convidamos as empresas do setor a embarcarem nesta jornada transformadora, contribuindo para a construção de um setor mais sustentável, resiliente, diferenciador e alinhado com os objetivos globais da ONU, da UE e de Portugal, e contribuindo para um planeta mais sustentável.

3.

O SETOR METAL PORTUGAL

3.1. AIMMAP

A mobilização para a sustentabilidade, para a transição energética e para a economia circular face à urgência climática que o mundo atualmente enfrenta, tem para a AIMMAP a maior importância, tendo sido definido como um dos cinco objetivos estratégicos definidos pela associação para o setor metalúrgico e metalomecânico, alinhados com as expectativas de transformação até 2030.

O grande desafio é assegurar condições para um setor focado no crescimento sustentado a longo-prazo, que prime por um tecido empresarial mais qualificado, inovador e alinhado com os princípios da sustentabilidade. Um setor consciente, conectado e formado por uma estrutura produtiva que reflita o uso eficiente de recursos, desenvolvimento de produtos e soluções que acompanham e contribuem para a inovação tecnológica, garantindo a sua afirmação no contexto nacional e, principalmente, internacional.

Na verdade, o setor metalúrgico e metalomecânico em Portugal está bem posicionado face à média da UE no que à descarbonização diz respeito. O setor engloba as empresas mais agressivas no combate à poluição e mais dinâmicas na apresentação de novas soluções integradas para a preservação do meio ambiente, oferecendo ao mercado, mais do que produtos ou soluções para necessidades dos seres humanos, novas formas de estar no planeta.

Além disso, é neste setor que nascem as tecnologias de produção, que absorvem hoje uma importante fatia do investimento do setor, tornando-se cada vez menos poluentes e mais eficientes em termos de processos e energéticos. Aliás, as tecnologias de produção representam um grande potencial de efeito de arrastamento transversal em toda a economia.

As evidências são inúmeras e muito assertivas: no processo de transformação “Net Zero”, o METAL PORTUGAL é um excelente exemplo de que a indústria é a solução e um veículo privilegiado para a disseminação da descarbonização.

Não há dúvida que a neutralidade carbónica,



enquanto objetivo partilhado por todos os países, é hoje um imperativo para qualquer economia que queira ser competitiva nos mercados globais, e continuar a crescer alicerçada em mais e melhor valor acrescentado.

E nesse percurso, o Projeto CarbonFree_Guide4Metal que resulta de uma união de esforços da AIMMAP com o CATIM, é uma extraordinária ferramenta e traduz-se numa singular mais-valia para o METAL PORTUGAL, um setor cada vez mais relevante na realidade socioeconómica nacional, criando um roteiro de descarbonização que vai guiar as empresas do setor neste processo e capacitar as empresas para este exigente caminho.

Vítor Neves

Presidente da Direção da AIMMAP

3.2. Caracterização do Setor METAL

O setor metalúrgico e metalomecânico tem um papel central na indústria transformadora e na economia nacional, com um crescimento sustentado e contínuo ao longo dos últimos anos.

Na última década mais do que duplicou o valor das exportações, e continua a ocupar um papel central no desenvolvimento socioeconómico do país. Além disso, o setor metalúrgico e metalomecânico abrange, e está ligado a múltiplos setores, sendo responsável pela produção de bens de suporte à produção nas demais atividades económicas e bens duradouros para consumo final. Apresenta uma importância muito relevante no desenvolvimento económico do país, não só pelo efeito de arrastamento e de transferência de tecnologia para tantos outros setores, como também pelo impacto que tem na criação de riqueza.

O setor metalúrgico e metalomecânico é um fornecedor central de todos os setores industriais e, desempenha, enquanto produtor de bens de equipamento, um papel fundamental no processo de desenvolvimento e modernização da indústria portuguesa, com destaque para as exportações, que continuam a ser o motor de crescimento da economia nacional. É também muito importante para o equilíbrio da balança comercial de Portugal, dada a fortíssima orientação exportadora das empresas que constituem o METAL PORTUGAL. Acresce que, o setor metalúrgico e metalomecânico leva aos quatro cantos do mundo, um conjunto de produtos e serviços relevantes com vantagens comparativas apelativas, sublinhando um forte espírito de cooperação que existe entre as empresas.

Em Portugal, atualmente composto por cerca de 23 mil empresas, o setor metalúrgico e metalomecânico representa mais de um terço do total das empresas da indústria transformadora (IT), empregando 253 mil pessoas (dados de 2023, do INE), o que representa 34% no total da IT e 5% da economia portuguesa.



Figura 1 - Relevância do setor metalúrgico e metalomecânico em Portugal (dados de 2023 e exportações 2024)

Na vertente económico-financeira, o volume de faturação anual do setor metalúrgico e metalomecânico fixa-se em cerca de 39,9 mil milhões de euros, e a riqueza gerada ultrapassa os 9,9 mil milhões de euros com um peso muito significativo no conjunto da IT e da economia, sobretudo considerando os efeitos diretos e indiretos gerados (dados de 2023, do INE).

Ao nível do comércio internacional, as exportações portuguesas do setor também se destacam pelo seu peso elevado na economia nacional (26%), assim como pela sua relevância na IT (48%). Em 2024, as empresas do METAL PORTUGAL exportaram um total de 23,5 mil milhões de euros.

O METAL PORTUGAL apresenta, assim, uma enorme expressão no total da indústria transformadora em vários indicadores, assumindo-se como um dos principais motores da economia portuguesa. A sua importância económica carateriza-se ainda pela heterogeneidade, integrando, como já referido, um conjunto alargado de atividades industriais e uma diversidade de produtos. Desta forma, marca presença em praticamente todos os elos nucleares da cadeia de valor da produção de bens, desde a metalurgia de base até ao material de transporte, peças técnicas de elevado valor acrescentado, passando pelos produtos metálicos, equipamentos elétricos, máquinas não elétricas e bens de equipamento.

Em termos gerais, o setor metalúrgico e metalomecânico apresenta resultados económico-financeiros mais salutares que a média das indústrias transformadoras: os rácios económico-financeiros do setor revelam uma boa capitalização das empresas, baixa pressão financeira e de tesouraria, e níveis de rentabilidade atrativos, permitindo alavancar novos projetos de investimento de valor para o setor. É também responsável por 23% do montante de investimento elegível decorrente das operações de financiamento aprovadas no âmbito do Portugal 2020 reportadas até 31/12/2021.

Em Portugal, o setor é dominado pelas microempresas (71%), seguido pelas pequenas e médias empresas (27.6%) e por fim as grandes empresas (com apenas 1.1%) (“Estudo da Central de Balanços - Análise setorial da indústria metalomecânica”, do Banco de



Portugal, 2023). No entanto, de acordo com o estudo "Visão Estratégica 2030 do Setor Metalúrgico e Metalomecânico", elaborado em colaboração entre a AIMMAP e a consultora EY, as grandes empresas são responsáveis pela geração de riqueza, nomeadamente 2,7mM€, cerca de 31% do total do VAB gerado, contra os 576M€, 7% do total do VAB gerado pelas microempresas.

A distribuição geográfica (NUTS II) das empresas do setor metalúrgico e metalomecânico evidencia uma maior concentração nas regiões do Norte e Centro do país, zonas fortemente industrializadas uma concentração particularmente evidente através de indicadores como volume de negócios e número de trabalhadores.

3.2.1. Processos de fabrico – CAE's 25 e 282

No que respeita à distribuição por subsetores, 90.3% das empresas em Portugal ("Estudo da Central de Balanços - Análise setorial da indústria metalomecânica", do Banco de Portugal, 2023) dedicam-se ao fabrico de produtos metálicos, máquinas e equipamentos, representadas nos CAE 25 e 282, sendo por isso relevante que o foco deste roteiro que visa apoiar, acompanhar e capacitar as empresas para os novos desafios associados à transição climática e digital, se aprofunde sobre os referidos CAE's.

Em particular, considerando a Revisão 4 da Classificação Portuguesa das Atividades Económicas:

CAE 25 Fabricação de produtos metálicos, exceto máquinas e equipamentos

CAE 282 Fabricação de outras máquinas para uso geral

Subsetor dos Produtos Metálicos e Equipamentos Elétricos

25: Fabricação de produtos metálicos, exceto máquinas e equipamentos
27: Fabricação de equipamento elétrico

25110	25733	27110
25120	25734	27121
25210	25910	27122
25290	25920	27320
25300	25931	27400
25401	25932	27510
25402	25933	27520
25501	25940	31010
25502	25991	31092
25610	25992	32110
25620	26400	32122
25710	26511	32502
25720	26512	33110
25731	26520	33130
25732	26600	33140

Subsetor das Máquinas, Equipamentos e Tecnologias de Produção

28: Fabricação de máquinas e de equipamentos, n.e.

28110	28300
28120	28410
28130	28490
28140	28910
28150	28920
28210	28930
28221	28940
28222	28950
28230	28960
28240	28991
28250	28992
28291	31020
28292	33120
28293	33200

Figura 2 - Delimitação do SMM por CAE a 2 e a 5 dígitos.

O subsetor "Produtos Metálicos e Equipamentos Elétricos" (CAE 25) é o que apresenta os números mais expressivos no SMM, na maioria dos indicadores, sendo que mais de dois terços das empresas do setor pertencem a este subsetor, que emprega mais de metade do pessoal ao serviço e é responsável por cerca de metade da riqueza gerada (VAB) anualmente (48%); em termos de investimento, é também o subsetor mais relevante (44% do total do setor).

Ao nível do comércio internacional (exportações), observa-se um peso muito significativo do subsetor "Mobilidade e Material de Transporte" (42%) nas exportações totais do setor metalúrgico e metalomecânico.

Estas duas CAE´s englobam um total de 9751 empresas, das quais cerca de 93% pertencem à CAE 25 e as restantes 7% à CAE 282, salientando a relevância da CAE 25 neste documento.

Conforme se pode verificar na Tabela 1, na CAE 25, os códigos a cinco dígitos predominantes são:

- 25 120, representando 38,2% das empresas;
- 25 110, representando 15,1%
- 25 620, representando 14,4%.

Relativamente ao subsetor representado pela CAE 282, o código predominante é o 28 250 com 48,4% do total, tal como representado na tabela 2.

Para conhecer e analisar o desempenho energético das empresas do SMM, foi desenvolvido um inquérito, estruturado para que fosse possível obter dados relevantes para a caracterização energética e das emissões. As questões do inquérito abordaram a caracterização da empresa (dimensão, localização e regime de funcionamento) e procuraram aferir as fontes de energia mais utilizadas, os processos existentes e respetivas medidas de redução de consumo energético implementadas.

Este inquérito teve como objetivo, avaliar o grau de sensibilidade das empresas do setor metalúrgico e metalomecânico em relação aos temas da sustentabilidade e da descarbonização, questionando a existência de planos de descarbonização, definição de objetivos de sustentabilidade e gestão/otimização de consumos.

Tabela 1:
Distribuição das respostas de organizações CAE 25

% empresas divididas por CAE 25	CAE	%	Nº de trabalhadores
Fabricação de estruturas de construções metálicas	25 110	15,10%	17.232
Fabricação de portas, janelas e elementos similares em metal	25 120	38,20%	19.811
Atividade de mecânica geral	25 620	14,40%	8.492
Fabricação de moldes metálicos	25 734	7,50%	10.585
Fabricação de outros produtos metálicos diversos, n.e.	25 992	10,30%	9.934

a nível nacional

Tabela 2:
Distribuição das respostas de organizações CAE 282

% empresas divididas por CAE 282	CAE	%	Nº de trabalhadores
Fabricação de equipamentos de elevação e de movimentação, n.e.	282 22	8,10%	862
Fabricação de equipamento não doméstico para refrigeração e ventilação	282 50	48,40%	7.934
Fabricação de outras máquinas diversas de uso geral, n.e.	282 93	24%	1.557

a nível nacional

A estrutura do inquérito e os principais resultados da análise dos dados recolhidos encontram-se no Anexo I, para consulta em detalhe.

O setor metalúrgico e metalomecânico abrange a transformação de metais em produtos acabados ou semiacabados. Esta indústria utiliza uma variedade de processos de fabrico, incluindo maquinagem, conformação, corte, soldadura, tratamentos térmicos, tratamentos de superfície (revestimento). Cada um destes processos é escolhido de acordo com o tipo de produto a ser fabricado, garantindo a adequação às especificações técnicas e às necessidades do mercado.

Neste capítulo, são descritos os vários processos produtivos mencionados, onde também se explica a finalidade associada ao(s) vetor(es) energético(s) utilizado(s).















maquinagem

A **maquinagem** é um processo fundamental no fabrico de componentes mecânicos, onde, de forma gradual, partindo de uma forma inicial, o material é removido de uma peça de trabalho, em bruto ou semiacabada, para lhe dar forma, dimensões ou acabamento, através do corte por arranque de apara.

Pode ser classificada como convencional ou não convencional, dependendo das técnicas e tecnologias aplicadas.

A **maquinagem convencional** utiliza ferramentas de corte diretamente em contato com a peça para remover material.

Como maquinagem convencional são classificadas as seguintes técnicas descritas na Tabela 3, assim como os vetores energéticos correspondentes aplicados.

Tabela 3:
Descrição dos processos de maquinagem convencional

Maquinagem convencional	Descrição	Valor energético
Torneamento	O torneamento utiliza uma ferramenta de corte estacionária contra uma peça de trabalho rotativa de alta velocidade. As ferramentas removem o material da peça de trabalho de forma simétrica.	Eletricidade
Furação	É um processo de fabrico versátil que permite abrir, alargar, criar aberturas de roscas e realizar escareamento de furos, entre outras.	Eletricidade
Fresagem	Este processo consiste em retirar o excesso de metal existente no bloco a trabalhar, sendo que o objetivo final é produzir uma peça com o acabamento e formas desejadas.	Eletricidade
Brochagem	A brochagem utiliza uma ferramenta de corte dentada para remover material da peça de trabalho. Existem duas variações do processo de brochagem - linear e rotativa.	Eletricidade
Aplainamento	A função deste processo de fabrico é cortar material utilizando uma ferramenta de corte, para remover as irregularidades duma superfície, tornando-a assim plana.	Eletricidade
Retificação	A retificação utiliza discos abrasivos para remover o mínimo de material da peça a trabalhar. As ferramentas de retificação não podem criar alterações significativas na forma da peça de trabalho.	Eletricidade
Rebarbagem	A rebarbagem é a operação realizada na fase de acabamentos da peça de forma a melhorar a qualidade final desta. Esta operação é executada recorrendo ao uso de uma ferramenta portátil com um disco a elevação rotação que ao entrar em contacto com a peça metálica lhe remove o material excedente.	Eletricidade



maquinagem

A **maquinagem não convencional** utiliza técnicas que não dependem do contato direto entre a ferramenta e a peça, mas sim de métodos térmicos, químicos, elétricos ou hidráulicos, sendo especialmente útil em materiais duros, frágeis ou de formas complexas.

Tabela 4:
Descrição dos processos de maquinagem não convencional

Maquinagem não convencional	Descrição	Valor energético
Eletroerosão (EDM, Electrical Discharge Machining)	Este processo de fabrico realiza uma descarga elétrica entre a ferramenta e a peça de trabalho, submersa num fluido dielétrico, provocando um arranque de material.	Eletricidade
Por feixe de eletrões	Neste processo de fabrico é usada eletricidade com alta voltagem, que gera um feixe localizado de eletrões a alta velocidade, permitindo a remoção de material com notável precisão.	Eletricidade
Eletroquímica	Este processo de fabrico combina a energia elétrica e química para remoção do material. Tem como base a dissolução anódica numa célula eletrolítica, em que a peça funciona como o ânodo e a ferramenta funciona como o cátodo.	Eletricidade
Por ultrassons	A maquinagem por ultrassons permite realizar furos de pequena dimensão. Isto é possível porque a peça é submersa num líquido que contem partículas abrasivas e pela aplicação de vibrações de alta frequência induzem cargas de impacte na peça.	Eletricidade
Por laser	Neste processo é usado um laser de alta intensidade com um comprimento de onda específico para converter a energia eletromagnética em energia térmica na superfície da peça de trabalho, permitindo uma remoção precisa do material.	Eletricidade
Por jato de água	A água é bombada para um bocal convergente, formando jatos de água de alta pressão com elevada velocidade. O impacte deste jato na peça de trabalho provoca a deformação plástica e a fratura, facilitando a remoção do material.	Eletricidade



conformação

A **conformação mecânica** é caraterizada por um conjunto de processos de fabrico onde é alterada a forma do material através da aplicação de forças mecânicas, sem a remoção de material. Nestes processos de fabrico há uma compressão de metais sólidos em moldes que provocam a deformação plástica do material, dando a forma desejada. A conformação pode ser realizada com aquecimento da matéria-prima ou a temperatura ambiente.

Tabela 5:
Descrição dos processos de conformação

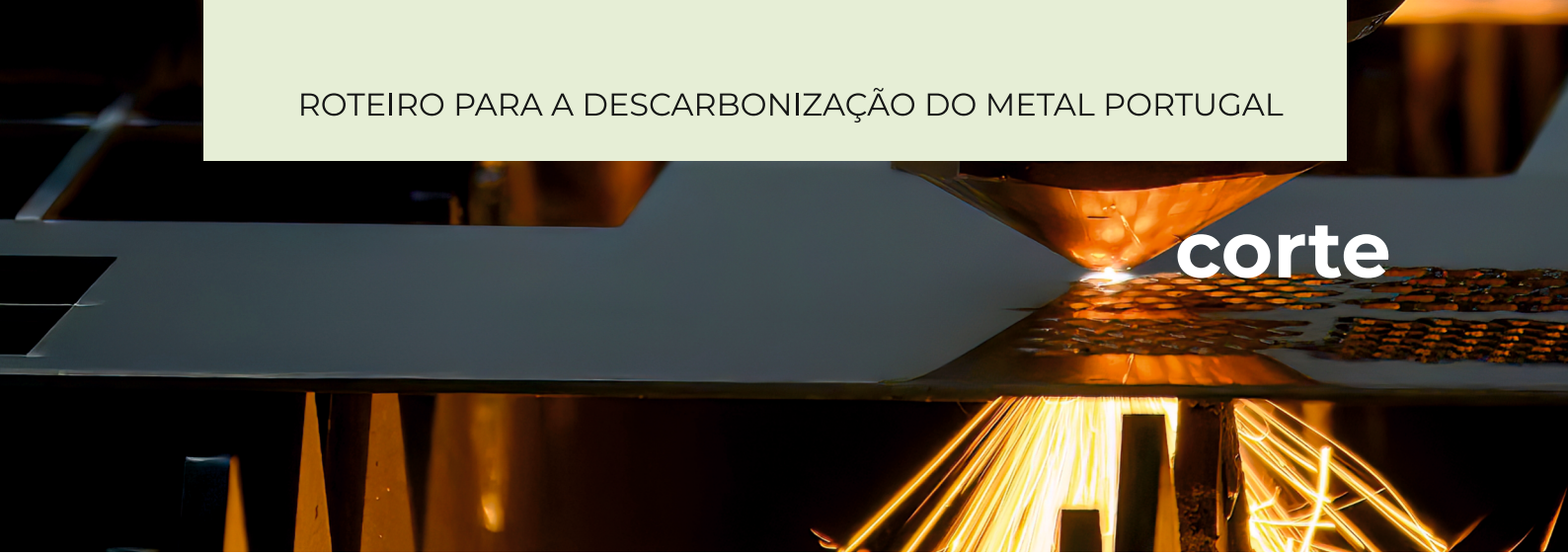
Conformação	Descrição	Valor energético
Calandragem	A calandragem é um processo de conformação mecânica para dar a curvatura desejada a chapas de metal, pela passagem entre pelo menos dois rolos. Este processo permite obter uma peça de espessura constante e bom acabamento.	Eletricidade
Dobragem / Quinagem	Na quinagem, a chapa inicial, passa por um equipamento que provoca a flexão e a deformação plástica da chapa, devido à aplicação de forças em duas direções opostas, mudando a forma de uma superfície plana para duas superfícies concorrentes.	Eletricidade
Embutimento ou repuxo	Para realizar o embutimento são usadas ferramentas que consistem numa punção e uma matriz. O punção é empurrado através de uma prensa sobre a chapa e esta entra dentro da cavidade da matriz, dando a forma das ferramentas usadas.	Eletricidade
Estiragem e Trefilagem	Uma barra, fio ou secção transversal é puxado por uma fieira com as características definidas a dar ao metal. Este processo de fabrico tem com principal funcionalidade reduzir a secção. Por vezes, posteriormente, é necessário realizar-se um tratamento térmico - recozimento.	Eletricidade
Forjamento em matriz fechada ou Estampagem	A estampagem é um processo de conformação mecânica no qual uma chapa metálica plana é forçada, através de uma prensa, a passar num conjunto de ferramentas denominadas de matrizes. Desta forma, a chapa é deformada permanentemente com a forma desejada. Este processo pode ser realizado a quente ou a frio. No processo a quente é necessário aquecer o metal até temperatura em que seja possível moldar o metal.	Eletricidade Gás natural



conformação

Tabela 5:
Descrição dos processos de conformação

Conformação	Descrição	Valor energético
Forjamento livre ou Matriz aberta	Processo de moldagem que, devido a pressão exercida no metal, obriga a assumir o perfil da ferramenta usada. Este processo pode ser realizado a quente ou a frio, dependo da forma da peça. No processo a quente é necessário aquecer o metal num forno para que seja obtida a temperatura desejada.	Eletricidade Gás natural
Extrusão	A extrusão é um processo de conformação plástica que consiste em fazer passar um lingote (a quente/ frio), por uma abertura geométrica com a forma desejada. Este processo dá-se por meio da ação de compressão de um pistão acionado pneumática ou hidraulicamente.	Eletricidade Gás natural
Laminagem	A laminagem é um processo de conformação que consiste na passagem de um corpo sólido (peça) entre dois cilindros (ferramentas) que provocam alteração transversal do material. Este processo pode ser realizado a quente ou frio.	Eletricidade Gás natural
Repuxagem	A repuxagem é um processo de conformação mecânica para transformar chapas metálicas planas em formas tridimensionais profundas e complexas. A chapa é pressionada pelo centro entre um mandril solidário com a árvore do torno e um mandril, forçando o metal a deformar e a se moldar à forma da matriz sem romper ou enrugar.	Eletricidade



corte

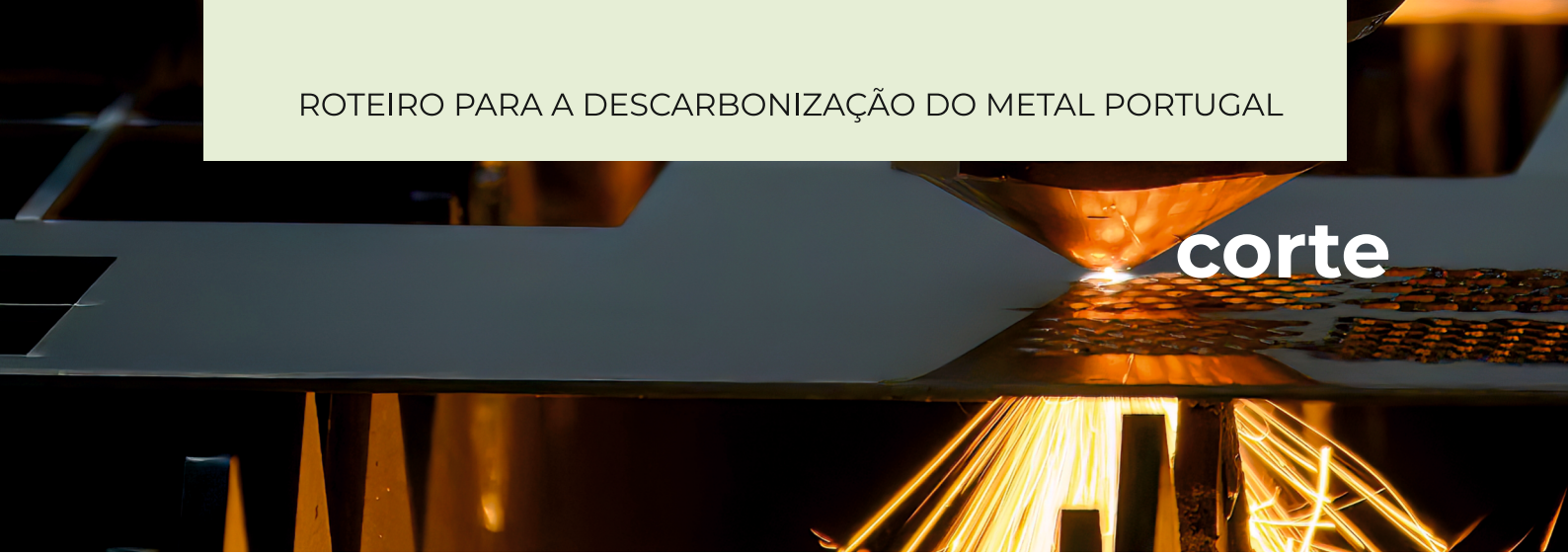
O **processo de corte** de materiais metálicos é uma interação complexa entre a peça de trabalho e a ferramenta de corte. Envolve a deformação do metal, a separação do material e a geração de calor. As propriedades do material, como dureza, ductilidade e condutividade térmica, podem afetar significativamente a eficiência do corte.

O calor é um dos grandes desafios neste processo. Se o calor for excessivo, pode danificar as ferramentas de corte e comprometer a qualidade da peça de trabalho. Portanto, a gestão eficaz do calor é crucial para manter a eficiência do corte.

Selecionar as ferramentas certas para o corte de metais é um passo crítico para alcançar a eficiência máxima. A escolha do equipamento de corte pode influenciar significativamente a qualidade do corte, a velocidade da operação e a vida útil da própria ferramenta. Por exemplo, utilizar uma serra de fita pode ser vantajoso devido à sua precisão nos cortes e versatilidade no manuseio de diferentes formas, enquanto corte com plasma pode ser mais adequado para cortar chapas de metal espessas.

Tabela 6:
Descrição dos processos de corte

Processos de corte	Descrição	Valor energético
Corte por serra	Nesta técnica é utilizado uma serra, que pode ser de fita ou circular, com dentes finos e afiados para cortar metais de forma rápida e precisa.	Eletricidade
Corte por guilhotina	Nesta técnica é utilizado uma serra, que pode ser de fita ou circular, com dentes finos e afiados para cortar metais de forma rápida e precisa.	Eletricidade
Corte com prensa	Por corte entende-se a obtenção de uma peça através da sua extração de uma chapa, segundo um contorno fechado. É um processo bastante simples que, sob o efeito do movimento relativo entre uma lâmina móvel e uma lâmina fixa, secciona a chapa. Mediante a adaptação de um punção cortante a uma prensa, e com alimentação automática da chapa, é possível a produção de peças com formas ligeiramente complexas e grandes séries.	Eletricidade
Corte por puncionamento	O puncionamento é um processo de separação no qual uma chapa metálica é separada num só golpe. Golpes individuais que podem ocorrer em sequência muito rápida geram, por exemplo, furos redondos na chapa.	Eletricidade
Corte a laser	Esta técnica utiliza um feixe de laser para derreter, queimar ou vaporizar o metal, proporcionando cortes precisos e complexos em diversos tipos de metais.	Eletricidade
Corte por plasma	O plasma utilizado neste tipo de corte é ionizado para cortar metais, especialmente os duros e espessos, com uma velocidade e precisão elevadas.	Eletricidade



corte

Um desajuste entre a ferramenta e a tarefa a realizar pode resultar em resultados insatisfatórios, desperdício de material, consumo elevado de energia ou desgaste excessivo dos equipamentos. Por outro lado, as ferramentas de alta qualidade, embora possam ter um custo inicial mais alto, geralmente oferecem melhor desempenho e vida útil mais longa, reduzindo os custos de substituição e de reparo a longo prazo. Portanto, investir algum tempo para entender os requisitos específicos das tarefas de corte e escolher as ferramentas mais adequadas é fundamental para a eficiência geral e o sucesso das operações.

O vetor energético principal deste tipo de processo é a eletricidade, sendo que existe pelo menos um em que a sua fonte provém de combustíveis (oxicorte).

Tabela 6:
Descrição dos processos de corte

Processos de corte	Descrição	Valor energético
Corte por jato de água	Este tipo de corte utiliza um jato de água em alta pressão, muitas vezes misturado com abrasivos, para cortar metais. É adequado para cortes complexos e não gera calor, preservando a integridade do material.	Eletricidade
Corte por chama (oxicorte)	O oxicorte é um processo de corte térmico a temperatura elevada, que permite cortar materiais de médias a grandes espessuras, graças a um maçarico que fornece chama de aquecimento e um jato de oxigénio puro, que permite a reação de oxidação.	Gás Natural, GPL (gases de petróleo liquefeito)



tratamentos térmicos

Os **tratamentos térmicos** envolvem processos de aquecimento específicos para alcançar as propriedades desejadas de um determinado material. Tipicamente são utilizados fornos ou estufas de aquecimento para realizar estes tratamentos. Os principais tipos de processos usados no tratamento térmico encontram-se descritos na Tabela 7.

Tabela 7:
Descrição dos processos de tratamentos térmicos

Tratamentos térmicos	Descrição	Valor energético
Recozimento	O recozimento envolve o aquecimento do material a uma temperatura específica, mantendo-o nessa temperatura por um período prolongado. O material é então arrefecido lentamente até à temperatura ambiente. O recozimento alivia as tensões internas, amolece o material e promove uma estrutura de grão uniforme. É usado para melhorar a maquinagem e reduzir a dureza, especialmente em produtos forjados em metal.	Eletricidade, Gás Natural, GPL
Normalização	Semelhante ao recozimento, a normalização envolve o aquecimento do material a uma temperatura específica, mas em vez de arrefecimento lento, o material é permitido arrefecer num ambiente com ar parado. A normalização melhora a uniformidade da estrutura de grão, aprimora as propriedades mecânicas e refina a microestrutura. É frequentemente usado para alcançar um equilíbrio entre resistência e ductilidade, geralmente após processos de fabricação como a estampagem de metais.	Eletricidade, Gás Natural, GPL
Têmpera	A têmpera é um processo de arrefecimento rápido, geralmente envolvendo a imersão do material aquecido num meio de têmpera, como água ou óleo. A têmpera resulta num aumento da dureza ao promover a formação de martensite. É normalmente utilizada para alcançar alta dureza em aços e outras ligas.	Eletricidade, Gás Natural, GPL
Revenido	O revenido segue a têmpera e envolve o reaquecimento do material temperado a uma temperatura mais baixa. O material é então arrefecido com uma taxa controlada. O revenido reduz a fragilidade introduzida pela têmpera, confere tenacidade e refina a microestrutura. É utilizado para alcançar um equilíbrio entre dureza e tenacidade.	Eletricidade, Gás Natural, GPL
Cementação	A cementação envolve o aquecimento da superfície do material e a introdução de carbono ou azoto para criar uma camada externa dura. A cementação melhora a resistência ao desgaste, a dureza e a resistência à fadiga da superfície, mantendo um núcleo mais resistente.	Eletricidade, Gás Natural, GPL



tratamentos térmicos

Tabela 7:
Descrição dos processos de tratamentos térmicos

Tratamentos térmicos	Descrição	Valor energético
Têmpera por indução	A têmpera por indução utiliza indução eletromagnética para aquecer áreas específicas do material rapidamente, seguido por uma têmpera. A têmpera por indução é um método de tratamento térmico localizado usado para endurecer seletivamente áreas específicas de um componente, fornecendo resistência ao desgaste em áreas críticas.	Eletricidade, Gás Natural, GPL
Têmpera por chama	A têmpera por chama envolve o aquecimento da superfície do material usando uma chama de oxigénio-acetileno e depois realizando a têmpera. Semelhante à têmpera por indução, a têmpera por chama é usada para endurecer seletivamente áreas específicas de um determinado componente, melhorando a sua resistência ao desgaste.	Eletricidade, Gás Natural, GPL
Endurecimento por precipitação	O endurecimento por precipitação envolve o aquecimento do material a uma temperatura específica, seguido por um arrefecimento controlado e um processo de envelhecimento. O endurecimento por precipitação melhora a resistência e a dureza de certas ligas metálicas, promovendo a formação de precipitados dentro da microestrutura.	Eletricidade, Gás Natural, GPL
Nitruração	A nitruração é um processo de endurecimento superficial produzido nos aços que proporciona maior durabilidade em componentes sujeitos ao atrito ou ao desgaste, introduzindo azoto na superfície do metal. A nitruração realiza-se a temperaturas mais baixas do que as utilizadas nos processos de têmpera, resultando assim numa variação dimensional nula ou mínima durante o tratamento.	Eletricidade, Gás Natural, GPL

Cada tipo de tratamento térmico é adaptado para alcançar propriedades específicas do material com base na aplicação pretendida do metal. A escolha do processo de tratamento térmico, temperatura e duração é fundamental para determinar as características finais do material.

Os vetores energéticos mais frequentemente utilizados nestes processos são, em geral, a eletricidade e combustíveis fósseis, como o gás natural ou o GPL.



tratamentos de superfície

Os **tratamentos de superfície** consistem em processos físico-químicos aplicados a peças metálicas para conferir-lhes propriedades específicas, como durabilidade, resistência, proteção ou um melhor acabamento estético. Antes de realizar esses tratamentos, é comum preparar as superfícies, removendo impurezas. A pintura é o tratamento de superfície mais comum, amplamente utilizado em diversas indústrias. Além de melhorar a aparência, a pintura também aumenta a resistência das peças à corrosão. Outros tratamentos de superfície incluem a eletrodeposição, a decapagem e a galvanização.

A galvanização, em particular, envolve a imersão de peças metálicas em banhos de zinco aquecidos a cerca de 450°C, utilizando agitadores e rolos para remover o excesso de zinco. Alternativamente, o zinco fundido pode ser pulverizado sobre o aço ou aplicado por eletrodeposição. Esse processo cria uma camada protetora de 0.1 a 0.2 mm de espessura, que protege o aço da corrosão ambiental, como a causada pelo ar salgado em regiões costeiras.

Tabela 8:
Descrição dos processos de tratamento de superfícies

Tratamentos de superfície	Descrição	Valor energético
Galvanização	A galvanização é um processo de aplicação de uma camada de zinco sobre o aço ou ferro para protegê-lo contra a corrosão. Pode ser feita por imersão a quente *(hot-dip galvanizing)* ou por eletrodeposição (galvanização eletrolítica).	Eletricidade, Gás Natural, GPL
Anodização	A anodização é um processo eletroquímico que aumenta a espessura da camada de óxido natural na superfície de metais, especialmente no alumínio. Este tratamento melhora a resistência à corrosão e ao desgaste, e também permite a coloração decorativa.	Eletricidade
Eletrodeposição	A eletrodeposição é um processo de tratamento de superfície que envolve a aplicação de um revestimento metálico a uma superfície através de um processo eletroquímico. A técnica é amplamente utilizada numa variedade de aplicações industriais, incluindo a produção de peças metálicas com propriedades específicas, a proteção contra corrosão, o acabamento estético e a fabricação de componentes eletrónicos.	Eletricidade
Decapagem	A decapagem é um processo químico ou eletroquímico utilizado para remover impurezas, óxidos ou contaminações da superfície metálica. É frequentemente utilizado como preparação antes de outros tratamentos de superfície.	Eletricidade



tratamentos de superfície

Tabela 8:
Descrição dos processos de tratamento de superfícies

Tratamentos de superfície	Descrição	Valor energético
Fostatização	A fosfatização é um processo químico que envolve a aplicação de uma camada de fosfato sobre a superfície do metal. Esta camada atua como um *primer* para pinturas e revestimentos, além de melhorar a resistência à corrosão e ao desgaste.	Eletricidade
Revestimento por pintura	A pintura (ou a aplicação de vernizes) oferece uma proteção contra a corrosão e melhora a aparência estética. Pode ser aplicada por métodos como spray, imersão ou de forma eletrostática.	Eletricidade
Polimento/ Acabamento	O polimento envolve a remoção de irregularidades da superfície para obter um acabamento liso e brilhante. Pode ser feito mecanicamente ou eletroquimicamente.	Eletricidade
Metalização	Consiste na aplicação de uma camada metálica sobre a superfície das peças, por projeção. O metal, em arame ou pó, é feito passar por uma pistola pulverizadora, onde é aquecido, e pulverizado contra a superfície da peça. Como a ligação do metal à peça é unicamente metálica, a superfície das peças a revestir deve ser previamente preparada. Este processo é usado para proteção das peças contra a corrosão, abrasão, oxidação, recuperação de peças com defeitos de maquinagem ou desgastadas..	Eletricidade Gás natural

Os tratamentos de superfície constituem uma atividade de carácter horizontal, incluída praticamente em todos os sectores da indústria transformadora que utilizam metais (mas não só) no seu processo de fabrico. Os tratamentos de superfície têm especial relevância no sector da metalomecânica, constituindo mesmo a atividade principal de algumas das empresas nele incluídas.

O vetor energético mais utilizado nestes tratamentos de superfície é a eletricidade, sendo que também poderá ser utilizado gás natural ou GPL para alguns processos que necessitem de calor, como a galvanização ou a nitruração.



soldadura

A **soldadura de metais** é um processo fundamental na fabricação e reparo de estruturas metálicas, que consiste em unir duas ou mais peças de forma permanente, fundindo o metal na área de contacto ou adicionando um material. Existem diversos métodos e técnicas de soldadura, cada um com características e aplicações específicas. Os métodos de soldadura manual podem ser genericamente diferenciados pela fonte de energia utilizada para fundir o metal e o material de adição, bem como pela técnica adotada para proteger o metal fundido da oxidação causada pelo ar.

Apresentam-se de seguida os diferentes processos de soldadura, focando nos mais utilizados no ramo industrial.

Tabela 9:
Descrição dos processos de soldadura

Tipo de soldadura	Descrição	Valor energético
Arco com elétrodo revestido (SMAW)	A soldadura por arco com elétrodo revestido (SMAW) é um processo manual que utiliza o calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um elétrodo metálico revestido e a peça de trabalho. O calor produzido pelo arco elétrico funde o metal, a alma do elétrodo e o seu revestimento de fluxo.	Eletricidade
Arco submerso (SAW)	Processo de soldadura em que o arco elétrico que se estabelece entre um elétrodo e uma peça se encontra submerso sob uma camada de fluxo granular e fusível, cuja função é proteger a operação da contaminação atmosférica. É um processo automático, de elevada produtividade, sendo comummente usado na indústria, tanto em corrente contínua como alternada.	Eletricidade
TIG *(Tungsten Inert Gas)*	Processo de soldadura em que se utiliza um elétrodo não consumível de Tungsténio, e em que um arco elétrico se forma entre o elétrodo e as peças a unir. A soldadura, mais especificamente o arco elétrico e a zona de fusão, é protegida por um gás inerte, como o Árgon, dos riscos de contaminação atmosférica. Visto o elétrodo ser não consumível, é ainda necessário adicionar ao processo um metal de adição.	Eletricidade



soldadura

Tabela 9:
Descrição dos processos de soldadura

Tipo de soldadura	Descrição	Valor energético
MIG *(Metal Inert Gas)* / MAG *(Metal Active Gas)*	Processo de soldadura por arco elétrico entre uma peça e um elétrodo, em que se utiliza um gás, ou mistura de gases, inerte ou ativo, para proteção da zona de soldadura. No processo MIG utiliza-se um gás inerte como o Árgon ou Hélio. No processo MAG utiliza-se um gás ativo, usualmente CO2. É um processo aplicável à maioria dos metais usados, como os aços, o alumínio, cobre, entre outros. Utiliza-se corrente contínua, sendo a peça o polo negativo e elétrodo o polo positivo.	Eletricidade
Soldadura por resistência	Processo em que as superfícies a unir são aquecidas pela utilização da resistência elétrica do material que as constitui. Essa geração de calor provoca o contacto entre as superfícies das duas peças ou, consoante o caso, entre mais do que duas superfícies metálicas. É um processo de elevada eficiência, mas de aplicação relativamente limitada. Na indústria utilizam-se três variantes deste processo: soldadura por pontos, soldadura por roletes e soldadura topo a topo.	Eletricidade
Soldadura a laser (LBW)	Este tipo de soldadura pode ser utilizado em metais ou termoplásticos. Como o nome indica, envolve o uso de um laser como fonte de calor para criar as soldaduras. Pode ser usado em aços carbono, aço inoxidável, aços de alta resistência e baixa liga.	Eletricidade
Soldadura por arco de plasma (PAW)	A soldadura por arco de plasma (PAW) pode ser utilizada em modo de corrente baixa, tornando-se uma excelente escolha para aplicações que envolvem peças delicadas de computadores. A soldadura por arco de plasma é semelhante à soldadura TIG, mas utiliza um arco menor e voltagens mais baixas, o que aumenta a precisão da soldadura. Esta precisão e voltagem permitem o uso deste processo para montar dispositivos delicados e sensíveis ao calor, como microchips e dispositivos médicos.	Eletricidade
Soldadura por feixe de eletrões (EBW)	A soldadura por feixe de eletrões (EBW) é um processo avançado que oferece precisão, penetração profunda e alta qualidade de soldadura. Embora seja mais complexo e caro devido à necessidade de equipamento especializado e condições de vácuo, é indispensável para aplicações em indústrias onde a integridade e a resistência das soldaduras são críticas.	Eletricidade

Estes são alguns dos tipos de soldadura mais comuns na indústria metalomecânica, cada um com suas vantagens e aplicações específicas, dependendo das necessidades do projeto e dos materiais a serem soldados.

A energia elétrica é o vetor energético mais amplamente utilizado na soldadura a um nível industrial.

3.2.2. Energia

O SMM em estudo neste documento apresenta características distintas que influenciam a sua trajetória de descarbonização. A indústria metalúrgica e metalomecânica está a crescer devido à elevada abertura do setor ao exterior e à sua incorporação em indústrias em expansão, como a das energias renováveis. A atual eletrificação do setor leva a que não se prevejam transformações relevantes, mantendo-se estável em termos de emissões associadas à eletricidade.

Além disso, regista-se um aumento significativo na indústria associada à fabricação de equipamentos informáticos, comunicação, eletrónica, equipamento elétrico e outras indústrias de elevado potencial tecnológico. A grande robotização contribui para que no futuro, 70% da procura por serviços de energia do setor esteja associada a maquinaria, contrastando com os 32% atuais.

Portanto, enquanto a eletrificação e a robotização impulsionam o setor, são necessárias estratégias abrangentes que combinem inovação tecnológica, alterações nos vetores energéticos utilizados e mudanças nos modelos de negócio para atingir as metas de descarbonização.

Em Portugal, o setor metalúrgico e metalomecânico apresentou uma performance positiva em termos de intensidade de emissões poluentes no período 2014-2020, dada a redução de 1,4% em emissões de GEE (gases com efeito de estufa). Acompanhou a tendência do conjunto das empresas da Indústria Transformadora (IT), que diminuiu a intensidade de emissões em 18,8%, tendo, porém, apresentado um ritmo menos acelerado, o que revela a necessidade de promover a transição verde, privilegiando a eficiência energética e a racionalização dos recursos e introdução de novos materiais sustentáveis (note-se que a "metalurgia de base" é o subsetor mais intenso em emissões poluentes, com 625 g/€, muito acima da média das IT.

No contexto europeu, o setor metalúrgico e metalomecânico português assume um posicionamento destacado, situando-se fora do Top 10 dos países da UE com maiores intensidades de emissões nos respetivos setores metalúrgicos e metalomecânicos. Em 2020, a média da UE em termos de emissões de GEE posicionou-se em 222 g/€ ao passo que Portugal registou 139,7 g/€. Ambos registaram variações negativas (logo positivas na lógica deste indicador) de 25,5% e 11% face a valores de 2014.

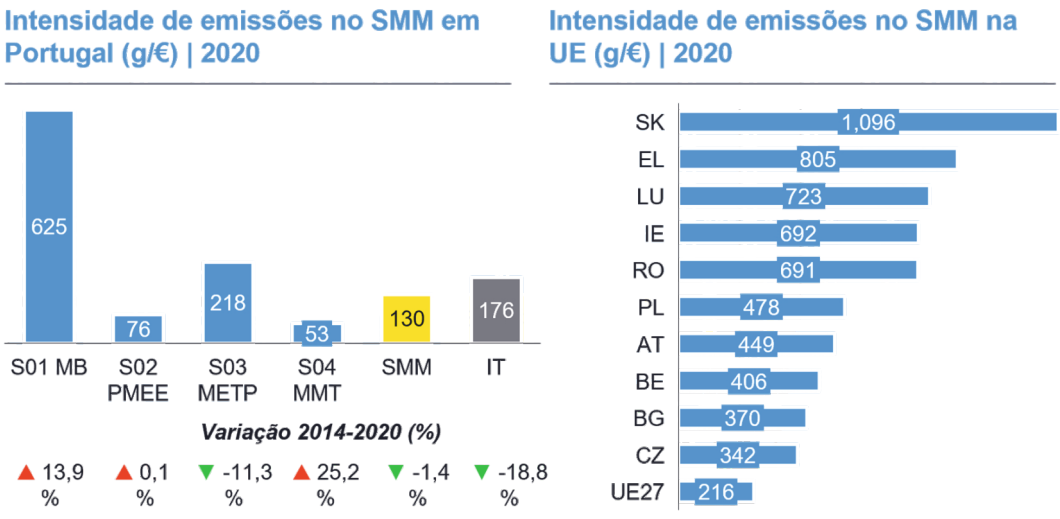


Figura 3 - Intensidade de emissões no setor metalúrgico e metalomecânico em Portugal e na UE, 2020.

O setor metalúrgico e metalomecânico tem grande potencial de contribuir para a e sustentabilidade e descarbonização, quer a nível nacional, quer a nível europeu, até porque a sua tipologia de investimentos tem um perfil de retorno muito positivo no que à descarbonização se refere.

Com a introdução de políticas governamentais robustas e incentivos económicos, espera-se assim um papel vital no incentivo à inovação e à adoção de novas tecnologias. Até 2050, a expectativa é de que a indústria esteja amplamente descarbonizada, contribuindo significativamente para um futuro mais sustentável e resiliente.

Mesmo sabendo que o setor industrial como um todo tem um potencial de descarbonização mais reduzido quando comparado com o setor de produção de eletricidade, da mobilidade e transportes ou dos edifícios, ainda assim considera-se existir potencial para contribuir decisivamente com reduções significativas no período 2020-2050, com especial ênfase no período 2040-2050.



Evolução do consumo de energia final até 2050

Segundo o Roteiro para a Neutralidade Carbónica (RNC2050), traçado pela Agência Portuguesa para o Ambiente, é esperado que, até 2050, exista uma redução significativa no consumo de energia final, estimada entre 22% a 25% em relação a 2015, juntamente com uma redução de mais de 50% na intensidade energética. A crescente eletrificação da economia será notável, com mais de 65% do consumo de energia final proveniente de eletricidade já em 2030 e continuando a aumentar até 2050. Esse processo será acompanhado por uma maior integração de fontes de energia renováveis no consumo de energia final, substituindo progressivamente os produtos petrolíferos, cujo consumo será drasticamente reduzido. Essa transformação contribuirá para um futuro energético mais sustentável e eficiente.

No gráfico 1 é possível observar como está previsto acontecer a redução da intensidade energética em Portugal até 2050.

Observando agora para os vetores energéticos (renováveis e não renováveis) utilizados nos mais diversos setores, como eletricidade, gás natural, produtos petrolíferos, etc., antecipa-se a seguinte variação nos próximos anos (gráfico 2).

Até 2050, na indústria transformadora, o consumo de energia final sofrerá uma evolução significativa, impulsionada pela eletrificação e pelo uso de biomassa, ambos essenciais para a descarbonização do setor. Espera-se que 90% do consumo de gás natural no país ocorra no tecido industrial, destacando a importância desse recurso energético na matriz industrial. No entanto, a descarbonização no setor industrial ocorrerá a um ritmo mais lento do que em outros setores, resultando em um aumento proporcional das emissões industriais no total do país, que representarão 39% das emissões em 2050. Esse desafio exigirá não apenas soluções tecnológicas inovadoras, mas também uma transformação nos modelos de negócio atuais, adaptando-se a um cenário de crescente exigência por sustentabilidade e eficiência energética.

Espera-se que a implementação de práticas de produção mais sustentáveis, bem como a digitalização e automação dos processos industriais, contribua para uma diminuição substancial do consumo de energia. Além disso, políticas governamentais e regulamentações ambientais mais rigorosas deverão acelerar essa transição, promovendo desta forma um futuro industrial mais sustentável e energeticamente eficiente.

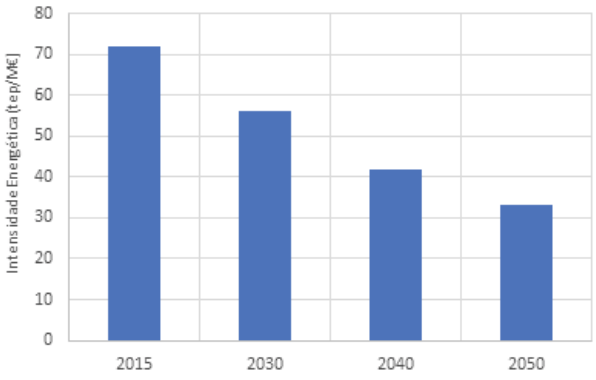


Gráfico 1 - Níveis de intensidade energética entre 2015 e 2050, em tep/M€.

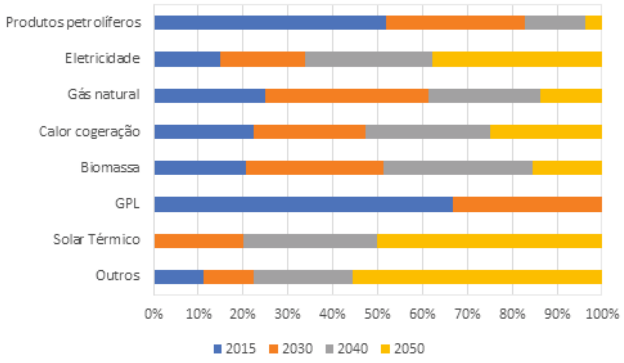


Gráfico 2 - Níveis de intensidade carbónica entre 2015 e 2050, em tep/M€.

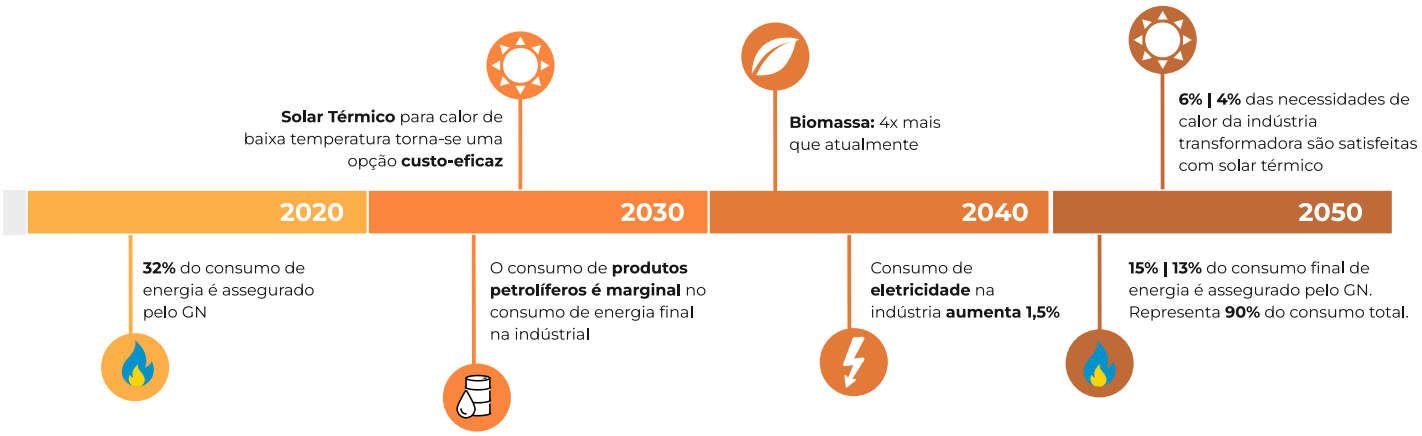


Figura 4 - Evolução do consumo de energia final na indústria até 2050.

Vetores energéticos existentes e o seu futuro

A evolução dos vetores energéticos na indústria metalomecânica deverá mudar significativamente nas próximas décadas, com uma forte ênfase na descarbonização e no aumento da eficiência. Eis uma visão geral das mudanças antecipadas (Tabela 10).

No geral, a indústria metalúrgica e metalomecânica dependerá cada vez mais de uma combinação de eletricidade e combustíveis provenientes de fontes renováveis, apoiada por tecnologias avançadas para aumentar a eficiência energética e reduzir as emissões de carbono.

Tabela 10:
Visão do futuro dos vários vetores energéticos para 2030, 2040 e 2050.

Ano	Valor energético	Descrição
2030	Eletricidade	A eletrificação do setor, particularmente através de fontes renováveis como a eólica e a solar, aumentará. Os avanços nas tecnologias de armazenamento de energia elétrica apoiarão esta transição, tornando a eletricidade renovável uma opção mais fiável para os processos industriais. negativo e elétrodo o polo positivo.
	Gás Natural	O gás natural continuará a desempenhar um papel relevante dado às suas emissões de carbono relativamente mais baixas em comparação com o carvão e o petróleo. No entanto, a sua utilização será cada vez mais otimizada para a eficiência.
	Biomassa e biocombustíveis	Espera-se um crescimento moderado da biomassa e dos biocombustíveis (ex: biometano), especialmente em regiões com abundantes resíduos agrícolas ou florestais.
2040	Eletricidade	A participação da eletricidade no consumo de energia aumentará ainda mais, impulsionada por avanços contínuos na energia renovável e na infraestrutura da rede elétrica.
	Hidrogénio	O hidrogénio, especialmente o hidrogénio verde produzido a partir de energia renovável, começará a tornar-se um vetor energético significativo. Será utilizado em processos de alta temperatura onde a eletrificação é desafiante.
	Biomassa e biocombustíveis	Serão relevantes particularmente em sistemas integrados onde os resíduos podem ser eficientemente convertidos em energia.
2050	Eletricidade	A dominância da eletricidade proveniente de fontes renováveis deverá estar firmemente estabelecida. A integração com tecnologias de redes inteligentes e a ampla adoção de soluções de armazenamento de energia garantirão a sua fiabilidade.
	Hidrogénio	Até 2050, espera-se que o hidrogénio seja o protagonista principal no mix energético, substituindo o gás natural em muitas aplicações. O seu papel será crítico para alcançar uma descarbonização profunda.
	Gás Natural	O uso do gás natural diminuirá significativamente, com o seu papel potencialmente limitado a centrais de energia de pico e sistemas de *backup*.
	Biomassa e biocombustíveis	A biomassa e os biocombustíveis serão idealmente otimizados dentro de modelos de economia circular, assegurando um mínimo de resíduos e uma eficiência máxima.

3.2.3. Matérias-primas

Os metais comuns tradicionalmente utilizados no setor podem ser classificados em dois grupos principais: ferrosos e não ferrosos. Metais ferrosos são aqueles que contêm ferro, como o aço e suas ligas. Em contraste, o grupo dos metais não ferrosos inclui materiais como alumínio, cobre, chumbo e zinco.

O aço, uma liga de ferro com menos de 2% de carbono, é extremamente dúctil e é um dos metais mais utilizados no mundo. Em ordem de importância seguem-se: o alumínio, o cobre e outros metais não ferrosos, como chumbo, zinco, níquel, titânio, cobalto, além de outros metais preciosos.

No caso do aço, a durabilidade e reciclabilidade são duas das principais propriedades que o tornam um material sustentável. O aço não só garante uma longa vida útil dos produtos, mas também permite a sua reutilização em inúmeras aplicações. O aço pode ser reciclado sem perda de qualidade, o que o torna crucial para a transição para uma economia mais circular, no entanto, a sua disponibilidade ainda é limitada, dado que os produtos de aço têm uma vida útil longa.

Em teoria, todo o aço novo poderia ser fabricado a partir de aço reciclado, mas tal não é viável na prática, devido à vida longa dos produtos de aço, dada a sua elevada resistência e durabilidade. Cerca de 80% dos produtos de aço fabricados a nível mundial ainda estão em uso atualmente, com uma vasta gama de aplicações, como pontes, edifícios, veículos, máquinas



e outros produtos. Os edifícios e outras estruturas de aço podem durar entre 40 e 100 anos, ou mais, desde que sejam objeto de uma manutenção adequada. A reciclagem de uma tonelada de aço leva a reduções de cerca de 70% no uso de energia, em comparação com a produção a partir de matérias-primas virgens, sendo evitadas cerca de 1,5 toneladas de CO2 equivalente.

Em 2017, 600 milhões de toneladas de sucata de aço foram usadas globalmente para a produção de aço, com 35,5% do aço bruto global proveniente de matérias-primas secundárias. Na União Europeia, em 2018, foram consumidas 93,8 milhões de toneladas de sucata de aço e os recicladores europeus exportaram mais de 21,4 milhões de toneladas de sucata e importaram 2,85 milhões de toneladas. A proporção de sucata de aço utilizada em relação à produção de aço bruto na União Europeia é de 56%.

Estima-se que até 2050, metade da produção mundial de aço poderá ter origem em sucata reciclada, com os governos nacionais a desempenharem um papel crucial nessa transição através de regulamentos e legislação. Está previsto que, até 2050, haja um aumento de 50% na procura de alumínio reciclado, correspondendo a mais de 9 milhões de toneladas deste material na União Europeia.

O alumínio é um metal amplamente utilizado no SMM devido à sua versatilidade, encontrando-se presente em peças de automóveis, caixilhos de janelas, portas e latas de bebidas. Tem como principais características a maleabilidade, alta resistência, baixa densidade, elevada condutividade térmica e elétrica, resistência à corrosão e grande reciclabilidade.

Ao utilizar alumínio reciclado, as emissões de dióxido de carbono podem ser reduzidas em 92% em comparação com o alumínio primário, isto porque uma tonelada de alumínio reciclado economiza até 8 toneladas de bauxite, 14.000 kWh de energia e 7,6 metros cúbicos de espaço em aterros sanitários. Além disso, a produção secundária de alumínio, a nível mundial, representa o dobro da produção de alumínio primário. Na União Europeia, das 4,3 milhões de toneladas de alumínio geradas no final da vida útil, aproximadamente 2,9 milhões de toneladas foram recolhidas e recicladas, resultando numa taxa de reciclagem de fim de vida de 69%.

O cobre é o segundo melhor condutor de eletricidade, depois da prata, e o terceiro metal mais utilizado na indústria, sendo aplicado em diversas utilizações como tubos, componentes elétricos e cabos. Na União Europeia, 44% do cobre adquirido provém de fontes recicladas, estando associado a uma taxa de reciclagem significativa, sendo que 70% do cobre em produtos no seu final de vida é reciclado. Esta utilização de cobre reciclado permite uma redução das emissões de CO_2 em 65% e poupa 85% da energia necessária para a produção primária, deste metal. Os depósitos naturais de cobre na União Europeia, estimados em 48 milhões de toneladas, promovem uma forte dependência da reciclagem, caso contrário, as importações de formas primárias e secundárias para satisfazer a procura interna aumentariam. Das 2,6 milhões de toneladas de cobre recicladas, cerca de 1,6 milhões de toneladas (61%) foram recolhidas e recicladas na União Europeia. A União Europeia produz apenas cerca de 3% das matérias-primas primárias necessárias para sustentar a crescente procura por metais.

Como resultado, a cadeia de valor da reciclagem de metais contribui para reduzir a dependência da União Europeia em materiais importados. Perante este cenário, a transição para a circularidade emerge assim como uma abordagem promissora para enfrentar os desafios de sustentabilidade atuais e promover a eficiência no setor metalúrgico e metalomecânico.

A implementação de estratégias de economia circular neste setor permitirá aumentar a percentagem de reciclado, assim como a eficiência no uso de recursos ao longo de toda a cadeia de valor.

3.2.4 Resíduos

Portugal tem demonstrado um forte compromisso com as metas de reciclagem definidas pela União Europeia. Até 31 de dezembro de 2025, o país deverá reciclar, pelo menos, 65% do peso total dos resíduos de embalagens, com objetivos específicos de 70% para os metais ferrosos, como o aço, e de 50% para o alumínio. Para 2030, prevê-se que estas taxas aumentem para 80% e 60%, respetivamente, evidenciando a determinação crescente de Portugal em alinhar a sua gestão de resíduos às exigências europeias.

Em 2022, Portugal produziu 5,323 milhões de toneladas de resíduos urbanos, o que representa um aumento de cerca de 0,24% face ao valor apurado em 2021. A produção média de resíduos por habitante manteve-se estável, situando-se em 510 kg, no referido ano.

Uma importante parcela do material do total de resíduos urbanos produzidos é metal, sendo 83% da mesma embalagem, como as de aço e alumínio. As taxas de retoma destes materiais têm ultrapassado as metas estabelecidas, tendo sido registadas, em 2022, taxas de 17% para as embalagens metálicas, sendo a meta 50% para este tipo de embalagem.

Em 2024, o Governo português aprovou o Decreto-Lei n.º 24/2024, o qual introduz alterações significativas nos regimes de gestão dos resíduos, nomeadamente no que toca à deposição em aterro e à organização dos fluxos de resíduos. Esta legislação pretende melhorar substancialmente o desempenho na gestão dos resíduos, promovendo práticas mais eficientes e sustentáveis, com especial ênfase na gestão dos resíduos metálicos e de outras tipologias de elevado valor económico e ambiental.

Apesar dos progressos registados, o país continua a enfrentar desafios significativos na gestão global dos resíduos. Em 2022, apenas 33% dos resíduos urbanos produzidos foram efetivamente reciclados, ficando aquém das metas estabelecidas. Este desempenho evidencia a necessidade urgente de intensificar os esforços para aumentar as taxas de reciclagem, sobretudo dos materiais metálicos, que desempenham um papel crucial na economia circular e no desenvolvimento sustentável.

De acordo com dados recolhidos pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA), no Mapa Integrado de Registo de Resíduos (MIRR) de 2022, mais de 84% dos resíduos gerados pelo SMM foram submetidos a operações de recuperação. Do total de resíduos gerados, verifica-se que a taxa de resíduos classificados como não perigosos é superior a 87%, apesar das atividades de tratamento de superfície e de outros processos realizados no setor. Adicionalmente, observa-se que mais de 68% dos resíduos gerados são metais, pelo que têm um elevado potencial de reciclagem e recuperação. Ressalva-se ainda que 12% destes resíduos metálicos são segregados como não ferrosos.

A dinâmica do setor metalúrgico continuou a desempenhar um papel relevante na economia circular, especialmente por meio do reaproveitamento da sucata de metais. Em 2022, cerca de 1,9 milhões de toneladas de sucata foram recicladas pela indústria, representando o metal reciclado parte significativa da matéria-prima utilizada na fabricação de novos produtos. Esse processo de reciclagem contribui para a redução da dependência de recursos naturais e para a minimização dos impactos ambientais associados à produção industrial.

Paralelamente, a implementação de projetos-piloto que integraram a gestão dos resíduos à modernização dos processos industriais tem reforçado a competitividade do setor. O desenvolvimento de tecnologias avançadas – nomeadamente nas operações de corte, soldagem e conformação – aliado a um elevado grau de automação, tem contribuído para a redução da geração de resíduos industriais e para a melhoria da eficiência energética. Adicionalmente, parcerias entre instituições públicas e privadas têm impulsionado a inovação, resultando em soluções tecnológicas que

beneficiam toda a cadeia produtiva.

Por fim, a melhoria dos mecanismos de monitorização e fiscalização, através da introdução de sistemas digitais de controlo e transparência, tem sido uma prioridade na gestão dos resíduos em Portugal. A disponibilização de dados fiáveis e a constante atualização dos indicadores de desempenho têm facilitado a identificação de gargalos operacionais e permitido a implementação célere de medidas corretivas. Estas iniciativas reforçam o compromisso com a sustentabilidade e promovem a transição para uma economia circular robusta, na qual os resíduos – especialmente os de metais – se transformam em matéria-prima essencial para um desenvolvimento industrial e ambientalmente responsável.





4.

O ROTEIRO

4.1 Enquadramento

Tendo como missão apoiar as empresas do setor metalúrgico e metalomecânico em todas as vertentes da sua atividade, a AIMMAP entendeu ser fundamental elaborar um Roteiro de Descarbonização para apoiar o setor neste processo e para suportar o empenho de todo o setor na conquista das metas de descarbonização e sustentabilidade definidas a nível global.

Contando para esta missão com o apoio do CATIM - Centro Tecnológico de Apoio à Indústria Metalomecânica, e tendo como certo que a sustentabilidade e a descarbonização são elementos essenciais para a competitividade global, a AIMMAP pretende assim disponibilizar um documento às empresas suas associadas, com um conjunto de informações, recomendações e boas práticas que as empresas do METAL PORTUGAL deverão seguir na sua jornada de descarbonização.

4.1.1. Sustentabilidade

O termo "desenvolvimento sustentável" foi popularizado a nível internacional pelo Relatório Brundtland, também conhecido como "Nosso Futuro Comum". O relatório foi lançado em 1987 pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (WCED), uma comissão da Organização das Nações Unidas (ONU) criada em 1983.

O documento introduziu a definição mais conhecida de desenvolvimento sustentável:

«Desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades."

O Relatório Brundtland teve um impacte significativo, dando origem ao debate sobre desenvolvimento sustentável, influenciando a agenda global, e servindo de base para acordos internacionais sob o chapéu da ONU.

A trajetória em direção à produção e consumo sustentável está intrinsecamente ligada a marcos históricos que moldaram a ação coletiva rumo ao desenvolvimento económico, equidade social e preservação ambiental. Desde a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento no Rio de Janeiro em 1992, seguida pelo Protocolo de Kyoto em 1997 e, posteriormente em 2015, o Acordo de Paris e a Agenda 2030, o cenário internacional tem sido palco de mudanças significativas rumo a um futuro mais sustentável.

Como parte da Agenda 2030, estabeleceram-se os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), um conjunto de metas globais estabelecidas pelas Nações Unidas para abordar desafios sociais, económicos, ambientais e para promover um desenvolvimento sustentável à escala global. Cada região, país, empresa e cidadão é encorajado a contribuir para a realização desses objetivos na década da ação 2030.

O Acordo de Paris, um tratado internacional juridicamente vinculativo sobre as mudanças climáticas adotado por 196 partes na Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP21), consolidou um consenso global mais amplo sobre a urgência das ações climáticas, refletindo um reconhecimento de que a responsabilidade pela sustentabilidade é compartilhada, independente-mente do estado de desenvolvimento.

O acordo é considerado um marco significativo no esforço global para limitar o aumento da temperatura média global e lidar com os impactes das mudanças climáticas. O objetivo principal é manter o aumento da temperatura média mundial bem abaixo dos 2°C em relação aos níveis pré-industriais e em envidar esforços para limitar o aumento a 1,5°C.

A implementação do Acordo de Paris exige uma transformação económica e social, fundamentada na melhor tecnologia disponível, operando em ciclos de cinco anos de ações climáticas cada vez mais ambiciosas e fornece um quadro para apoio financeiro, técnico e de fortalecimento de capacidades aos diversos países. Neste âmbito, estabeleceu-se uma estrutura de transparência aprimorada (ETF) que obrigará os países, a partir de 2024, a reportarem de forma transparente as ações realizadas e o progresso na mitigação das alterações climáticas, assim como nas medidas de adaptação e no apoio fornecido ou recebido. Esta estrutura também prevê procedimentos internacionais para a revisão dos relatórios submetidos e resultará em recomendações para que os países estabeleçam planos mais ambiciosos no período seguinte.

Quatro anos após o Acordo de Paris, a União Europeia estabeleceu o compromisso abrangente para tornar a economia da UE sustentável e neutra em carbono através do Pacto Ecológico Europeu, sendo este uma ambiciosa iniciativa política e estratégica para reduzir as emissões, mas também promover o crescimento económico sustentável e a qualidade de vida. O objetivo central é alcançar a neutralidade climática da UE até 2050, o que significa que a emissão de gases com efeito de estufa serão neutralizadas por ações de mitigação e remoção. O Pacto Ecológico Europeu inclui medidas como:

- **Fit for 55:** conjunto de propostas para rever a legislação relacionada com o clima, energia e transportes, além de implementar novas iniciativas legislativas para alinhar as leis da UE com as suas metas climáticas.
- **Lei Europeia do Clima:** tem como objetivo garantir que todas as políticas da UE contribuam para a meta de redução de, pelo menos, 55% até 2030 e zero emissões líquidas até 2050.
- **Estratégia da UE para Adaptação às Mudanças Climáticas:** estratégia a longo prazo para que a UE se torne uma sociedade resiliente às mudanças climáticas, e totalmente adaptada

aos seus impactes inevitáveis até 2050.

- **Estratégia Industrial Europeia:** visa reforçar a competitividade da indústria da UE e promover uma economia mais sustentável, resiliente e digitalizada, criadora de emprego.
- **Plano de Ação para a Economia Circular (PAEC):** inclui um conjunto de iniciativas relacionadas entre si por forma a estabelecer um quadro estratégico sólido e coerente, em que os produtos, serviços e modelos de negócio sustentáveis sejam a norma e haja uma transformação dos padrões de consumo no sentido da prevenção de resíduos.
- **Energia Limpa, Acessível e Segura:** visa apoiar o desenvolvimento e a adoção de fontes de energia limpas, promover a integração dos sistemas de energia em toda a UE, desenvolver infraestrutura energética e rever a legislação atual sobre eficiência energética e energia renovável.
- **Estratégia da UE para Produtos Químicos para a Sustentabilidade:** a estratégia de longo-prazo pretende melhorar a proteção da saúde humana, fortalecer a competitividade da indústria e apoiar um ambiente livre de substâncias tóxicas.
- **Transição justa:** mecanismo para fornecer apoio financeiro e técnico aos agentes mais afetados pela transição para uma economia de baixo carbono, estando direcionado para pessoas e comunidades, empresas, estados membros e regiões.
- **Estratégia da UE para a Biodiversidade:** visa ajudar a recuperar a biodiversidade da Europa até 2030, expandindo as áreas protegidas de terra e mar, restaurando ecossistemas degradados, reduzindo o uso e a nocividade de pesticidas.
- **Estratégia da UE para as Florestas e Desflorestação:** baseada na Estratégia da UE para a Biodiversidade visa promover a gestão florestal sustentável, oferecer incentivos financeiros para que proprietários e gestores de florestas adotem práticas ambientalmente amigáveis, e melhorar o tamanho e a biodiversidade das florestas.

Desde 2020, os países têm apresentado planos nacionais de ação climática, conhecidos como contribuições nacionalmente determinadas (NDCs). Neste contexto, o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 estabelece a visão e as trajetórias para que Portugal atinja a neutralidade carbónica até 2050, ou seja, para tornar nulo o balanço entre as emissões e as remoções de dióxido de carbono e outros gases com efeito de estufa (GEE) da atmosfera. O RNC2050 identifica os principais eixos de descarbonização em todos os setores da economia (incluindo a indústria), as opções de políticas, medidas e a trajetória de redução de emissões.

A estratégia nacional para a ação climática assume-se como uma prioridade, indo para além da operacionalização do RNC2050, e apresentando um conjunto alargado de medidas que visam contribuir para a descarbonização, ao mesmo tempo, que sustentam a criação de riqueza e desenvolvimento de uma economia de futuro, tais como:

- **A concretização do disposto na Lei de Bases do Clima:** Lei n.º 98/2021, vem consolidar um conjunto de objetivos, princípios e obrigações para os diferentes níveis de governação para a ação climática através de políticas públicas;
- **Operacionalização do Conselho de Ação Climática:** estrutura governamental para o acompanhamento da política climática e das políticas setoriais com impacte nos objetivos nacionais em matéria de alterações climáticas;
- **Revisão do Plano Nacional de Energia e Clima:** PNEC 2030, instrumento de política energética e climática para a década 2021-2030, no âmbito das obrigações estabelecidas pelo Regulamento da Governação da União da Energia e da Ação Climática, o qual prevê que todos os

Estados-membros elaborem e apresentem à Comissão Europeia os seus planos integrados em matéria de energia e de clima, abrangendo cinco dimensões: descarbonização, eficiência energética, segurança de abastecimento, mercado interno da energia e investigação, inovação e competitividade, além das principais linhas de atuação planeadas para o cumprimento dos diferentes compromissos;

- **Transposição e aplicação das diretivas** previstas do Green Pacto Ecológico Europeu;
- **Novas medidas** para adaptação às alterações climáticas.

Dentro da temática do desenvolvimento sustentável, existem ferramentas fundamentais, como documentos normativos, estruturas *(frameworks)* e avaliações *(ratings)* que desempenham um papel crucial no cenário regulatório e de mercado atual, onde a transparência em relação aos tópicos ESG são cada vez mais valorizados.

Estas surgem para orientar as empresas na recolha, tratamento, organização e divulgação de informações relevantes sobre os seus impactes e práticas de sustentabilidade.

No que diz respeito aos documentos normativos, estes têm como objetivo estabelecer critérios específicos e detalhados sobre o que deve ser abordado, garantindo uma comparabilidade e confiabilidade. Relativamente às estruturas *(frameworks)* tratam-se de quadros contextuais que oferecem uma orientação mais abrangente, fornecendo princípios que moldam a forma como as informações são estruturadas e apresentadas. Por fim, as avaliações *(ratings)* referem-se aos dados ou informações divulgadas no processo de avaliação do desempenho das práticas ambientais, sociais e de governança, resultando numa pontuação que pode variar em função da metodologia usada.

Estas ferramentas complementam-se e apoiam as empresas a alinhar as suas práticas com as expectativas dos *stakeholders,* promovendo uma abordagem mais consistente, confiável e comparável.

Na tabela 11 apresentam-se alguns exemplos:

Tabela 11:
Exemplos de normativos, estruturas e avaliações ESG

Normativos	Estruturas	Avaliações
Climate Disclosure Standads Board (CDSB)	Climate Disclosure Standards Board (CDSB)	EcoVadis
Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD)	Equator Principles (EP)	Carbon Disclosure Project (CDP)
Sustainability Reporting Board (EFRAG)	International Integrated Reporting Council (IIRC)	Dow Jones Sustainability Index (DJSI)
Financial Accounting Standards Board (FASB)	Task Force on Climate-Related Financial Disclosures (TCFD)	MSCI
Global Reporting Initiative (GRI)	Partnership for Carbon Accounting Financials (PCAF)	S&P Global Corporate Sustainability Assessment (CSA)
International Accounting Standards Board (IASB)	UN Principles for Responsible Investment (PRI)	Sustainalytics
The IFRS Foundation (IFRS)	UN Guiding Principles Reporting Framework	EcoVadis
International Integrated Reporting Council (IIRC)	UN Environment Programme Finance UNEP Finance Initiative	Workforce Disclosure Initiative (WDI)
International Sustainability Standards Board (ISSB)	United Nations Global Compact (UNGC)	Moodys ESG Solutions
Sustainability Accounting Standards Board (SASB)	UN Sustainable Development Goals (SDGs)	Vigeo Eiris
B Lab / B Corporation	UN Sustainable Stock Exchanges Initiative (SSEI)	ISS ESG
	Value Reporting Foundation (VRF)	
	World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)	



4.1.2. Descarbonização

A indústria destaca-se pelo seu papel decisivo ao nível da redução de emissões de poluentes atmosféricos, por via da modernização da sua atividade e dos seus processos, surgindo como um elemento-chave nesta transição. Por este motivo é fundamental garantir a articulação da atuação da comunidade industrial com as políticas climáticas, aproveitando sinergias e alinhando medidas que incidam simultaneamente nos poluentes atmosféricos e nos GEE.

O setor metalúrgico e metalomecânico, desempenha um papel fundamental na economia global, sendo responsável pelo fabrico de produtos essenciais para diversas indústrias, como a construção civil, automóvel, aeroespacial e tecnologia. Contudo, este setor é também um dos mais intensivos em emissões de dióxido de carbono (CO_2), devido ao elevado consumo energético e à utilização de combustíveis fósseis nos seus processos produtivos.

As indústrias metalúrgicas, incluindo a produção de aço, alumínio e outros metais, contribuem significativamente para as emissões globais de gases com efeito de estufa (GEE). Por exemplo, a produção de aço é responsável por cerca de 7% das emissões globais de CO_2, devido ao uso de carvão nos altos-fornos. Além disso, a extração e o processamento de metais acarretam impactos ambientais significativos, como a degradação do solo e a contaminação dos recursos hídricos.

A União Europeia (UE) é responsável por cerca de 10% da produção mundial de aço, concentrada em países como Alemanha, Itália, França e Espanha. Em 2021, a produção europeia de aço gerou cerca de 140 milhões de toneladas de CO_2, o que representa 4% das emissões totais da UE.

Portugal possui uma indústria metalúrgica de menor dimensão em comparação com outros países europeus, mas desempenha um papel estratégico em segmentos especializados, como a produção de aço inoxidável em unidades como a Siderurgia Nacional, com uma capacidade de produção de cerca de 500 mil toneladas anuais ou a transformação de metais para exportação, com uma forte ligação às indústrias automóvel e de construção da União Europeia.

O setor metalúrgico em Portugal contribui para cerca de 5% das emissões industriais do país, devido à dependência de eletricidade de fontes fósseis.

O setor tem adotado diversas estratégias para reduzir as suas emissões e tornar-se mais sustentável:

1. **Substituição de Combustíveis Fósseis:** A utilização de combustíveis verdes como fonte de energia no processo de fabrico do aço está a ganhar tração. Projetos como o "H2 Green Steel" na Europa são exemplos promissores.
2. **Eletrificação dos processos industriais:** Esta é uma estratégia crucial para a descarbonização do SMM permitindo substituir fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis por eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, tendo em conta a crescente produção de energia limpa, que já representa cerca de 60% do mix energético, esta mudança cria condições favoráveis para acelerar esta transição, tornando a eletrificação uma solução viável e alinhada com os objetivos de neutralidade carbónica.
3. **Eficiência Energética:** Melhorias nos processos industriais, como o reaproveitamento de calor residual e o uso de fornos elétricos mais eficientes, podem reduzir significativamente o consumo energético.
4. **Captura e Armazenamento de Carbono (CCS):** A captura de emissões diretamente nas instalações industriais é uma solução emergente para mitigar os impactos ambientais.

Existe, assim, no setor industrial, potencial para melhorar o desempenho ambiental, energético e material, por via da aposta na eficiência energética, nas fontes de energia renovável, na eletrificação, nos combustíveis alternativos limpos, nos processos e tecnologias de baixo carbono, nas simbioses industriais de energia, na dinamização de polos de inovação e na criação de novos modelos de negócio, de novos processos, produtos e serviços direcionados para a sociedade do futuro, apostando também no maior conhecimento e capacitação dos agentes.

Neste sentido, e considerando que o processo de descarbonização é uma estratégia emergente, mas de atuação continuada, torna-se fundamental o envolvimento das empresas, de modo a atingir a neutralidade carbónica do setor.

4.1.3. Economia Circular

Uma outra estratégia para a implementação da sustentabilidade assenta na adoção de medidas de Economia Circular.

O SMM é responsável pela circulação de matérias-primas essenciais para uma ampla gama de indústrias, desde a construção civil até à produção de bens de consumo, desempenhando um papel crucial na transição para uma economia circular a nível global, como já referido.

A economia circular é um modelo económico que procura a transição de cadeias de valor lineares de produtos, baseadas no processo de «extrair – produzir – usar – descartar», para cadeias de valor circulares, com o objetivo de diminuir a extração de recursos naturais, priorizando estratégias de redução, reutilização e reciclagem de produtos e matérias-primas, de forma a reduzir e eliminar os resíduos gerados e manter os recursos em circulação.

No SMM, a eficiência do uso dos materiais e a reciclagem são práticas de circularidade essenciais. Uma economia circular, mais eficiente no uso de recursos, contribui para o desenvolvimento de uma economia mais sustentável, garantindo a utilização eficiente de recursos naturais e aumentando a preservação ambiental.

O SMM é um dos setores com grande impacte ambiental, sendo responsável por aproximadamente 7% das emissões globais de dióxido de carbono (CO_2). Estas emissões estão relacionadas maioritariamente com a extração de matéria-prima e energia consumida no processo transformação do metal, dado que ocorre a temperaturas elevadas. Adicionalmente, a maior parte da produção ainda depende de combustíveis fósseis como fonte de energia e de redutores para processar o minério de ferro.

Para que este setor se torne sustentável e com pegada climática neutra, será necessário tomar medidas para acelerar a transição para uma economia circular. Isso inclui o recorrer a energias renováveis e processos de produção mais eficientes, com utilização das melhores tecnologias disponíveis, investimento em projetos de eficiência energética e o incremento da quantidade de metal reciclado.

A circularidade, baseada nos princípios de repensar, reduzir, redesenhar, reutilizar, reparar e reciclar, propõe uma mudança fundamental do paradigma do modelo económico atual, com o objetivo de minimizar o desperdício e prolongar o ciclo de vida dos materiais. No fabrico de produtos, é importante destacar que, para que a implementação de estratégias circulares e sustentáveis possua um impacte ambiental significativo, devem ser consideradas não só a fase de produção do produto, mas também os processos a montante (extração, transformação e transporte de matérias-primas) e a jusante (uso e gestão de resíduos) (Figura 5).

Idealmente, deve ser repensada a necessidade de extração, transformação e produção e, simultaneamente, reduzir e projetar novos produtos com menor incorporação de material, peso mais reduzido, baixa toxicidade, alta resistência e de fácil reparação e remanufactura.

A adoção da circularidade possibilita uma produção mais eficiente e ambientalmente sustentável, reduzindo a pegada ecológica e otimizando o uso de recursos. Esta abordagem permite prolongar o tempo de vida útil dos produtos e garantir um fluxo contínuo de materiais entre as fases de utilização final e de produção. Consequentemente, minimiza-se a necessidade de matéria-prima virgem, ao reaproveitar materiais no fim do seu ciclo de vida para novas aplicações, olhando para os resíduos como potenciais subprodutos, reduzindo assim, a necessidade de extração de novos materiais. Em consonância com estes princípios, é imperativo também transitar dos combustíveis fósseis para fontes de energia renovável, de forma a melhorar o desempenho ambiental, diminuindo essa dependência e promovendo a sustentabilidade. Transformar o sistema de produção para reter o valor máximo de um produto através de ciclos contínuos na sua

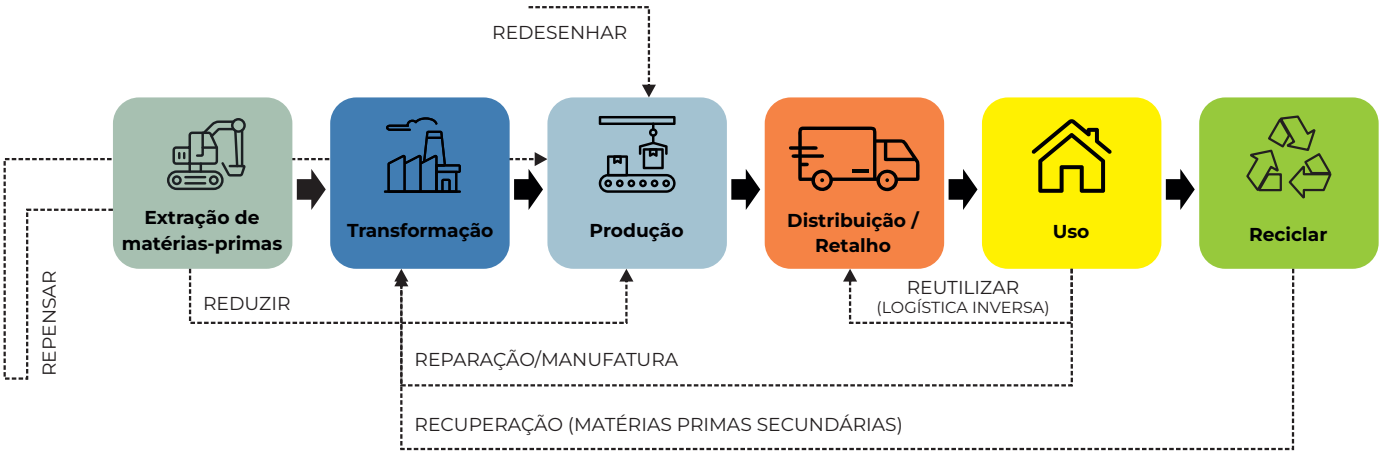


Figura 5 - Os sete princípios da economia circular no setor metalúrgico e metalomecânico.

cadeia de valor, enquanto se reduz ou elimina desperdícios, irá contribuir para um desenvolvimento sustentável, aportando benefícios para as empresas, sociedade e meio ambiente.

No contexto do SMM, a circularidade apresenta oportunidades significativas para repensar os processos de produção, a gestão de resíduos e a utilização de recursos, contribuindo para a redução do impacte ambiental do setor, refletindo-se em ganhos económicos associados à maior eficiência no uso de recursos dos processos.

A reciclagem de metais, por exemplo, economiza até 20 vezes (ou seja, entre 60 e 95%) a energia necessária quando comparada com a extração desses metais a partir de minérios, conseguindo a preservação da sua qualidade. Isso impacta diretamente os custos de reprocessamento desses metais em produtos finais.



Figura 6 - Estratégias de economia circular
(Fonte: Plano de Ação para a Economia Circular no setor metalúrgico e metalomecânico, LNEG, 2019)

Assim, a produção de metais a partir de matérias-primas secundárias reduz significativamente as emissões de CO_2 em comparação com a produção primária (mineração), além de reduzir significativamente o impacte ambiental nos recursos hídricos e no solo. Utilizar metal reciclado em vez de minérios virgens, recursos esses finitos, contribui para uma redução da poluição do ar na ordem dos 80%, da poluição da água em 76% e do uso de água em 40%.

Pensamento do Ciclo de Vida

Existindo atualmente a necessidade de quantificar as emissões por gases de efeito de estufa (GEE) e os impactos ambientais, sociais e económicos advindos do ciclo de vida do produto ou do processo, as ferramentas do Pensamento do Ciclo de Vida (*Life Cycle Thinking*) tornam-se essenciais para a transparência da sustentabilidade. Este tipo de análise permite compreender o impacte real de cada fase da vida de um produto, permitindo tomadas de decisão mais assertivas, por exemplo, relativas aos tipos de materiais a incorporar num produto.

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma metodologia que permite quantificar os impactes ambientais ao longo de toda a cadeia de valor de um produto, sendo possível englobar uma ou várias etapas, desde a extração de matéria-prima até ao processamento de materiais, produção, distribuição, uso e fim de vida. A definição de fronteiras irá também estabelecer a amplitude do estudo, podendo incluir todos os processos, em contexto de "*cradle to cradle*" ou excluir parcelas do sistema, sendo assim designado "*cradle to grave*" ou "*cradle to gate*" como apresentado na Figura 7.

A avaliação do ciclo de vida tem como objetivo contribuir para a compreensão das consequências ambientais associadas às atividades humanas. Fornece aos responsáveis e decisores informações detalhadas que explicam os efeitos ambientais dessas atividades, permitindo a identificação de oportunidades de melhoria. Esta metodologia auxilia assim, no desenvolvimento de novos produtos, processos, métodos e sistemas de transporte que sejam mais eficientes e mais sustentáveis do ponto de vista

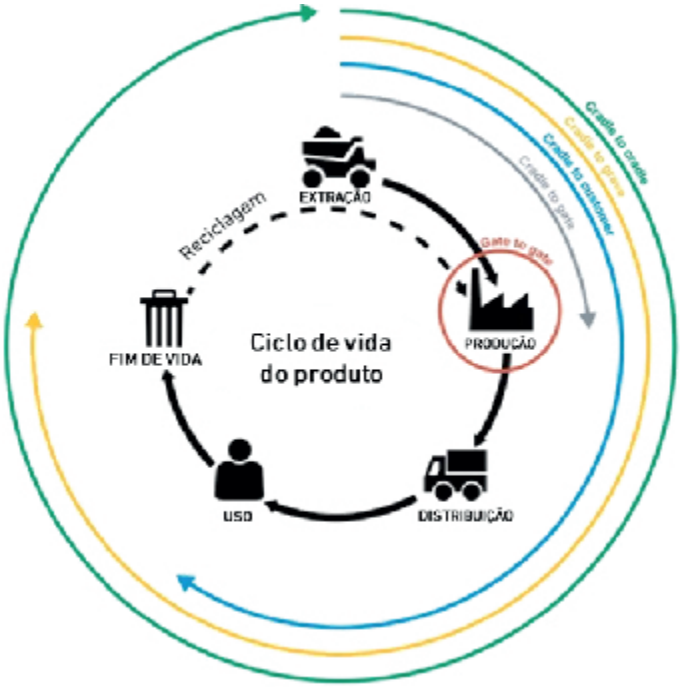


Figura 7- Perspetiva do ciclo de vida de um produto.

ambiental. Adicionalmente, a metodologia de cálculo apresenta uma base fidedigna para divulgação de resultados de carácter ambiental pela organização aos seus stakeholders. Por fim, cria uma base sólida para a determinação de novos investimentos, orientando decisões que promovam a sustenta-bilidade.

Por sua vez, a avaliação de ciclo de custos (ACC) é uma avaliação de todos os custos relacionados com um produto ou serviço ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a produção até ao respetivo uso ou até ao seu descarte. É uma técnica muito usada para prever e avaliar o desempenho de custos e é muito relevante para os produtos que apresentam uma longa vida útil e/ou elevados custos de manutenção, uso ou descarte.

A realização de ACV e ACC no setor do metal proporciona assim uma abordagem holística para a identificação de pontos críticos e o direcionamento de ações para melhorar o desempenho ambiental e económico dos produtos. Estas avaliações são fundamentais para promover a circularidade, incitando a fechar os ciclos de materiais e a reduzir impactes ambientais e custos ao longo do ciclo de vida dos produtos.

Com o objetivo de perspetivar e apoiar a execução de medidas de economia circular no setor metalúrgico e metalomecânico, o plano de ação para a circularidade, apresentado na secção seguinte, contribuirá para a identificação de oportunidades e implementação de práticas inovadoras de economia circular e sustenta-bilidade com enfâse na promoção da diferenciação e da competitividade das empresas da indústria metalúrgica e metalomecânica no contexto nacional. Recorrendo a uma análise generalista, serão apresentados os principais aspetos que contribuem para a implementação da circularidade adequados ao setor.

4.1.4. Roteiros: o que são e a sua importância

Os roteiros para a neutralidade, enquanto planos estratégicos, definem os caminhos para atingir a neutralidade carbónica. Elaborados por governos, setores ou empresas, estabelecem de uma forma sustentada, a trajetória para a redução de emissão de GEE.

Os roteiros de neutralidade setoriais são cruciais para alinhar os objetivos e ações com as metas globais de sustentabilidade, como as estabelecidas no Acordo de Paris. Desta forma, contribuem para a transição para uma economia neutra em carbono, impulsionando a adoção das melhores práticas e incentivando a busca por soluções inovadoras e tecnologias limpas.

As empresas que adotam roteiros de neutralidade estão mais preparadas para gerir potenciais riscos ambientais, nomeadamente climáticos, garantir a conformidade da regulamentação atual e futura relacionada com a sustentabilidade e ação climática, e aumentar a sua competitividade empresarial.

A elaboração de roteiros envolve a participação das partes interessadas, como governos e entidades públicas, associações setoriais, empresas, universidades e centros tecnológicos, garantindo uma abordagem inclusiva, considerações de diversas fontes de conhecimento e diferentes perspetivas.

Globalmente a análise de roteiros adotados, fornece uma visão abrangente das melhores práticas internacionais, permitindo identificar estratégias eficazes já implementadas por outros setores e países. Esta análise comparativa oferece uma orientação fundamental para definir o presente roteiro, adaptando essas boas-práticas ao contexto do setor metalúrgico e metalomecânico português. Existem no mercado vários estudos com abordagens diferentes, com rumo à neutralidade carbónica, e que serviram de base para compreender e poder integrar no setor metalúrgico e metalomecânico:

- ***Moving towards Zero-Emission Steel, Technologies Available, Prospects, Timeline and Costs, Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies at the request of the committee on Industry, Research and Energy (ITRE), 2021:*** o estudo avalia os possíveis caminhos de descarbonização da indústria siderúrgica europeia à luz do conjunto de medidas "*Fit for 55*" da Comissão Europeia, analisando as opções tecnológicas disponíveis, os cronogramas para alcançar essas metas, os custos envolvidos e a adequação das fontes de financiamento existentes. O documento mostra que as opções baseadas apenas nos processos de produção existentes têm um potencial limitado para alcançar as reduções de emissões necessárias. As opções de descarbonização total exigirão a disponibilidade generalizada de eletricidade verde, hidrogénio e/ou infraestrutura de CCS/ CCUS (*Carbon Capture, Utilization, and Storage)*. As recomendações incluem investi-mentos em inovação, e mecanismos de apoio financeiro para facilitar a transição para uma indústria siderúrgica sustentável e de baixo carbono.
- ***Low Carbon Roadmap Pathways to a Co2-Neutral European Steel Industry, Eurofer – The European Stell Association,* 2019:** o documento define um plano estratégico para alcançar a neutralidade carbónica na indústria siderúrgica europeia. Essa transição exigirá investimentos significativos no desenvolvimento e implementação de novas tecnologias, na infraestrutura energética, no consumo e no tipo de energia, além de exigir acesso a materiais de alta qualidade, como ferro e sucata. A indústria siderúrgica europeia poderia reduzir as emissões de carbono entre 80-95% até 2050, através de novos caminhos tecnológicos, porém os custos totais de produção podem aumentar entre 35-100% por tonelada de aço como resultado dos custos do uso de novas tecnologias e de mais energia.
- ***Industrial Decarbonization Roadmap, US Department of Energy, 2022:*** é um plano estratégico para reduzir as emissões de carbono no setor industrial, que é responsável por uma parte significativa das emissões totais do país. O *roadmap* visa atingir uma descarbonização abrangente até 2050 e foca-se em quatro pilares-chave para alcançar esse objetivo: a) eficiência energética dos processos industriais atuais, b) eletrificação, principalmente dos processos térmicos, c) combustíveis, matérias-primas e fontes de energia de baixo carbono, d) tecnologias de captura e armazenamento de carbono.

  Para o setor do aço e ferro nos EUA, as emissões GEE podem ser praticamente anuladas em 2050, apesar da previsão do aumento de 12% na produção do aço. O documento refere que neste setor, mais de dois terços da redução das emissões de GEE vêm da melhoria na eficiência energética, da mudança para combustíveis de carbono reduzido e eletrificação. Serão necessários esforços significativos no desenvolvimento de I&D e na implementação de tecnologias inovadoras.
- ***Net-zero Roadmap for China's Steel Industry, Global Efficiency Intelligence, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2023:*** o documento analisa o estado atual da indústria de aço na China e desenvolve cenários para 2050, avaliando diferentes caminhos de descarbonização que possam reduzir substancialmente as emissões de CO_2. A análise inclui cinco pilares principais de descarbonização: a) redução da procura do mercado, b) eficiência energética, c) troca de combustíveis, eletrificação e descarbonização da rede elétrica, d) mudança

tecnológica para produção de aço de baixo carbono, e) captura, utilização e armazenamento de carbono. A análise mostra que, no cenário de negócios atual, com a redução da procura de aço, a melhoria moderada na eficiência energética, o desenvolvimento tecnológico e descarbonização da rede elétrica, as emissões anuais de CO_2 poderão diminuir em 54% entre 2020 e 2050. O cenário *Net-Zero* exige uma adoção sem precedentes de tecnologias de baixo carbono, que vão desde melhorias na eficiência energética até à adoção em larga escala de tecnologias de descarbonização e produção com baixo carbono, passando pela mudança para o fabrico de aço secundário e o aumento significativo do uso de combustíveis com menor teor de carbono na indústria de ferro e aço da China.

- ***JISF long-term vision for climate change mitigation, A challenge towards zero-carbon steel, The Japan Iron and Steel Federation, 2019:*** o documento apresenta a estratégia da JISF para alcançar uma produção de aço neutra em emissões de carbono até 2100. São definidas metas ambiciosas para reduzir as emissões de CO_2 da indústria siderúrgica japonesa, enfatizando a necessidade de inovação tecnológica, a adoção de novos processos de fabrico com baixo carbono e produtos de alta performance. O documento inclui a previsão da procura e fornecimento de aço no Japão, apresenta quatro cenários de longo-prazo de mitigação das emissões de GEE os desafios inerentes, a) atividade como o habitual (?) (*business as usual)*, b) melhores tecnologias disponíveis, c) máximo de introdução de tecnologias inovadoras, d) desenvolvimento de tecnologias superinovadoras.

São de referir também a existência a nível internacional de algumas estruturas standardizadas, de apoio a esta temática:

- ***Science Based Targets initiative (SBTi) NetZero Standard,*** sendo esta, o principal referencial a nível internacional que fornece diretrizes detalhadas no desenvolvimento de roteiros de neutralidade, para que seja possível estabelecer metas robustas e trajetórias eficazes.
- A ***ISO Net Zero Guidelines*** - ISO IWA 42:2022 fornece princípios orientadores e recomendações para permitir uma abordagem comum e global na obtenção de emissões líquidas zero, através do alinhamento de iniciativas voluntárias e da adoção de normas, políticas e regulamentações nacionais e internacionais;
- A **norma ISO 14068-1:2023** fornece princípios, requisitos e orientações para alcançar e demonstrar a neutralidade de carbono. Utiliza uma abordagem hierárquica que prioriza a redução direta e indireta das emissões e o aumento das remoções dentro da cadeia de valor, em vez da compensação.



4.2. Estrutura do Roteiro

O presente roteiro segue uma metodologia robusta e estruturada com o objetivo de fornecer uma clara e eficaz orientação às empresas do setor metalúrgico e metalomecânico português para uma transição para a neutralidade carbónica.

O roteiro foi elaborado usando como referência (porém não de acordo com) o SBTi *NetZero Standard*, o principal referencial internacional que fornece uma orientação clara e consistente para as empresas definirem metas de emissões com base científica.

A definição das metas e trajetórias, bem como a identificação de soluções de mitigação, foram estabelecidas de forma a alinhar os objetivos do setor com os do RNC2050 para a indústria nacional, o que levou à necessidade das devidas adaptações ao referencial SBTi *NetZero*.

Este roteiro segue uma estrutura passo a passo, englobando a sequência ilustrada na figura 8.

A primeira etapa do Roteiro, referente ao Diagnóstico do setor, encontra-se abordada no capítulo 3 deste documento.

As etapas seguintes são indicadas abaixo.

4.2.1. Quantificação das Emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE)

Os gases com efeito de estufa absorvem calor e libertam-no (radiação solar infravermelha) para a atmosfera, funcionando como um "cobertor térmico" que mantém a superfície terrestre a uma temperatura média de aproximadamente 15°C. Esta camada de gases é essencial para tornar a Terra um lugar habitável. Embora os GEE estejam naturalmente presentes na atmosfera, a intensa atividade humana está a aumentar as suas concentrações, afetando o equilíbrio natural do planeta. O aumento da concentração dos GEE materializa-se no impacte ambiental de aquecimento global, também designado por alterações climáticas. Estima-se que as emissões antropogénicas de gases com efeito de estufa tenham provocado, até à data, um aumento de cerca de 1,0°C



Figura 8 - Metodologia passo-a-passo do roteiro CarbonFree_Guide4Metal

acima dos valores pré-industriais.

O Acordo de Paris foi assinado por 196 países, com o objetivo de limitar o aumento da temperatura média mundial a um nível «bem abaixo» dos 2°C em comparação com os valores pré-industriais, e promover esforços para limitar esse aumento a 1,5°C em relação a esses níveis.

Assim, tornou-se imperativo e de extrema importância o cálculo da pegada de carbono, indicador utilizado para avaliar o impacte ambiental das atividades humanas sobre o meio ambiente, nomeadamente da sua contribuição para o aquecimento global e consequentemente para as alterações climáticas.

A pegada de carbono consiste na contabilização das emissões de GEE, onde se incluem o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e os gases fluorados. Como os vários GEE não contribuem de igual forma para o aquecimento global devido aos diferentes mecanismos de remoção e tempos de permanência dos mesmos na atmosfera, cada um possui um potencial de aquecimento global (PAG). O PAG permite a comparação entre as emissões de diversos GEE, convertendo-os em unidades de massa equivalentes de CO_2, gás convencionado como de referência [IPCC, 2006]. A pegada de carbono é obtida pela soma das emissões de GEE após conversão destas para equivalentes de dióxido de carbono (CO_2e).

Para contabilização e reporte das emissões de GEE seguiu-se a metodologia do *Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol)* [WBCSD, WRI, 2004]. Além desta ser a mais amplamente reconhecida e adotada internacionalmente, a metodologia está alinhada com outras iniciativas globais como o Protocolo de Quioto e o Acordo de Paris, promovendo a harmonização dos esforços globais para combater as alterações climáticas. Desenvolvido em parceria com o *World Resources Institute* (WRI) e o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), o GHG *Protocol* publicou diferentes normas para contabilização de GEE, em que cada uma delas define procedimentos para o desenvolvimento e reporte de inventários de GEE, em particular para sistema corporativo, produto e projeto.

Quando aplicada a uma empresa ou, neste caso, setor, a pegada de carbono compreende diversas fontes de emissões, que são organizadas em diferentes âmbitos de categorias com base no facto de serem diretas ou indiretas relativamente à atividade da entidade que reporta.

Tabela 12:
Potenciais de aquecimento global dos principais gases com efeito de estufa libertados pelas atividades antropológicas

Gás com efeito de estufa (GEE)	Fórmula química	PAG a 100 anos [IPCC, 2013]
Dióxido de carbono	CO_2	1
Metano	CH_4	28
Óxido nitroso	N_2O	265

As emissões de gases com efeito de estufa são classificadas como diretas (âmbito 1) se a sua fonte é detida ou controlada pela organização, ou como indiretas (âmbitos 2 e 3) se forem consequentes de atividades da empresa, mas ocorrerem em fontes que são detidas ou controladas por outras entidades. As emissões indiretas de âmbito 2 são resultantes da aquisição e consumo de energia de terceiros e são indiretas uma vez que a emissão de GEE ocorre no produtor da mesma.

As outras emissões indiretas de âmbito 3 resultam da cadeia de valor e dividem-se em 15 categorias, oito das quais referem-se a atividades a montante relacionadas com a aquisição de bens, serviços e pré-processamento, enquanto as restantes sete estão associadas a atividades a jusante da entidade que reporta, incluindo distribuição, uso e fim de vida dos produtos. A contabilização do âmbito 3 é opcional de acordo com a norma do GHG Protocol seguida neste estudo– *Corporate standard* [WBCSD, WRI, 2004]. Ainda que o standard seja orientado para contabilização de emissões de empresas/organizações, este é adaptável para o contexto setorial. Apesar de opcional, a contabilização das emissões de âmbito 3 fornecem um panorama mais completo da pegada de carbono, abrangendo o ciclo de vida do produto, sendo o seu valor frequentemente superior à soma das emissões de âmbitos 1 e 2, dadas as atividades que contemplam.

Na tabela 13 estão descritas as categorias de cada âmbito.

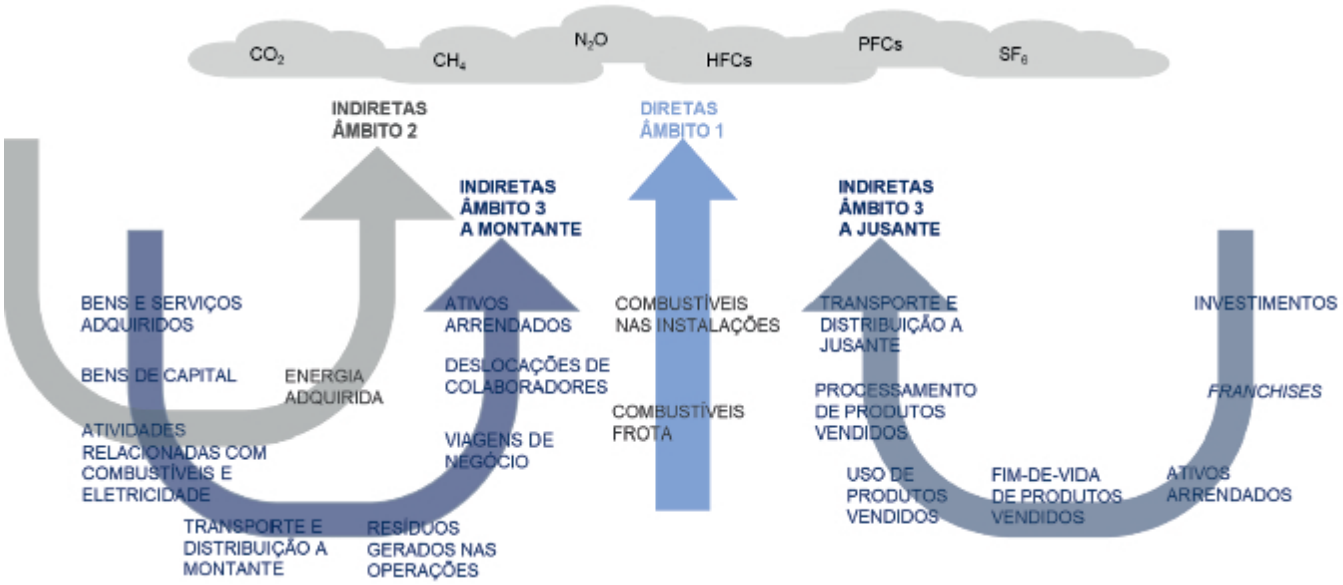


Figura 9 – Representação das diferentes categorias por âmbito de acordo com o Greenhouse Gas Protocol.

Tabela 13:
Categorização e descrição das emissões de GEE de acordo com a metodologia do *Greenhouse Gas Protocol*

Âmbito	Categoria	Descrição
1	Combustão estacionária	Emissões de GEE resultantes da queima de combustíveis em equipamentos estacionários.
	Combustão móvel	Emissões de GEE resultantes da queima de combustíveis em equipamentos móveis.
	Processo	Emissões de GEE associadas a atividades processuais.
	Fugitivas	Emissões de GEE resultantes da fuga de gases fluorados de equipamentos de refrigeração, climatização e supressão de incêndio.
2	Energia adquirida	Emissões de GEE resultantes do consumo de energia adquirida de terceiros.
3	1. Bens e serviços adquiridos	Emissões de GEE da extração e produção de bens e serviços adquiridos.
	2. Bens de capital	Emissões de GEE relativas à produção de bens de capital adquiridos no ano de reporte. Estes podem incluir p.ex. maquinaria, edifícios e veículos.
	3. Atividades relacionadas com combustíveis e electricidade	Emissões de GEE associadas à produção e distribuição de eletricidade e combustíveis como p.ex. perdas na transmissão e distribuição de energia elétrica.
	4. Transporte e distribuição a montante	Emissões de GEE resultantes de atividades associadas ao transporte e distribuição de bens adquiridos entre fornecedores e as instalações em veículos ou instalações que não são propriedade nem controladas por quem reporta.
	5. Resíduos gerados nas operações	Emissões de GEE libertadas aquando do tratamento de resíduos gerados nas operações.
	6. Viagens de negócio	Emissões de GEE resultantes do transporte utilizado em viagens de negócio.
	7. Deslocações de colaboradores	Emissões de GEE associadas aos transportes utilizados nas deslocações casa-trabalho dos colaboradores.
	8. Ativos arrendados	Emissões de GEE da operação de ativos que são arrendados pela entidade que reporta e que não foram incluídos nos âmbitos 1 e 2.
	9. Transporte e distribuição a jusante	Emissões de GEE resultantes de atividades associadas ao transporte e distribuição dos produtos vendidos em veículos ou instalações que não são propriedade nem controlados pela entidade que reporta.
	10. Processamento de produtos vendidos	Emissões de GEE associadas ao processamento de produtos por terceiros.
	11. Uso de produtos vendidos	Emissões de GEE da utilização de produtos vendidos durante a sua vida útil no ano de referência.
	12. Fim-de-vida de produtos vendidos	Emissões de GEE da eliminação ou tratamento de resíduos associados aos produtos vendidos no fim da sua vida útil.
	13. Ativos arrendados	Emissões de GEE da operação de ativos que são propriedade de quem reporta, mas arrendados a outras entidades, e que não foram incluídas nos âmbitos 1 ou 2.
	14. *Franchises*	Emissões de GEE de âmbitos 1 e 2 dos franchisados.
	15. Investimentos	Emissões de GEE resultante de investimentos e que são relevantes para instituições financeiras privadas e públicas.

Neste sentido, o Roteiro do SMM teve por base a contabilização das emissões GEE do grupo de empresas com o CAE 25 e 282.

Com base na metodologia anteriormente referida, seguiram-se as etapas ilustradas na figura 10.



Figura 10 - Principais etapas da pegada de carbono de acordo com o *Greenhouse Gas Protocol*

4.2.2.Objetivos e âmbito

A primeira etapa da pegada de carbono passa por definir os objetivos e âmbito do sistema a avaliar.

Objetivos

A contabilização das emissões de GEE do Roteiro do SMM é uma das principais etapas de um roteiro de descarbonização, pois estabelece uma linha de base para a execução do mesmo. Apenas desta forma será possível estabelecer metas realistas e mensuráveis, bem como desenvolver planos de ação para a redução das emissões ao longo do tempo. A pegada de carbono possibilita ao setor obter uma visão global das suas emissões de GEE atuais e permite identificar as principais fontes de emissões, processos ou atividades que mais contribuem para este indicador de impacte ambiental.

Em suma, os principais objetivos da contabilização das emissões de GEE do Setor Metal incluem:

- Quantificar as emissões de GEE resultantes das atividades do conjunto de empresas dos CAE 25 e 282, incluindo as emissões diretas de âmbito 1, emissões indiretas de âmbitos 2 e 3;
- Entender a contribuição de cada atividade face ao total da pegada de carbono;
- Apresentar resultados que permitam estabelecer o ponto de partida do Roteiro de descarbonização.

Âmbito

Seguidamente, são descritas as delimitações de âmbito consideradas na contabilização das emissões de GEE em termos temporais, organizacionais e operacionais.

Ano base

De acordo com o *GHG Protocol,* deve ser definido o ano base, correspondente ao período da primeira contabilização das emissões de GEE, que serve como ponto de referência para avaliar o progresso das emissões ao longo dos anos considerados no roteiro.

Para o conjunto de empresas dos CAE 25 e 282, selecionou-se o ano base de 2022, embora para alguns dados de atividade se tenham considerado os dados mais recentes disponíveis, referentes a 2021.

Fronteira organizacional

A fronteira organizacional identifica as operações que serão incluídas na contabilização das emissões de GEE. Para tal, deve ser selecionada a abordagem de consolidação que mais se adequa à realidade do estudo.

A abordagem de consolidação, estabelece como devem ser combinadas as emissões de diferentes operações de uma empresa ou entidade. Existem duas abordagens possíveis: por participação de capital ou

por controlo. Na abordagem por participação de capital, a entidade contabiliza as emissões com base na percentagem de propriedade nas operações. Por exemplo, se uma empresa detém 50% do capital de uma fábrica, então deve contabilizar 50% das emissões dessa. Na abordagem de controlo, a entidade que reporta considera a totalidade das emissões das operações que controla, independentemente da sua participação acionária.

O controlo pode ser de duas naturezas: financeiro ou operacional. O controlo financeiro refere-se à capacidade da entidade em dirigir políticas financeiras e operacionais das operações consoante os direitos de voto corporativos e o status da contabilidade financeira. Já o controlo operacional reflete a autoridade da entidade em introduzir, implementar e gerir políticas operacionais, considerando a titularidade da licença de operação e autoridade sobre as operações diárias.

No contexto do Roteiro, a fronteira organizacional refere-se às atividades do SMM, que neste caso abrangem os setores económicos CAE 25 e 282. Os dados que foram recolhidos são referentes ao contexto nacional de ambos os CAE considerados, por isso, a abordagem de consolidação adotada foi a de controlo operacional, contabilizando assim a totalidade das emissões de GEE resultantes das atividades que os subsetores controlam.

Fronteira operacional

A fronteira operacional identifica as fontes de emissão que serão contabilizadas e como serão categorizadas em âmbitos. Na figura 11 apresentam-se as atividades e fontes de emissões consideradas na determinação da pegada de carbono dos CAE 25 e 282 para os três âmbitos, considerados no limite operacional da análise.

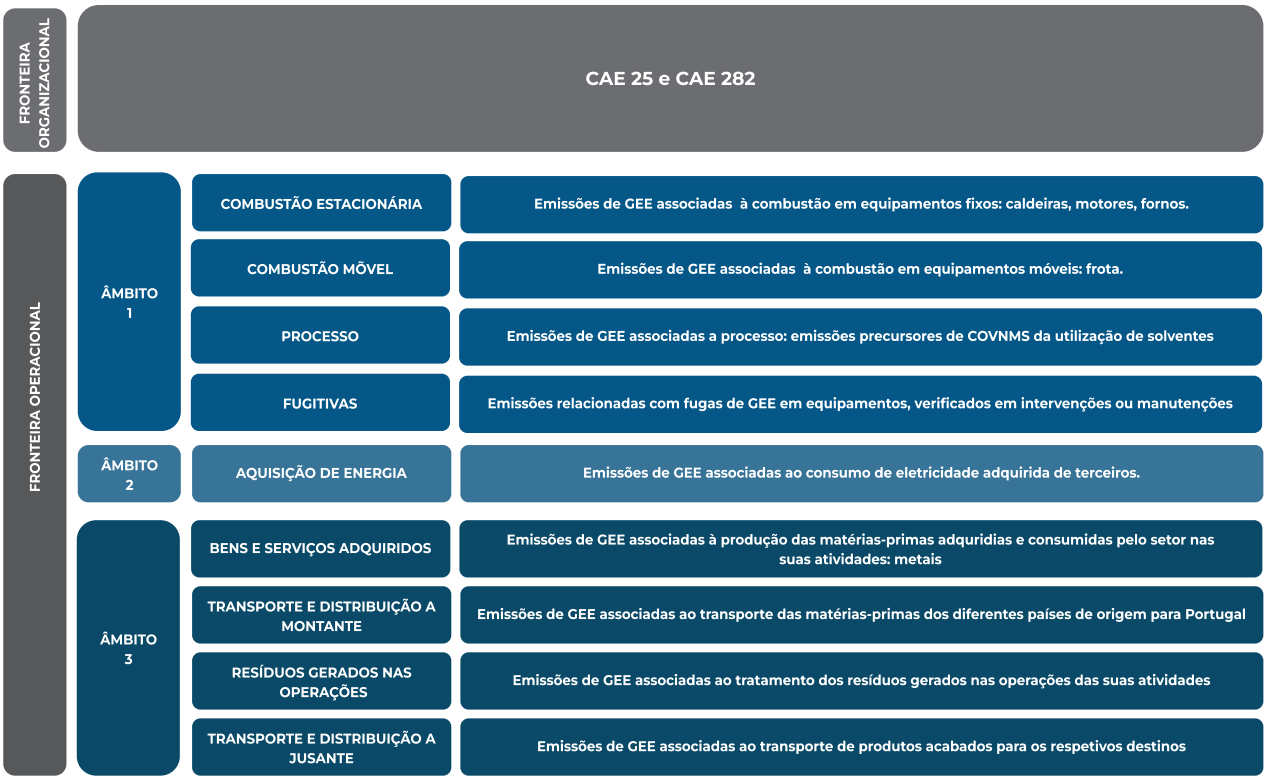


Figura 11 - Representação da fronteira organizacional e operacional consideradas na determinação da pegada de carbono dos subsetores referentes aos CAE 25 e 282.

4.2.3. Recolha de dados e metodologia de cálculo

Após identificação das fontes das emissões a considerar na fronteira operacional definida, segue-se a etapa de recolha de dados de atividade e estabelecimento dos procedimentos de cálculo, que permitirão a quantificação das emissões de GEE.

Os dados de atividade são uma medida quantitativa das operações associadas a uma fonte de emissão, que frequentemente requerem cálculos intermédios e a consideração de pressupostos, para que a contabilização seja praticável e o mais rigorosa possível.

De um modo geral, a recolha de informação da atividade foi realizada através da consulta de dados setoriais de fontes credíveis e reconhecidas, como é o caso da DGEG e do INE, e da recolha de informação direta de uma amostra de empresas dos subsetores CAE 25 e 282 que se refere aos associados da AIMMAP. Desta última, como nem sempre os dados recolhidos eram referentes ao conjunto total das empresas pertencentes à fronteira organizacional definida, CAE 25 e CAE 282, foi necessário recorrer a extrapolações. Em seguida são descritos em detalhe, as fontes dos dados de atividade, pressupostos, metodologias de compilação e metodologias de cálculo adotados.

Adotou-se como abordagem de cálculo global a estimativa, que se obtém a partir da multiplicação dos dados de atividade pelos fatores de emissão adequados, efetuando-se as necessárias conversões e cálculos intermédios para ajuste de unidades. A equação que se segue apresenta a fórmula base para o cálculo das emissões, sendo que as variações à mesma são apresentadas nas respetivas categorias.

Emissões (CO_2eq) = Dado de atividade × Fator de emissão × Potencial de Aquecimento Global

Âmbito 1 – Combustão estacionária, móvel e emissões de processo

Os dados de atividade das fontes de emissão incluídas na combustão estacionária, combustão móvel e de processo de âmbito 1 foram obtidos a partir de duas abordagens:

1) Através de dados sectoriais retirados da DGEG, nomeadamente das "Vendas de Produtos do Petróleo no Mercado Interno por Setor de Atividade Económica e Município em 2021". Estes dados de atividade incluem consumo de butano, propano, gasóleo para aquecimento, petróleo iluminante/carburante, gasóleo rodoviário e solventes. Uma vez que os dados recolhidos se apresentavam em unidades de massa (toneladas), foi necessária a sua conversão para unidades de energia recorrendo ao poder calorífico inferior específico (PCI) de cada combustível, que indica a quantidade de energia libertada por unidade de massa aquando da sua queima, e que são referidos na tabela 14.

Tabela 14:
Poder calorífico inferior dos combustíveis considerados no âmbito 1.

Combustivel	PCI (tep/t) (Conversor SGCIE - DGEG)
Gás de petróleo liquefeito (GPL)	1,099 - 1,130
Gasóleo	1,010 - 1,034
Querosene	1,046

O consumo anual de carvão foi obtido a partir de dados da DGEG, nomeadamente do registo "Balanço do Carvão 2021", que apresenta a quantidade consumida deste combustível em unidades de energia (tep), por atividade. O dado de atividade considerado foi o alocado à categoria de "Consumo final" das atividades "Metálo-eletromecânicas", não sendo, por isso, possível a sua discriminação por subsetor.

2) O consumo de gás natural foi estimado a partir de dados de consumo de empresas associadas da AIMMAP. Embora estes dados reflitam apenas uma amostra das empresas pertencentes aos CAE 25 e 282, realizou-se uma extrapolação destes resultados para todas as empresas dos CAE considerados tendo em conta o Valor Acrescentado Bruto (VAB).

No gráfico 3 é ilustrado a distribuição percentual dos consumos de combustíveis fósseis, onde se observa que a predominância do consumo de gás natural, representando 81% do total, seguido pelo propano e pelo butano, com respetivamente 11% e 4%, do total de consumo.

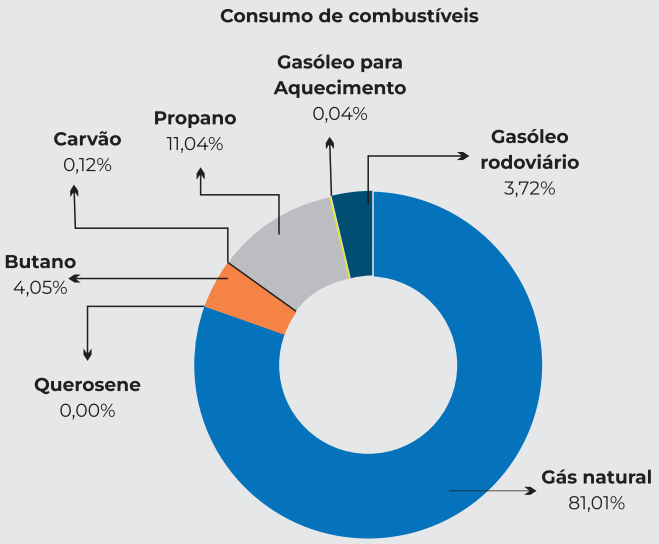


Gráfico 3 – Distribuição percentual do consumo de combustíveis utilizados nos CAE 25 e 282.

As emissões de GEE da combustão (estacionária e móvel) foram determinadas com base no consumo de combustíveis e na aplicação de fatores de emissão específicos para cada combustível, e por cada GEE.

As emissões de GEE resultantes da utilização de solventes foram consideradas como emissões de processo em alinhamento com o *National Inventory Report (NIR)* português. Embora não existam emissões de GEE diretas da utilização destes produtos, de acordo com o documento, Portugal é um dos países que tem vindo a reportar as emissões percursoras (indiretas) de CO_2 das emissões de compostos orgânicos voláteis não metânicos (COVNM), provenientes da utilização de produtos de origem fóssil para atividades que não são de combustão. A utilização de solventes na indústria de metais está tipicamente associada a operações de desengordu-ramento e limpeza de materiais e produtos, comummente realizadas no SMM. De acordo com a metodologia

$$\textit{Emissões GEE}_c\ (t\ CO_2e) = C_c(t) \times PCI_c \left(\frac{tep}{t}\right) \times 41{,}868 \left(\frac{GJ}{tep}\right) \times \sum \left(FE_c \left(\frac{t\ GEE}{GJ}\right) \times PAG_G \left(\frac{t\ GEE}{t\ CO_2e}\right)\right)$$

Onde:

C_c – Quantidade consumida de combustível "c"

PCI_c – Poder calorífico inferior do combustível "c"

FEG_c – Fator de emissão do GEE G (CO_2, CH_4, N_2O) do combustível "c"

PAG_G – Potencial de aquecimento global do GEE "G"

adotada, as emissões resultam da evaporação dos COVNM contidos nos solventes, sendo que o carbono sofre oxidação atmosférica para CO_2. Assume-se que a totalidade dos solventes adquirida/utilizada é evaporada, pelo que a emissão de COVNM é igual à massa de solventes utilizados [IIR]. Na determinação das emissões utilizou-se a metodologia de cálculo do IPCC, que considera que 85% das emissões dos COVNM são carbono que posterior-mente se reflete na formação e presença de CO_2 na atmosfera.

As emissões fugitivas foram determinadas tendo em consideração o potencial de aquecimento global do refrigerante utilizado para recarregar equipamentos no ano de 2022, declarados no formulário de gases fluorados da APA, que considera os equipamentos com uma quantidade superior a 5t CO_2eq.

$$Emissões\ GEE_C(t\ CO_2e) = C_s(t) \times \left(\frac{44}{12}\right) \times 0{,}85$$

Onde,

C_s – Consumo de solventes, em toneladas, que equivale às emissões de COVNM.

$$Emissões\ GEE_F(t\ CO_2e) = C_R(t) \times PAG_R$$

Onde:

C_R – Consumo de gás refrigerante, em toneladas.

PAG_R – Potencial de aquecimento global do refrigerante utilizado.

Âmbito 2 – Eletricidade adquirida

Neste âmbito, os dados de atividade foram obtidos pelo consumo de eletricidade apurado a partir de amostragem representativa dos associados da AIMMAP e pela sua extrapolação para o conjunto total de empresas dos subsetores tendo em conta o VAB. Considerando que o CAE 25 possui um número consideravelmente superior de empresas em comparação com o CAE 282, era já esperada a preponderância das organizações do CAE 25 no consumo deste vetor energético (91% do consumo de eletricidade do SMM), conforme se ilustra no gráfico 4.

Para determinação das emissões do âmbito 2 utilizou-se a abordagem *location-based,* que requer a utilização de um fator de emissão que tem em consideração a produção de energia elétrica fornecida na rede nacional. [APA].

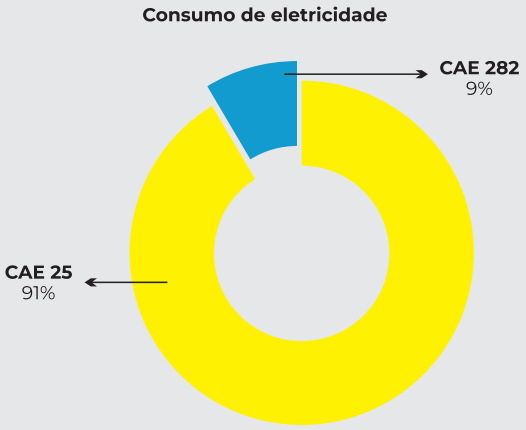


Gráfico 4 - Distribuição do consumo de eletricidade pelos CAE 25 e 282.

$$Emissões\ GEE_E\ (t\ CO_2e) = C_E \times FE_E$$

Onde:

C_E – Consumo de eletricidade, em unidades de energia

FE_E – Fator de emissão de eletricidade, em t CO2e/unidade de energia

Âmbito 3

De acordo com a norma seguida, *Corporate Standard*, o âmbito 3 é de contabilização e reporte opcional. De acordo com a informação setorial disponível, foram selecionadas as categorias de âmbito 3, apresentadas nos pontos seguintes.

Bens e serviços adquiridos

Para a devida análise à categoria bens e serviços adquiridos, foi possível obter dados relativos às importações de matéria-prima da nomenclatura combinada NC8 no ano de 2022, nomeadamente peso, país de origem e meio de transporte, por CAE [INE]. Dessa listagem, consideraram-se as quantidades e os respetivos fatores de emissão dos principais metais que fazem parte do inventário de matéria-prima importada, que correspondem a 86% da quantidade total de matérias-primas importadas do CAE 25. Apesar de existirem informações semelhantes para o CAE 282, a determinação das emissões associadas à produção de matéria-prima importada deste subsetor não foi possível devido à complexidade da sua composição. Enquanto no CAE 25 as matérias-primas são, na maioria, metais comuns, como se encontra ilustrado no gráfico 5, no CAE 282 tratam-se de produtos intermédios ou finais constituídos por muitas partes/componentes, para os quais não se conhece o tipo de material, impossibilitando a seleção de fatores de emissão adequados. Do total de matéria-prima importada, 90% corresponde a matéria-prima adquirida por organizações do CAE 25. Assim, e apesar da limitação referida, ainda foi possível determinar as emissões para uma amostra representativa.

As emissões de GEE das matérias-primas foram obtidas pela multiplicação da quantidade das principais matérias-primas importadas pelos respetivos fatores de emissão específicos para cada material.

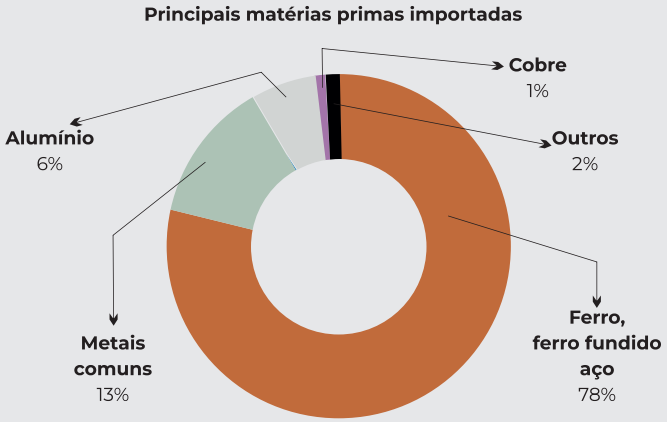


Gráfico 5 - Distribuição percentual das principais matérias-primas importadas pelos subsetores CAE 25.

$$Emissões\ GEE_{MP}\ (t\ CO_2e) = \sum (C_{MP}\ X\ FE_{MP})$$

Onde,

C_{MP} – Consumo de matérias-primas, em toneladas;

FE_{MP} – Fator de emissão específico de cada matéria-prima, em toneladas de CO2e/tonelada de matéria-prima.

Transporte e distribuição a montante

Na categoria de transporte e distribuição a montante incluíram-se emissões relativas ao transporte de matéria-prima. Os dados de atividade foram extraídos a partir do INE, mas dada a elevada quantidade de matérias-primas e diferentes origens para cada uma destas, teve-se em consideração os principais bens importados de cada CAE, o que reflete cerca de 79% do total de importações. Espanha, Itália e China destacam-se como os países de origem das importações mais significativas de matérias-primas para os CAE 25 e 282 (gráfico 6).

Para o cálculo das emissões associadas ao transporte, considerou-se assim a quantidade importada, a distância entre capitais dos países de origem e destino e o respetivo fator de emissão associado ao meio de transporte considerado.

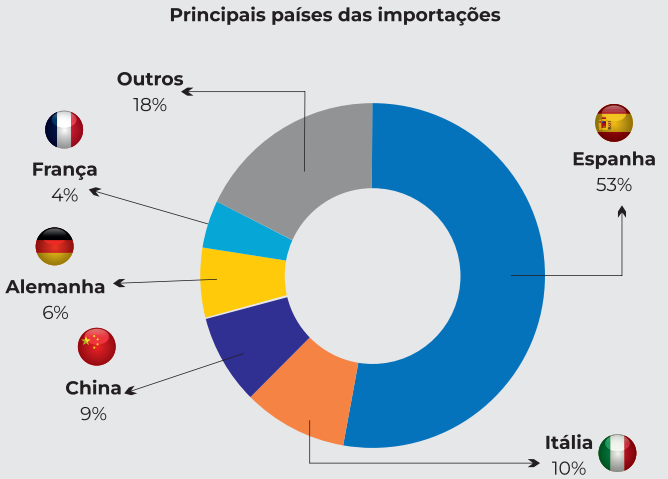


Gráfico 6 - Distribuição percentual das principais matérias-primas importadas (ferro fundido, ferro e aço) pelos países de origem.

$$Emissões\ GEE_T\ (t\ CO_2e) = \sum (C_{MP} \times D \times FE_T)$$

Onde,

C_{MP} – Consumo de matéria-prima importada, em toneladas;

D – Distância percorrida, em km;

FE_T – Fator de emissão específico do tipo de transporte utilizado, (em toneladas CO_2e/(tonelada transportada x km percorrido)

Resíduos gerados nas operações – Calcular emissões de GEE, tira resíduos

A quantidade de resíduos gerados em Portugal por produtores cuja atividade se enquadra nos CAE 25 e 282, e respetivo tipo de resíduo (código LER) e operação de tratamento, foram obtidos a partir dos dados compilados do formulário B (produção de resíduos) do Mapa Integrado de Gestão de Resíduos (MIRR), referente ao ano de 2022, cedidos pela Agência Portuguesa do Ambiente, I.P..

Estes dados permitiram contabilizar as emissões associadas a esta categoria de âmbito 3, nomeadamente à gestão dos resíduos gerados nas atividades do SMM. Aquando da pesquisa de fatores de emissão adequados a cada resíduo e operação, verificou-se uma elevada lacuna na informação disponível em termos de operação específica a que cada tipo de resíduo é sujeito, pelo que apenas foram possíveis obter fatores de emissão genéricos. Para se ultrapassar este obstáculo e reduzir-se a tipologia de resíduos a avaliar, considerou-se 80% dos resíduos declarados no MIRR 2022 (gráfico 7).

Para determinação das emissões de GEE foram, assim,

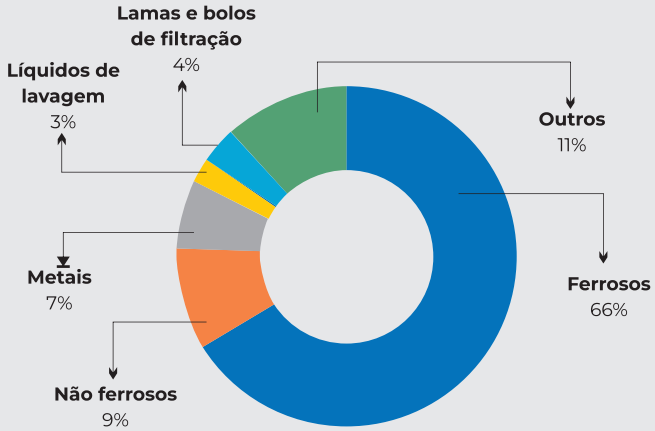


Gráfico 7 – Principais resíduos gerados nas atividades inerentes aos subsetores CAE 25 e 282.

utilizados fatores de emissão genéricos para cada tipo de resíduo e operação de gestão, consoante disponibilidade nas bases de dados consultadas [Ecoinvent; EC, 2001].

Transporte e distribuição a jusante

Nesta categoria, a quantidade de produtos exportados, por CAE e respetivo destino, foram obtidos a partir de dados disponibilizados pelo INE. Na inventariação dos dados de atividade, por existirem bastantes destinos de exportação, reduziu-se a amostragem, considerando-se os países de destino para onde são exportadas maiores quantidades, e que representam 83% do total das exportações.

O gráfico 8 representa os destinos e respetiva ponderação percentual de exportações, do setor, destacando-se como países de destino Espanha, França e Estados Unidos da América

Para o cálculo das emissões de GEE do transporte considerou-se a carga transportada, em toneladas, distância entre capitais do país de origem (Portugal) e do país de destino, e o respetivo meio de transporte utilizado. Os fatores de emissão para os tipos de transporte considerados foram obtidos da base de dados do *Ecoinvent*.

4.2.4.Seleção de fatores de emissão

Na seleção de fatores de emissão, seguiu-se um fluxo de decisão de forma a garantir a maior proximidade com a realidade do setor considerando a disponibilidade de dados, precisão e relevância possível para os objetivos do estudo: privilegiou-se a utilização de fatores de emissão específicos, quer quanto à atividade ou processo, quer quanto à região geográfica. Apenas perante a indisponibilidade de fatores de emissão específicos se recorreu a fatores de emissão padrão, que refletem valores médios, apesar de obtidos a partir de fontes credíveis e apropriadas ao estudo.

Na tabela 14 apresentam-se os fatores de emissão utilizados e respetiva fonte.

$$\textit{Emissões GEET (t } CO_2e) = \sum (R_i \times FE_R)$$

Onde:

R_i – quantidade de resíduo "i" gerado, em toneladas;

FE_R – Fator de emissão do respetivo resíduo e operação de tratamento, em toneladas de CO2e/tonelada de resíduo.

Principais destinos das exportações

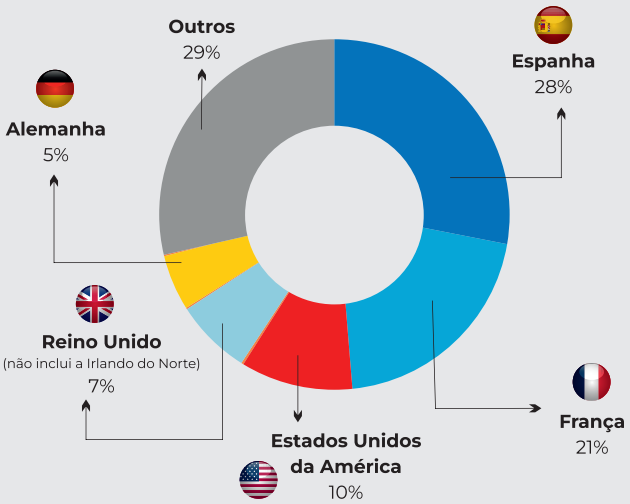


Gráfico 8 - Distribuição percentual das exportações pelos principais destinos dos CAE 25 e 282.

$$\textit{Emissões GEE}_T \textit{ (ton } CO_2e) = \sum (E \times D \times FE_T)$$

Onde:

E – Quantidade exportada, em toneladas;

D – Distância percorrida, em km;

FE_T – Fator de emissão específico do tipo de transporte utilizado, em toneladas de CO_2e/(toneladas transportadas x km percorridos).

Tabela 14:
Fatores de emissão considerados em cada categoria dos âmbitos 1, 2 e 3.

Âmbito	Fonte de emissões de GEE	Fatores de emissão consideradas	Fonte dos fatores de emissão
1. Emissões Diretas	Gás natural	CO_2: 56,4 kg/GJ; CH_4: 1,0 g/GJ; N_2O: 1,0 g/GJ	
	Butano	CO_2: 63,1 kg/GJ; CH_4: 0,9 g/GJ; N_2O: 4,0 g/GJ	NIR, 2023, APA
	Propano		
	Gasóleo para aquecimento	CO_2: 74,1 kg/GJ; CH_4: 3 g/GJ; N_2O: 0,6 g/GJ	
	Carvão	Co_2e: 95,25kg/GJ (1);	Despacho n.º 17313/2008
	Gasóleo rodoviário	CO_2: 74,1 kg/GJ; CH_4: 4,2 g/GJ; N_2O: 28,6 g/GJ	NIR, 2023, APA
	Solventes	Co_2: 1 kg/GJ	IPCC, 2006
	Gases fluorados (refrigerantes)	R-134a: 1300 kg/kg CO_2 R-407c: 1624,21 kg/kg CO_2 R-410a: 1923,5 kg/kg CO_2 R-422d: 2473 kg/kg CO_2 R-453a: 1636,34 kg/kg CO_2 R-513a: 573 kg/kg CO_2	IPCC, AR5
2. Emissões Indiretas	Eletricidade	CO_2e: 0,151 t/MWh	Fator de emissão da eletricidade, 2023, Portugal, APA
3. . Outras Emissões Indiretas	Produção de ferro fundido, ferro e aço	CO_2e: 3,18kg/kg (2)	Ecoinvent, EC,2001
	Produção de alumínio	Co_2e: 19,36 kg/kg	
	Produção de cobre	Co_2e: 0,71 kg/kg	
	Produção de metais comuns (3)	Co_2e: 14,54 kg/kg	
	Produção de crómio	Co_2e: 27,80 kg/kg	
	Produção de molibdénio	Co_2e: 16,98 kg/kg	
	Produção de estanho	Co_2e: 10,72 kg/kg	
	Produção de níquel	Co_2e: 4,19 kg/kg	
	Produção de titânio	Co_2e: 49,43 kg/kg	
	Produção de tungsténio	Co_2e: 5,68 kg/kg	
	Importação (transporte)	Rodoviário:CO_2e: 0,152 kg/tkm Marítimo:CO_2e: 0,010 kg/tkm Aéreo:CO_2e: 0,837 kg/tkm	
	Tratamento de aparas e limalhas de metais ferrosos	CO_2e: 0,005 kg/kg	
	Tratamento de aparas e limalhas de metais não ferrosos	Co_2e: 0,036 kg/kg	

Tabela 14:
Fatores de emissão considerados em cada categoria dos âmbitos 1, 2 e 3 (cont.)

Âmbito	Fonte de emissões de GEE	Fatores de emissão consideradas	Fonte dos fatores de emissão
3. . Outras Emissões Indiretas	Tratamento de metais e embalagens de metal	Co_2e: 0,021 kg/kg	Ecoinvent, EC,2001
	Tratamento de líquidos de lavagem aquosos contendo substâncias perigosas	Co_2e: 0,490 kg/kg	
	Tratamento de ácidos de decapagem (perigoso)	Operação D|CO_2e: 0,490 kg/kg Operação R|CO_2e: 0,237 kg/kg	
	Tratamento de lamas de outros tratamentos de águas residuais industriais	Co_2e: 0,237 kg/kg	
	Tratamento de embalagens de papel e cartão	Co_2e: 0,01 kg/kg	
	Tratamento de outros resíduos urbanos e equiparados, incluindo misturas de resíduos	Operação D|CO_2e: 0,237 kg/kg Operação R|CO_2e: 0,003 kg/kg	
	Tratamento de materiais de construção contendo amianto (perigoso)	Co_2e: 0,237 kg/kg	
	Tratamento de embalagens de madeira	Co_2e: 0,030 kg/kg	
	Tratamento de emulsões e soluções de maquinagem sem halogéneos. (perigoso)	Co_2e: 0,490 kg/kg	
	Tratamento de poeiras e partículas de metais ferrosos	Co_2e: 0,004 kg/kg	
	Tratamento de lamas e bolos de filtração	Co_2e: 0,237 kg/kg	
	Exportações (transporte)	Rodoviário: CO_2e: 0,152 kg/kg Marítimo: CO_2e: 0,010 kg/kg Aéreo: CO_2e: 0,837 kg/tkm	

(1) Como o carvão utilizado é hulha, antracite ou coque, o fator de emissão (FE) utilizado foi obtido pela média entre o FE do carvão betuminoso e o FE do sub-betuminoso.

(2). No caso do ferro fundido, ferro e aço, o fator de emissão utilizado foi obtido através da média entre os fatores de emissão do ferro fundido e do aço.

(3) Para todas as matérias-primas de metais comuns considerou-se a média dos fatores de emissão dos metais comuns.



4.2.5.Cálculo de emissões e interpretação

Com base nas etapas descritas anteriormente, neste subcapítulo são apresentados os resultados detalhados e a interpretação das emissões de GEE consideradas na contabilização da pegada de carbono do SMM, que proporcionam uma análise ao impacte ambiental associado às atividades do grupo de empresas dos CAE 25 e 282.

A tabela 15 apresenta os resultados obtidos do inventário de emissões de GEE nos subsetores CAE 25 e 282 discriminados por âmbito e por categoria.

No ano de 2022, no setor metalomecânico, os CAE 25 e 282, foram responsáveis pela emissão de 4.773 kt CO_2e, sendo estas emissões de GEE relativas aos âmbitos 1, 2 e a categorias de âmbito 3. A grande maioria das emissões de GEE do setor são emissões de âmbito 3, representando cerca de 92,9% das emissões totais, seguido pelo âmbito 1 e 2, com 4,1% e 3,0% respetivamente.

Tabela 15:
Resumo dos resultados das emissões de GEE em kt CO_2e por categoria e âmbito.

Âmbito	Categoria	Total Emissões de GEE kt CO_2e/âmbito	% do Total	Total Emissões de GEE kt CO_2e/categoria	% do Total
1	Estacionárias	197	4,1%	186	3,9%
	Móveis			10	0,2%
	Processo			0*	0,0%
	Fugitivas			0*	0,0%
2	Eletricidade	141	3,0%	141	3,0%
3	Bens e serviços adquiridos	4.434	92,9%	4.101	85,9%
	Transporte e distribuição a montante			130	2,7%
	Resíduos gerados nas operações			10	0,2%
	Transporte e distribuição a jusante			193	4,0%
	TOTAL	**4.773**			**100%**

**O valor "zero" corresponde ao devido arredondamento à unidade, sendo o valor 0,2kt CO2e para emissões de processo e de 0,5 kt CO2e para emissões fugitivas.*

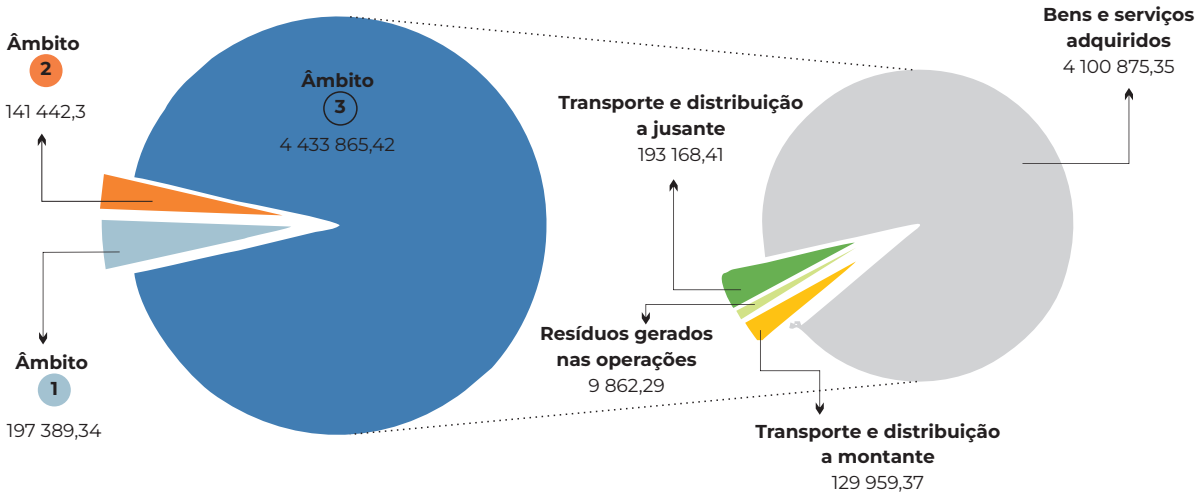


Gráfico 9 - Distribuição das emissões de GEE dos subsetores CAE 25 e 282 por âmbito e distribuição do âmbito mais dominante (âmbito 3) pelas categorias consideradas (t Co_2e).

Emissões diretas de âmbito 1

As fontes de GEE associadas ao âmbito 1, combustão estacionária, combustão móvel e emissões de processo são responsáveis pela emissão de 196.389,34t CO_2e de GEE, que representam 4,1% das emissões totais de GEE dos CAE em estudo.

No gráfico 10 são apresentadas as emissões de GEE das diferentes categorias de âmbito 1, em que a combustão estacionária se destaca como o grupo de fontes de emissão mais significativo, com uma representação de cerca de 95% das emissões de GEE totais do âmbito.

Da análise da contribuição de cada um dos combustíveis fósseis utilizados nas atividades de combustão (estacionária e móvel) verifica-se que o gás natural é o maior responsável de emissões de GEE, com uma contribuição de 78% das emissões totais do âmbito, seguido do propano e gasóleo rodoviário com 12% e 5%, respetivamente.

Tabela 16:
Distribuição de emissões de âmbito 1 e tabela resumo discriminada por GEEs e por CAE.

CAE	Categoria	Combustível	Co_2e (t CO_2e)
25		Gás natural	145.812,45
282			7.796,09
25		Butano	8.676,52
282			11,98
25	Combustão estacionária	Propano	18.461,20
282			5.211,30
25		Gasóleo aquecimento	92,25
282			57,26
25		Querosene	3,16
25 e 282		Carvão	374,97
25	Combustão móvel	Gasóleo rodoviário	8.946,01
282			1.235,50
25 e 282	Processo	Solventes	196,35
25	Fugitivas	-	507,40
282		-	6,89
		TOTAL	**197.389,34**

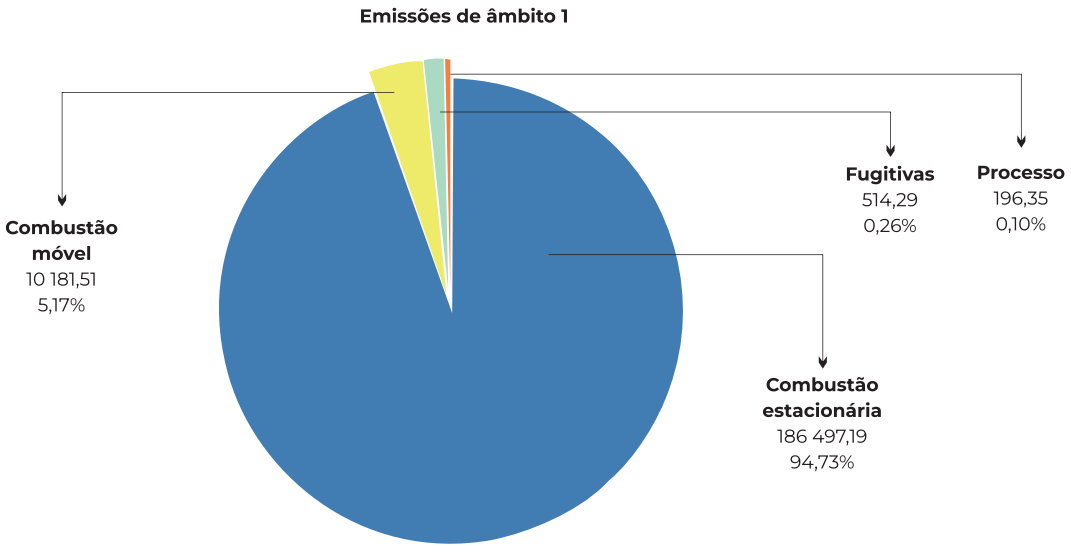


Gráfico 10 – Distribuição das emissões de âmbito 1 por categoria (t CO_2e)

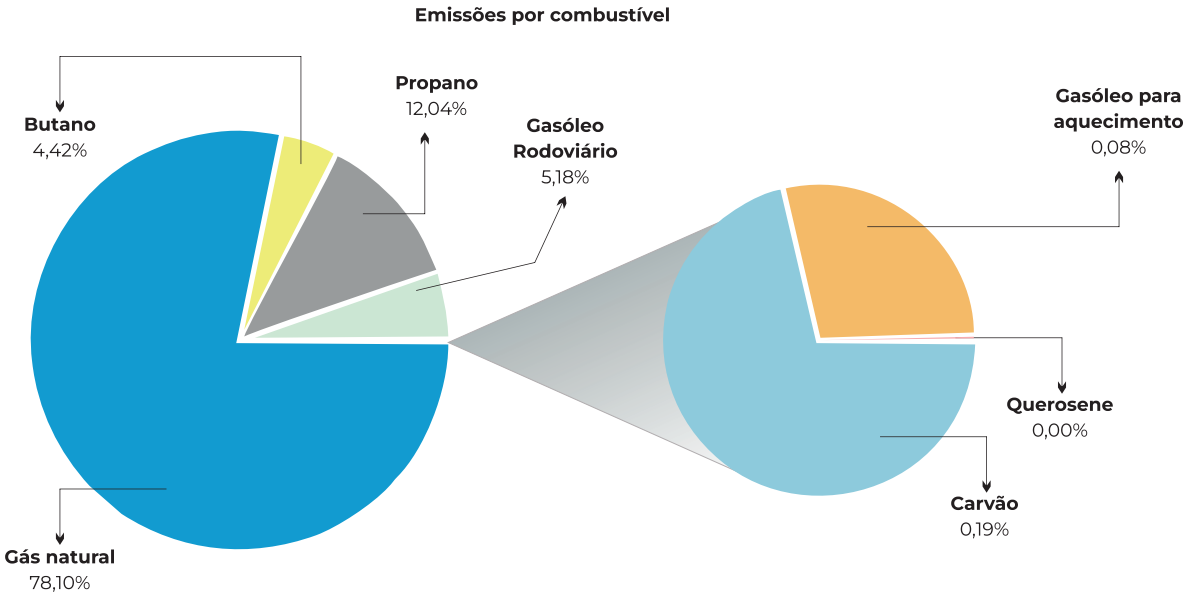


Gráfico 11 – Distribuição das emissões de combustão estacionária e móvel por combustível fóssil (t CO_2e)

Combustão Estacionária

A combustão estacionária é uma das três categorias consideradas no âmbito 1 e representa 94,7% do total do mesmo, sendo responsável pela emissão de 186.497,19 t CO_2e. As emissões relativas à combustão de gás natural, representam 82,4% do total das emissões de combustão estacionária, seguindo-se as emissões pela combustão do propano com 12,7% e do butano com 4,7%. Os restantes combustíveis são menos representativos, com menos de 1% das emissões de GEE da categoria, conforme a tabela 17.

Combustão Móvel

Na categoria de combustão móvel considerou-se o consumo de gasóleo rodoviário na frota, que é responsável pela emissão de 10.181,51 t CO_2e de GEE, representando 5,2% das emissões de âmbito 1.

Emissões de Processo

Como descrito anteriormente na secção Recolha de dados e metodologia de cálculo, as emissões processuais nas indústrias do CAE 25 e 282 estão associadas à

Tabela 17:
Distribuição das emissões de combustão estacionária por combustível (t CO_2e)

Combustível	Emissões de GEE (t CO_2e)	% do total do âmbito
Gás natural	153.608,55	82,4%
Butano	8.688,50	4,7%
Propano	23.672,50	12,7%
Gasóleo colorido	149,51	0,1%
Carvão	347,97	0,2%
Querosene	3,16	0,0%
TOTAL	**186.497,19**	**100%**

utilização de solventes nas suas atividades. O total da categoria resulta na emissão de 196,35 t Co_2e.

Emissões Fugitivas

As emissões fugitivas referem-se a perdas de gases fluorados em equipamentos de climatização, refrigeração e supressão de incêndio. O total da categoria resulta na emissão de 514,29 t CO_2e.

Emissões indiretas de âmbito 2

A categoria que reflete o consumo de eletricidade adquirida por terceiros é responsável pela emissão de 141.422,30 t CO_2e, representando 3% das emissões totais de GEE dos subsetores considerados. A análise da distribuição das emissões de âmbito 2 por CAE revela que o CAE 25 é predominante, com uma representação de 91% do total das emissões deste âmbito (gráfico 12).

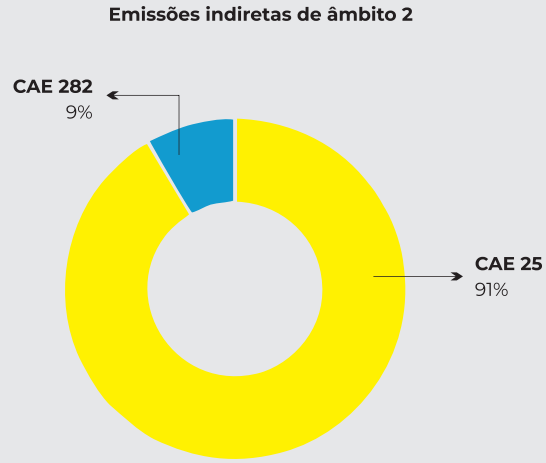


Gráfico 12 - Emissões de GEE de âmbito 2 distribuídas pelos subsetores do SMM (t CO_2e)

Emissões indiretas de âmbito 3

As emissões de GEE de âmbito 3 referem-se às fontes de emissão na cadeia de valor, que representam 92,9% das emissões totais dos CAE's em estudo, para as quais contribuem as categorias de bens e serviços adquiridos, transporte e distribuição a montante, resíduos gerados nas operações e transporte e distribuição a jusante.

Âmbito 3 – Bens e serviços adquiridos

Na categoria de bens e serviços adquiridos teve-se em consideração a aquisição de matérias-primas pelas empresas do CAE 25. Esta categoria é a que mais contribui para a pegada de carbono, sendo responsável pela emissão de 4.100.875,35 t CO_2e, que representa 92,5% das emissões totais de âmbito 3 e 85,9% das emissões totais dos subsetores considerados. As emissões desta categoria devem-se principalmente à

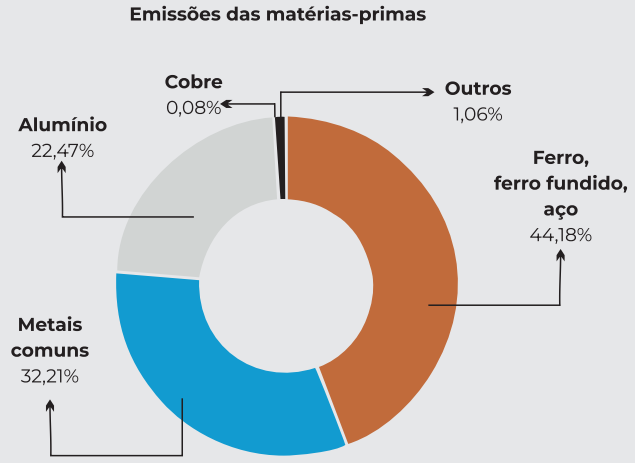


Gráfico 13 – Distribuição percentual das emissões de GEE das principais matérias-primas importadas pelo CAE 25

produção das matérias-primas mais utilizadas – ferro, ferro fundido e aço - que em conjunto refletem 44,2% das emissões da categoria.

Âmbito 3 – Transporte e distribuição a montante

Na categoria de transporte e distribuição a montante determinaram-se as emissões associadas ao transporte das principais matérias-primas (importações). Como referido previamente no subcapítulo Recolha de dados e metodologias de cálculo, devido à grande variedade de matérias-primas, suas diversas origens e meios de transporte, considerou-se o transporte dos bens importados com maior peso, que representam 79% do total das importações.

O transporte e distribuição a montante resulta na emissão de 129.959,37 t CO_2e, que corresponde a 2,7% do total das emissões de GEE dos subsetores considerados do SMM. No gráfico 14 são apresentados os resultados das emissões da importação de matérias-primas por país de origem, sendo que o grupo "Outros" envolve 99 países. Destaca-se o mercado europeu como principal responsável das emissões desta categoria, em particular Espanha, Itália, Alemanha, França e Países Baixos.

A análise da contribuição de cada meio de transporte utilizado nas atividades de transporte e distribuição a montante revela que o transporte rodoviário é o maior responsável pelas emissões de GEE, contribuindo com 84% do total das emissões nesta categoria, seguindo-se o transporte marítimo com 13% e, finalmente, o transporte aéreo com 3% das emissões (gráfico 15).

Da divisão das emissões do transporte e distribuição a montante, verifica-se o domínio do CAE 25 com uma representação de 88% das emissões da categoria.

Emissões de GEE por país de importação

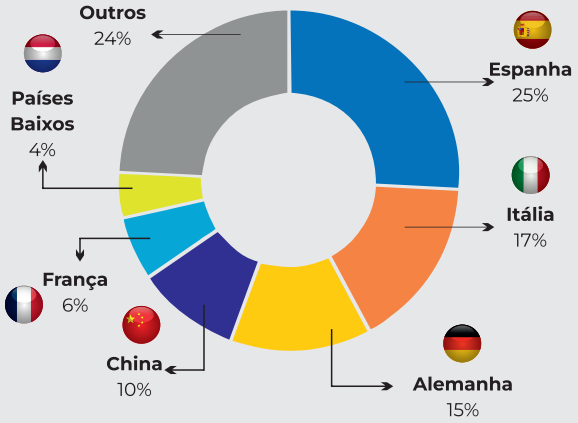


Gráfico 14 – Distribuição das emissões de GEE pelos principais países de importação.

Emissões das importações por transporte

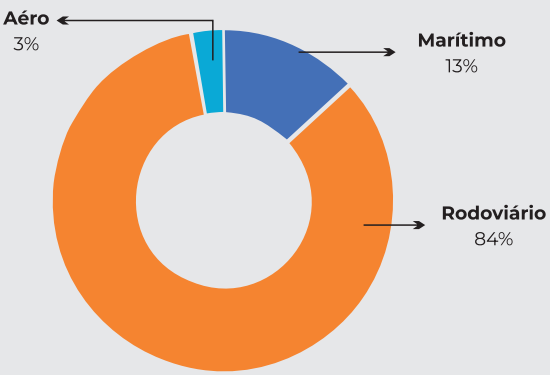


Gráfico 15 - Emissões de GEE do transporte e distribuição a montante desagregadas por meio de transporte (t CO_2e)

Emissões do transporte a montante por CAE

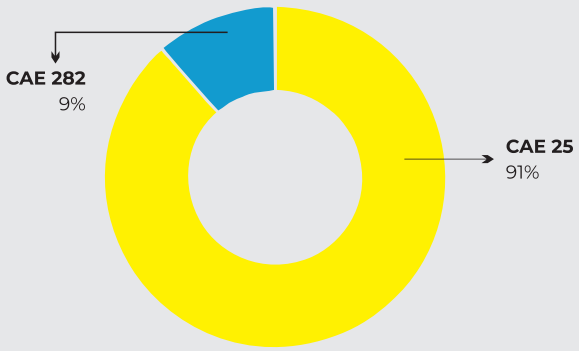


Gráfico 16 – Distribuição das emissões de transporte e distribuição a montante por CAE

Âmbito 3 – Resíduos gerados nas operações

A categoria de resíduos gerados nas operações reflete as emissões de GEE provenientes do tipo de tratamento a que o resíduo é sujeito. Nesta consideraram-se 80% da quantidade total de resíduos declarados no Mapa Integrado de Registo de Resíduos (MIRR). As emissões da categoria resultaram na emissão de um total de 9.862,29 t CO_2e, que contribui para apenas 0,2% das emissões totais. No gráfico 17 apresenta-se a distribuição percentual das emissões, de acordo com o tipo de resíduo.

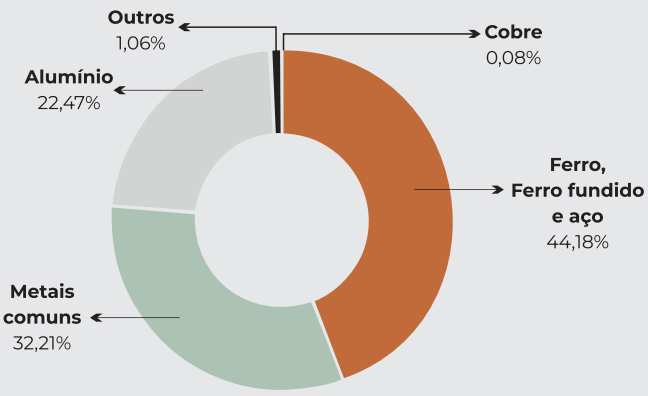


Gráfico 17 – Distribuição das emissões de GEE por tipo de resíduo.

Âmbito 3 – Transporte e distribuição a jusante

A exportação de produtos foi considerada na categoria de âmbito 3 respeitante ao transporte e distribuição a jusante. O resultado global das emissões de exportações de ambos os subsetores considerados, totaliza 193.168,41 t CO_2e, o que representa 4% das emissões globais de GEE dos CAE 25 e 282. Os países de destino e a sua representatividade estão ilustrados no gráfico 18.

Conforme se pode verificar no gráfico 18, França, Alemanha e Espanha destacam-se como os países de destino de exportações com maior parcela de emissões associadas a esse transporte.

Nesta categoria, realizou-se a análise da distribuição das emissões de GEE por tipo de transporte utilizado nas exportações, tendo sido possível constatar que o transporte rodoviário domina a contribuição para as emissões totais da categoria, representando 88%, seguido do transporte marítimo com 11% e do transporte aéreo com 1%, conforme apresentado no gráfico 19.

Da análise das emissões do transporte e distribuição a jusante por CAE, destaca-se mais uma vez o CAE 25 como dominante, com 97% do total de emissões desta categoria (gráfico 20).

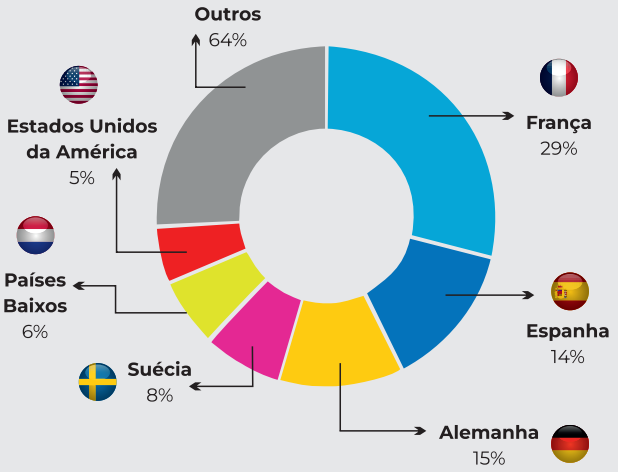


Gráfico 18 – Distribuição das emissões de GEE do transporte a jusante por país de destino.

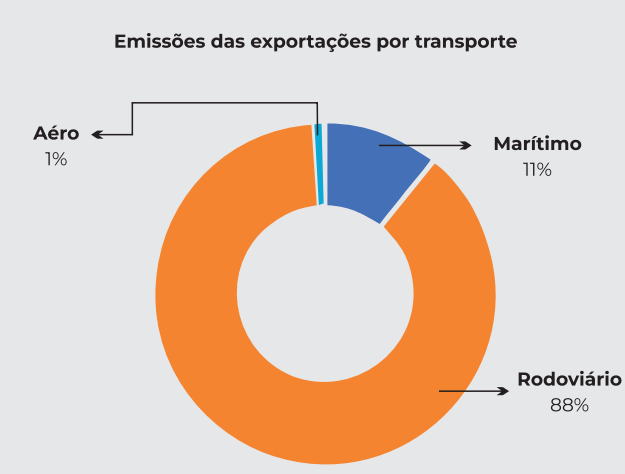


Gráfico 19 - Distribuição das emissões das exportações por tipo de transporte utilizado

Emissões de GEE por subsetor

Apesar da intenção de apresentar os resultados segmentados por subsetor, alguns dos dados disponíveis referem-se ao global e não estão detalhados de acordo com os subsetores CAE 25 e 282. Assim, por não se conseguir desagregar a informação disponível, a análise não abrangeu as emissões oriundas da combustão de carvão (374,87 t CO_2e) e das emissões processuais (196,35 t CO_2e) do âmbito 1, nem a categoria de resíduos de âmbito 3 (9.862,29 t CO_2e). Além disso, salienta-se que na categoria de bens e serviços adquiridos só foram consideradas as matérias -primas referentes ao CAE 25, pelo que esta categoria também não foi aqui analisada (4.100.875,35 t CO_2e) (gráfico 21).

A avaliação realizada permitiu avaliar, conforme se pode verificar no gráfico 21, que o peso de cada âmbito nos subsetores considerados difere ligeiramente, verificando-se maior variação na representatividade das categorias de âmbito 3. As emissões de âmbito 3 são dominantes tanto no CAE 25 como no 282, com uma representação de 49% e 45% respetivamente, em relação ao total das emissões de GEE consideradas (660.873,81 t CO_2e). Uma das grandes diferenças entre a proporção das fontes de emissão face ao total entre os dois CAE está relacionada com as emissões do transporte a montante e a jusante. No caso do CAE 25, o peso (em toneladas) do transporte a jusante é superior ao do transporte a montante, enquanto para o CAE 282 se verifica o contrário. Como a carga é, a par da distância, determinante no cálculo das emissões associadas ao transporte, observa-se uma maior proporção de emissões do transporte a montante no CAE 282, enquanto no CAE 25 prevalece uma maior proporção do transporte a jusante.

Da distribuição das emissões de GEE pelos subsetores considerados do SMM, verifica-se o domínio do CAE 25 – Fabricação de produtos metálicos, exceto máquinas e equipamentos - no total das emissões de GEE da avaliação (93%), conforme o gráfico 21 e tendo-se em consideração a devida exclusão das fontes de emissão que não foram possíveis de desagregar (combustão de carvão - combustão estacionária, consumo de solventes - emissões de processo, resíduos gerados e matérias-primas adquiridas), do SMM pelos subsetores considerados.

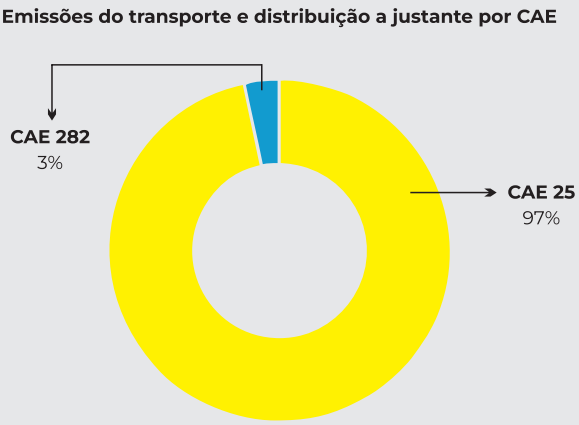


Gráfico 20 – Distribuição das emissões de GEE do transporte e distribuição a jusante por CAE

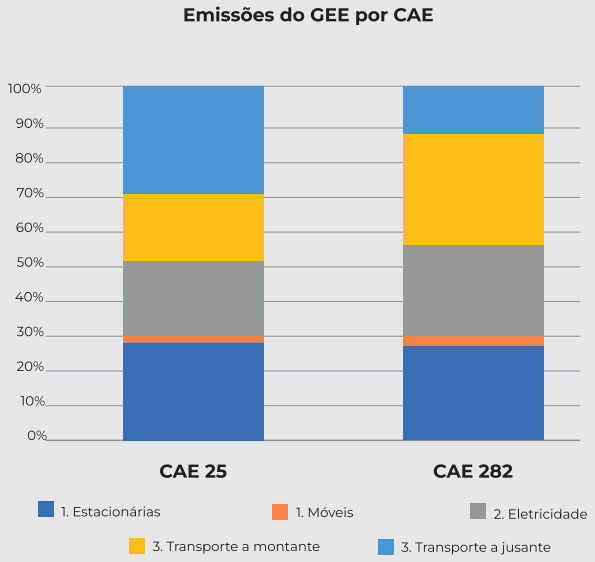


Gráfico 21 – Emissões de GEE distribuídas pelos subsetores do SMM

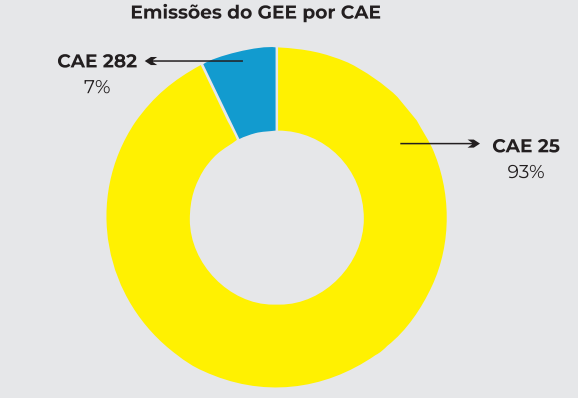


Gráfico 22 – Distribuição das emissões de GEE dos âmbitos 1, 2 e 3

4.2.6. Análise de incerteza

No cálculo das emissões de GEE para este Roteiro realizou-se uma análise de incerteza qualitativa. Com os dados disponíveis e a seleção de algumas fontes de informação utilizadas para o inventário, considerou-se que uma avaliação de incerteza quantitativa seria complexa, demorada e ofereceria pouca validade no que diz respeito à incerteza estatística.

Por se tratar de um estudo setorial, a recolha de dados de atividade é um dos constrangimentos na contabilização das emissões de GEE, uma vez que a precisão dos resultados depende diretamente da qualidade e disponibilidade dessas informações. Para muitos dos dados, foi necessário estabelecer procedimentos que envolveram estimativas ou cálculos intermédios com base em pressupostos. Além disso, algumas fontes de emissões não foram consideradas devido a várias limitações nos dados disponíveis. Por isso, os resultados apresentados neste documento devem ser analisados tendo em conta o anteriormente referido.

Em teoria, a melhor abordagem para recolher dados de atividade, que proporcionaria uma contabilização mais fiável e uma menor margem de erro, seria a recolha direta de dados através do contacto com todas as empresas dos CAE 25 e 282. No entanto, devido ao número elevado de empresas a consultar e à diversidade de produtos e atividades envolvidas, essa abordagem não seria viável. Assim, optou-se por restringir a recolha de dados conforme foi descrito anteriormente no subcapítulo "Recolha de dados e metodologia de cálculo".

Relativamente aos fatores de emissão utilizados, estes foram selecionados a partir de fontes oficiais e reconhecidas, embora se tenham assumido alguns pressupostos na seleção daqueles que mais se adequam ao respetivo dado de atividade, de forma a minimizar a incerteza.

Na tabela 18 é apresentada uma análise qualitativa à incerteza, por categoria de fonte de emissões, considerada no cálculo das emissões de GEE.

Tabela 18:
Análise de incerteza qualitativa por categoria

Âmbito	Categoria	Descrição da incerteza
1	Combustão estacionária	O consumo de gás natural foi obtido a partir dos dados disponibilizados pelas empresas associadas da AIMMAP, sendo posteriormente necessária uma extrapolação com base no VAB, para o total de empresas pertencentes ao CAE 25 e 282; Os dados referentes ao consumo de GPL (butano e propano), gasóleo para aquecimento e petróleo iluminante foram obtidos pelo INE, de acordo com o CAE; já o consumo de carvão foi retirado da DGEG, que não discrimina o consumo deste combustível por CAE, mas pelo total das atividades "Metalo-eletro-mecânicas".
	Processo	Nesta categoria foi considerada como fonte de emissões a utilização de solventes, que apesar de não emitirem diretamente GEE, os COVNM libertados sofrem posteriormente oxidação atmosférica, sendo considerados emissões precursoras de GEE (indiretas).
	Combustão móvel	Os dados referentes ao consumo de gasóleo rodoviário foram obtidos através de dados setoriais retirados da DGEG, nomeadamente das "vendas de produtos do petróleo no mercado interno por setor de atividade económica e município em 2021"
	Fugitivas	Foram considerados os dados das empresas dos CAE 25 e 282, declarados no Formulário de Gases Fluorados referente a 2022. Apenas os equipamentos com carga de gás fluorado superior a 5 t CO_2eq são considerados neste formulário.
2	Energia adquirida	Os dados foram disponibilizados pelas empresas associadas da AIMMAP, tendo sido necessário extrapolar o consumo total de eletricidade para todas as empresas dos subsetores do CAE 25 e 282 a partir do VAB.

Tabela 18:
Análise de incerteza qualitativa por categoria (cont.)

Âmbito	Categoria	Descrição da incerteza
3	Bens e serviços adquiridos	Os dados recolhidos foram obtidos através do INE. No entanto, pelo modo como é agregada esta informação, os dados podem não ser totalmente fidedignos na medida em que podem englobar mais do que os CAE considerados. Ainda assim esta foi a abordagem mais viável para os efeitos desejados. Da vasta listagem de importações de matérias-primas importadas por ambos os CAE considerados, apenas foi possível analisar as referentes ao CAE 25. Esta consideração deve-se ao facto da maioria das matérias-primas do CAE 25 serem metais comuns, enquanto as do CAE 282 serem produtos intermédios ou finais mais complexos, que consistem em multi-componentes não discriminados, o que levou à impossibilidade da seleção de um fator de emissão adequado. Do total da matéria-prima importada de ambos os CAE 25 e 282, sendo que 90% corresponde ao primeiro CAE, ainda foi possível determinar as emissões de uma amostra representativa. A grande maioria das matérias-primas consideradas são constituídas por "metais comuns", não sendo indicado o metal específico destas, houve necessidade de assumir uma média dos fatores de emissão dos seguintes metais: ferro, aço, cobre, níquel, alumínio, chumbo, zinco, estanho, tungsténio, molibdénio, tântalo, magnésio, cobalto, cádmio, titânio, zircónio, antimónio, manganês e crómio. Os fatores de emissão dos metais comuns variam bastante, e não se sabendo a ponderação de cada metal nas matérias-primas, pode-se estar a contabilizar, por esta abordagem, mais ou menos emissões do que as reais.
	Transportes e distribuição a montante	Devido à quantidade considerável de tipos de matérias-primas, diferentes origens e meios de transporte, foi necessário limitar a contabilização aos principais bens importados, tendo sido considerado 79% do total de importações. Tipicamente nesta categoria incluem-se mais do que as emissões relativas às importações, mas prevê-se que estas sejam a fonte predominante.
	Resíduos gerados nas operações	Foram considerados os dados das empresas dos CAE 25 e 282, declarados no MIRR 2022. Existem empresas dos CAE referidos que não são obrigadas ao reporte anual. A maior fonte de incerteza nesta categoria de emissões prende-se com a seleção do fator de emissão mais adequado tendo em conta o tipo de resíduo e o tratamento a que este é sujeito. Embora o MIRR contenha a informação sobre o tipo de operação (código), por vezes não é claro o tratamento específico que é dado ao resíduo. Para reduzir as variáveis e ultrapassar esta limitação, considerou-se 80% da quantidade total dos resíduos declarados no MIRR, reduzindo a tipologia de resíduos a avaliar e agrupando-se os mais semelhantes.
	Transporte e distribuição a jusante	Dada a heterogeneidade de produtos exportados, destinos e meios de transporte, foi necessário reduzir os dados a considerar, tendo-se privilegiado o tratamento dos mesmos para destinos de exportação de maiores quantidades de produtos dos subsetores. Assim, nesta categoria considerou-se 83% do total de exportações de ambos os CAE.



4.2.7. Conclusões

A pegada de carbono dos CAE 25 e 282 do SMM resultou na emissão de 4.773 kt CO_2e no ano base. Das categorias analisadas, dentro dos âmbitos de emissões de GEE, verificou-se que o âmbito 3, relativo às emissões indiretas da cadeia de valor, é o responsável pela maior quantidade de GEE emitida, contribuindo para 92,9% do total.

Os âmbitos 1 e 2 contribuem em 4,1% e 3%, respetivamente, para o total de emissões no setor.

Analisando-se mais detalhadamente as emissões contabilizadas, constata-se o ónus significativo da extração e produção das matérias-primas necessárias aos processos produtivos do setor, que contribuem para 85,9% do total.

No âmbito 1, embora as emissões diretas geradas a partir de fontes que o setor detém ou controla tenham uma contribuição insignificante no total das emissões de GEE, são aquelas onde as empresas podem atuar mais facilmente a curto prazo, proporcionando uma maior oportunidade para redução. Neste âmbito identificou-se a combustão estacionária como dominante na emissão de GEE, especialmente devido à queima de gás natural. De salientar que apesar desta constatação, sabe-se que este combustível é o que gera menor quantidade de emissões de GEE, por quantidade de energia, sendo apenas superado pela eletrificação dos equipamentos.

No âmbito 2, a produção de eletricidade consumida representa neste setor um total de emissões de GEE de 141.422,30 t CO_2e, representando 3% das emissões totais. É de salientar que, dos CAE analisados, o CAE 25 tem o maior contributo neste âmbito, representando um total de 91% das emissões.

Conforme já referido, o âmbito 3 contém a maioria das emissões associadas ao SMM, com um total de 4.433.865,42 t CO_2e. A categoria com maior impacte neste âmbito é "Bens e serviços adquiridos" com uma representação percentual de 85,9%, face às restantes categorias "Transporte e distribuição a jusante" (4%), "Transporte e distribuição a montante" (2,7%) e "Resíduos gerados nas operações" (0,2%).

A contabilização das emissões de GEE fornece um relevante contributo para a definição de estratégias de descarbonização no setor. Com base nesta, foi possível extrapolar as emissões para o período 2005-2050, conforme se verifica no ponto seguinte, tendo sido ainda possível identificar focos de interesse em termos de fontes de emissão significativas de GEE.

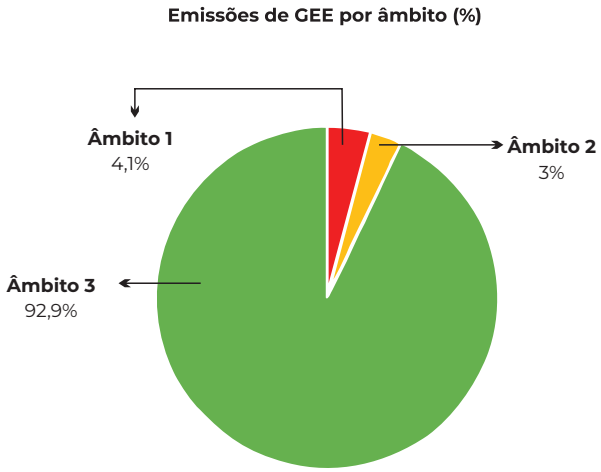


Gráfico 23 - Emissões de GEE por âmbito em percentagem

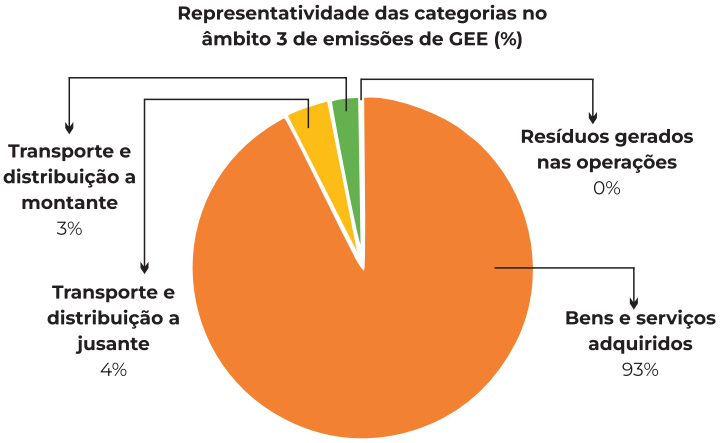


Gráfico 24 – Categorias no âmbito 3 de emissões de GEE (%)

4.3. Definição de metas e trajetórias de redução das emissões de GEE

O processo de redução das emissões de GEE no setor é dividido em metas intermédias para facilitar o acompanhamento do progresso de redução das respetivas emissões. As metas do roteiro foram alinhadas com as que o RNC2050 estabeleceu para o setor da indústria do aço e do ferro, sendo que a neutralidade deve ser atingida em 2050.

O setor definiu metas a curto e longo prazo alinhadas com as metas do RNC2050, para a indústria e processos industriais, e pressupõem uma redução de 50% até 2030 e de 72% das emissões até 2050, face a 2005, de acordo com a tabela 19.

Para as empresas que possuem um controlo operacional, as metas a curto prazo são cruciais para se conseguir reduzir de forma significativa e acelerada as emissões de âmbito 1 e 2. Já as metas a longo prazo, incidem maioritariamente na redução das emissões do âmbito 3, ou seja, da cadeia de valor, o que requer um compromisso global.

As emissões de GEE do setor foram contabilizadas usando 2022 como ano de referência. Para o período 2005-2020 as emissões foram extrapoladas, tendo por base os dados existentes para análise desse período. Para o período 2030-2050, as emissões foram projetadas em linha com as metas do RNC2050 para o setor. No gráfico 25 observa-se a evolução das emissões dos âmbitos 1, 2 e 3 ao longo do período 2005-2050.

Uma vez que existe um maior controlo operacional por parte das empresas nas emissões de âmbito 1 e 2 considera-se que estas devem ser priorizadas numa

Tabela 19:
Metas de redução das emissões de GEE por período

Período	2005	2015	2020	2022	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Metas de redução	—	30%	32%	36%	42,7%	50%	57%	62%	67%	72%

Evolução das emissões de GEE totais

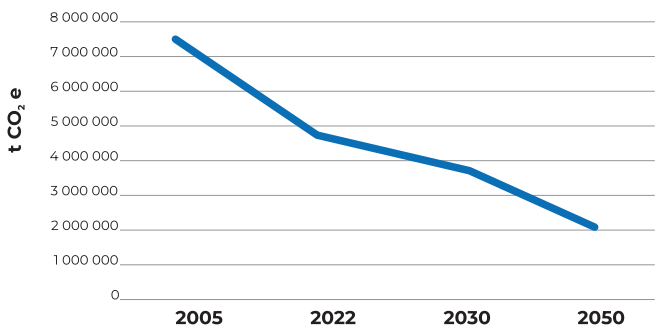


Gráfico 25 – Evolução das emissões de GEE no período 2005-2050

estratégia de neutralidade. Assim, prevê-se que estas reduzam 75% até 2030 e 90% até 2050, face ao total emitido em 2005, conforme se constata no gráfico 26.

As emissões indiretas do âmbito 3, exigem um maior esforço de redução, por não haver controlo direto das empresas, levando a que a sejam implementadas essencialmente medidas a longo prazo, projetando-se uma redução de 48% até 2030 e 70% até 2050, conforme se verifica no gráfico 27.

A estimativa do aumento da procura de mercados em crescimento por produtos deste setor, intensifica a dificuldade de atingir as metas de redução absoluta das emissões do SMM. Entre 2005 e 2022, o setor teve um crescimento do VAB superior a 75%, conforme dados do INE, e estima-se que entre 2022 e 2050 o crescimento seja superior a 50%. Entre 2005 e 2050 estima-se que o crescimento seja de 165%, o que corresponde a um crescimento superior a 3,6%/ano.

Esta evolução significa uma redução especifica de emissões GEE por VAB gerado de 3,1 t CO_2e/€ em 2005 para 1,1 t CO_2e/€ em 2022, de 0,8 t CO_2e/€ em 2030 e de 0,3 t CO_2e/€ em 2050, conforme se verifica no gráfico 28.

Evolução das emissões de GEE âmbito 1 e 2

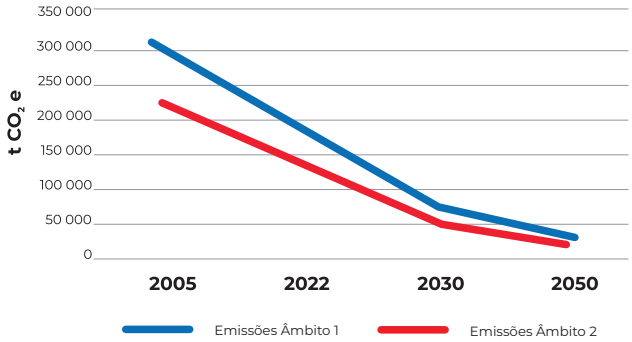


Gráfico 26 – Evolução das emissões de GEE dos âmbitos 1 e 2 no período 2005-2050

Evolução das emissões de GEE âmbito 3

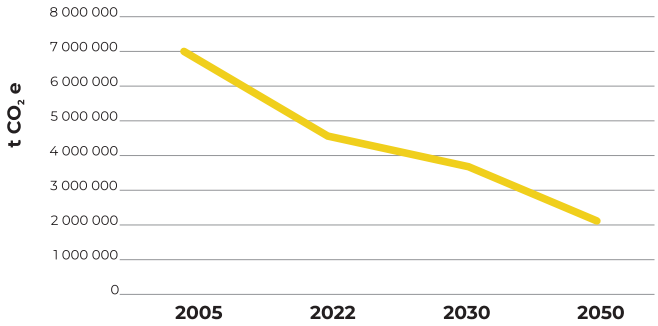


Gráfico 27 – Evolução das emissões de GEE do âmbito 3 no período 2005-2050

Evolução das emissões de GEE vs VAB

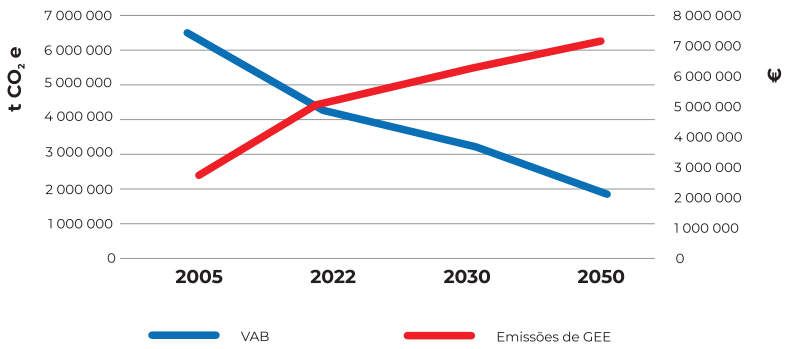


Gráfico 28 – Comparação da evolução das emissões de GEE com o VAB no período 2005-2050

4.4. Mitigação das emissões de GEE

A mitigação de emissões de gases com efeito de estufa é um elemento central para a concretização dos objetivos definidos no roteiro. Nesta fase, são identificadas as soluções que melhor respondem ao desafio de redução permanente das emissões de GEE, considerando os diferentes âmbitos e períodos ao longo da trajetória de descarbonização.

É importante salientar que deverá ser dada prioridade à eliminação definitiva das fontes de emissões ao longo da cadeia de valor, em detrimento de medidas de compensação, as quais deverão ser consideradas apenas de forma complementar e em situações específicas.

A escolha dos mecanismos para a redução de emissões nas diversas atividades e fontes de emissão ao longo da cadeia de valor, deverá ter sempre em conta a sua viabilidade técnica e o respetivo retorno económico, garantindo a sua implementação de forma eficaz e sustentável.

As soluções a curto prazo podem incidir em medidas de eficiência energética, bem como na adoção de tecnologias já consolidadas no mercado. Por sua vez, as soluções de longo prazo exigirão a aposta em tecnologias emergentes, atualmente em desenvolvimento, que possam dar resposta aos desafios futuros da transição climática.

A abordagem à circularidade para o setor metalúrgico e metalomecânico, considerada neste documento, dirige-se especificamente aos fabricantes do setor. Esta baseia-se em seis áreas de ação fundamentais para a sua descarbonização, abrangendo todo o ciclo de vida dos produtos — desde a fase de conceção até à gestão de resíduos no final de vida. São consideradas medidas diretas e indiretas, que contribuam para a redução das emissões e para a transição sustentável do setor.

Identificam-se as áreas abaixo como os principais vetores de ação para a descarbonização e a circularidade do setor Metal:

- Descarbonização pela eficiência energética
- Recuperação de calor residual
- Eletrificação
- Produção de energia por fontes renováveis
- Captura de Carbono
- Utilização de combustíveis verdes
- Descarbonização de tecnologias de produção
- Economia circular: Ecodesign e Eficiência de materiais
- Logística e Processos para Economia Circular
- Gestão de resíduos
- Modelos de negócio circulares
- Inovação
- Capacitação

4.4.1. Descabonização pela eficiência energética

A eficiência energética constitui uma das estratégias mais eficazes para responder aos atuais desafios associados à necessidade de redução do consumo de energia e, consequentemente, à diminuição das emissões de gases com efeito de estufa.

Neste contexto, as medidas de eficiência energética apresentadas na tabela 20 abordam várias áreas, desde isolamento térmico, recuperação de calor residual e até a adoção de equipamentos e sistemas de controlo inteligentes. Estas ações não só beneficiam o meio ambiente, mas também proporcionam maior conforto para os trabalhadores, para além de promoverem uma economia mais sustentável e resiliente.

Na tabela 21 e gráfico 28 é apresentada uma estimativa global dos custos de aplicação das várias medidas de eficiência energéticas até 2050. É possível verificar uma tendência de redução de custos ao longo dos anos. De notar, que o custo de investimento de uma medida depende muito das condições existentes no local, desta forma, é aconselhado uma análise detalhada e rigorosa para apurar todas as condições.

Tabela 20:
Medidas de eficiência energética e descarbonização globais [36-39]

Tecnologia ou Medida	Impacto na descarbonização	Estado de desenvolvimento (TRL)
Aplicação de isolamento	Aplicação de isolamento térmico vai reduzir as perdas por convecção e radiação. Para um caso de estudo de uma implementação de 15k permitirá: • Redução na fatura energética: 7000doll s/ano • *Payback* = 2 anos • Redução das emissões de CO_2 = 40 ton/ano	9
Utilização de queimadores de alta eficiência	A existência de novos queimadores altamente eficientes permite o pré-aquecimento do ar de combustão com gases de exaustão. Permite economizar 15% da energia.	9
Otimização da eficiência da combustão	Instalação de um sensor de O_2, na conduta dos gases de exaustão para garantir que esta ocorrer a combustão ideal. A poupança de energia pode atingir 19 782 m3 de GN por ano e pode reduzir 41 344 emissões de CO_2 por ano.	9
Instalação de equipamentos de monotorização	Este equipamento ter um controlo rigoroso dos equipamentos em funcionamento, permitindo identificar maus funcionamentos e perdas de eficiência. Desta forma determinar quando este precisa de manutenção. Em média, as empresas do sector metalúrgico que acrescentam um equipamento de monotorização: • Investimento: 85 000 dolls • Redução na fatura energética: 17 000 dolls/ano • *Payback* = 5 anos • Redução das emissões de CO_2 = 70 ton/ano	9
Verificação das condições de funcionamento	Verificação, por exemplo, da temperatura e da pressão, permite uma redução de energia em 5%.	9
Subsistemas acionados por motores elétricos	Sendo que a maioria dos sistemas são acionados por motores elétricos é necessário garantir que: <u>Durante a fase de instalação:</u> • Utilização de motores eficientes do ponto de vista energético, de preferência motores com classificação I3; • Dimensionamento adequado do motor; • Instalação de variadores de velocidade; • Instalação de transmissões/redutores de alta eficiência; • Reparação de motores eficientes do ponto de vista energético. <u>Durante a utilização:</u> • Acoplamento direto sempre que possível; • Cintos síncronos ou cintos em V dentados no lugar de cintos em V; • Substituir engrenagens sem fim por engrenagens helicoidais. <u>Sistemas de operação/Manutenção:</u> • Lubrificação; • Ajustes; • Afinação. Estas medidas manutenção podem permitir uma redução de energia em 5%. O variador de velocidade tem uma contribuição mais significativa, podendo reduzir 10-60% no consumo de energia.	9
Sistemas de bombagem	Os sistemas de bombagem devem ser o mais otimizados possível e para isso deve-se aplicar seguintes técnicas: <u>Design:</u> • Evite o sobredimensionamento das bombas; • Design correto das tubagens sistema. <u>Controlo e manutenção:</u> • Controlo e regulação do sistema; • Controlo automático de *ON/OFF* para as bombas; • Utilização de variadores de velocidade; • Utilização de múltiplas bombas; • Manutenção regular. <u>Sistema de distribuição:</u> • Minimizar o número de válvulas e curvas, desta forma, mantém a facilidade de operação e manutenção • Diâmetro correto das tubagens. Um design correto do sistema pode permitir uma redução de energia até aos 17%. Além disso, os variadores de velocidade podem salvaguardar 20-50% da energia consumida pela bomba.	9

Tabela 20:
Medidas de eficiência energética e descarbonização globais [36-39] (cont.)

Tecnologia ou Medida	Impacto na descarbonização	Estado de desenvolvimento (TRL)
Sistemas de ventilação extração de gases	As poupanças de energia deste equipamento dependem do tipo de utilização, contudo, as implementações de variadores de velocidade para ventiladores extratores de gases de exaustão podem reduzir as necessidades energéticas em 20%.	9
Sistemas de ar comprimido	Design do sistema/ Instalação: • Conceção geral do sistema, incluindo sistemas multipressão; • Aquisição de compressores de alta eficiência; • Melhorar dos sistemas de arrefecimento, secagem e filtragem; • Reduzir as perdas de pressão por fricção; • Melhoramento das unidades (motores de alta eficiência); • Implementação de variadores de velocidade; • Utilização de sistemas de controlo sofisticados; • Recuperar calor residual para utilização em outros equipamentos; • Utilizar ar fresco externo como entrada; • Armazenamento de ar comprimido perto de utilizações altamente flutuantes. Sistema de Operação/Manutenção: • Reduzir as fugas de ar; • Substituição de filtro mais frequente; • Otimizar a pressão de trabalho. O uso de sistema de controlo de ar comprimido pode resultar numa redução de consumo de energia até 20%. Adicionalmente, a colocação de variadores de velocidade nestes equipamentos tem potencial de redução de 15-25% da energia. De acordo com algumas estimativas, mais de 85% da energia elétrica introduzida num compressor perde-se como calor residual. A recuperação de calor residual do óleo dos compressores, permite recupera-se 50-80% da energia térmica, a uma temperatura media de 60°C. Além disso, é referido em alguns estudos que recuperação de calor permite minimizar o consumo e os custos de eletricidade.	9
Iluminação	Melhorias no sistema de iluminação: • Identificar os requisitos de iluminação ideias para um bom funcionamento; • Planear o espaço e as atividades de modo a otimizar a utilização de luz natural; • Colocação/substituição por lâmpadas LED; • Utilização de sistemas de controlo de gestão da iluminação incluindo sensores de ocupação, temporizadores, etc.; A substituição de lâmpadas de tecnologia de halogénio permite reduzir em 30% o consumo de energia. Enquanto a substituição de lâmpadas fluorescente compacta permite reduzir em 80% o consumo de energia.	9

Tabela 21:
Estimativa global dos custos de aplicação de medidas de eficiência energética até 2050

Medidas de eficiência energética	2030	2040	2050
Custo (EUR/kW)	500	400	300

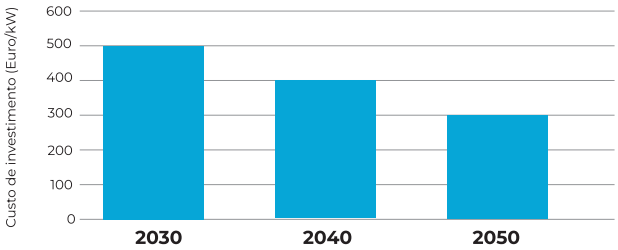


Gráfico 29 - Estimativa global dos custos de aplicação de medidas de eficiência energética até 2050

4.4.2. Recuperação de calor residual

Durante um processo industrial, apenas parte da energia fornecida é efetivamente usada, sendo a restante desperdiçada sobre a forma de calor residual para o meio envolvente. A recuperação dessa energia é atrativa tanto de um ponto vista financeiro com ambiental, pois quando bem aplicada reduz os gastos energéticos e as emissões de gases com efeito de estufa. Estima-se que entre 20 a 50% da energia utilizada em processos industriais é perdida e entre 18 a 30% desse calor residual poderia ser reutilizado para outra aplicação.

Deve-se assim reduzir a perda de calor dos equipamentos e maximizar a energia fornecida ao equipamento para uma reutilização do excesso de calor transformando essa energia em energia útil noutro equipamento, contudo, existem vários fatores envolvidos na disponibilidade de calor residual que se deve ter conta:

- A temperatura da fonte de calor;
- A taxa de fluxo de calor residual;
- O tipo de meio de transferência de calor;
- A distância entre a fonte e o dissipador de calor;
- O desfasamento entre a oferta de fluxos de energia térmica (oferta) e procura;
- A composição do fluxo residual e a complexidade do potencial de aproveitamento de calor associada.

A modelação e simulação são essenciais para avaliar a forma como os sistemas de recuperação de calor, juntamente com os sistemas de armazenamento e gestão de energia, podem ser implementados em operações de processo industrial. As novas tecnologias de armazenamento e recuperação de calor irão assim desempenhar um papel significativo no futuro, permitindo às indústrias equilibrar o seu consumo de energia térmica recorrendo a processos totalmente integrados e monitorizados.

A metodologia de identificação calor e solução de recuperação de calor residual deve considerar não apenas as necessidades térmicas da empresa, como também deve ter em conta soluções para aproveitar o calor residual para a metodologia referida na tabela 22.

A recuperação de calor aliada ao uso de energia renovável, à utilização de equipamentos mais eficientes e à racionalização de consumos permitira a este setor reduzir consumos e ter uma menor pegada carbónica. As tecnologias de recuperação de calor estão bem desenvolvidas e encontram-se já disponíveis no mercado.

Como podemos ver na tabela 23, o CAPEX e OPEX médios para tecnologias de recuperação de calor irão ter um custo por potência instalada progressivamente menor até 2050 devido à elevada maturidade das tecnologias.



Tabela 22:
Soluções para aproveitamento de calor residual na indústria

Análise *Pinch*	A análise *pinch* tem como objetivo principal minimizar o consumo de energia e maximizar a eficiência energética de um sistema industrial, tendo em conta, todos os fluxos energéticos disponíveis. Esta metodologia identifica o ponto ideal de permuta, permitindo desta forma uma reorganização de processos de permuta de calor permitindo assim maximizar a recuperação de calor.
Armazenamento térmico	O armazenamento térmico pode ser sob a forma de calor sensível, latente e termoquímica. Esta tecnologia é ideia para situações em que as necessidades de calor e a disponibilidade do calor residual se encontram desfasadas temporalmente. Desta forma, a energia que seria desperdiçada fica armazenada durante grandes períodos de tempo, desde que o equipamento encontre se devidamente isolado, permitindo usar a energia.
Ciclo Orgânico de *Rankine*	O Ciclo Orgânico de *Rankine* permite a utilização de fontes térmicas residuais convertendo essa energia em energia elétrica. A vantagem destes equipamentos é a utilização de fluidos orgânicos de baixo ponto de ebulição que estende a usabilidade para várias gamas de temperaturas. Uma tecnologia inovadora e em ascensão.
Chiller de absorção	Esta tecnologia permite a utilização de fontes térmicas residuais para produção de frio. A modificação existente destes equipamentos em relação aos compressores convencionais é alteração de compressor mecânico por um compressor térmico. Estes equipamentos tem um COP relativamente baixo, contudo o facto de aproveitamento de calor residual permite aumentar a sua atratividade.
Simbiose industrial	A simbiose industrial permite criar redes industriais que promovam benefícios económicos, ambientais e sociais entre empresas. As redes de calor são um exemplo ideal de cooperação entre empresas, uma vez que, estas permitem aproveitar o excedente de energia térmica de uma empresa e fornecer a outra empresa com necessidades térmicas.

Tabela 23:
CAPEX e OPEX médios para tecnologias de recuperação de calor até 2050

Tecnologias de recuperação de calor	Unidade	2030	2040	2050
	CAPEX (EUR/kW)	9,5	9	8
	OPEX (EUR/kW)	0,48	0,44	0,40

4.4.3. Eletrificação

A eletrificação é um pilar principal no futuro da transição de energética. Esta mudança consiste na substituição de fontes de energia baseada em combustíveis fósseis por eletricidade gerada a partir de fontes de energias renováveis, como solar ou eólica. Entre as tecnologias chave que impulsionam a eletrificação, neste setor, destacam-se as bombas de calor e os fornos híbridos.

Segundo o Roteiro para Neutralidade Carbónica de 2050, a eletrificação terá um contributo fundamental no setor industrial. É estimado que na matriz energética aja um aumento no consumo de energia elétrica de 29% até 2050 (gráfico 30).

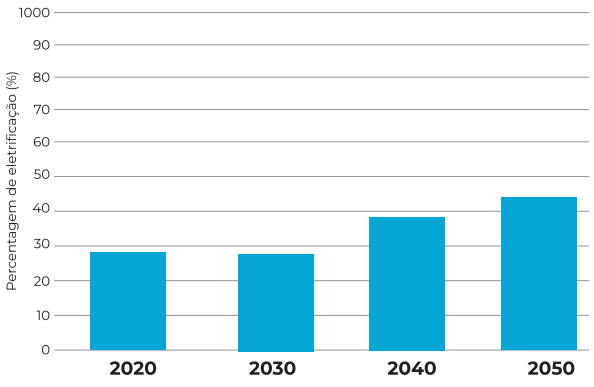


Gráfico 30 - Evolução de consumo de energia elétrica até 2050

Apenas fará sentido ser aplicada a eletrificação a nível industrial se aliado houver uma produção de eletricidade através de fontes de energia renovável – eletricidade verde. Portugal é um país com caraterísticas ideais para produção de eletricidade verde através de várias tecnologias como a energia eólica, solar fotovoltaica, hidroelétrica, entre outras. Isto irá permitir que a matriz energética não esta depende de apenas uma tecnologia, existindo uma diversidade de fontes de energia renovável, dando desta forma, uma segurança, estabilidade e redução nos custos de investimentos na produção de eletricidade verde.

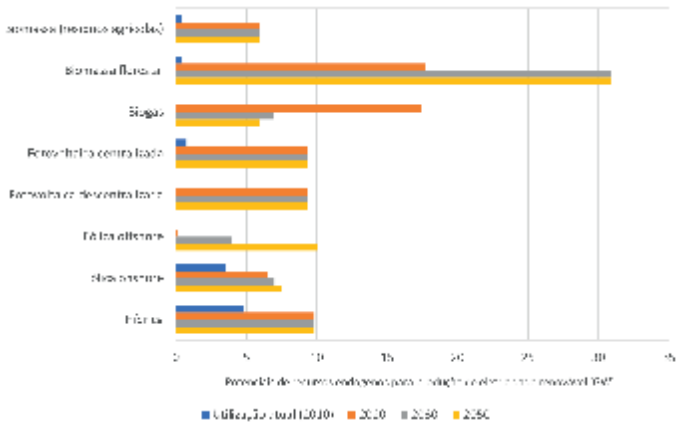


Gráfico 31 - Potenciais de recursos endógenos para produção de eletricidade renovávell

Segundo o Roteiro Nacional de Baixo Carbono 2050 – Anexos, gráfico 31, é esperado até 2050 que o uso da biomassa para produção de eletricidade seja 30%, seguido pela energia eólica em 17%, energia fotovoltaica em 19%, sendo a restante produzida por energia hídrica e biogás.



4.4.4. Produção de energia por fontes renováveis

Os sistemas solares térmicos possuem um enorme potencial para geração de calor e podem colmatar grande parte das necessidades térmicas do calor industrial. Atualmente, sabe-se que na Europa, cerca 30% do calor gerado é consumido a temperaturas inferiores a 100°C e 27% a temperaturas intermedias entre 100 – 400°C. A tecnologias de coletores para as diferentes gamas de temperaturas esta totalmente de desenvolvida e encontra-se disponível no mercado, sendo o TRL desta tecnologia de 9.

Na figura 12 a), é apresentado para vários sectores da indústria e para os diferentes processos que incorporam estes, as temperaturas e a tecnologia de painéis solares térmicos que correspondem.

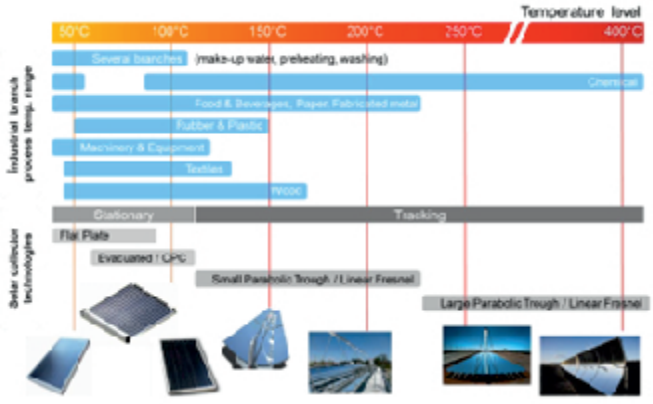
Outra tecnologia que usa a energia de sol para geração de calor é os fornos solares. Esta tecnologia já é aplicada na metalúrgica em áreas como: soldadura, revestimento, tratamentos de superfície, endurecimento de superfícies e metalurgia do pó. Para temperaturas até aos 400°C já existem soluções no mercado implementadas a vários anos. Contudo esta em fase desenvolvimento fornos de alta temperatura. Existem desenvolvimentos relativos a um forno solar até 1130°C [48]. A energia solar é concentrada por um campo de helióstatos e direcionada para o forno através da sua abertura. Na Figura 12 b), é apresentado um forno solar em estudo de uma potência de 10 KW. Esta tecnologia esta em fase de desenvolvimento e apresenta um TRL de 4.

Na tabela 24, é apresentado a estimativa de evolução do CAPEX e OPEX para os principais tipos de coletores solares até 2050.

Estas tecnologias já tem um nível de desenvolvimento de 9. Como tal, deverá haver uma gradual diminuição dos seus custos por potência instalada.

Tabela 24:
Evolução custos de aquisição e de manutenção de coletores solares

Coletores solares	Custo	2030	2040	2050
Placa plana	CAPEX (EUR/kW)	461	435	378
	OPEX (EUR/kW)	23	22	18
Tubos vácuo	CAPEX (EUR/kW)	1165	1099	956
	OPEX (EUR/kW)	58	55	46
Concentradores	CAPEX (EUR/kW)	1092	1030	896
	OPEX (EUR/kW)	55	52	43



a)



b)

Figura 12 – a) Para os diferentes processos que incorporam estes, as temperaturas e a tecnologia de painéis solares térmicos que correspondem b) Forno solar de 10 kW

4.4.5. Captura de carbono

A captura e sequestro de carbono (ou CCS – *Carbon Capture and Storage*) é uma combinação de tecnologias usadas para capturar CO_2 dos gases de exaustão industriais e armazená-lo de forma segura no subsolo, em formações geológicas adequadas, com o objetivo de evitar que as emissões sejam libertadas na atmosfera. Antes de o CO_2 poder ser transportado e armazenado, este deve ser filtrado para remover quaisquer substâncias indesejadas.

Esta não é uma tecnologia nova, uma vez que o CO_2 é rotineiramente separado e capturado como um subproduto de processos industriais. O CO_2 capturado é então comprimido ou liquefeito e transportado para o seu local de armazenamento final utilizando para isso tanques, gasodutos ou navios. O CO_2 capturado também pode ser utilizado para produzir materiais sintéticos (como combustíveis, produtos químicos ou materiais de construção).

As tecnologias de captura de carbono podem ser utlizadas em centrais elétricas a biomassa ou a combustíveis fósseis, bem como em indústrias com alta intensidade de carbono, como a metalomecânica.

Existem várias soluções de remoção de carbono, como a captura e sequestro de carbono de bioenergia (BECCS – *Bio-Energy Carbon Capture and Storage*), que combinam a geração de energia a partir de biomassa com CCS. Além da matéria-prima ser especificamente de base biológica, as tecnologias utilizadas para a captura e sequestro de carbono de bioenergia são as mesmas usadas para a captura de carbono. O CO_2 utilizado no BECCS pode ser gerado por processos biológicos, como a fermentação (para produzir biocombustíveis), bem como pela combustão de biomassa para geração de calor e energia.

Outra solução de remoção de carbono baseada na CCS é a captura e sequestro de carbono do ar (DACCS – *Direct Air Carbon Capture and Storage*). Neste caso, o CO_2 é capturado diretamente do ar ambiente e armazenado permanentemente no subsolo. Capturar quantidades significativas de CO_2 através de DACCS é um grande desafio devido à concentração muito menor de CO_2 no ar ambiente, em comparação com as fontes industriais.

Estas tecnologia é imatura e tem um custo elevado e para além disso apresenta os seguintes pontos negativos:

1. Necessário consumir mais energia para captura de carbono e sua transformação;
2. O sequestro e o transporte do carbono é difícil e é necessário criar infraestruturas próprias;
3. Mantém a dependência dos combustíveis fósseis;
4. Processo muito caro.

Atualmente, esta tecnologia ainda não esta disponível a nível industrial, apresentado um TRL: 6 – 7. Contudo é estimado que entre no mercado a partir de 2030 e que até 2050 contribua para a captura de 25% das emissões de CO_2.

Na tabela 25, é apresentado uma estimativa de custos CAPEX e OPEX para esta tecnologia até 2050.

Neste momento estas tecnologias ainda não estão disponíveis a nível industrial estando ainda numa fase de desenvolvimento com um TRL de 6-7. Como tal, pode concluir-se que haverá um crescimento considerável do volume de negócios destas tecnologias impulsionando o aumento de economias de escala e como tal, uma diminuição do seu custo por potência instalada.

Tabela 25
CAPEX e OPEX médios para tecnologias de captura e sequestro de carbono até 2050

	Unidade	2030	2040	2050
Captura e sequestro de carbono	CAPEX (EUR/kW)	840	700	500
	OPEX (EUR/kW)	210	175	125

4.4.6.Utilização de combustíveis verdes

Os combustíveis verdes são alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis, incluindo biocombustíveis, hidrogénio verde e combustíveis sintéticos. Produzidos a partir de fontes renováveis como a biomassa e eletrólise da água utilizando energia solar ou eólica, esses combustíveis têm um impacto ambiental significativamente menor. Os biocombustíveis são derivados de materiais orgânicos, enquanto o hidrogénio verde e os combustíveis sintéticos, que combinam hidrogénio com carbono capturado, oferecem opções promissoras para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e apoiar a transição para uma economia de baixo carbono.



O **Hidrogénio** é uma opção sustentável e ecologicamente consciente, desde que este seja produzido através de processos de eletrólise alimentados por fontes de energia renovável.

Acredita-se que nos próximos anos o hidrogénio venha a substituir a necessidades de consumo de combustíveis fosseis para a geração de calor, especialmente para o sector da metalúrgica. As tecnologias atuais estão limitadas e só permitem no funcionar com misturas de gás natural e hidrogénio de 80-20%.

Pelo mundo estão a ser feitos esforços/estudos para colmatar os principais desafios:

- **Infraestrutura e Disponibilidade:** A infraestrutura para produção, armazenamento e distribuição de hidrogénio.
- **Compatibilidade de Equipamentos:** A transição para o uso de hidrogénio pode exigir modificações significativas nos equipamentos existentes, como nos queimadores, para garantir a segurança e a eficiência operacional, implicando essas modificações custos adicionais.
- **Custos de Produção:** A produção de hidrogénio renovável, especialmente por meio do eletrólise, pode ser cara em comparação com fontes convencionais de energia. Reduzir os custos de produção do hidrogénio é essencial para torná-lo uma opção economicamente viável.
- **Segurança:** O hidrogénio é altamente inflamável, e a segurança no manuseio, armazenamento e transporte é uma preocupação significativa. Garantir normas rigorosas de segurança é essencial para a aceitação e implementação do hidrogénio no setor.
- **Regulamentações e Normas:** As regulamentações e normas específicas para o uso industrial do hidrogénio podem não estar totalmente estabelecidas em alguns locais.
- **Soluções de armazenamento:** Sendo a produção de energia renovável intermitente é necessário pensar se em soluções de armazenamento para colmatar as diferenças entre a produção-procura.

Acredita-se que o hidrogénio tenha um papel fundamental na transição energética e é esperado a sua entrada no mercado entre 2030/2035, uma vez que esta tecnologia ainda apresenta um TRL de 7. Como tal, o seu custo por potência instalada deverá começar a diminuir em 2030, como podemos ver na tabela 26.

Tabela 26:
CAPEX e OPEX médios para as tecnologias de hidrogénio até 2050

Tecnologias	Unidade	2030	2040	2050
HIDROGÉNIO	CAPEX (EUR/kW)	1206	1005	758
	OPEX (EUR/kW)	36	30	20



A substituição do gás natural por **gás de síntese** (*syngas*) ou **biogás** obtido de resíduos ou biomassa em fornos e equipamentos de alta temperatura pode ser uma solução rápida e económica para o setor industrial. Existem estudos que indicam que o biogás e o *syngas* podem substituir o gás natural sem a necessidade de alterações significativas nos queimadores ou em outros equipamentos associados à rede de gás. Além disso, esses combustíveis são considerados verdes, pois o ciclo de vida do biometano, por exemplo, absorve o CO_2 emitido durante sua produção e utilização, contribuindo para a neutralidade carbónica.

No entanto, atualmente não existe uma infraestrutura estabelecida para o biometano a nível nacional. Para viabilizar a transição, é necessário iniciar estudos que avaliem a disponibilidade de biomassa e resíduos adequados para a produção de biogás. Além disso, é essencial incentivar a criação de infraestruturas de produção e distribuição, bem como implementar regulamentações específicas que assegurem a viabilidade técnica e económica, além da segurança no uso de biometano no setor industrial. A implementação dessas medidas pode facilitar a descarbonização dos setores em questão, reduzindo significativamente as suas emissões de gases de efeito estufa.



Pesquisas realizadas nos últimos anos enfatizam os benefícios do uso da **biomassa,** tanto como matéria-prima quanto como fonte de energia para o setor da metalomecânica.

Sendo este setor caracterizado pela existência de correntes de calor de alta temperatura, consequente existência de calor residual, este pode ser utilizado como fonte térmica para a transformação da biomassa em matéria-prima de base biológica, através de processos como pirólise e gaseificação. O biochar produzido pode ser utilizado como fertilizante ou condicionador de solo, promovendo a sustentabilidade agrícola.

Principais Vantagens da Biomassa:

- Redução das emissões de GEE: Contribui significativamente para a mitigação das mudanças climáticas.
- Redução da dependência energética: Diminui a dependência de combustíveis fósseis.
- Previsibilidade: A produção de biomassa segue padrões agrícolas estáveis.
- Facilidade de armazenamento: Biomassa é relativamente fácil de armazenar e manusear.

Desafios e Oportunidades:

A disponibilidade de biomassa é limitada pela falta de infraestrutura logística e de transporte adequada. No entanto, o desenvolvimento dessa infraestrutura pode estimular o desenvolvimento rural, promover a economia circular e gerar empregos.

Em resumo, a biomassa oferece uma alternativa sustentável e eficaz para a indústria metalúrgica, embora ainda existam desafios significativos a serem superados para sua implementação em larga escala.

Na tabela 27, é apresentado a estimativa de investimento e custos de manutenção para este tipo de equipamentos até 2050.

De acordo com as previsões da tabela 14 para o vetor energético da biomassa, este deverá ter um custo por potência instalada quase constante apenas com ligeiras diminuições até 2050 devido ao aumento da já elevada maturidade das tecnologias, como podemos ver na tabela 27.

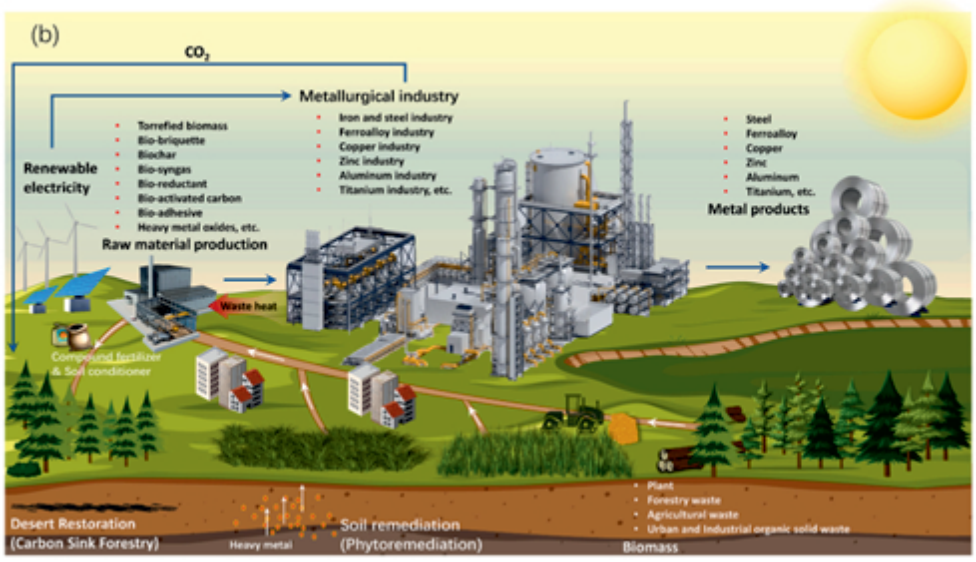


Figura 13 – A biomassa na indústria do metal [58]

Tabela 27:
CAPEX e OPEX médios para tecnologias de biomassa até 2050 [50]

Tecnologias	Unidade	2030	2040	2050
BIOMASSA	CAPEX (EUR/kW)	1685	1603	1484
	OPEX (EUR/kW)	504	476	440



4.4.7. Descarbonização de tecnologias de produção

No setor da metalomecânica, as tecnologias elétricas com maior potencial incluem as bombas de calor e os fornos híbridos, que se destacam pela eficiência energética e pela capacidade de reduzir as emissões de carbono.

As bombas de calor são eficientes em processos de aquecimento e arrefecimento, aproveitando a energia elétrica para transferir calor, o que resulta em menores emissões de gases de efeito estufa e uma maior eficiência energética. Os fornos híbridos, que combinam tecnologias elétricas com fontes de energia como o gás natural, otimizam o processo de aquecimento necessário na fabricação de metais, proporcionando flexibilidade operacional e adaptabilidade às flutuações nos preços de energia.

Essas inovações não só respondem às exigências ambientais, mas também oferecem oportunidades para modernizar as operações industriais, melhorar a eficiência e reduzir os custos a longo prazo.


Bomba de calor

As **bombas de calor** têm ganho destaque na indústria devido ao facto de permitir uma melhoria na eficiência energética nos processos e à redução de gases com efeito de estufa.

Esta tecnologia é um processo mais eficiente do que os métodos tradicionais de geração de calor. Dependo da gama de temperatura desejadas, a bomba de calor pode apresentar COP de superiores a 3, que significa que por cada kWh elétrico a bomba fornece 3 kWh de térmico.

Para além disso, estes equipamentos são bastantes versáteis, pois podem ser adaptadas a várias funcionalidades e a diferentes gamas de temperatura:

- Geração de calor: Utilizadas com fonte de energia térmica;
- Geração de frio: Utilizadas para produção de frio;
- Recuperação de calor: Utilização de correntes de baixa temperatura, permitindo aumentar a eficiência energética global da empresa.

Na tabela 28 é apresentado o nível de desenvolvimento das tecnologias por gamas de temperatura.

De acordo com a tabela 28, observa-se que o nível de desenvolvimento das bombas de calor de baixa temperatura já atingiu o nível 9 de TRL, indicando um sucesso na sua implementação. Prevê-se que esta tecnologia poderá beneficiar de economias de escala, resultando numa ligeira redução do custo por potência instalada.

Ainda segundo a tabela 28, o desenvolvimento das bombas de calor de média temperatura já alcançou o nível 8 de TRL, estando próximo da conclusão. À medida que a tecnologia avança para uma maior maturidade, espera-se que o custo por potência instalada comece a diminuir gradualmente.

Por fim, as bombas de calor de alta temperatura ainda se encontram num estágio inicial de desenvolvimento, o que resulta em altos custos de investimento. Assim, de momento, essas tecnologias são economicamente

menos viáveis em comparação com as bombas de calor de média e baixa temperatura, que estão mais avançadas e apresentam custos mais competitivos.

Tabela 28:
Nível de desenvolvimento das bombas de calor por gama de temperaturas

Gama de temperaturas	Categoria de temperatura	Níveis de desenvolvimento da tecnologia (TRL)
<80°C	Baixa	TRL: 9
80°C - 100°C	Baixa	TRL: 8
100°C - 140°C	média	TRL: 6 - 7
140°C - 160°C	média	TRL: 4 - 5
160°C - 200°C	média	TRL: 6 - 7 (escala muito pequena) TRL: 4 - 5 (para grande aplicação, mas ainda se encontra em fase de desenvolvimento)
> 200°C	média	TRL: 4 - 5

Tabela 29:
Evolução custos de aquisição e de manutenção de bombas de calor

Bombas de calor	Custo	2030	2040	2050
Baixa	CAPEX (EUR/kW)	705	588	511
	OPEX (EUR/kW)	26	21	19
Média	CAPEX (EUR/kW)	868	755	472
	OPEX (EUR/kW)	43	37	23
Alta	CAPEX (EUR/kW)	1030	1102	1002
	OPEX (EUR/kW)	41	44	40





Fornos híbridos

Uma solução que tem sido implementada nos últimos anos em algumas indústrias é a utilização de fornos híbridos. Em tratamentos de superfícies, a secagem realizada dentro de um forno é certamente uma das operações que mais afeta os gastos energéticos de algumas empresas. Esta é uma solução que combina os dois sistemas de aquecimento, gás e elétrico, dentro do mesmo dispositivo.

O forno híbrido é projetado através de um queimador de gás ao qual se adiciona uma bateria elétrica. O forno é inicialmente levado a uma temperatura de 200 °C aproveitando a potência do queimador, que é desligado uma vez atingida a temperatura. A partir desse momento, a bateria elétrica entra em funcionamento para manter a temperatura definida. O resultado é óbvio: o consumo de gás é limitado apenas ao momento de alcançar a temperatura, enquanto a manutenção do calor é garantida pela eletricidade.

Se a eletricidade for proveniente diretamente da presença de painéis fotovoltaicos, esta será ainda mais limpa e económica.

Em termos práticos, a integração da energia elétrica para o funcionamento dos fornos proporciona uma enorme vantagem em termos dos custos do consumo energético.

Algumas das suas vantagens são as seguintes [46]:

Aquecimento rápido: O gás proporciona um aquecimento inicial mais rápido, reduzindo potencialmente os tempos de pré-aquecimento até 50%, economizando tempo e energia;

- Controlo preciso: Os elementos de aquecimento elétrico oferecem um melhor controlo de temperatura, melhorando a consistência e a qualidade do tratamento;
- Eficiência combinada: Os fornos híbridos podem melhorar a eficiência geral em 15-25% através da utilização otimizada de energia e tempos de cozimento reduzidos.

Esta tecnologia já tem um nível de desenvolvimento 8-9. Como tal, é de prever que no futuro os seus custos por potência instalada diminuam, como podemos ver na tabela 30.

Tabela 30:
Estimativa da evolução custos de aquisição e de manutenção de fornos híbridos

Fornos híbridos	Custo	2030	2040	2050
Conformação	CAPEX (EUR/kW)	2472	2247	2140
	OPEX (EUR/kW)	200	182	173
Tratamento térmico	CAPEX (EUR/kW)	2000	1818	1732
	OPEX (EUR/kW)	142	129	123
Tratamento de superfície	CAPEX (EUR/kW)	1417	1288	1227
	OPEX (EUR/kW)	142	129	123



Tabela 31:
Medidas de descarbonização de processos de maquinagem

Tecnologia ou Medida	Impacto da Medida	Estado de desenvolvimento (TRL)	Disponibilidade comercial
Produção de bandas sem fim	Redução de 40-60% do consumo de	9	Disponível
Sistema de aquecimento de próxima geração para reaquecimento de aço sem incrustações	Redução de 0.2GJ/t de produto.consumo de energia.	9	Disponível
Forno de vigas galopante	Redução de 25 e 37.5% de eletricidade e combustível, respetivamente.	9	Disponível
Substituição dos materiais de isolamento do forno de reaquecimento.	Redução de 2 - 5 % do consumo de energia.respetivamente.	9	Disponível
Redução dos resíduos de alumínio da laminagem a quente	Redução de 0.6 GJ/t de alumínio.	9	Disponível
Redução das perdas de calor na linha de recozimento (laminagem a frio)	Redução de 40 - 60 % do consumo de energia.	9	Disponível
Instalação de sistemas de lubrificação	Redução de 4 kWh/t de produto.	9	Disponível
Redução da utilização de vapor na linha de decapagem ácida (laminagem a frio)	Redução de 17 % do consumo de energia.	9	Disponível
Utilização de um forno de recozimento contínuo (laminagem a frio)	Redução de 33 % do consumo de combustível.	9	Disponível

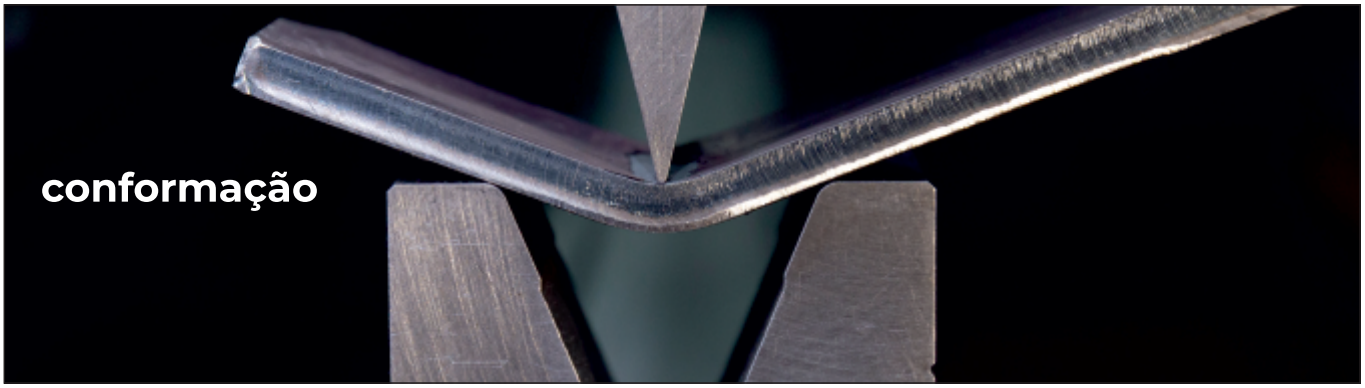


Tabela 32:
Medidas de descarbonização de processos de conformação

Tecnologia ou Medida	Impacto da Medida	Estado de desenvolvimento (TRL)	Disponibilidade comercial
Fresagem sem vibrações	Software de otimização para todas as oficinas mecânicas que permite aplicar velocidades de fuso e taxas de avanço otimizadas para as configurações específicas da máquina e obter-se melhores peças. Aumenta a produtividade em 110%, reduzindo os tempos de ciclo em 53%. Reduz em 11% os desgastes das ferramentas, consequente, reduz os custos com as ferramentas. Reduz desperdícios. Reduz o consumo de energia.	9	Disponível
Silent Tools™ para fresagem	Muitos componentes e máquinas-ferramentas requerem conjuntos de ferramentas longas para alcançar componentes de grandes dimensões. O risco de vibração é elevado e a solução é uma maquinação lenta ou ferramentas com amortecimento. Com as ferramentas silenciosas, a vibração e a vibração são eliminadas, a taxa de maquinação pode ser aumentada e a segurança do processo melhorada. Vantagens: • Ganhos de produtividade de pelo menos 50% para os adaptadores mais curtos e até 300% para adaptadores mais longos; • Melhoria do acabamento da superfície; • Maior segurança do processo; • Conjuntos modulares para comprimentos de alcance necessários; • Ampla gama de funcionalidades para cobrir todos os materiais e aplicações.	9	Disponível

Tabela 32:
Medidas de descarbonização de processos de conformação (cont.)

Tecnologia ou Medida	Impacto da Medida	Estado de desenvolvimento (TRL)	Disponibilidade comercial
Inteligência artificial Productive Machines	Esta tecnologia consiste em simular todas as combinações de configuração da máquina para melhorar a taxa de alimentação, otimizar a velocidade do fuso e reduzir/eliminar as vibrações. A tecnologia ainda permite aumentar a possibilidade de criação de novas peças, abrindo assim oportunidades a novos mercados. Através do uso de inteligência artificial é possível reduzir consumos de energia, redução de GEE e desperdícios. Objetivo: • Redução do tempo de configuração em 20%; • Redução do ciclo de 10 a 53%; • Redução os custos operacionais e de manutenção em 25%; • Redução os custos de ferramentas de corte em 11%; • Redução o ruído de corte em cinco vezes; • Redução dos custos de energia em 25%.	9	Disponível
Impressão 3D do metal – Fabricação aditiva (DMP)	A fabricação é aditiva é um processo alternativo aos convencionais e permite produzir peças tridimensionais, adicionando camada sobre camada. Esta tecnologia tem enumeras vantagens: • Maior velocidade de prototipagem; • Redução no custo; • Flexibilidade de produção; • Redução de desperdícios. No mercado já existem várias máquinas com capacidades diferentes, para inúmeras ligas de metal e produtos.	9	Disponível
Maquinagem com 5 eixos	A maquinagem a 5 eixos permite criar pecas com uma forma mais complexa e com alta precisão. Devido ao nível de automação destes equipamentos é possível aumentar a produtividade, reduzir consumos de energia e reduzir as emissões de GEE.	9	Disponível
Conformação mecânica – dobragem/prensa	Atualmente as prensas hidráulicas são caracterizadas por terem um consumo elevado de energia elétrica, requerem manutenções regulares com elevados custos e baixam a produtividade. As máquinas servo elétricas são máquinas que usa a energia apenas para dar curvatura a peça reduzindo a necessidade de energia. Uma vez que as máquinas hidráulicas quando ligadas, acionam a bomba, aquecendo o óleo e o meio envolvente sem que haja de facto dobragem da peça. Estes equipamentos podem: • Permitir uma redução no desperdício de energia em 50%; • Eliminar o consumo de óleo; • Aumento na produtividade em 30%.	9	Disponível



Tabela 33:
Medidas de descarbonização de processos de corte

Tecnologia ou Medida	Impacto da Medida	Estado de desenvolvimento (TRL)	Disponibilidade comercial
Utilização de laser de fibra	• Eficiência de conversão fotoelétrica é de cerca de 30 % (comparado com laser de CO_2 que é entre 6 e 10%); • Não possui peças vulneráveis e os custos de manutenção são, em geral, baixos; • Não existem espelhos de reflexão externos no caminho da luz, economizando custos, não ocorre contaminação do caminho da luz e menos peças móveis estão sujeitas a desgaste; • Comprimento de onda do laser de fibra (1.06 m) é mais facilmente absorvido pelo material metálico em comparação com o comprimento de onda do laser de CO_2 • A velocidade de corte é entre 2 a 4 vezes superior aos lasers de CO_2 e apresenta melhores resultados de corte em materiais altamente refletivos (alumínio, cobre).	9	Disponível
Integração de nanomateriais	A integração de grafeno e nanotubos de carbono, por exemplo, oferece uma resistência e durabilidade sem paralelo, permitindo que as ferramentas resistam a velocidade de corte mais altas e prolonguem a sua vida útil.	4 - 6	Disponível a médio prazo
Aplicação de revestimentos avançados	A aplicação de revestimentos avançados como carbono tipo diamante (*diamon-like carbon*) e revestimentos com nanocompósitos proporcionam uma dureza excecional e redução de atrito, resultando num melhor desempenho das ferramentas e vida útil prolongada. Estes permitem que as ferramentas de corte enfrentem materiais mais desafiantes e operem a velocidades mais elevadas, aumentando a sua produtividade em geral.	8 - 9	Disponível

Tabela 33:
Medidas de descarbonização de processos de corte (cont.)

Tecnologia ou Medida	Impacto da Medida	Estado de desenvolvimento (TRL)	Disponibilidade comercial
Integração de Internet of Things (IoT)	A integração da IoT permite a monitorização em tempo real e análise de dados do desempenho da ferramenta, desgaste e manutenção preventiva. Os sensores embutidos nas ferramentas de corte irão recolher dados sobre temperatura, vibração e vida útil da ferramenta, fornecendo informações valiosas para otimizar o uso da ferramenta e minimizar o tempo de inatividade.	6 - 8	Disponível a curto prazo
Fabricação aditiva (Impressão 3D)	A impressão 3D permite a produção de geometrias de ferramentas complexas que anteriormente eram inatingíveis com métodos de fabricação tradicionais. Esta tecnologia permite a criação de ferramentas de corte personalizadas adaptadas a aplicações específicas, otimizando o desempenho e a eficiência. Com a impressão 3D, os fabricantes podem rapidamente prototipar e testar novos projetos de ferramentas, acelerando o ciclo de desenvolvimento e reduzindo o tempo de comercialização.	5 - 7	Disponível a médio prazo
Inteligência Artificial e Machine Learning	Os algoritmos de inteligência artificial e *machine learning* estão a revolucionar os processos de fabricação, e o seu impacte na indústria de ferramentas de corte será significativo. Sistemas alimentados por IA podem analisar vastas quantidades de dados, identificar padrões e tomar decisões informadas em tempo real. No contexto de ferramentas de corte, os algoritmos de IA podem otimizar os parâmetros de corte, trajetórias de ferramentas e estratégias de maquinagem, resultando em maior precisão, eficiência e redução de desperdício.	7 - 9	Disponível a curto prazo



Tabela 34:
Medidas de descarbonização de processos de tratamentos térmicos

Tecnologia ou Medida	Impacto da Medida	Estado de desenvolvimento (TRL)	Disponibilidade comercial
Pré-aquecimento do ar de combustão de fornos	O recuperador é um dispositivo de recuperação de calor residual muito interessante para este tipo de aplicação. Trata-se de um permutador de calor ar-ar, de tubos ou placas, colocado na exaustão e utilizado na generalidade para pré-aquecer o ar de entrada do forno. Este tipo de permutador permite a transferência do calor do gás de exaustão para o ar de combustão, evitando que as correntes se misturem. Os recuperadores têm a capacidade de pré aquecer o ar de combustão até cerca de 600 °C e recuperar 65% da energia contida nos gases de combustão, levando a uma redução de 30% no consumo energia.	9	Disponível
Pré-aquecimento da carga	Se o calor existente nos gases de exaustão de elevada temperatura de um forno estiver em contato com uma carga de entrada relativamente fria, essa energia térmica pode ser transferida diretamente para a carga, aquecendo-a e reduzindo o consumo energético do forno. Na sua forma mais eficiente, o pré-aquecimento da carga rivaliza com o pré-aquecimento do ar de combustão em questões da viabilidade económica, sendo que este método pode ter uma aplicação algo complexa em diversos casos.	9	Disponível
Aplicação de ciclos termodinâmicos	Quando o uso direto de calor residual no local é limitado, a melhor opção é converter esse calor em eletricidade. Existem vários tipos de ciclos termodinâmicos que podem utilizar fontes de calor residual para gerar energia elétrica de forma eficiente a partir de fontes de baixa/média temperatura, como o ciclo de Rankine orgânico. Este ciclo funciona entre os 60 e os 200°C para fontes de baixa temperatura, podendo atingir até 350 °C no caso de fontes de calor de média temperatura.	6 - 8	Disponível a curto prazo

Tabela 34:
Medidas de descarbonização de processos de tratamentos térmicos

Tecnologia ou Medida	Impacto da Medida	Estado de desenvolvimento (TRL)	Disponibilidade comercial
Minimização de perdas de calor por convecção e radiação das superfícies quentes	A minimização das perdas de calor devido à radiação e convecção reduz substancialmente os consumos energéticos. Isto pode ser conseguido minimizando a presença de fugas, escolhendo materiais refratários adequados ou isolando corretamente as superfícies de um forno.	9	Disponível
Implementação de fornos com tecnologias avançadas	Fornos a indução: o aquecimento por indução utiliza correntes elétricas induzidas (correntes de Foucault) para aquecer materiais. O processo envolve a colocação da peça de metal dentro de uma bobina de indução, que gera um campo eletromagnético de alta frequência. Esse campo induz correntes no metal, causando aquecimento devido à resistência elétrica do material. As vantagens deste equipamento passam pela elevada eficiência de conversão de energia (cerca de 90%), aquecimento rápido e preciso, compatibilidade com energias renováveis e uma menor necessidade de arrefecimento; Fornos a vácuo: Os fornos a vácuo removem o ar e outros gases do interior do forno, criando um ambiente de vácuo. Isso evita a oxidação e contaminação dos metais durante o tratamento térmico. A ausência de gases pode reduzir a perda de calor por convecção, aumentando a eficiência térmica.	9	Disponível
Gestão de resíduos	A gestão dos resíduos resultantes dos diferentes tipos de tratamentos térmicos de metais é essencial. Por exemplo, durante a têmpera, a utilização eficiente da água com um caudal reduzido (como 10 L/min), pode proporcionar poupanças significativas. Além disso, a reciclagem dos resíduos de metais tratados termicamente é fundamental, considerando que se estima que 1,3 mil milhões de toneladas de sucata são descartadas anualmente. Ao reutilizar esses materiais, é possível reduzir significativamente os resíduos produzidos.	9	Disponível

Tabela 34:
Medidas de descarbonização de processos de tratamentos térmicos

Tecnologia ou Medida	Impacto da Medida	Estado de desenvolvimento (TRL)	Disponibilidade comercial
Integração de sistemas de automação	A implementação da automação nos diversos tipos de tratamentos térmicos de metais mostrou-se eficaz para aumentar a eficiência do processo. Ao serem introduzidos sistemas computadorizados para o controlo de temperatura, capazes de manter a temperatura dentro de uma margem de ±5°C, é garantido assim um tratamento térmico preciso. Adicionalmente, a utilização de robótica para o manuseamento de metais entre o forno e o banho de têmpera resulta em melhorias significativas na segurança operacional. Com a automação, observa-se um aumento substancial na precisão dos processos, o que contribuiu para a melhoria da qualidade geral dos produtos.	9	Disponível
Redução do tempo de ciclo	O tempo do ciclo de um tratamento térmico pode ser reduzido ao otimizar a eficiência do forno. A temperatura e o tempo de arrefecimento adequados influenciam diretamente as propriedades finais do produto. As propriedades dos metais que podem ser melhoradas após o tratamento térmico incluem a dureza, tenacidade e ductilidade. Com ciclos mais curtos traduzem-se em taxas de produção aumentadas e custos reduzidos.	9	Disponível
Eletrificação dos fornos com fontes de energia renovável	Utilizar fornos elétricos alimentados por eletricidade proveniente de fontes renováveis, como solar, eólica ou hidrelétrica ajudam à descarbonização do setor.	9	Disponível
Utilização de biomassa	Utilizar biomassa como fonte de calor em vez de combustíveis fósseis tradicionais contribui para diminuir a pegada de carbono deste setor.	7 - 9	Disponível a curto prazo



Tabela 35:
Medidas de descarbonização de processos de tratamento de superfícies

Tecnologia ou Medida	Impacto da Medida	Estado de desenvolvimento (TRL)	Disponibilidade comercial
Redução de perdas de calor	• Procurar oportunidades de recuperação de calor; • Reduzir a quantidade de ar extraído através das soluções aquecidas. Melhorar a gama de operação dos banhos em termos de concentração e temperatura; • Isolar as soluções aquecidas, utilizando tinas de duplo casco, tinas pré-isoladas ou esferas de polipropileno na superfície dos banhos sempre que possível.	9	Disponível
Revestimento sem eletrólise	O revestimento sem eletrólise oferece vantagens significativas em relação aos métodos tradicionais de galvanoplastia. Como não requer corrente elétrica, elimina o risco de distribuição desigual do revestimento ou queima do elétrodo. Também permite um controlo mais preciso da espessura do revestimento, podendo alcançar um acabamento mais uniforme. Além disso, como não há necessidade de uma fonte de energia externa, esse método pode ser utilizado em formas complexas e intricadas, que seriam difíceis de revestir usando métodos tradicionais de galvanoplastia.	7 - 9	Disponível a curto prazo
Texturização a laser	O processo utiliza feixes de laser intensos para fundir ou vaporizar a superfície do metal, formando assim microestruturas e texturas. Isso pode melhorar propriedades como a fricção, resistência ao desgaste e adesão. A texturização a laser de superfície oferece algumas vantagens sobre os tratamentos de superfície tradicionais, como o controlo preciso da profundidade e forma da textura, a capacidade de criar padrões complexos e a remoção mínima de material.	6 - 8	Disponível a curto prazo

Tabela 35:
Medidas de descarbonização de processos de tratamento de superfícies (cont.)

Tecnologia ou Medida	Impacto da Medida	Estado de desenvolvimento (TRL)	Disponibilidade comercial
Limpeza com dióxido de carbono supercrítico	A limpeza com dióxido de carbono supercrítico é um método que utiliza dióxido de carbono altamente pressurizado para limpar superfícies de metal. Isso permite que este atue como um poderoso solvente, removendo contaminantes das superfícies de metal sem deixar resíduos ou causar quaisquer danos. O estado supercrítico também permite que o dióxido de carbono penetre em pequenas fendas e limpe áreas de difícil acesso. Isso torna esta uma opção eficaz e ecologicamente positiva para a limpeza de metal.	6 - 8	Disponível a curto prazo
Oxidação eletrolítica por plasma	A oxidação eletrolítica por plasma (ou *Plasma Electrolytic Oxidation*, PEO) é um processo de acabamento de metais que envolve imergir o metal num banho eletrolítico e aplicar uma corrente elétrica de alta voltagem. Isso cria uma descarga de plasma na superfície do metal, causando sua a oxidação e formando um revestimento semelhante a um material cerâmico. O processo pode ser personalizado ajustando a voltagem, o tempo e a composição do eletrólito de forma a controlar a espessura, a dureza e a resistência à corrosão do revestimento. A PEO oferece várias vantagens sobre técnicas de anodização tradicionais, como melhor resistência à corrosão e durabilidade.	6 - 8	Disponível a curto prazo
Tecnologia de pulverização a frio	Os revestimentos de pulverização a frio oferecem várias vantagens em relação a outros métodos tradicionais de acabamento de metais. Como o processo não envolve entradas de calor ou fusão das partículas, não causa distorção térmica ou danos ao substrato. Isso torna-o adequado para reparar e revestir materiais sensíveis ao calor, como polímeros e compósitos. Os revestimentos de pulverização a frio também possuem excelente resistência de adesão devido à ligação mecânica entre as partículas e a superfície. Resulta assim num revestimento denso, uniforme e altamente durável que pode suportar condições extremas e desgaste. A tecnologia de pulverização a frio também é económica e eficiente, pois não requer tempo de pós-processamento.	7 - 9	Disponível a curto prazo

Tabela 35:
Medidas de descarbonização de processos de tratamento de superfícies (cont.)

Tecnologia ou Medida	Impacto da Medida	Estado de desenvolvimento (TRL)	Disponibilidade comercial
Decapagem por aspersão	Em vez de prosseguir com uma imersão, é utilizado o princípio oposto, realizando uma decapagem por aspersão. Esta técnica não pode ser realizada em todos os objetos, mas funciona bem na maioria. A principal vantagem desta técnica é a diminuição do volume do líquido de decapagem e a possibilidade de usar quantidades menores de gel decapante, que tem um grande impacte ambiental e um tempo de reação muito mais longo. Além disso, evita a aplicação manual pelo operador, evitando sujeitá-lo a todos os riscos envolvidos no uso deste tipo de substâncias. Outro aspeto muito importante a nível ambiental é o de evitar o arrastamento de ácido na área de lavagem durante o aparecimento das peças dos tanques de tratamento, melhorando assim o desempenho da estação de tratamento de água.	7 - 9	Disponível a curto prazo
Fornos híbridos	Em tratamentos de superfícies, a secagem realizada dentro de um forno é certamente uma das operações que mais afeta os gastos energéticos de algumas empresas. O forno híbrido é projetado através de um queimador de gás ao qual se adiciona uma bateria elétrica. O forno é inicialmente levado a uma temperatura de 200°C aproveitando a potência do queimador, que é desligado uma vez atingida a temperatura. A partir desse momento, a bateria elétrica entra em funcionamento para manter a temperatura definida. Algumas vantagens deste sistema é a redução de até 50% do tempo de pré-aquecimento e aumento da eficiência geral em 15-25%.	8 - 9	Disponível



Tabela 36:
Medidas de descarbonização de processos de soldadura

Tecnologia ou Medida	Impacto da Medida	Estado de desenvolvimento (TRL)	Disponibilidade comercial
Processos de soldadura avançados	A soldadura MIG, TIG e por elétrodo revestido continuam a ser das técnicas favoritas em muitas indústrias, mas já se observa um aumento da utilização de metais avançados. Esses metais englobam materiais como ligas intermetálicas de alumineto de titânio, alumineto de níquel, alumineto de ferro, ligas fortalecidas por dispersão de óxidos (ODS), compósitos de matriz metálica (MMCs), superligas de níquel, ligas de alumínio (incluindo ligas de Al-Li), ligas de magnésio e aços inoxidáveis supermartensíticos. Estes materiais exigem um desempenho avançado de soldadura. Processos de soldadura avançados, como a soldadura magnética, ultrassónica, explosiva, por fricção, híbrida ou a laser, são aplicados para lidar com possíveis problemas e fornecer melhores resultados.	4 - 9	Disponível a curto prazo
Soldadura a laser	Uma das mais recentes inovações na soldadura envolve o uso da tecnologia laser para fundir instantaneamente duas peças metálicas. O feixe de laser é extremamente preciso e permite uma soldadura fina, mesmo quando se trata de peças extremamente intrincadas. A soldadura a laser consegue ser até 10 vezes mais rápida do que a soldadura MIG típica. Ao mesmo tempo, não requer altas temperaturas ou múltiplas passagens. Isto torna-a bastante eficiente para processos de fabrico de alta precisão.	8 - 9	Disponível

Tabela 36:
Medidas de descarbonização de processos de soldadura

Tecnologia ou Medida	Impacto da Medida	Estado de desenvolvimento (TRL)	Disponibilidade comercial
Soldadura automatizada	Em breve a robótica poderá automatizar todo o processo de soldadura, seguindo instruções baseadas num programa. Este programa pode depois ser ajustado por um soldador profissional para se adaptar ao projeto específico. As indústrias estão a descobrir que os robôs são uma solução altamente rentável, especialmente na produção em massa, uma vez que são capazes de trabalhar eficientemente sem erros humanos. A soldadura robótica é mais adequada para soldaduras curtas com tarefas repetíveis e previsíveis, para que não tenham de ser constantemente reprogramadas.	7 - 9	Disponível a curto prazo
Utilização de cobots (robots colaborativos) de soldadura	Um cobot de soldadura, ou robô colaborativo de soldadura, é projetado para ajudar os soldadores humanos no processo de soldadura. Está equipado com sensores e programação que lhe permitem trabalhar ao lado dos soldadores humanos sem a necessidade de barreiras de segurança. O cobot de soldadura pode realizar várias tarefas de soldadura e é programado para trabalhar em colaboração com os soldadores humanos, ajudando-os nas tarefas mais repetitivas ou fisicamente exigentes da soldadura. Uma das principais vantagens dos robots de soldadura é a sua capacidade de melhorar a segurança e ergonomia do processo de soldadura.	7 - 9	Disponível a curto prazo
Realidade aumentada e realidade virtual	A soldadura trata-se de uma profissão complexa, que envolve vários riscos para a saúde e segurança, exigindo elevados níveis de habilidade para o operador. É neste contexto que a realidade aumentada e virtual tem potencial de integração. Ao criar simulações de ambientes de trabalho reais, os profissionais podem treinar novos soldadores de forma eficaz, sem o risco de acidentes. O uso de simulações de realidade aumentada é também uma forma rentável de treinar novos soldadores.	6 - 8	Disponível a curto prazo

Tabela 36:
Medidas de descarbonização de processos de soldadura

Tecnologia ou Medida	Impacto da Medida	Estado de desenvolvimento (TRL)	Disponibilidade comercial
EPI mais seguros	Os soldadores encontram-se frequentemente expostos a vários gases tóxicos e cancerígenos. Além disso, as suas tarefas envolvem riscos de queimaduras ou choques elétricos. As empresas têm investido em respiradores que podem ajudar a proteger os trabalhadores de fumos nocivos, enquanto introduzem equipamentos de EPI mais resistentes ao calor, a fumos tóxicos e a partículas ultrafinas.	9	Disponível

4.4.8. Economia Circular

O SMM está focado em transformar os modelos de consumo e produção atuais, com o objetivo de alcançar a descarbonização e apostar na sustentabilidade. Naturalmente que este processo passa pela implementação de modelos de economia circular que visam maximizar o uso eficiente de recursos, reduzindo resíduos, reutilizando materiais, apostando no *ecodesign*, extensão de vida útil dos produtos, eficiência energética e promovendo a regeneração dos ecossistemas naturais.

No âmbito deste roteiro, tendo em conta as ações de Economia Circular, foram identificadas 14 ações-alvo, das quais 5 de curta duração e 9 de média/longa duração, todas acompanhadas de medidas específicas a serem implementadas. No total, foram sugeridas 30 medidas, sendo 8 de curta duração e 22 de média/longa duração, detalhadas ao longo do relatório, bem como o seu impacte na descarbonização.

Todas as ações são importantes, mas é necessário prioriá-las de acordo com o tempo de implementação de acordo com a realidade de cada organização.

A Figura 14 apresenta, de forma resumida, uma sugestão de ações-alvo e medidas, por cada área da circularidade definida neste roteiro.

4.4.8.1 Ecodesign e eficiência de materiais

A implementação de medidas de eficiência dos materiais pode ajudar a promover a circularidade no setor metalúrgico e metalomecânico, ao otimizar a utilização dos produtos e mitigar a procura de materiais metálicos virgens, diminuindo a necessidade de extração de matérias-primas (IRENA, 2023).

Cerca de 80% do impacte ambiental de um produto é originado na sua fase de conceção, pelo que as decisões tomadas nesta fase e durante o desenvolvimento do produto influenciam significativamente o seu impacte. Pela perspetiva da economia circular, as oportunidades de melhoria iniciam-se precisamente nesta fase, contemplando o redesenho de produtos, através da aplicação de estratégias de *ecodesign*, com os objetivos de:

- Desenhar os produtos para eliminar o desperdício e a poluição;
- Permitir que o produto seja modular, atualizado e ou reparável, tornando-o mais circular;
- Estender o seu ciclo de vida;
- Ser desenhado pensando no seu fim de vida, facilitando processos de reciclagem ou reutilização;
- Incluir matérias-primas no produto que se possam regenerar a natureza (EMFoundation, 2022).



Figura 14- Resumo das medidas de economia circular recomendadas e identificação do potencial de implementação para curta e média-longa duração.

Em relação às estratégias de eficiência dos materiais, segundo o *Roadmap* Tecnológico do Aço e do Ferro da Agência Internacional da Energia (*International Energy Agency* - IEA), estima-se que a sua aplicação possa reduzir a procura global de aço em cerca de um quinto até 2050 (IEA, 2022). No entanto, a implementação dessas estratégias enfrenta desafios, dado que a adoção de medidas de eficiência material muitas vezes requer mudanças técnicas complexas a nível produtivo e a implementação de regulamentação adequada (IRENA, 2023).

As estratégias de eficiência de materiais estão diretamente relacionadas com medidas de *ecodesign,* por isso, é imprescindível perceber bem este conceito, e de que forma a sua implementação pode melhorar a eficiência nos produtos do SMM. Na Figura 4 está representada uma visão geral das estratégias de *ecodesign* que poderão ser aplicadas ao longo da cadeia de valor do setor do metal, e que contribuem para o aumento da eficiência de materiais utilizados.

Uma das principais ações de circularidade no design do produto deve ser reduzir, sempre que possível, a quantidade de matérias-primas necessárias para o seu fabrico, sem afetar sua aplicabilidade (IRENA, 2023).

Existem diferentes desafios que podem induzir as organizações a adotarem medidas de eficiência de materiais, nomeadamente, regulamentação, inovações tecnológicas de produção ou aumento de custos das matérias-primas e processos. As organizações devem, assim, estar preparadas para estas mudanças e gerir a integração das mesmas, antevendo riscos e criando planos de ação e mitigação dedicados, de forma a poderem tornar-se mais resilientes (IRENA, 2023). No contexto do *ecodesign* e eficiência de materiais são apresentadas algumas medidas que devem ser consideradas no setor do metal (Tabela 37)



Figura 15 - Princípios e estratégias de ecodesign ao longo da cadeia de valor do setor do metal (Adaptado de (Konteh et al., 2023)).

Tabela 37
Medidas de economia circular e respetivo impacte na descarbonização na área de intervenção do *ecodesign* e eficiência de materiais.

Medida	Impacto da Medida
Considerar um design de produto circular, procurando reduzir a quantidade, volume e / ou o peso dos materiais utilizados.	A redução da quantidade de material utilizado nos produtos impacta diretamente na redução de emissões CO_2 e a redução de custos. Considerando o design do produto, medidas como a otimização do material utilizado, materiais mais leves e projetar o produto com base em princípios circulares, podem levar a potenciais poupanças de materiais. Alguns estudos mostram que na construção de um módulo de escritório, é possível reduzir até 30% do aço utilizado através da otimização no design de componentes (Allwood, 2013).

Tabela 37
Medidas de economia circular e respetivo impacte na descarbonização na área de intervenção do *ecodesign* e eficiência de materiais.

Medida	Impacto da Medida
Desenhar produtos com maior durabilidade e fácil reparação.	Desenhar produtos para uma fácil reparação e re-fabricação reflete-se na redução de custos e no impacte ambiental, comparativamente à produção de novos componentes. Para além disso, é um fator chave para potenciar a resiliência da organização face aos possíveis constrangimentos no fornecimento de matérias-primas. Isto é possível, ao apostar no fabrico de produtos com componentes que podem ser facilmente substituídos, atualizados ou reparados, prolongando-se a vida útil dos produtos e reduzindo a necessidade de fabricar novos produtos inteiros, com consequente impacte na emissão de CO_2. Adicionalmente, a manutenção e a reparação tornam-se mais fáceis, exigindo menos energia e recursos e também facilita a reciclagem e a reutilização destes componentes.
Priorizar o uso de matérias-primas secundárias (material reciclado ou recuperado) e / ou de base biológica	O uso de matéria-prima secundária reduz a necessidade de extração e processamento de matérias-primas virgens, cujos processos são altamente intensivos em energia e geram grandes quantidades de gases com efeito de estufa. Por exemplo, a produção de alumínio reciclado consome até 95% menos energia do que a produção a partir do minério de bauxita (Raabe et al., 2022). Além disso, essa prática conserva recursos naturais e promove a eficiência energética, já que a produção de metais a partir de sucata geralmente requer menos energia. Incorporar materiais reciclados também contribui para a redução de resíduos sólidos industriais e pós-consumo, promovendo um ciclo de vida mais sustentável para os materiais. Estima-se, por exemplo, que a reutilização de vigas de aço na construção possa resultar numa redução de cerca de 40% deste material virgem, rondando um custo entre 358€ e 1.123€ por tonelada de CO2e reduzido (Dunant et al., 2019).
Reutilização direta de componentes.	Os componentes de maior dimensão de produtos em fim de vida, particularmente vigas de aço de edifícios antigos, podem ser reutilizados diretamente sem reciclagem, evitando assim o uso de recursos na sua transformação.
Procurar priorizar o uso de matéria-prima reciclável.	O aço, pode ser infinitamente reciclado sem perda de qualidade. A reciclagem de sucata de aço de produtos em fim de vida é uma prática já bem estabelecida, uma vez que faz sentido do ponto de vista económico que os produtores de aço adotem um processo de reciclagem que consome menos energia do que produzir aço novo a partir de minério de ferro (Wang et al., 2021). Hoje, cerca de 30% do aço mundial é produzido a partir de sucata de aço (WSA, 2020). Ao utilizar sucata de alumínio, as emissões de CO2 podem ser reduzidas em 92% em comparação com o alumínio bruto e ao utilizar sucata de cobre, é possível reduzir até 65% das emissões de CO2 (EuRIC, 2020).
Eliminar ou substituir a utilização de substâncias nocivas e perigosas por alternativas menos prejudiciais para o ambiente.	Esta medida é transversal a todo o tipo de produtos. Além de contribuir para diminuir a poluição ambiental, também permite uma maior segurança para o ser humano.
Comprar produtos ou serviços com baixa pegada de carbono e elevada performance ambiental comprovada. .	A seleção de fornecedores com elevada performance ambiental comprovada poderá levar a reduções significativas na pegada de carbono da organização. A incorporação da diretiva da *Due Diligence* de Sustentabilidade Corporativa (*Corporate Sustainability Due Diligence Directive* - CSDD) é uma garantia de qualidade na seleção de fornecedores com melhor performance ambiental, permitindo avaliar os impactes ambientais e a adoção de critérios rigorosos de sustentabilidade. O processo inclui a monitorização contínua do desempenho ambiental dos fornecedores e a exigência de transparência nos relatórios sobre práticas e resultados. Além disso, promove a inter-relação com os *stakeholders* para alinhar as práticas de seleção às expectativas sociais e impõe responsabilidades legais para assegurar a conformidade com altos padrões ambientais (EC, 2022). Também a norma ISO 20400-2017 fornece um entendimento do que são compras sustentáveis, identificando como a sustentabilidade afeta os diferentes aspetos da atividade de compra (ISO20400.org). No caso do fornecimento de aço bruto, por exemplo, pode-se encontrar variações de emissões em cerca de 1.000 kg CO_2e entre fornecedores por tonelada de produto (Schiessl et al., 2020).

Tabela 37
Medidas de economia circular e respetivo impacte na descarbonização na área de intervenção do *ecodesign* e eficiência de materiais.

Medida	Impacto da Medida
Implementar uma estratégia de envolvimento de fornecedores para garantir a sua participação na redução de emissões de gases com efeito de estufa na cadeia de valor.	A seleção de fornecedores de acordo com critérios de sustentabilidade consegue levar a uma redução de custos em cerca de 5% associados à aquisição de matéria-prima, além de contribuir para a redução de impactes ambientais através da redução de emissões de CO_2e (Kumar et al., 2014).
Investir em tecnologias de elevada eficiência de forma a maximizar o uso de recursos e reduzir a quantidade de resíduos gerados.	Investir em tecnologias de elevada eficiência, procurando implementar práticas de economia circular e obter um elevado desempenho ambiental dos processos de fabrico, apoia a maximização do uso eficiente de matérias-primas e, consequentemente, a redução da quantidade de resíduos produzidos, contribuindo para melhorar a produtividade, custos operacionais e impacte ambiental.

Casos práticos de eficiência de materiais

Redução da espessura do aço para embalagens



A tecnologia usada para produzir a folha-de-flandres (FF) de aço usada em latas para alimentos e bebidas é muito sofisticada. Desde que a Baosteel desenvolveu o aço FF pela primeira vez em 1998, a sua espessura foi reduzida de 0,280 para 0,225 mm. A folha-de-flandres mais fina é amplamente utilizada na indústria de embalagens de bebidas.

A redução da espessura do material requer laminação adicional do aço, o que aumenta ligeiramente o consumo de energia do forno de reaquecimento e dos rolos. No entanto, reduzir a espessura da folha-de-flandres traz benefícios: menor incorporação de aço e melhoria significativa da taxa de produção de latas acabadas. Os impactes nos transportes também são reduzidos devido ao menor peso transportado, o que, por sua vez, diminui as emissões atmosféricas e o consumo de energia.

Os benefícios ambientais do ciclo de vida do material FF mais fino foram quantificados numa Avaliação do Ciclo de Vida de latas de aço de duas peças feitas pela *Baoyi Can Making Co., Ltd.* A redução da espessura do aço referida permitiu não só diminuir o peso do material utilizado, mas também reduzir as emissões de CO2 das latas de aço em 14,5%, ao longo do seu ciclo de vida (Baosteel, 2024).

Fechar o ciclo de produção de automóveis



O Grupo Renault tem concentrado a sua política de redução de carbono ao longo de várias décadas, abrangendo todo o ciclo de vida dos veículos - desde o design e produção até à vida útil e reciclagem. A empresa visa tornar-se líder europeia da indústria automóvel na economia circular.

Para alcançar essa meta, o *Renault Group* reestruturou indústrias inteiras na apresentação do conceito *Renault Scénic Vision*, em 2022, que aplicou o plano de redução de carbono do grupo e da marca a todo o ciclo de vida do veículo, introduzindo avanços significativos no âmbito da economia circular.

A estratégia de economia circular está atualmente em prática com o lançamento do Renault Scénic E-Tech Electric, um carro familiar que incorpora até 24% de materiais reciclados (como alumínio reciclado e garrafas plásticas) e é 90% reciclável (em massa, incluindo a bateria) em fluxos industriais, permitindo a produção de novos veículos a partir dos materiais reciclados. Este enfoque pode ter um impacte substancial na redução do impacte ambiental no setor metalúrgico, pois o uso de alumínio reciclado diminui a procura pela extração e processamento de metais primários, reduzindo assim as emissões de carbono associadas a essas atividades.

Um dos desafios mais importantes na implementação da economia circular é o *ecodesign*. Uma das práticas frequentemente implementadas envolve a produção de peças com um único material para simplificar a reciclagem no futuro.

O compromisso do *Renault Group* com a redução de carbono e a economia circular representa um avanço significativo na indústria automóvel. Através de inovações tecnológicas e *ecodesign,* a empresa está a pavimentar o caminho para um futuro mais sustentável e, desta forma, a contribuir também para a diminuição do impacte ambiental no setor metalúrgico (Richard, 2023).

4.4.8.2. Logística e Processos para a Economia Circular

As operações logísticas na cadeia de abastecimento resultam em poluição ambiental e num extenso consumo de recursos, desempenhando um papel crucial na implementação eficaz da economia circular (Zaman & Shamsuddin, 2017).

Uma cadeia de abastecimento consiste em todas as partes envolvidas, direta ou indiretamente, no fluxo e transformação de bens e serviços, desde a produção do produto até ao cliente final. A logística direta inclui os fluxos no sentido da origem até ao cliente final, ao longo da cadeia de abastecimento. A logística inversa, conforme o nome indica, refere-se aos fluxos que ocorrem no sentido inverso, isto é, do cliente final até à origem de um bem ou serviço. Neste âmbito, então incluídos a recolha e o tratamento de produtos e resíduos, bem como atividades de reparação e manutenção e extensão do ciclo de vida dos produtos.

Sistemas de recolha seletiva, logística inversa e armazenamento eficiente são essenciais para garantir uma boa gestão de materiais ao longo da cadeia de valor de forma economicamente viável, enquanto contribuem para uma redução de impacte ambiental. Adicionalmente, a otimização de rotas de transporte e o uso de veículos sustentáveis podem contribuir para reduzir as emissões de carbono associadas à logística (Jayarathna et al., 2022).

Desta forma, é fundamental que a indústria metalúrgica e metalomecânica, com uma rede logística complexa, esteja sensibilizada para adotar medidas que contribuam para a redução das emissões de carbono. Na Tabela 38 estão exemplificadas algumas medidas a adotar e de que forma podem impactar na descarbonização do setor do metal.

Tabela 38:
Medidas de economia circular e respetivo impacte na descarbonização na área de intervenção da logística

Medida	Impacto da Medida
Implementação de tecnologias de rastreio e monitorização	Uso de IoT (Internet das Coisas) e RFID (Identificação por Radiofrequência) para monitorizar a movimentação de materiais e otimizar rotas de recolha e distribuição. Por sua vez, isso irá aumentar a eficiência na recolha e transporte de materiais, facilitando a sua recuperação e reciclagem, reduzindo emissões de dióxido de carbono e desperdício de recursos. A ArcelorMittal, por exemplo, ao utilizar sistemas de rastreio, reduziu as emissões de CO_2 nas suas operações logísticas em aproximadamente 10% (ArcelorMittal, 2022).
Logística inversa de resíduos	Colaboração com empresas de logística, governos locais e entidades de reciclagem para criar uma infraestrutura de logística inversa robusta e eficiente, irá aumentar a taxa de recuperação e reciclagem, contribuindo para a redução da necessidade de produção primária de metais. A Voestalpine, através de parcerias com empresas de reciclagem, aumentou a sua taxa de reciclagem em 15%, resultando na redução de 30.000 toneladas de CO_2 anualmente (Voestalpine, 2022).

Tabela 38:
Medidas de economia circular e respetivo impacte na descarbonização na área de intervenção da logística

Medida	Impacto da Medida
Investimento em infraestrutura verde	Desenvolvimento de instalações logísticas que utilizem energia renovável e incorporem práticas sustentáveis, como a redução do consumo de água e energia, e a minimização de resíduos, irá contribuir para a redução de emissões de carbono nas operações logísticas.
Otimização de rotas e transporte sustentável	Utilização de softwares de otimização de rotas que minimizam distâncias percorridas e tempos de transporte ou a adoção de frotas de veículos elétricos ou movidos a combustíveis alternativos contribui para a redução do consumo de combustível e as emissões de CO2. A Nucor Corporation, ao otimizar as suas rotas de transporte e utilizando veículos elétricos, reduziu as emissões de CO2 nas suas operações de transporte em 25%, economizando aproximadamente 40.000 toneladas de CO2 por ano (Nucor, 2022).
Integração de cadeias de abastecimento	Promover a integração entre diferentes elos da cadeia de valor para facilitar a troca de informações e a coordenação de esforços na recolha e reciclagem de materiais, potencia a eficiência na gestão de resíduos e materiais recicláveis.

Casos práticos de logística

Otimização da logística da cadeia de abastecimento da ArcelorMittal com análise preditiva

A ArcelorMittal, a maior siderúrgica do mundo, opera duas empresas interdependentes no Quebec: *ArcelorMittal Mines Canada* e *ArcelorMittal Infrastructure Canada*. Após um projeto de expansão de capacidade de produção em 2013-14, as operações canadianas da empresa extraem, processam, transportam e distribuem aproximadamente 26 milhões de toneladas métricas de produtos de minério de ferro anualmente. As operações dispersas da empresa incluem minas de minério de ferro a céu aberto e instalações de processamento em *Mont-Wright* e *Fire Lake*, uma unidade de pelotização e um porto privado em Port-Cartier, além de uma ferrovia de 420 km a conectar as minas ao porto.

Com esta expansão da capacidade de produção, surgiram gargalos logísticos. Para superá-los, a *ArcelorMittal i*mplementou uma nova estratégia de informação, utilizando a plataforma de inteligência empresarial sem necessidade de grandes investimentos adicionais. A empresa integrou e correlacionou dados para apoiar decisões estratégicas e operacionais, monitorizando e otimizando a utilização de equipamentos de mineração, ferrovias e infraestrutura portuária. Através da visualização geográfica do porto e tráfego de navios com dados integrados do sistema de identificação automática (SIA) e sobreposições no *Google Earth,* a empresa otimizou o agendamento da manutenção baseado em requisitos de mercado.

Os benefícios incluíram melhoria na visibilidade e planeamento, acompanhamento consistente da cadeia de abastecimento, resolução eficiente de problemas operacionais e integração de dados para otimizar operações portuárias e ferroviárias, permitindo a gestão eficiente das operações e aumentando a capacidade de carga e descarga de navios.

Em suma, a *ArcelorMittal* conseguiu transformar a sua cadeia logística e melhorar significativamente a eficiência operacional ao integrar dados e fornecer informação para os seus trabalhadores, resultando numa operação mais previsível e resiliente, com redução do impacte ambiental (Surepelly, 2016).

Programa *Zero Carbon Logistics* da Tata Steel



A Tata Steel Nederland lançou o programa *Zero Carbon Logistics* para as suas operações europeias que consiste em várias dezenas de projetos de sustentabilidade logística relacionados com melhorias na rede logística, eficiência da frota e eficiência energética. A meta é alcançar uma redução de 30% de emissões de CO_2 até 2030.

A *Tata Steel Nederland* é a primeira empresa siderúrgica do mundo a utilizar o *Global Logistics Emissions Council Framework* para o relatório de emissões, que torna comparáveis diferentes modalidades logísticas e permite identificar e melhorar os pontos críticos de emissões.

A utilização do *Optimum Voyage* para informação e otimização da rota mais eficiente em termos de consumo de combustível para a logística de transporte resultou numa poupança de aproximadamente 5% das emissões de CO_2.

A Tata Steel Nederland também se concentrou na substituição do transporte rodoviário pelo transporte ferroviário, sendo uma opção mais eficiente e menos impactante a nível de emissões de carbono, com uma redução do transporte rodoviário em mais de 5.000 camiões por ano.

A Tata Steel Nederland está a trabalhar com os seus parceiros da cadeia de valor na utilização de combustíveis alternativos e mais limpos e é membro da *Sustainable Freight Buyers Alliance* (Steel, 2023).

Desde o lançamento do programa *Zero Carbon Logistics*, 25 projetos ativos levaram à redução de 9.162 toneladas de emissões de CO2 em emissões logísticas e proporcionaram benefícios financeiros de 3,7 milhões de euros (Steel, 2021).

4.4.8.3. Gestão de resíduos

A economia circular tem como um dos seus princípios o conceito "resíduo zero", ou seja, a produção de resíduos deverá ser mitigada primordialmente e na etapa de fim de vida de um produto. No momento do seu descarte, deverão ser implementadas estratégias de reciclagem e recuperação de resíduos, passando esta a ser considerada uma fase de transformação para que a matéria-prima (secundária) volte ao mercado novamente, promovendo a circularidade dos materiais.

Assim, a gestão de resíduos é fundamental para criar negócios ambientalmente sustentáveis, eficientes e garantir a conformidade regulatória. O SMM, incluindo atividades de produção de produtos metálicos, gera uma variedade significativa de resíduos, que se não forem devidamente recuperados e valorizados, geram impacte considerável no meio ambiente.

A implementação de práticas eficazes de gestão de resíduos pode, assim, contribuir para a redução de impactes ambientais negativos, como a emissão de gases com efeito de estufa, mas também podem resultar na redução de custos operacionais associados às taxas de resíduos enviados para aterro (Novo Regime Geral de Resíduos - DL n.º 102-D/2020, de 10 de Dezembro), através da reciclagem e reutilização de materiais, como o ferro e o aço que possuem elevado potencial de reciclabilidade, reduzindo simultaneamente a necessidade e consequente compra de recursos virgens e minimizando os custos associados ao descarte de resíduos.

À medida que a regulamentação se torna cada vez mais rigorosa, e que a não conformidade pode resultar em penalizações de custo elevado, que influenciam a reputação da empresa, a gestão de resíduos eficaz torna-se numa abordagem fundamental para mitigar estes riscos.

Na Tabela 39 são apresentadas as medidas identificadas como relevantes no contexto de gestão de resíduos, que irão contribuir para a sua gestão eficiente e para a diminuição da quantidade de resíduos gerados, contribuindo para a descarbonização do setor.

Tabela 39:
Medidas de economia circular e respetivo impacte na descarbonização na área de intervenção da gestão de resíduos.

Medida	Impacto da Descarbonização
Promover o retorno de produtos usados pelo consumidor / Produtor assumir responsabilidade pela recuperação de produtos em fim de vida	A responsabilidade organizacional pela recolha ou devolução, classificação e tratamento de produtos em fim de vida para eventual reciclagem ou reutilização dos materiais que o compõem contribui para a redução da perda de materiais, reparação de equipamentos, diminuindo assim, a necessidade de produção de matéria-prima virgem, podendo também levar a poupanças económicas consideráveis a nível de custos com as matérias-primas (BSI, 2017). A reciclagem de 1 kg de sucata de aço no final da vida útil do produto em detrimento da extração e tratamento do minério, pode contribuir para poupar 1,5 kg de emissões de CO_2e, 13,4 MJ de energia primária e poupar 1,4 kg no consumo de minério de ferro virgem (Broadbent, 2016). Por sua vez, a reutilização da sucata de chapa metálica, em vez da reciclagem convencional do mesmo material, pode levar a uma redução de custos de aproximadamente 40% (~400 €/tonelada) e a uma poupança de aproximadamente 67% (10MJ/kg) no consumo de energia (Ali et al., 2019).
Mapear fluxos de materiais de forma a reduzir perdas.	O mapeamento do fluxo de materiais, com as respetivas quantidades de recursos utilizados e resíduos gerados no processo de produção, é uma ferramenta de apoio para aumentar a eficiência no uso de recursos e diminuir a quantidade de resíduos gerados.
Implementar um sistema integrado de gestão dos resíduos produzidos pela empresa.	Implementar um sistema integrado de gestão de resíduos garante a segregação, reciclagem e tratamento adequado dos mesmos, promovendo a recuperação, reutilização e reciclagem de materiais e a diminuição da quantidade enviada para aterros. A reciclagem de 1 tonelada de aço permite poupar 1,4 toneladas de minério de ferro, 0,8 toneladas de carvão, 0,3 toneladas de calcário e aditivos e 1,67 toneladas de CO2. Uma tonelada de alumínio reciclado economiza até 8 toneladas de bauxita, 14.000 kWh de energia e 7,6 metros cúbicos de aterro (EuRIC, 2020).
Investir na monitorização e reparação de peças e equipamentos de produção.	A monitorização do estado de peças e equipamentos de produção contribui para fazer uma análise preditiva das necessidades de intervenção e manutenção, permitindo maximizar a eficiência operacional, minimizar os tempos de inatividade, evitando fugas e apoiando a redução de custos associados a danos graves nos ativos, prolongando a sua vida útil e, consequentemente, reduzindo perdas.

Casos práticos de resíduos

Recuperação e reciclagem de materiais



O Grupo Renault, com a sua política de redução de carbono em todo o ciclo de vida do veículo – desde a extração de materiais, à sua transformação, produção, utilização, até ao seu fim de vida - pretende tornar-se o principal fabricante europeu de automóveis através da circularidade.

A recuperação de materiais que compõem os veículos em fim de vida é uma estratégia para atingir a mobilidade hipocarbónica, permitindo produzir novos veículos com um impacte ambiental menor. Com este objetivo, a organização desenvolveu ciclos fechados para reciclar materiais como o cobre, o plástico, o aço e o alumínio de forma a reintegrá-los na produção de automóveis novos. Até 2030, o *Grupo Renault* estabeleceu também como objetivo reutilizar cerca de 80% do minério proveniente de baterias recicladas – níquel, cobalto e lítio – no fabrico de novas baterias (Mazier, 2024).

Adicionalmente, foi lançada uma linha de peças e componentes recondicionados dedicados a veículos elétricos, juntando-se à linha existente de peças

eletrónicas e motores de combustão recondicionados. O proprietário de um veículo elétrico tem agora a opção de substituir uma peça defeituosa por uma peça usada recondicionada por um preço cerca de 30% mais baixo comparativamente ao de uma peça nova (GROUP, 2023).

A implementação de processos mais circulares está frequentemente associada a alguns desafios para a organização, dado que envolveu a remodelação de processos, garantindo uma gestão eficiente do fluxo de reutilização de peças e materiais e o investimento em novas tecnologias. Apesar dos desafios, a organização considera que o investimento em processos mais circulares continua a ser vantajoso para a organização, trazendo novas formas de rendimento e melhorando a sua reputação com o compromisso para com a sustentabilidade. Adicionalmente, a reutilização de materiais de veículos usados para fabricar veículos novos é também uma forma de ultrapassar o risco para o negócio associado ao aumento dos preços das matérias-primas e à escassez de alguns componentes.

4.4.8.4. Inovação e modelos de negócio

A inovação através do investimento em modelos de negócio circulares, procura criar novas formas de operar e criar valor de forma sustentável, tendo como base a reutilização, reciclagem e regeneração de materiais, prolongando o ciclo de vida dos produtos e minimizando o desperdício.

No setor metalúrgico e metalomecânico, onde a extração e a transformação de matérias-primas são intensivas em energia e recursos naturais, a transição para um modelo de negócio circular que priorize a reutilização e recuperação de materiais e que promova a redução de desperdício através de formas inovadoras, trará inúmeras vantagens do ponto de vista da sustentabilidade, além de reduzir a dependência pelo setor de matérias-primas externas à Europa.

Os modelos de negócio circulares visam assim a inovação e a criação de valor através do desenvolvimento de novos produtos ou serviços mais sustentáveis e da implementação de novos processos associados às várias etapas da cadeia de valor. Irão conceder às empresas a oportunidade de explorar novos mercados e áreas de negócio, trazendo novas fontes de receita, fortalecendo a resiliência e a competitividade das empresas do setor.

Neste tópico, existem diversas medidas inovadoras que podem ser implementadas que irão contribuir para a criação de modelos de negócio mais circulares.

Na Tabela 40 estão identificadas medidas que permitem criar modelos de negócio circulares, focadas na partilha e gestão de recursos e na criação de serviços que permitam trazer novas fontes de rendimento para a organização.

Tabela 40:
Medidas de economia circular e respetivo impacte na descarbonização na área de intervenção da inovação e criação de modelos de negócio circulares.

Medida	Impacto na Descarbonização
Implementação de simbioses industriais	A simbiose industrial, consiste numa estratégia que procura promover a interligação de recursos nas organizações e entre organizações, promovendo a partilha dos mesmos. No caso do setor do metal, por exemplo, as aparas transformadas resultantes de processos de maquinaria podem servir, na forma de pós, para o fabrico aditivo na própria empresa ou noutra, permitindo assim, reduzir as emissões associadas ao fabrico do novo produto e do descarte de resíduos (Emadinia, 2023). A venda ou reincorporação de material não conforme sob a forma de subprodutos ou o reaproveitamento de águas residuais em processos que não exijam água potável podem também ser consideradas estratégias de simbiose industrial.

Tabela 40:
Medidas de economia circular e respetivo impacte na descarbonização na área de intervenção da inovação e criação de modelos de negócio circulares (cont.)

Medida	Impacto na Descarbonização
Produzir de acordo com a procura (sob encomenda)	Produzir um produto ou fornecer um serviço apenas quando encomendado pelo consumidor (sistema pull – estratégia de manufatura Lean) permite controlar riscos de obsolescência de produtos e o uso desnecessário de recursos (BSI, 2017).
Promover a digitalização	A digitalização promove a desmaterialização em relação aos produtos tangíveis, sem reduzir a perceção da qualidade do produto pelo o cliente (BSI, 2017). O investimento em tecnologias digitais e de produção inteligentes pode, por exemplo, passar por monitorizar consumos e emissões e a garantir uma manutenção preditiva através de sensores para deteção e prevenção de falhas nos equipamentos. Isto garante uma gestão da condição dos equipamentos, contribui para melhorar a eficiência operacional, a atualizar processos de produção, aumentando o rendimento da produção e reduzindo as perdas e consumos de materiais e energia. Consequentemente, leva à redução de custos e à diminuição das emissões por gases com efeito de estufa, criando um negócio mais sustentável e resiliente.
Servitização	A servitização (produto como um serviço) permite conceder acesso ao produto sem ter de o adquirir, sendo que as receitas resultam da prestação de serviço, sendo feito um pagamento por utilização do mesmo (Provensi, 2023).
Serviço para extensão do ciclo de vida de produtos	Criar um serviço de reparação, recondicionamento, remanufactura ou recuperação dos produtos vendidos pode constituir uma nova fonte de receitas diferenciadora no mercado para a entidade. Este serviço pode envolver a venda de contratos de manutenção e reparação, aumentando a satisfação e a fidelização dos clientes ao oferecer suporte contínuo e confiável à qualidade dos produtos vendidos.

Casos práticos de Inovação e modelos de negócio

Simbioses industriais



A indústria do setor metalúrgico e metalomecânico tem feito esforços significativos para encontrar novos mercados e aplicações para os seus subprodutos. Os subprodutos gerados no setor já apresentaram bons resultados ao serem utilizados noutros setores. Por exemplo, alguns subprodutos da produção de ferro e aço, tais como escória, pó de forno elétrico a arco, escórias de laminação e lamas de zinco, podem ser utilizados em produtos de fábricas de cimento e em fábricas de fundição de zinco como matéria-prima. A escória possui também outras aplicações, podendo ser utilizada como fertilizante de culturas (sendo rica em diversos elementos-chave como fosfato, silicato, magnésio, cal, manganês e ferro) e como agregado na construção de estradas.

Por sua vez, subprodutos de outros setores industriais podem também ser aplicados na indústria do setor do metal como materiais secundários e reciclados. Por exemplo, a utilização de resíduos de plástico e outros materiais utilizados no setor do metal como combustível pode reduzir em 30% as emissões de dióxido de carbono, comparativamente à utilização de combustíveis fósseis (Branca et al., 2020).

A criação de simbioses industriais pode assim, gerar vantagens ambientais e económicas para as entidades envolvidas. De acordo com Dong et al. (2013) a relação de simbiose industrial no parque industrial de Liuzhou, composto por entidades de produção de ferro/aço, empresas de cimento e indústria química, contribuiu para a diminuição da utilização de material virgem em mais de 2 milhões de toneladas/ano, reduziu a quantidade de resíduos sólidos em 2,4 milhões de toneladas/ano na área industrial e levou a ganhos económicos de cerca de 36 milhões de euros para a empresa de ferro e aço, destacando os potenciais efeitos benéficos que podem advir da criação deste tipo de relações.

Servitização

A Caterpillar, empresa que fabrica máquinas, motores e veículos pesados, orientados principalmente para a construção civil e mineração, adquiriu a *startup* de tecnologia *Yard Club,* cujo modelo de negócio é focado na estratégia de economia de partilha.

A *Yard Club* é especializada em prestar apoio a empresas de construção a gerir e alugar os seus equipamentos, através de uma plataforma *online,* quando os mesmos não estão a ser utilizados. Com sede em São Francisco, a empresa desenvolveu uma plataforma Software as a *Service (SaaS)* para ajudar os clientes a gerir de forma eficiente os equipamentos que possuem ou alugam, incluindo ferramentas para gestão da expedição, frotas, bem como de gestão de inspeção e manutenção dos mesmos.

De acordo com o site da *Yard Club,* a empresa obteve lucro na ordem dos 120 milhões de euros em contratos de aluguer com cerca de 2.500 empresas, apenas em 2016 (Slowey, 2017). Do lado do consumidor, a construtora McGuire & Hester, na Califórnia, ao utilizar os serviços da Yard Club, alugou os seus equipamentos que não estavam a ser utilizados, tendo obtido um lucro de cerca de 100 mil euros em pouco mais de um ano (Pramuk, 2015).

Serviço para extensão do tempo de vida de produtos

A Konecranes, empresa de venda de equipamentos de elevação (gruas e empilhadoras), oferece um programa *Lifecycle Care* que inclui serviços de consultoria, modernização e manutenção dos seus produtos. Possui um serviço de gestão de ativos dos clientes através de uma abordagem holística de Serviços de Ciclo de Vida, agregando dados, máquinas e pessoas para oferecer uma experiência digital ao cliente.

O seu programa de manutenção preditiva permite melhorar a segurança e a produtividade em tempo real e minimizar o custo do tempo de inatividade, maximizando o valor ao longo do tempo de vida dos equipamentos.

Desta forma, promove a venda de serviços como meio para gerar novas vendas de produtos e vice-versa, além de contribuir para que seja melhorada a colaboração entre unidades, através da partilha de informação entre diferentes unidades de negócio (Konecranes, 2024).

4.4.8.5. Capacitação

A consciencialização no âmbito da economia circular envolve a compreensão e o reconhecimento, por parte dos colaboradores e líderes, dos princípios e benefícios da economia circular. Isso inclui a compreensão dos impactes ambientais, sociais e económicos das práticas circulares, bem como a importância de adotar novos modelos de negócio e processos produtivos mais sustentáveis. A capacitação, por sua vez, refere-se à preparação e desenvolvimento de habilidades e conhecimentos específicos relacionados com a economia circular. Isso pode incluir formação que abrange desde o design sustentável, análise de ciclo de vida, logística inversa, à gestão de resíduos, ou outros temas considerados relevantes. A capacitação visa, assim, fornecer aos colaboradores as ferramentas necessárias para implementar práticas circulares nas suas atividades diárias.

A consciencialização e a capacitação tornam-se assim ações fundamentais, pois a consciencialização promove a mudança de mentalidade e o envolvimento dos colaboradores e a capacitação fornece as competências técnicas e práticas necessárias para a implementação efetiva da economia circular. A combinação destas ações contribui para a criação de

uma cultura organizacional voltada para a sustentabilidade e a inovação, alinhada aos princípios da economia circular, contribuindo para a melhoria do desempenho ambiental e económico das organizações.

As políticas para a economia circular englobam uma série de iniciativas voltadas para a formação e qualificação de profissionais e a consciencialização da população em geral. Acompanhar e antecipar a futura regulamentação que influenciará a atividade empresarial, sensibilizar e envolver a direção, gestores, líderes e os restantes colaboradores de uma organização sob o mesmo propósito, será determinante para o sucesso da circularidade na organização (OECD, 2024). Criar uma estratégia de sustentabilidade, aliada a políticas e regulamentação, é assim fundamental para delinear um caminho eficaz rumo à circularidade. A estratégia transcende ações isoladas ou iniciativas pontuais de responsabilidade social e ambiental, integrando princípios de sustentabilidade nos processos centrais de negócio. O objetivo é gerar valor a longo prazo, tanto para a empresa quanto para a sociedade em geral. Tal abordagem envolve a análise do impacte das atividades empresariais em questões cruciais como alterações climáticas, uso de recursos naturais, direitos humanos, diversidade e inclusão, ética nos negócios e transparência. Além de mitigar riscos, o compromisso com uma estratégia de sustentabilidade promove oportunidades de inovação, crescimento, atração e retenção de talento e aprimora a reputação e o valor da marca. Para assegurar a eficácia da sustentabilidade, esta deve ser incorporada na cultura organizacional, desde a gestão de topo até ao nível operacional. A consideração de fatores ESG (Ambientais, Sociais e de Governança) pode, assim, proporcionar vantagens através da redução de custos, crescimento de vendas, estímulo à inovação e redução de riscos.

Os materiais metálicos utilizados como matéria-prima na indústria metalomecânica possuem uma elevada capacidade de reciclagem e reaproveitamento. É importante mapear os recursos utilizados e as lacunas no processo produtivo. Reduzir o desperdício de matéria-prima e de outros recursos (energia e água) é uma ação importante e é necessário avaliar o processo produtivo diariamente para mapear pontos onde podem estar a ocorrer desperdícios. No setor global da indústria metalomecânica, durante a produção, existem resíduos como aparas do corte de chapas e outro tipo de sucata. Esse desperdício pode ser reutilizado no fabrico de novos produtos, integrando-se no processo produtivo da própria organização, ou em potenciais valorizações por outras indústrias. Isto permite a formação de parcerias que fomentam a economia circular não apenas dentro da empresa, mas também simbioses entre outras organizações. A identificação deste tipo de oportunidades poderá ser realizada em parceria com outras empresas, como fornecedores, clientes ou universidades e centros de tecnologia e inovação, através da transferência de conhecimento, para avaliar a viabilidade económica de novos modelos de negócio circulares.

Envolver uma mudança de cultura fomentada pelo benchmarking do setor, realizar o diagnóstico da situação atual da empresa e delinear uma estratégia de sustentabilidade para a mesma é projetar o negócio sob uma perspetiva que depende de uma governança estruturada e em constante monitorização. Desta forma, é fundamental serem estabelecidos indicadores de performance, que espelhem o avanço das iniciativas implementadas, de maneira que exista um ambiente de cooperação interno e transparência com as partes interessadas, aquando do seu reporte. O pensamento do ciclo de vida dos produtos, assim como a pegada de carbono corporativa, são ferramentas cruciais para mapear e identificar oportunidades de melhoria ao longo de toda a cadeia de valor, bem como perceber qual o impacte dentro e fora de portas da organização. Cada organização possui especificidades que precisam de ser considera-das num projeto de transição para a economia circular e, no decorrer do processo de execução de um plano de ação, é possível que sejam identificadas novas necessidades, o que ressalta a importância da existência de uma equipa interna que acompanhe diariamente os processos e o reporte. Na Tabela 41 são referidas medidas de capacitação para as organizazões e o seu impacte na descarbonização do setor.

Tabela 41:
Medidas de economia circular e respetivo impacte na descarbonização na área de intervenção da capacitação

Medida	Impacto na Descarbonização
Integração de uma equipa/departamento de sustentabilidade.	A equipa irá promover uma estratégia interna com processos e metas ajustados à empresa. Implementar estratégias de eficiência, quer ao nível energético, como na gestão de resíduos, apoia a reduzir tanto impactes económicos como ambientais.
Desenvolvimento de formações direcionadas para a economia circular.	Desenvolver habilidade e conhecimentos fundamentais sobre economia circular, estratégias e enquadramento legislativo. Desenvolver competências para implementar estratégias e medidas circulares para aumentar a circularidade de uma organização abrangendo temáticas como design sustentável, gestão de resíduos, logística inversa, modelos de negócio circulares e conhecer ferramentas e metodologias de apoio à implementação dessas práticas.
Parcerias entre empresas, instituições de ensino e especialistas.	Colaboração com especialistas em economia circular e sustentabilidade, através de dinâmicas de workshops/palestras/mentorias e resolução problemas concretos.
Disseminação de boas práticas entre o setor.	Visa inspirar e educar profissionais, trazendo outra visão para a resolução de problemas. Atuar de forma eficaz preparando os profissionais para desafios e oportunidades do novo paradigma económico e sustentável. A disseminação de boas práticas poderá passar, por exemplo, por criar materiais educativos, guias ou manuais de casos de sucesso e problemas comuns.
Incentivos para inovação e desenvolvimento de novos produtos.	Investir na inovação de produtos e processos alternativos com ganhos económicos e ambientais. Com a capacitação de aplicar o redesign e obter novos produtos e serviços, fortalece a competência no mercado com soluções mais competitivas e sustentáveis. Poderá passar por criar projetos-piloto com novas tecnologias de emissão zero.
Criação de inventário, medição e quantificação impactes ambientais e económicos.	Quantificar impactes ambientais e económicos (pegada de carbono, avaliação do ciclo de vida e ciclo de custos) permite obter dados claros que comunicam a realidade da empresa. Contribui para a dentificação de hotspots, análise contínua de oportunidades de melhoria com o objetivo de reduzir impactes associados de forma continua. Estas métricas além de poderem ser reportadas de forma transparente podem ser vistas como indicadores anuais no trajeto da descarbonização da empresa.
Certificações e reconhecimentos.	A adoção de declarações e rótulos culmina em evidência do compromisso para com a sustentabilidade, para além de contribuírem para uma vantagem competitiva de mercado. O cumprimento de requisitos necessários para a sustentabilidade é transparente e poderá ser reportado para todos os *stakeholders*.



4.5.Neutralização das emissões de GEE residuais

A meta da neutralidade requer um enorme esforço às empresas do setor na fase de mitigação das suas emissões. Para se atingirem as metas de longo prazo, a redução das emissões torna-se desafiantes, por isso, uma das opções passará pela neutralização dessas emissões residuais por via da compensação de carbono.

Alcançar a neutralidade carbónica exige uma compensação das emissões residuais fora da cadeira de valor, na mesma quantidade de dióxido de carbono equivalente, para contrabalançar o impacte das emissões produzidas. Uma estratégia de neutralização por via da compensação de carbono pode envolver investimento em soluções de base natural ou soluções de base tecnológica que reduzam ou removam as emissões gases com efeito de estufa fora da cadeia de valor da organização.

Para contrabalançar o impacte das emissões residuais de longo prazo, as empresas devem tomar medidas para reduzir ou remover carbono da atmosfera de forma permanente, fora da sua cadeia de valor.

- EGEE a neutralizar = EGEE residuais de longo prazo = EGEE do ano base - EGEE mitigadas.

As empresas em transição para a neutralidade carbónica podem também acelerar este processo compensando as emissões que ainda não foram reduzidas ao longo da jornada de descarbonização, desde que a compensação não substitua as medidas de mitigação das emissões. A figura 16 representa o processo de neutralidade carbónica introduzindo o conceito de neutralização das emissões residuais após o esforço de mitigação das emissões das empresas.

O mercado de carbono proporciona às empresas a possibilidade de neutralizarem as emissões financiando projetos fora da sua cadeia de valor. As empresas que não estejam abrangidas pelo Sistema de Comércio de Licenças de Emissão (CELE) da União Europeia podem comprar créditos de carbono no mercado voluntário de carbono. Esses mercados funcionam paralelamente aos mercados regulados que são estabelecidos por políticas governamentais.

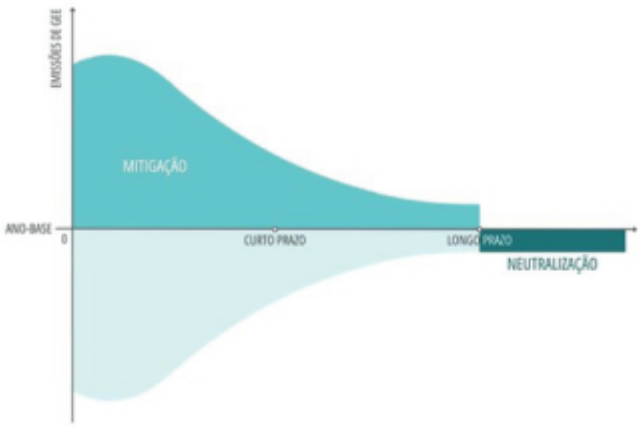


Figura 16 – Etapas do processo de neutralidade carbónica

Os créditos de carbono de maior qualidade são mensuráveis, reais e permanentes, sendo essenciais para alcançar zero emissões líquidas de carbono. A qualidade, transparência e integridade desses mercados são essenciais para garantir que os créditos de carbono realmente resultem em benefícios ambientais reais e duradouros. Um crédito deve resultar na redução de emissões ou remoção de carbono estimada de forma perdurável e conservadora.

Um crédito de carbono é uma unidade transacionável que representa uma tonelada de CO_2e reduzida ou sequestrada por uma atividade desenvolvida por um

projeto de carbono registado no mercado voluntário de carbono. Os projetos estão sujeitos a critérios específicos de elegibilidade, contabilização de emissões e medidas de monitorização, reporte e verificação, por entidades independentes e qualificadas. Os créditos de carbono podem ser produzidos através de diferentes tipos de atividades que reduzam ou removam as emissões gases com efeito de estufa. Estas reduções ou remoções podem resultar de soluções de base natural ou soluções de base tecnológica. Na tabela 42 estão apresentadas algumas tipologias de projetos para compensação de carbono:

Tabela 42:
Tipologias de projetos de compensação de carbono

Projeto	Descrição	Classificação	Base
Reflorestação e arborização	Recuperar florestas destruídas ou plantar novas florestas	Remoção	Natural
Gestão de solo agrícola	Gestão sustentável de pastagens, sequestro no solo e agrofloresta	Remoção	Natural
Restauração de turfeiras	Recuperar turfeiras e pântanos destruídos	Remoção	Natural
Prevenção da conversão florestal	Prevenir a conversão de florestas autóctones	Redução	Natural
Gestão de florestas	Melhoria da gestão de florestas	Remoção, redução ou misto	Natural
Captura direta e armazenamento de carbono (DAC)	Captura direta e sequestro de carbono da atmosfera	Remoção	Tecnológica
Biochar	Carvão vegetal empregado para correção do solo	Remoção	Tecnológica
Bionergia com captura e armazenamento de carbono	Capturar e armazenar carbono através do uso de bioenergia	Remoção	Tecnológica
Energias renováveis	Instalar energia renovável em países em desenvolvimento	Redução	Tecnológica
Eficiência energética	Fornecer equipamentos mais eficientes a terceiros	Redução	Tecnológica

4.6. Monitorização e reporte de desempenho

A monitorização da pegada e o seu progresso em relação às metas estabelecidas deve ser anualmente revista, utilizando os mesmos critérios e metodologia da contabilização do ano-base, de forma a garantir a consistência e comparabilidade. A monitorização anual da pegada de carbono utilizando a metodologia do Greenhouse Gas Protocol é uma prática essencial para qualquer organização comprometida com a neutralidade carbónica. Esse processo não só possibilita o rastreamento do progresso e ajuste das estratégias, como também promove a transparência do reporte e a responsabilidade neste âmbito.

O relato deve ser feito anualmente, em conformidade com a legislação da UE, através de *standards* internacionalmente reconhecidos.

A monitorização e a divulgação de dados relacionados com os roteiros de neutralidade devem seguir os princípios da relevância, integralidade, consistência, transparência e rigor:

- Relevância: Garantir que as metas reportadas refletem adequadamente a realidade da empresa em relação às emissões de GEE e atendem às necessidades de tomada de decisão de todos os *stakeholders*.
- Integralidade: Contabilizar e reportar todas as fontes e atividades de emissão de GEE dentro das fronteiras selecionadas e justificar quaisquer exclusões.
- Consistência: Usar metodologias consistentes para permitir a comparação das emissões ao longo do tempo e justificar quaisquer alterações ao método, fronteiras, fatores de emissão ou qualquer outro dado relevante.
- Transparência: Abordar todas as questões relevantes de forma factual e coerente, divulgando a metodologia, fronteiras, fontes de dados, exclusões e pressupostos.
- Rigor: Reduzir ao máximo as incertezas e alcançar a precisão suficiente no cálculo e relato das emissões de GEE, garantindo a integridade das informações relatadas, na frequência adequada.

Além disso, devem incluir a seguinte informação:

- As emissões de GEE do ano-base, a descrição do método utilizado e as fronteiras
- As metas de curto e longo-prazo, totais e por âmbito
- O progresso ao longo dos anos através de indicadores de desempenho
- As iniciativas para atingir as metas
- Justificação de variações no método de cálculo, nas fronteiras ou nas metas

Os indicadores de desempenho são uma ferramenta fundamental na monitorização e avaliação do progresso dos roteiros, permitindo aferir a eficácia das ações implementadas. A escolha dos KPIs deve ser adaptada ao objetivo do roteiro e à realidade da organização. Alguns dos indicadores que permitem avaliar o desempenho e progresso das organizações rumo às metas do seu roteiro são:

- Emissões da organização: Total de Emissões de GEE/ano, em t CO_2e
- Emissões âmbito 1: Emissões de GEE/ano de âmbito 1, em t CO_2e
- Emissões âmbito 2: Emissões de GEE/ano de âmbito 2, em t CO_2e

- Emissões âmbito 3: Emissões de GEE/ano de âmbito 3, em t CO_2e
- Emissões residuais neutralizadas: Emissões de GEE residuais compensadas fora da cadeia de valor/ano, em t CO_2e
- Intensidade carbónica: Emissões de GEE/unida de produzida/ano, em t CO_2e/un
- Evolução da pegada: Redução das emissões de GEE em comparação com o ano-base, em t CO_2e
- Trajetória da pegada: Taxa de redução das emissões de GEE em comparação com o ano anterior, em %
- Retorno do investimento: Emissões reduzidas por cada euro investido, em t CO_2e/€

A par destes indicadores, as empresas devem monitorizar de forma regular os consumos de energia, de combustíveis, de materiais, a produção e destino de resíduos, bem como todas as variáveis que contribuem para as emissões de GEE, como exemplifica na tabela 43.

As empresas deverão rever as metas definidas, no mínimo, a cada cinco anos de forma a garantir o requisito da consistência e deverão ser atualizadas e revalidadas quando ocorrem mudanças significativas que possam comprometer a metas existentes.

Tabela 43:
Indicadores de monitorização com impacte nas emissões de GEE

Indicador	Exemplos	Unidade
Combustível consumido	Quantidade de combustíveis fósseis consumidos (ex.: gasolina, gasóleo, gás natural)	kWh
Fugas de gases refrigerantes	Fugas de gases refrigerantes durante a manutenção ou descarte dos equipamentos	kg
Consumo de energia elétrica	Quantidade de energia elétrica adquirida	kWh
Autoconsumo de energia renovável	Quantidade de energia renovável produzida para autoconsumo	kWh
Consumo de calor/vapor	Quantidade de calor ou vapor adquirido	kWh
Viagens de negócios	Distância percorrida em viagens de negócios, por meio de transporte	km
Deslocação de funcionários	Distância percorrida por funcionários entre casa e trabalho, por meio de transporte	km
Materiais adquiridos	Peso dos diferentes materiais adquiridos	kg
Transporte de matérias-primas	Distância e carga transportada, por meio de transporte	km, kg
Transporte de produtos vendidos	Distância e carga transportada, por meio de transporte	km, kg
Gestão de resíduos	Peso dos resíduos gerados, por tipo de resíduo e operação de tratamento	kg


0425935 5686
RESOLVING
TARGET...
ELIMINATION
STARTED

5.

CENÁRIOS PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO SETOR METALÚRGICO E METALOMECÂNICO ATÉ 2050

A construção de cenários de evolução do uso de energia no setor até 2050 é importante de forma a projetar uma transição energética sustentável, e desenhar um roteiro que permita atingir as metas estabelecidas de forma custo-eficaz. Este exercício de cenarização tem por base documentos de referência como o Roteiro para a Neutralidade Carbónica, o qual prevê uma adoção gradual, por parte das empresas, de vetores energéticos como a eletricidade proveniente de fontes renováveis, o hidrogénio verde e dos biocombustíveis, além da utilização de equipamentos mais eficientes e sustentáveis.

Tendo em conta fatores como o crescimento económico do setor industrial, avanços tecnológicos, e regulamentações ambientais, este exercício é desenvolvido com recurso a um modelo representativo do setor em análise, o qual permite avaliar o impacto que a implementação de diferentes medidas tem em termos de custos de operação do sistema, garantindo a segurança energética e alcançar metas de sustentabilidade. A modelação do setor e dos diferentes fatores com impacto na sua transição energética permite realizar um planeamento eficaz da introdução de novas tecnologias no setor industrial, contribuindo para a descarbonização e eficiência energética, alinhando-se com os objetivos globais de mitigação das alterações climáticas.

O *Open Source Energy Modeling System* (OSeMOSYS) é um modelo de otimização de sistemas energéticos, comummente utilizado para planeamento energético

a longo prazo. Sendo um modelo flexível, quer em termos de âmbito (fronteiras do sistema energético), quer em termos da caracterização do sistema energético (tecnologias, custos, e metas a considerar), permite efetuar uma análise da evolução futura do setor da indústria metalomecânica, ao nível dos processos e em termos de energia útil. O seu objetivo final é identificar as rotas custo-eficazes que a indústria deve seguir, para que seja possível descarbonizar a sua atividade e cumprir os acordos relativos às alterações climáticas, reduzindo assim, as emissões de gases com efeito de estufa.

Em resumo, o OSeMOSYS foi utilizado para simular a evolução do sistema energético da indústria metalomecânica até 2050, e encontrar a solução que garante o fornecimento de energia de acordo com as necessidades do setor, enquanto minimiza os custos totais do sistema ao longo de todo o período de modelação. Para o efeito, o modelo tem por base a evolução das necessidades energéticas por processo (em energia útil), a previsão da evolução técnico-económica das diferentes tecnologias de uso final, a evolução da disponibilidade e preço dos diferentes vetores energéticos, e as metas de descarbonização do setor de curto, médio e longo-prazo. Adicionalmente, podem ser incorporadas restrições ao modelo que representem limitações ao nível de investimento, de (in)disponibilidade de algumas tecnologias em larga-escala, limites de fornecimento de diferentes vetores ener-géticos, como o biometano ou o hidrogénio. Ao considerar essas restrições, o OSeMOSYS fornece uma representação mais realista do sistema energético modelado. Os parâmetros utilizados são descritos de seguida.

Parâmetros de caracterização da procura:

- Procura anual específica - Procura total específica para o ano, associada a um "momento de utilização" específico;
- Perfil da procura específica - Fração anual da procura de energia-serviço que é necessária em cada período, permitindo fazer uma desagregação temporal do uso de energia. Para cada ano, todos os valores de entrada do perfil da procura específica devem ser iguais a 1.

Parâmetros de caracterização das especificações técnicas das tecnologias:

- Capacidade por Unidade de Atividade - Fator de conversão que relaciona o *output* de uma determinada tecnologia com a sua capacidade, considerando que uma unidade de capacidade é totalmente utilizada num ano;
- Fator de disponibilidade - Tempo máximo que uma tecnologia pode funcionar durante todo o ano, fração do ano que varia entre 0 e 1. Dá a possibilidade de contabilizar e de ter em conta as interrupções planeadas, por exemplo para manutenção;
- Vida útil - Vida útil de uma tecnologia, expressa em anos;
- Rácio de atividade de entrada - Taxa de utilização de um bem por uma tecnologia, como um rácio da taxa de atividade;
- Rácio de atividade de saída - Taxa de saída de um produto de uma tecnologia, como um rácio da taxa de atividade.

Parâmetros de caracterização dos custos das tecnologias:

- Custo de capital - Custo de investimento de capital de uma tecnologia, por unidade de capacidade;
- Custo Fixo - Custo fixo de O&M (operação e manutenção) de uma tecnologia, por unidade de capacidade;
- Custo variável - Custo de operação de uma tecnologia para um determinado modo de funcionamento (custo variável de O&M), por unidade de atividade.

Tendo como objetivo a identificação das trajetórias custo-eficazes para a descarbonização do setor, a modelação focou-se nas tecnologias de uso final para os diferentes processos do setor, com o horizonte temporal de 2050.

Âmbito do modelo

O âmbito da otimização refere-se apenas aos custos do sistema energético das unidades industriais, sendo a

componente de fornecimento dos diferentes vetores energéticos (transformação e distribuição) um *input* do modelo, caracterizado pela disponibilidade, emissões e preço. Assim, o modelo não considera a otimização do sistema de geração de eletricidade, produção de hidrogénio e biometano, etc., com exceção das instalações de geração de eletricidade e calor para autoconsumo.

O sistema foi desagregado tendo por base os principais consumidores: Iluminação, Ar comprimido, Maquinagem, Conformação, Corte, Tratamento térmico, Tratamento superfície e Soldadura. Para cada um desses indicadores, foram identificadas as principais tecnologias e respetivos vetores energéticos associados, assim como a evolução da procura, em termos de energia útil.

De forma a quantificar o impacto da descarbonização do setor nos custos totais do sistema, foram desenvolvidos dois cenários de evolução, o Cenário de Referência e o Cenário Descarbonização SMM. O Cenário de Referência corresponde a uma evolução do sistema sem restrições de emissões de GEE, enquanto que no segundo cenário são impostos limites de emissões de GEE de acordo com as metas estipuladas para o setor. Ambos os cenários foram simulados, sendo que a diferença em termos de custos totais do sistema corresponde ao investimento e/ou custo adicional necessário para atingir as metas já estabelecidas para 2050.

Dados de *input*

Neste subcapítulo são descritos os principais *inputs* considerados no modelo OSeMOSYS, assim como o seu racional. Os resultados obtidos estão fortemente ligados aos dados de *input* introduzidos no modelo. Nesse sentido, a definição precisa e adequada destes *inputs* é fundamental para garantir resultados mais exatos e próximos da realidade.

De forma a assegurar o cumprimento das metas de emissões de gases com efeito de estufa para o SMM (âmbitos 1 e 2), as emissões anuais do sistema foram limitadas no modelo de acordo com os valores apresentados na tabela 44. O racional utilizado para os mesmos foi considerar as metas estabelecidas pelo setor para 2030, 2040 e 2050, e assumir uma trajetória linear nos intervalos.

Tabela 44:
Metas de emissões de GEE para setor até 2050

Emissões de CO_2	2021	2025	2030	2035	2040	2045	2050
[$kgCO_2$]	352112000	271871375	138137000	117416500	96696000	75975500	55255000

A tabela 45, apresenta os valores dos fatores de emissão dos diferentes vetores energéticos, sendo estes constantes para todo o período considerado. No caso da eletricidade, uma vez que é expectável que esta seja progressivamente descarbonizada ao longo dos anos, o fator de emissão reduz gradualmente entre 2021 e 2050, em conformidade com as metas estabelecidas pelo PNEC2030 e pelo RNC2050 e encontra-se apresentado na tabela 46.

Tabela 45:
Fator de emissão dos vetores energéticos

Fator de emissão	[$kgCO_2/GWh$]
GPL	227520
Gás Natural	202320
Biometano	39996

Tabela 46:
Evolução do fator de emissão de GEE da eletricidade entre 2021 e 2050

Fator de emissão	2021	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Eletricidade [kgCO_2/GWh]	151000	125044	92600	71765	50930	30095	9260

Os preços de mercado dos diferentes combustíveis e a sua perspetiva de evolução, foram introduzidos no modelo para refletir a competitividade económica das diferentes opções energéticas. Na tabela 47, é apresentada a estimativa da evolução de custos para os diferentes combustíveis considerados.

No caso do biometano e do hidrogénio o preço mostra uma redução contínua, refletindo os avanços tecnológicos e o aumento da eficiência na produção destes combustíveis. O biometano diminui de 0,12 €/kWh em 2025 para 0,08 €/kWh em 2050, enquanto o hidrogénio reduz de 0,11 €/kWh em 2030 para 0,04 €/kWh até 2050. A eletricidade, inicialmente tem uma queda para 0,07 €/kWh em 2030, depois aumenta para 0,10 €/kWh até 2050, refletindo o aumento de procura de eletricidade para a eletrificação de processos. Por outro lado, o GPL e o gás natural mostram uma estabilidade relativa dos custos, o GPL aumenta de 0,12 €/kWh para 0,16 €/kWh até 2050 e o gás natural estabiliza o preço em 0,03 €/kWh após uma queda inicial. Por sua vez, a biomassa mantém um custo estável de 0,03 €/kWh. É de referir que foram aplicadas restrições no modelo, mais concretamente, na disponibilidade do biometano, hidrogénio e a biomassa no mercado, pelo que o biometano e a biomassa só estarão disponíveis a partir do ano 2025, enquanto o hidrogénio só estará disponível a partir do ano 2028.

A procura energética é um dos parâmetros mais críticos no modelo, uma vez que define a quantidade de energia útil que deve ser fornecida para garantir as necessidades de operação do setor ao longo do tempo.

Assim, as projeções de procura de energia até 2050 foram calculadas com base nos principais indicadores económicos, como por exemplo, o VAB. A partir dos dados históricos entre 2006 e 2021, que correlacionam o consumo energético com indicadores económicos, e os dados económicos extrapolados até 2050, foi possível utilizar modelos de previsão múltiplos para estimar a procura energética, a energia útil dos consumidores ao longo dos próximos anos.

Tabela 47:
Estimativa de evolução de preços dos diferentes combustíveis, entre 2021 e 2050

Custo (euro/kWh)	2021	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Biometano	——	0.12	0.11	0.10	0.10	0.09	0.08
Eletricidade	0.14	0.12	0.07	0.09	0.09	0.10	0.10
Hidrogénio	——	——	0.11	0.06	0.06	0.05	0.04
GPL	0.12	0.12	0.13	0.14	0.14	0.16	0.16
Gás natural	0.07	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
Biomassa	——	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03

Na tabela 48, é apresentada a estimativa de consumo energético pelos diferentes consumidores até 2050, tendo em conta os pressupostos que foram usados no modelo.

O gráfico 32 apresenta a evolução da procura energética do setor, em energia útil, desagregada pelos diferentes consumidores/processos.

Tabela 48:
Evolução de procura de energia útil, desagregada por consumidor/processo, entre 2021 e 2050

Consumo de energia (GWh)	2021	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Iluminação	70	75	82	89	97	106	115
Ar comprimido	62	64	67	70	74	77	80
Maquinagem	161	165	173	181	190	198	206
Conformação	66	68	71	74	78	81	85
Tratamento térmico	314	323	339	355	371	387	403
Tratamento superfície	456	468	491	515	538	561	584
Soldadura	125	128	135	141	147	154	160

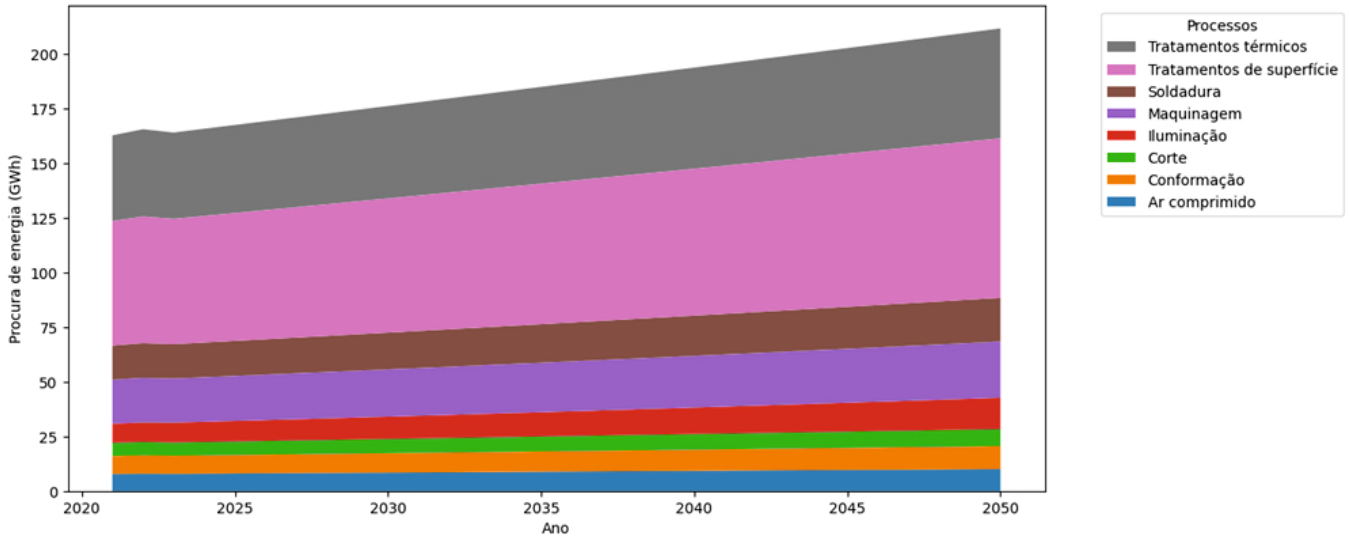


Gráfico 32 - Evolução da procura de energia útil anual (GWh) do SMM, entre 2021 e 2050, desagregada por consumidor

No Anexo II encontra-se apresentado o significado da nomenclatura usada no modelo.

Seguidamente estão apresentados os resultados dos cenários energéticos, tendo em conta a existência (Cenário de Descarbonização) ou não (Cenário de referência) de limitações de emissões de Co_2.

Resultados do Cenário de Referência

Nesta secção, são apresentados os resultados do cenário de referência, modelado sem restrições de emissões de GEE. Este cenário oferece uma visão sobre a evolução do consumo energético, custos do sistema e do uso dos vetores energéticos e serve como base de comparação para cenários futuros, onde as políticas de redução de emissões são implementadas.

O gráfico 33 apresenta a evolução do uso de energia final associado ao SMM em gigawatts-hora (GWh) desde o ano de 2021 até 2050.

- No que diz respeito ao uso de **gás natural**, representado a vermelho, destaca-se a sua predominância na matriz energética durante todo o período modelado, o que significa que, sem limitações impostas pelas emissões de carbono, o setor iria continuar a ser dependente do gás natural devido à sua disponibilidade e baixo custo associado. A partir de 2025 verifica-se uma maior flutuação de consumo de gás natural, existindo um aumento em 15%. A partir de 2030 o seu consumo estabiliza até 2050, num valor médio de 1245 GWh/ano.
- No caso da **eletricidade**, representada pela área azul, posiciona-se como o segundo vetor energético com mais representatividade no setor, mantendo-se relativamente constante ao longo do tempo. De 2021 até 2037 a média de consumo é 687GWh/ano, havendo uma redução para 587GWh/ano nos restantes anos, devido ao aparecimento da energia fotovoltaica.
- A **energia fotovoltaica,** representada a laranja, é correspondente à geração de eletricidade para autoconsumo. Na ausência de políticas de incentivo ou restrições, o uso de painéis solares e fotovoltaicos para autoprodução não verificará uma expansão, provavelmente devido ao custo inicial elevado.
- O **GPL**, representado a verde, aparece numa quantidade reduzida, nomeadamente em 2022 devido aumento do custo de gás natural verificado, com um consumo de 150 GWh/ano. O GPL tem um custo superior ao gás natural e à eletricidade, por isso este modelo otimiza o cenário, optando pelas tecnologias custo eficaz, deixando de optar por este combustível.

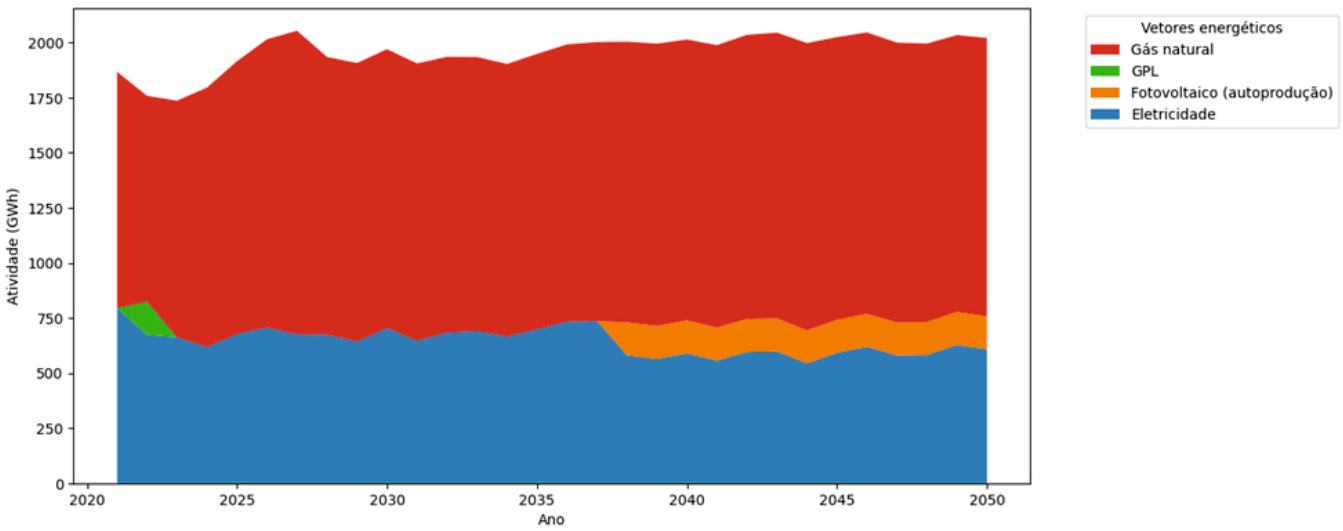


Gráfico 33 – Cenário de Referência: Evolução do uso de energia final em gigawatts-hora (GWh) do SMM, de 2021 a 2050.

No gráfico 34, é apresentada a evolução das emissões de GEE, âmbitos 1 e 2, entre 2021 a 2050, para o setor em análise. Em termos de emissões, verifica-se uma queda de 18% entre 2021 e 2050, o que se deve essencialmente à previsão de descarbonização gradual do sistema eletroprodutor nacional e à introdução de painéis fotovoltaicos a partir de 2037. Assim, verifica-se que, para o período em análise, o consumo médio de gás natural é responsável por emitir 250 826 t CO_2e/ano. A eletricidade contriubiu, em 2021, com 100 088 t CO_2e/ano e, por sua vez, estima-se que em 2050 contribua apenas com 4 615 t CO_2e/ano. Deste modo, verifica-se uma queda 95% da emissões relativas ao consumo de eletricidade.

O investimento acumulado necessário até 2050 encontra-se apresentado no gráfico 35. A curva revela uma necessidade de investimento globalmente estável, com um investimento ligeiramente mais acentuado nos primeiros dez anos, possivelmente associado à necessidade de renovação de um parque tecnológico

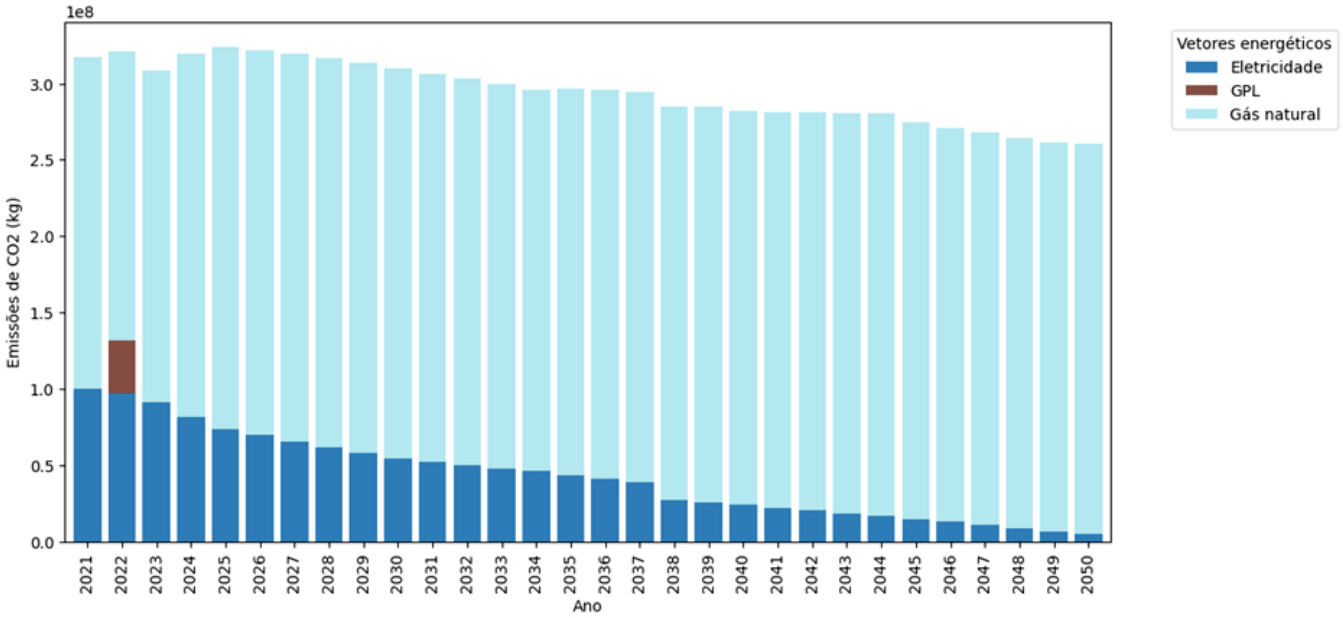


Gráfico 34 – Cenário de Referência: Evolução das emissões de GEE âmbitos 1 e 2 associadas ao SMM, entre 2021 a 2050.

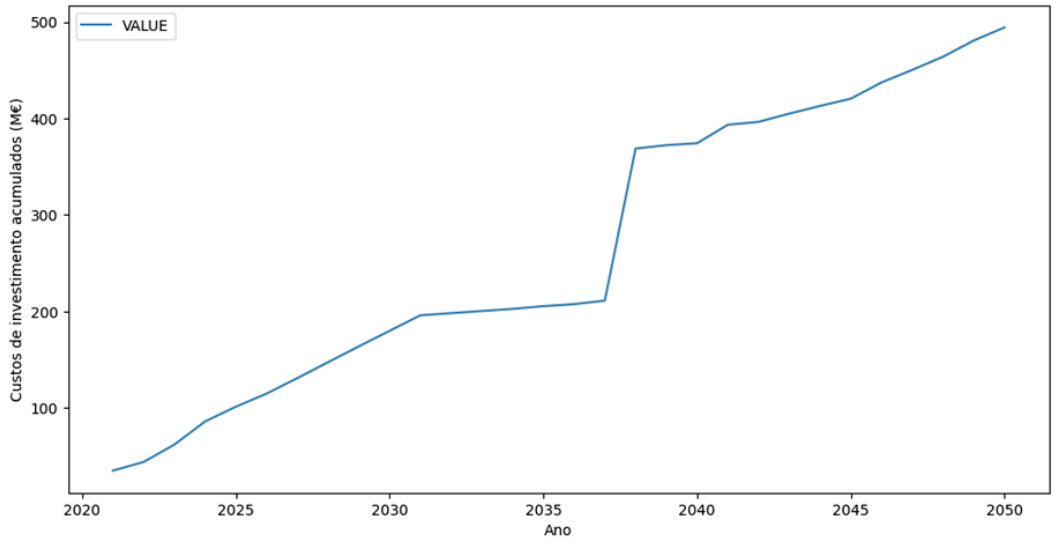


Gráfico 35 – Cenário de Referência: Evolução do investimento acumulado em M€ para o SMM, entre 2021 e 2050.

envelhecido. Após a renovação do parque, verifica-se uma atenuação na necessidade de investi-mento, entre 2030 e 2037. Em 2038, verifica-se um pico de investimento, que se deve essencialmente à introdução de painéis solares fotovoltaicos para autoconsumo. Entre 2021 e 2032, as necessidades de investimento acumulado atingem 198 milhões de euros. Entre 2032 e 2037, o investimento é mínimo, verificando-se em 2038 um investimento da ordem dos 160 milhões de euros. No total do período modelado, estima-se a necessidade de investir 494 milhoes de euros, o que representa cerca de 16 milhões de euros por ano.

A evolução dos custos de operação anuais (fixos e variáveis) até 2050 é apresentada no gráfico 36, e mostra um aumento significativo entre 2021 e 2022 impulsionado pelo aumento do custo do gás natural. Nos anos seguintes, até 2030, observa-se uma redução acentuada de cerca de 68% nesses custos, principalmente devido à diminuição do preço do gás natural ao longo desse período. Entre 2034 e 2038, há um ligeiro aumento nos custos variáveis, refletindo um pequeno incremento no custo da eletricidade. Nos anos seguintes, até 2050, os custos analisados permanecem praticamente estáveis, mantendo-se uma média de 95 milhões de euros por ano.

Os custos totais do sistema acumulados até 2050 encontram-se apresentados no gráfico 37, sendo de notar pouca variação entre os diferentes anos ao longo do período avaliado. Relativamente ao pico de investimento identificado entre 2037 e 2038, não é muito

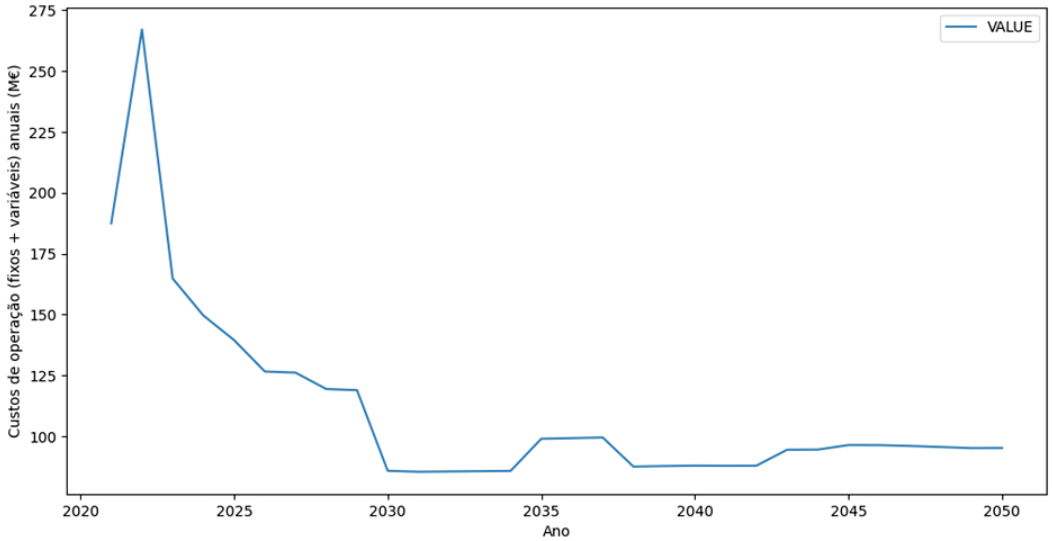


Gráfico 36 – Cenário de Referência: Evolução dos custos de operação anuais (fixos + variáveis) em M€ do SMM, entre 2021 e 2050

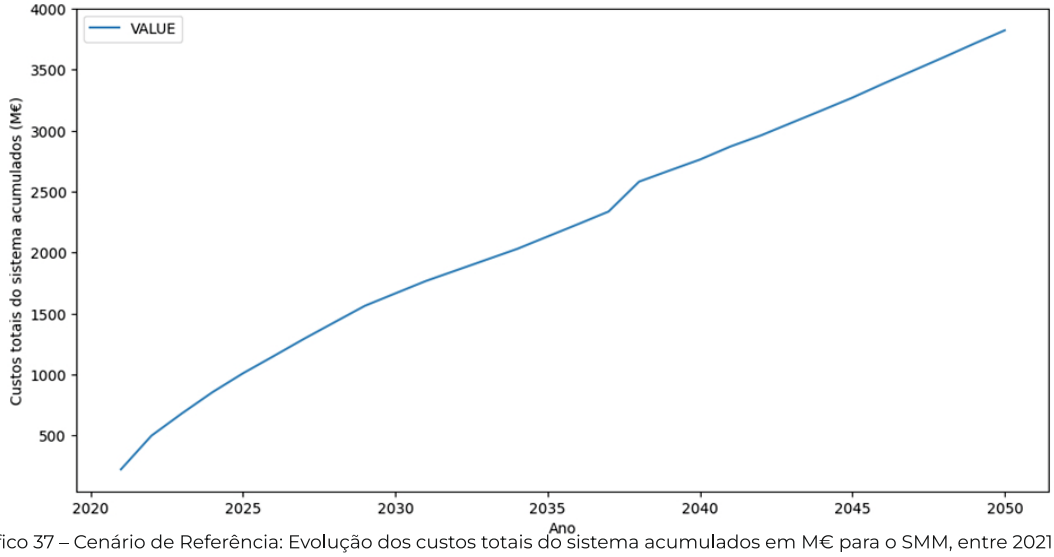


Gráfico 37 – Cenário de Referência: Evolução dos custos totais do sistema acumulados em M€ para o SMM, entre 2021 e 2050

significativo quando avaliado juntamente com os custos de operação anuais (fixos e variáveis). No total do período analisado, os custos totais do sistema ascendem a mais de 3500 milhões de euros, o que representa cerca de 120 milhões de euros por ano.

No que diz respeito à adoção ou alteração de tecnologias para os diferentes processos, verifica-se que a partir de 2025 a solução de recuperação de calor se torna custo-eficaz, sendo adotada para melhorar a eficiência dos processos de tratamento térmico e tratamento de superfície. Em 2033, o modelo prevê a implementação de bombas de calor para fornecer energia térmica de baixa, média e alta temperatura. Desde o início, o modelo considera a substituição da iluminação existente por alternativas mais eficientes. Além disso, a partir de 2026, verifica-se um investimento em tecnologias mais eficientes para o processo de maquinagem. No entanto, o cenário sem restrições não apresenta a introdução de outras tecnologias inovadoras ou mais sustentáveis do ponto de vista ambiental, como por exemplo a mudança de vetor de gás natural para hidrogénio ou biometano.

Resultados do Cenário de Descarbonização

Neste capítulo são apresentados os resultados do cenário energético modelado com restrições de emissões de GEE. Este cenário permite a identificação das medidas necessárias para reduzir as emissões de gases com efeito estufa, de forma a atingir as metas estabelecidas pelo setor. Além disso, os resultados deste cenário fornecem uma perspetiva da influência das restrições na emissão de GEE poderá ter no uso de energia no SMM, incluindo a adoção de vetores energéticos menos convencionais e tecnologias inovadores, e o impacto nos custos globais do sistema energético do setor ao longo do tempo.

O gráfico 38 ilustra a evolução no mix energético do SMM entre 2021 e 2050, em termos de energia final, em GWh/ano. Comparativamente ao gráfico equivalente do Cenário de Referência, verifica-se uma mudança significativa na composição do mix energético.

- A **eletricidade**, representada a verde no gráfico 38, destaca-se como o vetor energético com o peso mais significativo ao longo de todo o período analisado. Durante esse período, o consumo de eletricidade mantém-se constante, refletindo a sua importância no setor. No entanto, é importante notar que a introdução de equipamentos elétricos mais eficientes, como variadores de velocidade e bombas de calor tem um impacto relativamente modesto no consu-mo total do setor, apesar de refletir a tendência global de eletrificação da indústria, promovendo uma utilização mais eficiente da energia elétrica ao longo do tempo.
- O **gás natural,** representado a castanho, tem um peso significativo no mix energético nos primeiros anos, mas ao longo do tempo e devido à restrição de emissão de GEE, reduz de forma acentuada a sua presença (86%) entre 2021 e 2050. A primeira queda acentuada no consumo de gás dá-se em 2025, com entrada do biometano e da biomassa no mix energético. Em 2030, verifica-se uma nova queda associada à entrada do hidrogénio. Até 2050 o consumo de gás natural no setor continua a reduzir de forma gradual, contudo mantém-se um consumo médio residual de 150 GWh/ano.
- A **energia fotovoltaica**, representada a vermelho, aumenta o seu peso a partir de 2024, porém estabiliza rapidamente, mantendo uma contribuição de 150 GWh/ano ao longo do tempo. Este resultado deve-se essencialmente à introdução de uma restrição no modelo que impõe um limite na capacidade instalada de solar fotovoltaico para autoconsumo. O racional para essa limitação está associado a uma estimativa do potencial máximo de geração de eletricidade local para autoconsumo, tendo por base a área disponível e o retorno desse investimento.
- O **GPL**, representado a roxo, tem uma presença muito reduzida no mix, surgindo em 2022 devido ao aumento do custo de gás natural causado pela guerra na Ucrânia e à restrição do modelo, que apenas permite a introdução de gases renováveis a partir de 2025. Verifica-se que o GPL foi utilizado temporariamente como uma alter-

nativa durante este período e teve um consumo de cerca de 145 GWh/ano.

A partir de 2025, surgem "novos" vetores energéticos de base renovável, impulsionados pela maior maturidade tecnológica, no caso da biomassa, assim como pela disponibilidade do vetor, no caso do biometano e do hidrogénio. O biometano e a biomassa estão representados pelas cores laranja e azul, respetivamente, e o hidrogénio a rosa.

- No caso do **biometano,** de 2025 a 2030 este apresenta um forte crescimento (97%), estabilizando a sua utilização num valor médio de 544 Gwh/ano até 2050.
- A **biomassa**, embora apresente um crescimento no período analisado, mantém um peso pouco significativo no mix energético global do setor, não ultrapassando 104 GWh/ano. Este valor indica que o seu uso, embora relevante, tem limitações, sobretudo na capacidade das tecnologias a biomassa obterem as temperaturas necessárias para alguns dos processos relevantes no setor.
- Por fim, o **hidrogénio** surge de forma discreta no mix energético; contudo, a sua presença na matriz energética cresce cerca de 92% até 2050.

Apesar de ser considerado como tendo uma contribuição relevante para a descarbonização a longo prazo, a utilização do hidrogénio apresenta desafios técnicos e económicos que restringem a sua utilização em larga escala no SMM.

De acordo com o cenário de descarbonização, a composição do mix energético do SMM para 2050, em termos de energia final, é a seguinte: gás natural – 8%; eletricidade – 35%, biometano – 32%, painéis fotovoltaicos (autoconsumo) – 8%, hidrogénio – 11% e biomassa – 6%.

Em resumo, o gráfico 38 evidencia uma clara mudança no mix energético, onde a eletricidade assume um papel cada vez mais central, refletindo a eletrificação do setor. As energias renováveis, como o biometano e a fotovoltaica, começam a ganhar espaço de forma mais pronunciada, devido à maturidade tecnológica alcançada. No caso dos vetores energéticos emergentes, como o hidrogénio, estes começam a aparecer no mix energético a partir de 2025, mas de forma limitada.

O gráfico 39 apresenta a projeção da evolução das emissões de GEE associadas ao uso de energia no SMM, entre 2021 e 2050. Em 2022, o gás natural (representado a cor azul-claro) é o maior responsável pelas emissões de GEE, representando 59% das emissões totais do setor, seguido pela eletricidade (represen-

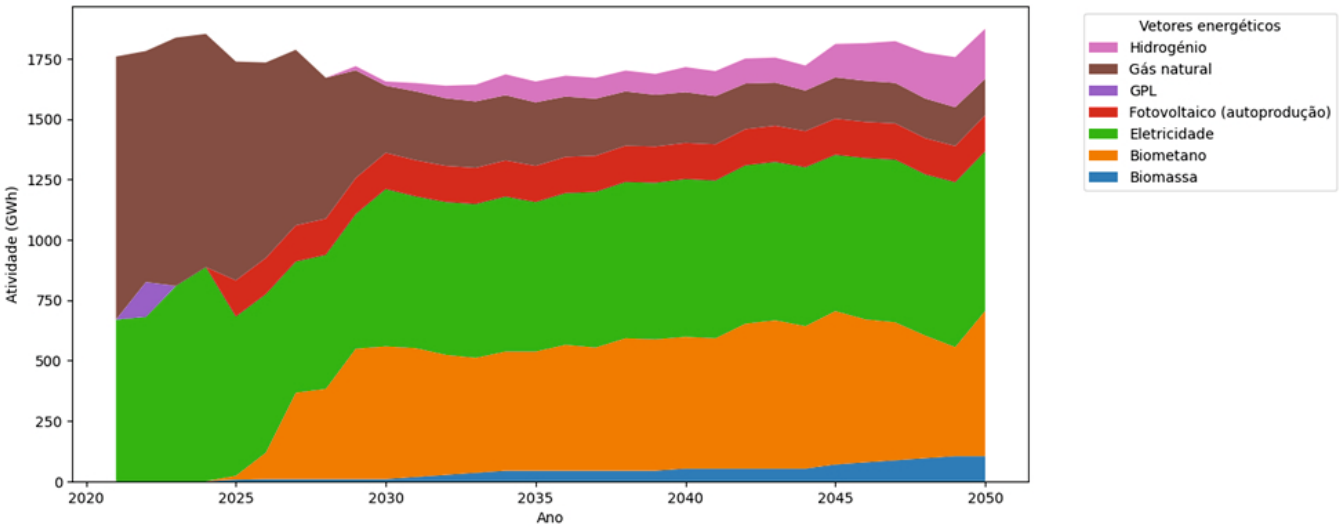


Gráfico 38 – Cenário de Descarbonização: Evolução do uso de energia final em gigawatts-hora (GWh) no SMM, entre 2021 e 2050

tada a vermelho), responsável por 30% das emissões, e o GPL (representado a rosa) com 10%. O peso destes três vetores ilustra a predominância de combustíveis fósseis na matriz energética atual e, consequentemente, a elevada intensidade carbónica associada ao consumo de energia. 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.

- Verifica-se que a queda nas emissões associadas ao uso do gás natural é particularmente acentuada, reduzindo em 85% até 2050. Esta redução pode ser explicada pela substituição gradual do gás natural por combustíveis de base renovável.
- A contribuição da eletricidade nas emissões apresenta uma diminuição progressiva ao longo dos anos, totalizando uma redução de 94%. Contrariamente ao verificado para o gás natural, esta redução 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 SMM será proveniente de instalações solares fotovoltaicas para autoconsumo, as quais surgem no modelo a partir de 2024.
- O biometano, sendo considerado um vetor energético com baixo teor de emissões (emissões de carbono biogénico), é um dos vetores utilizados para a substituição do gás natural. Prevê-se um aumento do seu uso ao longo do tempo, assim como das emissões a este associadas. Em média, as emissões de GEE associadas ao biometano não ultrapassam 18 700t CO_2/ano.

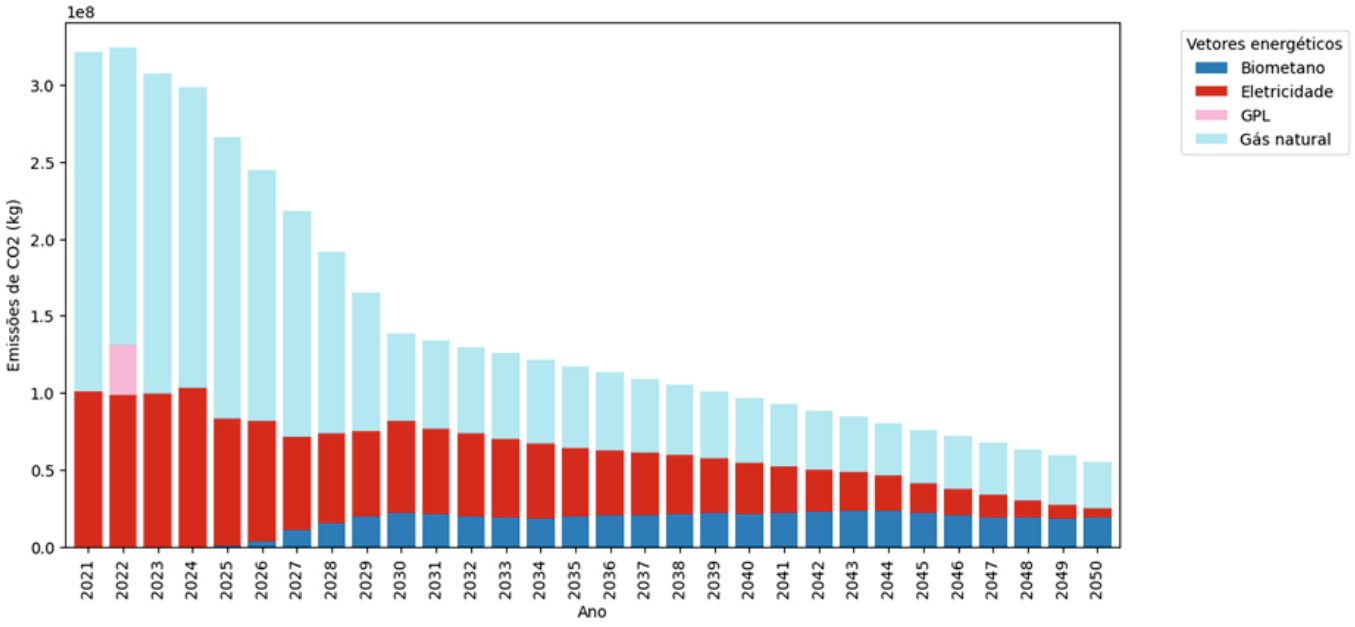


Gráfico 39 – Cenário de Descarbonização: Evolução das emissões GEE (108 kgCO2e/ano) associadas ao SMM, âmbitos 1 e 2, entre 2021 e 2050.

Os custos de investimento acumulado entre 2021 e 2050 são apresentados no gráfico 40. A curva é significativamente diferente da curva equivalente para o Cenário de Referência, demonstrando que os períodos com maior necessidade de investimento não serão necessariamente os mesmos nos dois cenários. No Cenário de Descarbonização, verifica-se um pico de investimento em 2025, possivelmente devido à introdução das soluções de solar fotovoltaico - a qual é antecipada face ao Cenário de Referência (2037). Após 2025, observa-se um período com investimento anual relativamente constante, verificando-se um novo pico no final do período de análise, de forma a atingir as metas definas para 2050. Estas diferenças poderão ser justificadas não só pelo facto de existir uma antecipação na adoção de diferentes tecnologias (como o solar fotovoltaico), quando apresentam valores de investimento menos competitivos, assim como pela adoção de diferentes tecnologias, como tecnologias a hidrogénio, que não são adotadas quando não existem restrição de emissões. Se analisarmos o período entre 2021 e 2050, o investimento acumulado é de 663 milhões de euros, o que representa uma média de cerca de 22 milhões de euros por ano, cerca de 30% acima do valor médio de investimento anual previsto no Cenário de Referência.

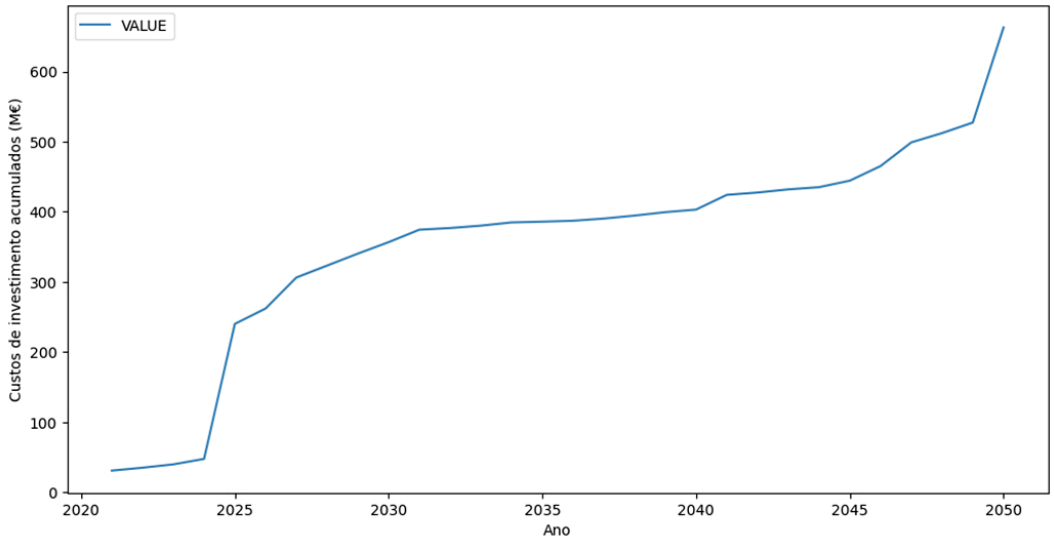


Gráfico 40 – Cenário de Descarbonização: Evolução do investimento acumulado em M€ para o SMM, entre 2021 e 2050

A evolução dos custos de operação anuais (fixos e variáveis) até 2050 mostra um aumento significativo (30%) entre 2021 e 2022, impulsionado pelo aumento do custo do gás natural, conforme apresentado no gráfico 41. Nos anos seguintes, até 2025, observa-se uma redução acentuada de cerca de 53%, aumentando novamente os custos em 2026 e 2027, devido à integração do biometano no mix energético do setor. Entre 2035 e 2050, existem algumas oscilações nos custos de operação e manutenção, as quais se devem à redução do consumo de gás natural e à integração de combustíveis alternativos, como a biomassa, o biometano e o hidrogénio, mantendo-se em média um custo anual de 142 milhões de euros. É de notar que excluindo o valor estimado para 2022, este valor seria significativamente mais baixo. Adicionalmente, o valor médio dos custos de operação e manutenção é superior ao previsto no Cenário de Referência, em cerca de 25%.

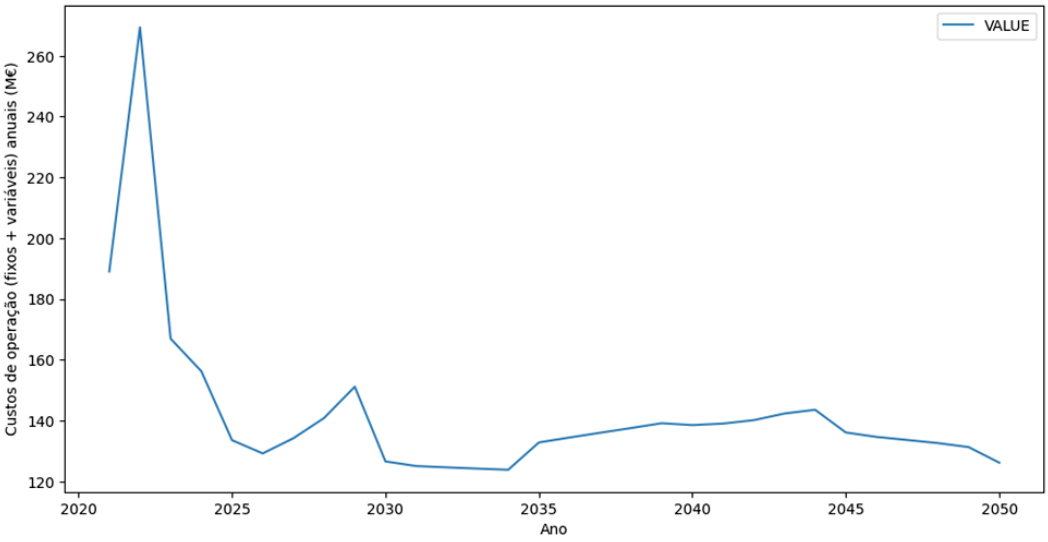


Gráfico 41 – Cenário de Descarbonização: Evolução dos custos de operação anuais (fixos + variáveis) em M€ do SMM, entre 2021 e 2050

A previsão dos custos totais do sistema acumulados entre 2021 e 2050, conforme ilustrado o gráfico 42, revela uma curva bastante homogénea, ilustrando uma baixa variação nos custos anuais (CAPEX e OPEX) previstos ao longo do período de análise. Ao ilustrar os custos de investimento e os custos de operação e manutenção de forma agregada, verifica-se que o peso dos primeiros é relativamente baixo comparativamente com o dos custos operacionais, esbatendo a importância dos picos de investimento previstos em 2025 e em 2050. No total do período em análise, prevê-se que os custos totais do sistema ascendam a 5000 milhões de euros, face aos 3500 milhões de euros previstos no Cenário de Referência. Em termos anuais, estima-se um valor médio de cerca de 167 milhões de euros por ano, considerando CAPEX e OPEX. O aumento dos custos face ao Cenário de Referência está associado não só à adoção de tecnologias menos maduras e mais caras, como também a um aumento nos custos operacionais pela integração de vetores energéticos com um preço unitário mais elevado.

A tabela 49 apresenta uma análise comparativa dos custos totais do sistema obtidos para os dois cenários. O aumento nos custos totais do sistema no Cenário de Descarbonização é visível em todos os períodos, sendo que a diferença entre os cenários se torna mais

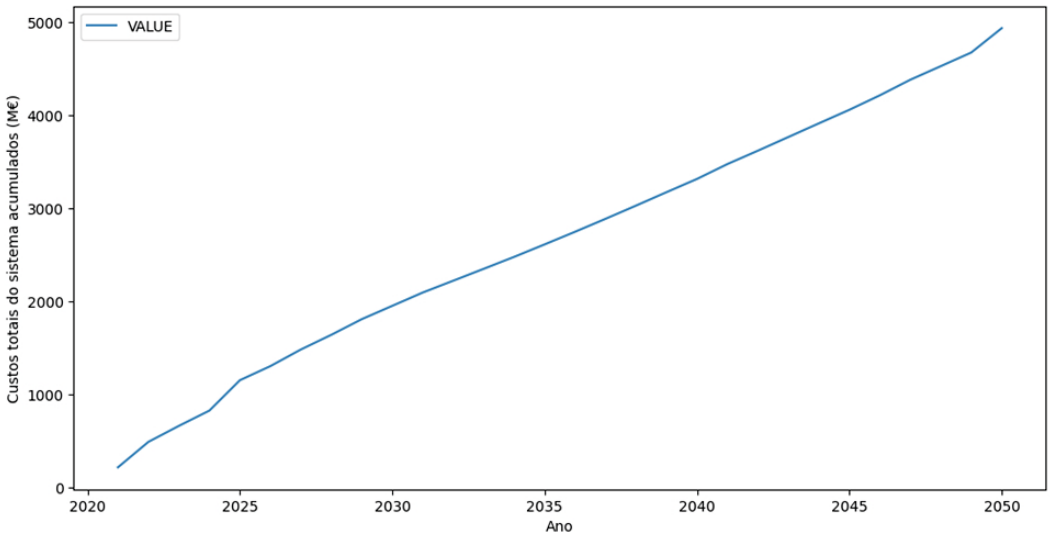


Gráfico 41 – Cenário de Descarbonização: Evolução dos custos totais do sistema acumulados em M€ para o SMM, entre 2021 e 2050

significativa com o aumento das restrições. Em 2030, os custos do sistema com restrições são 17% mais altos do que no Cenário de Referência; em 2040, essa diferença sobe para 20%, e em 2050 atinge 29%. De destacar que, na modelação do sistema, não foram consideradas as taxas de carbono associadas às emissões de GEE, o que resultaria num aumento considerável dos custos totais do sistema no cenário sem restrições de emissões.

De seguida apresentam-se os principais resultados obtidos para o Cenário de Descarbonização, com desagregação por processo produtivo.

Tabela 49:
Custos totais do sistema acumulados para o Cenário de Referência e para o Cenário de Descarbonização, em 2030, 2040 e 2050

Ano	Custos totais (M€)	
	Cenário de Referência	Cenário de Descarbonização
2030	1655,1	1954,2
2040	2763,0	3317,3
2050	3822,7	4937,1

Maquinagem

O gráfico 43 representa a evolução do uso de energia útil (em GWh) associado ao processo de maquinagem entre 2021 e 2050, desagregando por tecnologias finais. Verifica-se que, em 2025, ocorre a introdução de uma tecnologia mais eficiente, que inclui variadores de velocidade (VFD), representada a azul-claro. Esta transição indica um passo importante na modernização do processo, com a entrada gradual dessa tecnologia ao longo dos anos seguintes. Prevê-se um aumento no uso de energia útil no processo de maquinagem, associado ao crescimento económico do SMM. No entanto, este aumento não implica necessariamente um aumento da energia final, dado que este será (parcialmente) compensado pelo aumento de eficiência no processo. Até 2050, observa-se a substituição completa da tecnologia atual pela nova tecnologia mais eficiente (Maq_A_Ele_VFD).



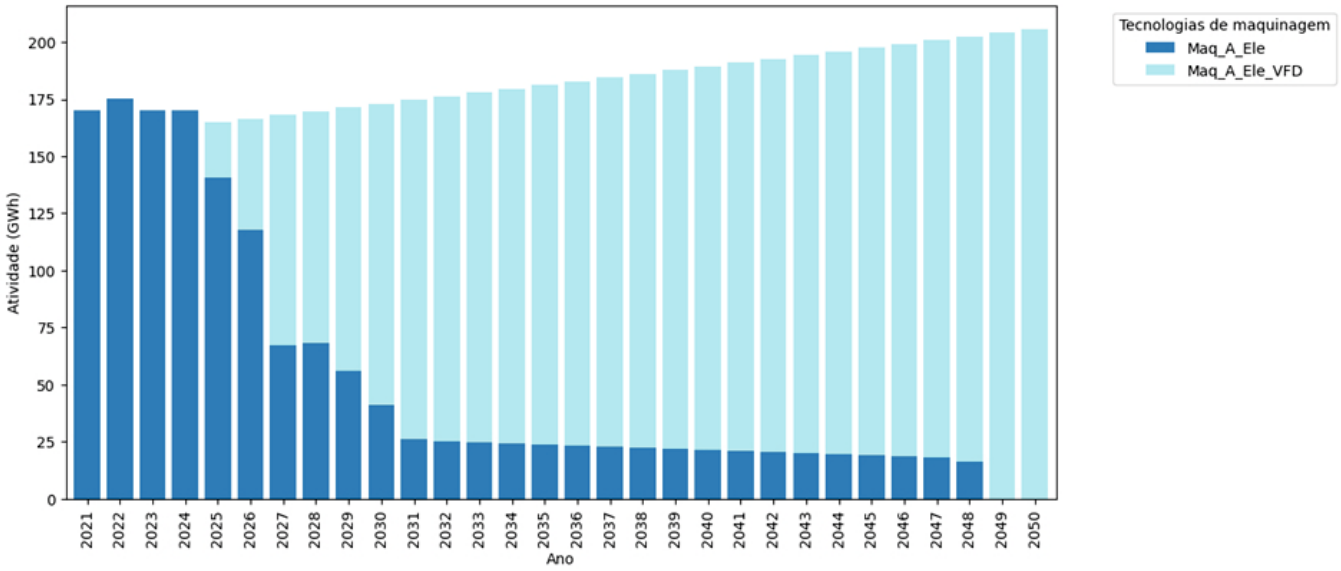


Gráfico 43 – Cenário de Descarbonização: Evolução do uso de energia útil para maquinagem em gigawatts-hora (Gwh), entre 2021 e 2050, desagregado por tecnologia.

Conformação



No gráfico 44 está representada a evolução do uso de energia útil (em GWh) associado ao processo de conformação. Em 2021, este processo é implementado com recurso a tecnologias a gás natural e elétricas.

A partir de 2025, observa-se uma mudança significativa nas tecnologias associadas ao processo, com a substituição gradual das tecnologias de conformação convencionais, quer elétricas quer a gás natural, por tecnologias de conformação elétricas mais eficientes, representadas a vermelho (Conf_A_Ele_VFD). Verifica-se uma eletrificação gradual do processo, prevendo-se a eletrificação total do processo até 2030. No entanto, devido à previsão do aumento no preço da eletricidade até 2035, o gás é temporariamente reintroduzido no processo, mas sob a forma de biometano, para assegurar o cumprimento das metas de redução de emissões. A partir de 2045, o processo é novamente totalmente eletrificado, mantendo-se com a utilização de tecnologias de conformação elétricas mais eficientes até ao final do período em análise.

É ainda de notar que, a partir de 2025, surgem as medidas de recuperação de calor, representadas a azul-claro (Conf_RC). As tecnologias de recuperação de calor, não estão associadas a um aumento de energia final, contribuindo para melhorar a eficiência energética do processo ao reutilizar parte da energia que seria desperdiçada.

De forma global, entre 2021 e 2050, prevê-se um aumento do uso de energia útil no processo de conformação, em linha com o crescimento económico previsto para o setor. No entanto, este aumento não se reflete totalmente no uso de energia final, devido à introdução das tecnologias de recuperação de calor e à substituição das tecnologias convencionais por tecnologias de conformação mais eficientes.

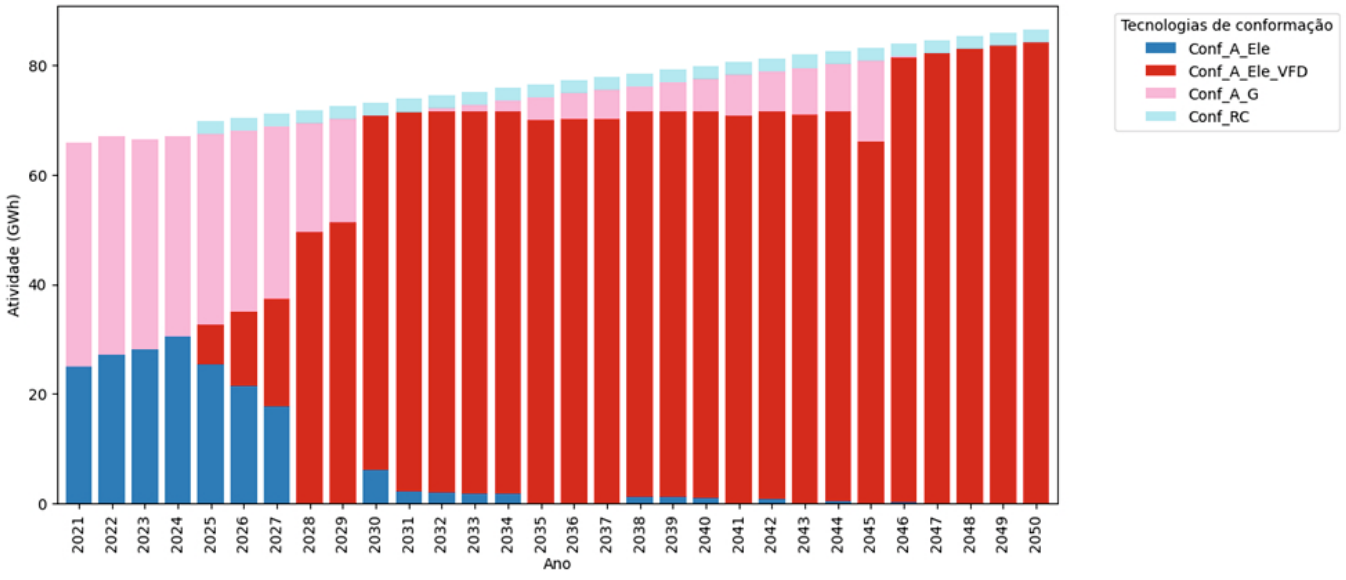


Gráfico 44 – Cenário de Descarbonização: Evolução do uso de energia útil para conformação em gigawatts-hora (Gwh), entre 2021 e 2050, desagregado por tecnologia

Corte

A evolução do uso de energia útil no processo de corte, entre 2021 e 2050, está ilustrada no gráfico 45. Em 2021, o mix energético associado a este processo é composto por 30% de gás natural e 70% de eletricidade.

A partir de 2026, o modelo prevê uma adoção de tecnologias de corte elétricas mais eficientes, representadas a castanho (Corte_A_Ele_VFD), verificando-se uma substituição total do uso de gás natural por eletricidade até 2027. A substituição de tecnologias convencionais elétricas por tecnologias mais eficientes é mais lenta, prevendo-se que, em 2046, todas as tecnologias utilizadas no processo de corte são substituídas por versões mais eficientes. Estas tecnologias incluem variadores de velocidade, contribuindo para uma maior eficiência energética no processo de corte. Uma vez mais, embora a energia útil aumente ao longo do tempo, acompanhando o crescimento económico do setor, a energia final necessária no processo não aumenta na mesma proporção.



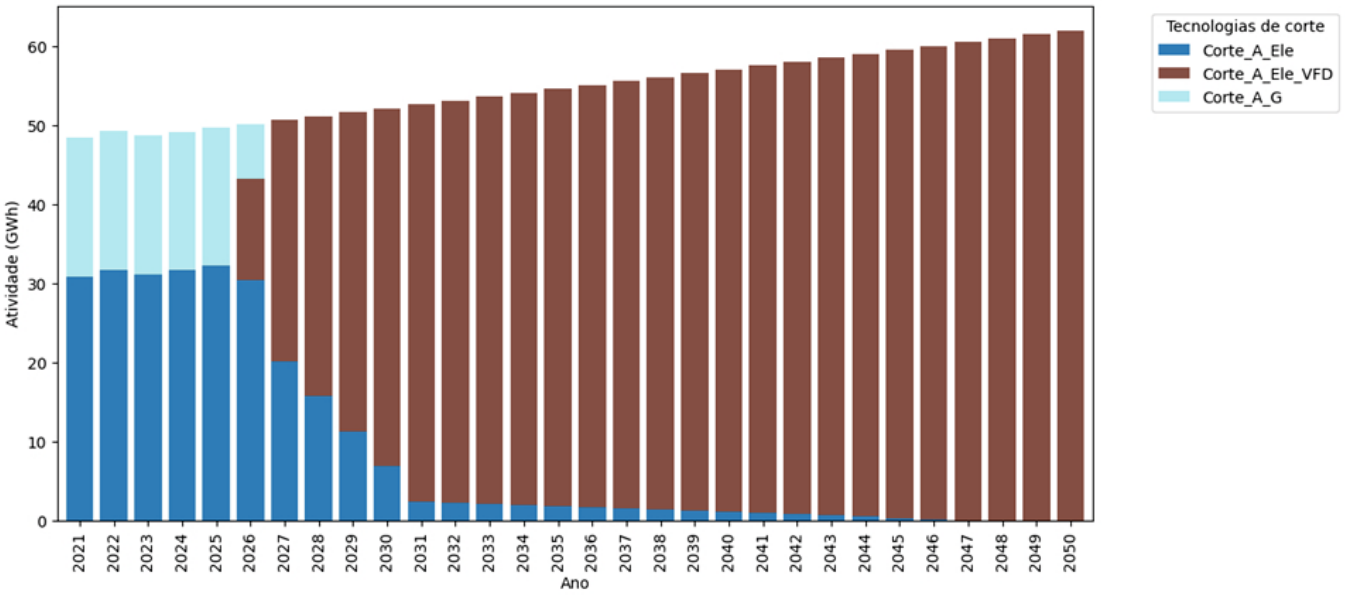


Gráfico 45 – Cenário de Descarbonização: Evolução do uso de energia útil para corte em gigawatts-hora (Gwh), entre 2021 e 2050, desagregado por tecnologia

Tratamento térmico



No gráfico 46, está representada a evolução do uso de energia útil (em GWh) associado ao processo de tratamento térmico, entre 2021 e 2050. Em 2021, o mix energético associado aos tratamentos térmicos era predominantemente composto por 80% de gás natural e 20% de eletricidade. Já em 2022, observou-se uma substituição parcial do gás natural pelo GPL, impulsionada pelo aumento do preço do gás natural.

A partir de 2025, prevê-se a adoção de medidas de implementação de tecnologias para recuperação de calor, representada a azul-claro (TT_RC). As medidas de recuperação de calor desempenham um papel crucial na melhoria da eficiência energética do processo, ao reutilizar energia que, de outra forma, seria desperdiçada, reduzindo assim o aumento de procura de energia final associado ao crescimento económico do setor.

No mesmo ano, parte das tecnologias atuais a gás começam a ser substituídas para versões mais eficientes com isolamento térmico (representada a roxo, TT_A_G_IT). Apesar de não ser visível no gráfico, as tecnologias a gás, com e sem isolamento térmico, utilizam inicialmente gás natural. No entanto, com a introdução do biometano, o gás natural é substituído por troca direta, não sendo necessária a substituição das tecnologias finais do processo. Em 2042, verifica-se a substituição total das tecnologias convencionais a gás.

Adicionalmente, a partir de 2025, a tecnologia a biomassa (TT_F_WD), representada a verde-claro, passa a integrar o mix energético, quase duplicando a sua participação até 2050.

O hidrogénio, representado a cinzento-escuro (TT_F_H2) é também introduzido no mix energético, a partir de 2028, momento a partir do qual se torna uma alternativa custo-eficaz para a descarbonização do processo.

Paralelamente, ao longo dos anos, as tecnologias elétricas são progressivamente substituídas por equipamentos mais eficientes, como bombas de calor, para a produção de energia térmica.

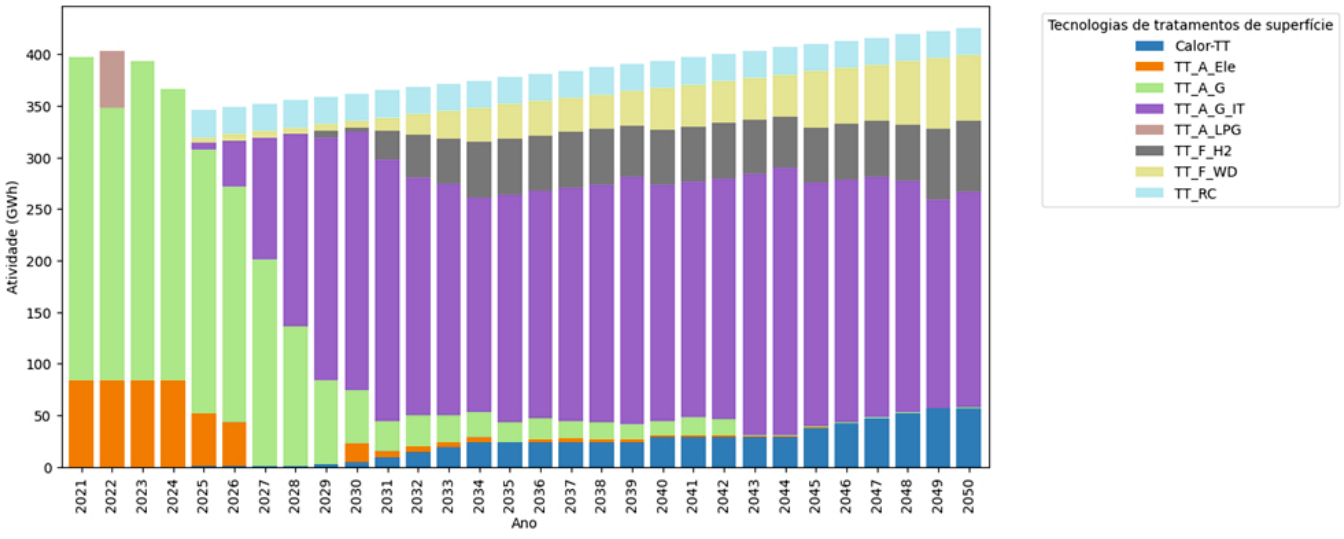


Gráfico 46 – Cenário de Descarbonização: Evolução do uso de energia útil para tratamentos térmicos em gigawatts-hora (Gwh), entre 2021 e 2050, desagregado por tecnologia

Tratamento de superfície



O gráfico 47 ilustra a evolução do uso de energia útil associado ao processo de tratamentos de superfície, entre 2021 e 2050. Em 2021, o mix energético associado a tratamentos superfície era predominantemente composto por 80% de gás natural e 20% de eletricidade, observando-se, em 2022, uma substituição parcial de gás natural por GPL impulsionada pelo aumento do preço do gás natural.

A partir de 2025, prevê-se a introdução de medidas de recuperação de calor, representadas a azul-claro (TS_RC), limitando assim o aumento do uso de energia final causado pelo crescimento económico do setor.

Adicionalmente, o modelo prevê, a partir de 2025, a substituição gradual das tecnologias atuais a gás (TS_A_G), representadas no gráfico a verde-claro, por versões mais eficientes com isolamento térmico, representadas a roxo (TS_A_G_IT). Para ambas as tecnologias, apesar de não estar representado, inicialmente é utilizado o gás natural como fonte de energia, contudo com a introdução do biometano, este vetor energético é substituído por biometano, sem necessidade de substitui-ção das tecnologias finais.

A partir de 2025, prevê-se também a integração de tecnologias a biomassa (TS_F_WD), representadas a verde-claro, aumentando sua participação de forma gradual até 2050.

No que diz respeito ao hidrogénio, prevê-se que o uso de tecnologias a hidrogénio para tratamentos de superfície se torne custo-eficaz a partir de 2033, verificando-se a integração gradual desta tecnologia no mix entre 2033 e 2050. Contudo, a sua utilização neste processo é pouco significativa, atingindo 2% em 2050.

Por fim, as tecnologias elétricas para tratamentos de superfície são gradualmente substituídas por equipamentos mais eficientes, como bombas de calor, para a produção de energia térmica.

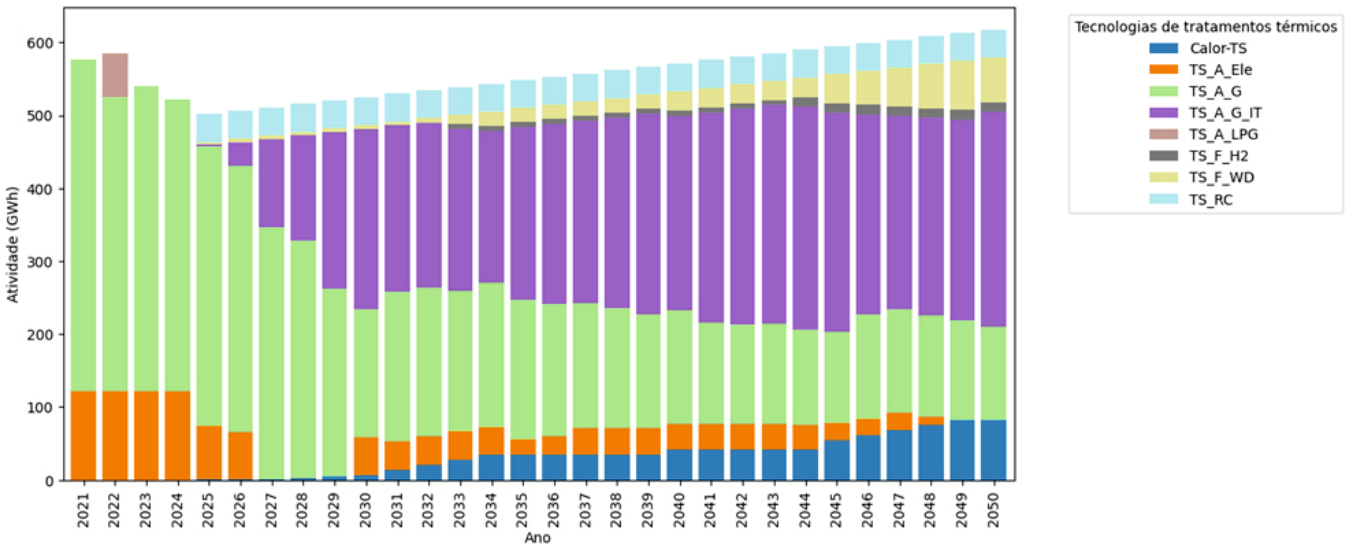


Gráfico 47 – Cenário de Descarbonização: Evolução do uso de energia útil para tratamentos de superfície em gigawatts-hora (Gwh), entre 2021 e 2050, desagregado por tecnologia

Soldadura

No caso da soldadura, o gráfico 48 ilustra o aumento de energia útil previsto para o período em análise, acompanhando o crescimento económico do setor. No entanto, neste caso específico, o modelo prevê que a substituição das tecnologias atuais por tecnologias mais eficientes não seja custo-eficaz. Como resultado, o modelo opta por não realizar mudanças tecnológicas neste processo, mantendo as tecnologias existentes ao longo do período analisado.



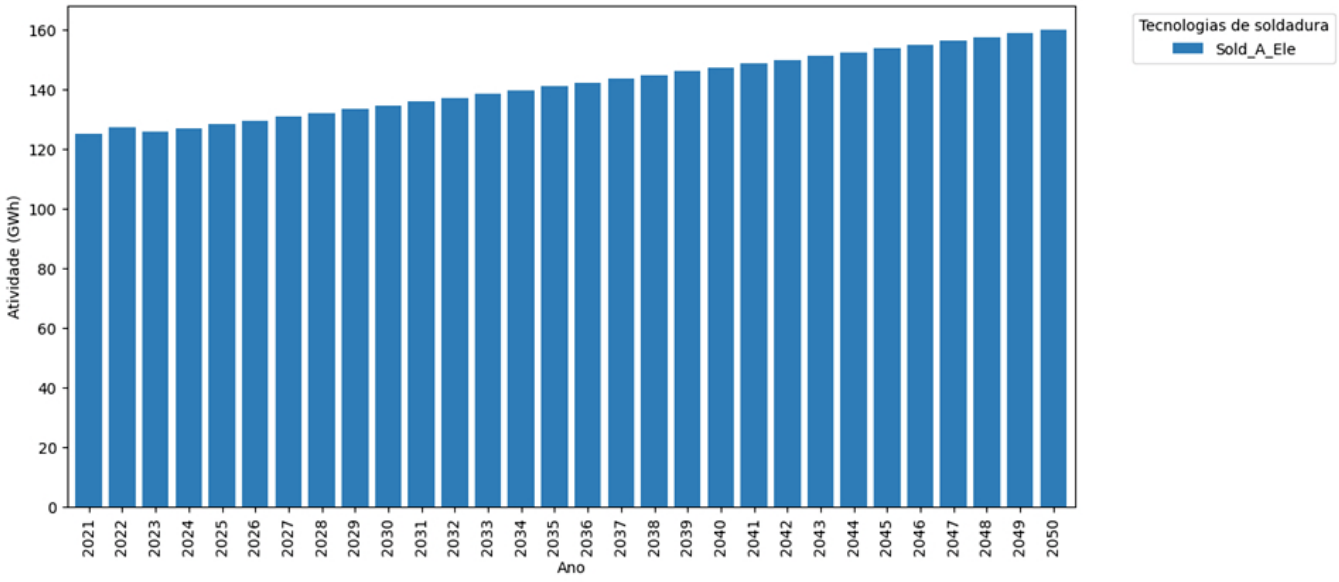


Gráfico 48 - Cenário de Descarbonização: Evolução do uso de energia útil para soldadura em gigawatts-hora (Gwh), entre 2021 e 2050, desagregado por tecnologia





6.

RECOMENDAÇÕES E PLANO DE AÇÃO PARA O FUTURO

Num contexto global marcado pela preocupação com os fenómenos climáticos extremos e pela necessidade de transformação dos modelos de produção e consumo, Portugal assumiu um compromisso forte com a sustentabilidade. Para isso, definiu metas ambiciosas que visam reduzir as emissões de gases com efeito de estufa (GEE) e promover a eficiência energética, a inovação e a circularidade.

O PNEC 2030 – Plano Nacional de Energia e Clima estabelece como objetivos a redução das emissões de GEE em 45% a 55% até 2030, face aos níveis de 2005, bem como o aumento do peso das energias renováveis e o aumento da eficiência energética.

Complementarmente, o RNC2050 – Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 almeja um país com emissões líquidas nulas até 2050, através da descarbonização profunda da economia, da promoção da inovação tecnológica e da adoção de princípios da economia circular em todos os setores.

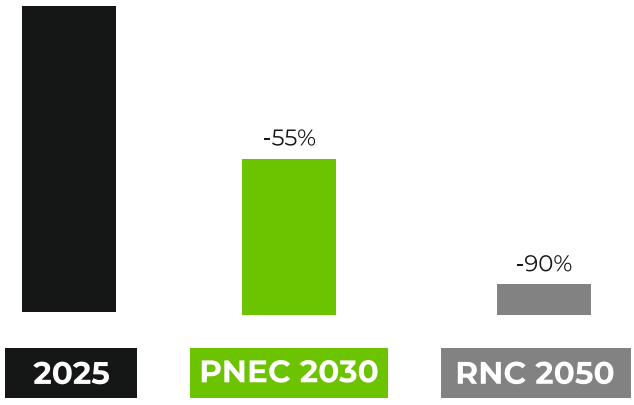


Gráfico 49 - Objetivos nacionais na redução de emissões de GEE

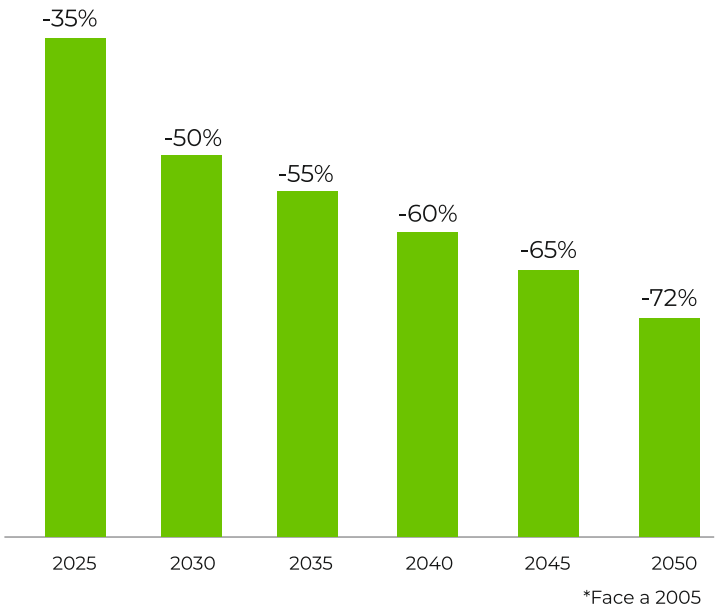


Gráfico 50 - Objetivos do setor metalúrgico e metalomecânico na redução de emissões de GEE

O propósito de descarbonização do setor exige uma atuação estratégica por parte das empresas, que devem alinhar os seus modelos de negócio com os objetivos nacionais.

A transição para a neutralidade carbónica não depende de uma única solução, mas sim de uma combinação de iniciativas que devem ser desenvolvidas em paralelo. Neste sentido, apresentam-se na figura 17 ações prioritárias que podem orientar o setor na transição para um modelo mais verde, resiliente e competitivo.

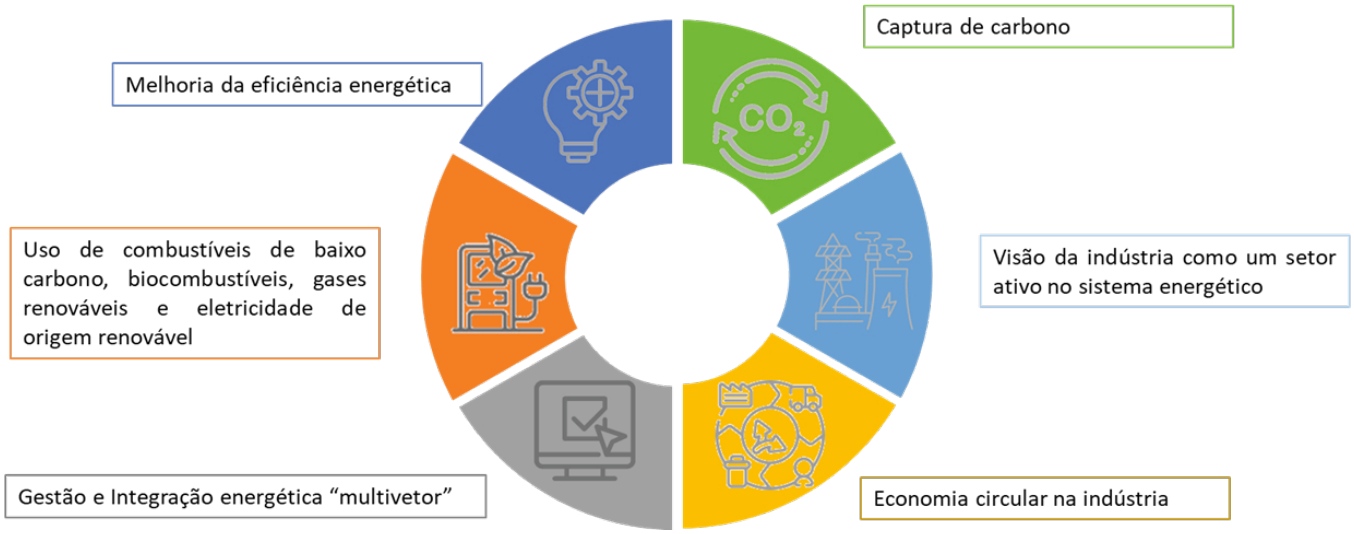


Figura 17 - Ações prioritárias que orientam o SMM na transição para um modelo mais verde, resiliente e competitivo

Os principais eixos de atuação que poderão viabilizar a descarbonização e a transição energética no setor do Metal Portugal são os seguintes:

- Eficiência Energética

O conhecimento do perfil de consumo energético das empresas é essencial e deve envolver a realização de uma auditoria energética, instrumento fundamental para mapear os principais processos consumidores de energia, identificar ineficiências e desperdícios. Esta auditoria fornece uma visão abrangente sobre o desempenho energético da empresa e permite estabelecer uma linha de base sobre a qual se podem definir objetivos de melhoria realistas e sustentados. Com base na situação identificada, a empresa pode estabelecer metas claras de redução do consumo energético e das emissões associadas, com horizontes de curto, médio e longo prazo, suportadas por dados técnicos e económicos, garantindo a viabilidade das medidas propostas. Este conhecimento aprofundado assume-se como fundamental para definir áreas prioritárias de intervenção e implementar medidas eficazes de eficiência energética. Complementarmente, a instalação de sistemas de monitorização e controlo contínuo dos consumos de energia permitem assegurar o bom funcionamento dos equipamentos e processos. Estes sistemas permitem não só acompanhar em tempo real o desempenho energético, como também detetar rapidamente anomalias, facilitando uma resposta ágil e a correção de desvios operacionais.

No caso do SMM, identificam-se várias recomendações para a eficiência energética, como por exemplo associadas ao reaproveitamento do calor residual para outras aplicações:

- Parte significativa da energia consumida em fornos, caldeiras ou estufas é perdida para o exterior através de gases de exaustão, podendo ser aprovei-tada e introduzida novamente em equipamentos produtivos, por exemplo no pré-aquecimento do ar de combustão;
- Cerca de 80% da energia elétrica fornecida aos sistemas de ar comprimido é desperdiçada sobre a forma de calor residual, podendo ser aproveitada, através da instalação de permutadores de óleo/água, para pré aquecer a água de alimentação de uma caldeira ou AQS (rede de água quente sanitária).



Figura 18 - Como resolver, passo a passo, problemas de eficiência energética, até 2050

- Eletrificação

A transição energética assenta, em grande parte, na eletrificação dos equipamentos, substituindo progressivamente o uso de combustíveis fósseis por fontes de energia elétrica, idealmente de origem renovável. De seguida, apresentam-se duas das principais tecnologias que apoiam este processo de transição:

- Fornos híbridos: apresentam eficiências 15–25 % superiores aos fornos convencionais e permitem a implementação de estratégias de flexibilidade de carga e redução de picos de consumo *(peak-shaving)*, otimizando o uso de energia nos momentos de maior procura;
- Bombas de calor: sistemas versáteis para aquecimento e arrefecimento, com coeficientes de desempenho (COP) muito mais elevados do que os equipamentos tradicionais, resultando em significativas poupanças energéticas e emissões reduzidas.

- Utilização de gases renováveis

Os gases renováveis constituem uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, podendo, no curto prazo, ser introduzidos na rede de gás natural, reduzindo significativamente as emissões de CO_2.

Tabela 50:
Utilização de gases renováveis

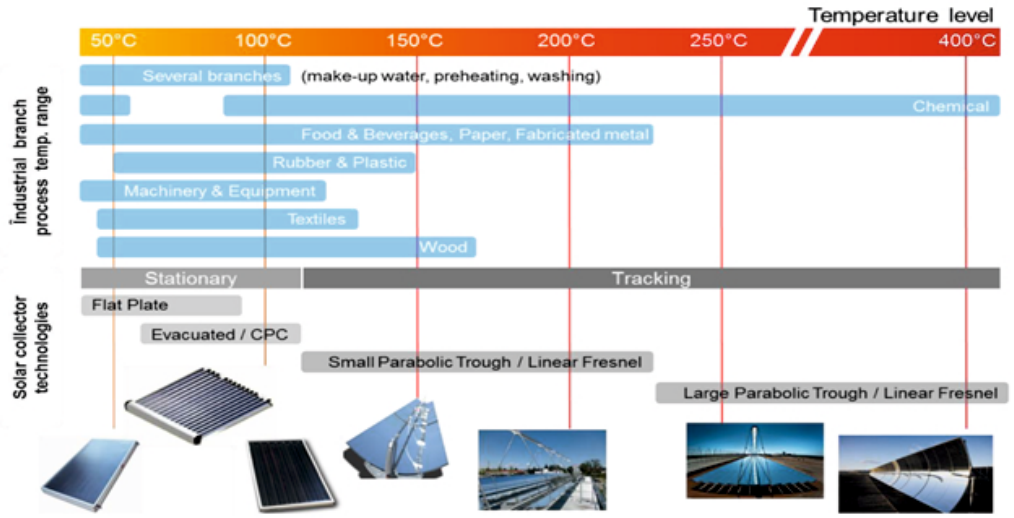
	Gás Natural	Hidrogénio	Biometano
Prós	+ Baixo custo económico + Boa acessibilidade de transporte + Tecnologia bem desenvolvida	+ Fim de emissões com efeito de estufa + Armazenamento do excesso de energia renovável	+ Redução elevada nas emissões com efeito de estuda + As tecnologias atuais estão preparadas a utilizar este gás
Contras/ Necessidades	- Emissões de CO_2	> Upgrade de equipamentos > Normas de segurança > Armazenamento > Transporte	

- Utilização de Biomassa

O uso de biomassa no setor metalomecânico permite substituir parcial ou totalmente os combustíveis fósseis, reduzindo significativamente as emissões de gases de efeito estufa e a dependência externa de energia elétrica, enquanto se promove a valorização dos resíduos agroflorestais. Contudo, a sua adoção enfrenta desafios como a necessidade de adaptar equipamentos às diferentes temperaturas e fluxos de combustão e a criação de infraestrutura adequada para armazenamento, secagem e transporte da matéria-prima.

- Instalação de coletores solares

Portugal tem um excelente potencial de radiação solar devido à sua localização geográfica e clima, potenciando assim o uso de coletores solares nas empresas do setor metalomecânico. Em processos que exigem temperaturas na ordem dos 50–150°C, podem-se usar coletores planos ou tubos de vácuo para pré-aquecimento de águas; na gama dos 150–300°C, podem-se aplicar cilindros parabólicos ou *Fresnel* lineares capazes de pré-aquecer fornos e gerar vapor. A integração de acumulação térmica assegura fornecimento contínuo, reduz custos energéticos e reduzindo as emissões de Co_2.



Tendo em conta estas tecnologias e os vetores energéticos que irão permitir que o setor metalomecânico consiga cumprir as metas de descarbonização previstas, foi desenhado um modelo energético que identifica as trajetórias custo-eficazes até 2050. A modelação foca-se nas tecnologias de uso final para os diferentes processos do setor.

O presente Roteiro centrou-se no consumo de energia segmentado pelos principais consumidores/processos de fabrico: **Iluminação, Ar comprimido, Maquinagem, Conformação, Corte, Tratamento térmico, Tratamento superfície e Soldadura.** De forma a tornar o modelo mais realista foram tidas em consideração as projeções de VBA até 2050, tendo-se estimado um crescimento da energia útil necessária de 30% até 2050.

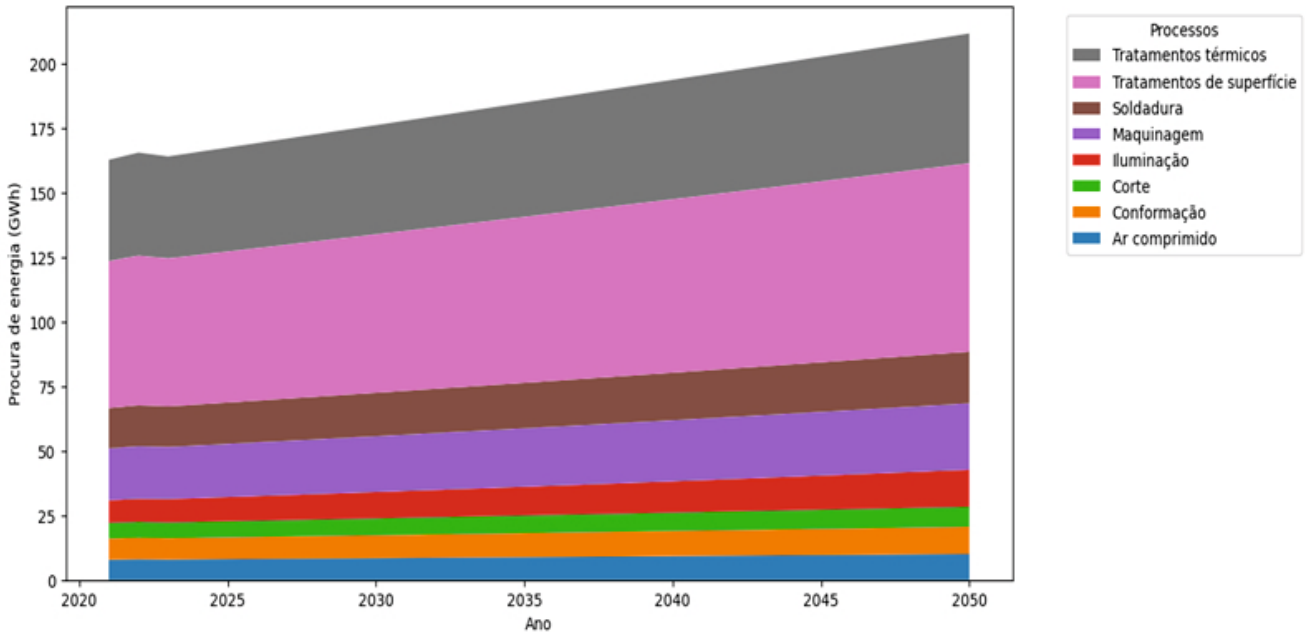
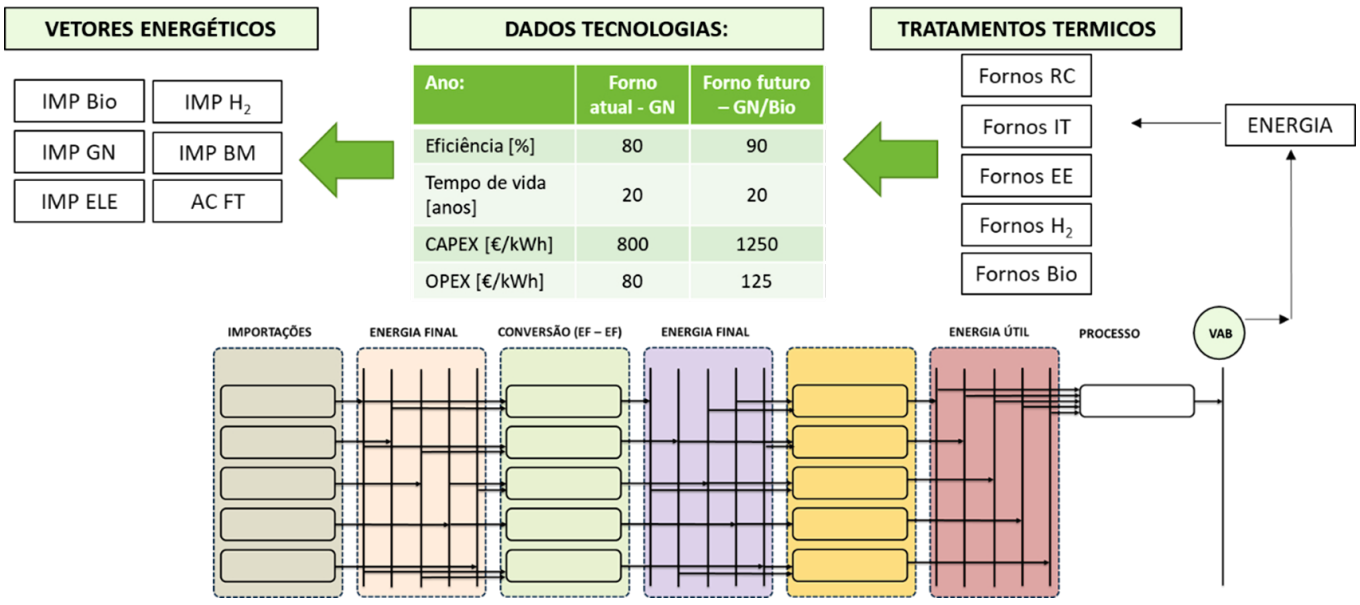


Gráfico 51 - Projeções de VBA até 2050

Com base nesta projeção, foi determinada a energia necessária ao correto funcionamento de cada processo de fabrico. Através da desagregação por etapas de produção, identificaram-se as opções tecnológicas que contribuem para a descarbonização, podendo estas consistir (i) na atualização da tecnologia existente ou (ii) na conjugação de nova tecnologia com diferente vetor energético. Por exemplo, nos tratamentos térmicos, mantêm-se o vetor energético atual, geralmente com recurso a gás natural, mas aumenta-se a eficiência energética mediante:

- Recuperação de calor residual;
- Reforço do isolamento térmico.

Em alternativa, podem ser introduzidas tecnologias que utilizem vetores energéticos diferentes, tais como eletricidade renovável, hidrogénio ou biomassa. Para cada tecnologia proposta foi efetuada uma análise de sensibilidade ao longo do horizonte de avaliação, variando-se parâmetros como eficiência energética, custos operacionais e vida útil dos equipamentos. Simultaneamente, considerou-se a disponibilidade e o custo esperado de cada vetor energético (rede elétrica, gás natural, hidrogénio, biomassa), bem como, o respetivo fator de emissão, durante o período em análise.



No gráfico 52 apresenta-se a evolução do consumo de energia final (GWh) no setor, entre 2021 e 2050. Os vetores considerados incluem hidrogénio, gás natural, GPL, solar fotovoltaica (autoconsumo), eletricidade, biometano e biomassa.

A eletricidade assume um papel cada vez mais central, refletindo a eletrificação do setor. As energias renováveis, como o biometano e a fotovoltaica, começam a ganhar espaço de forma mais pronunciada, devido à maturidade tecnológica alcançada. Por sua vez, o hidrogénio surge no mix energético a partir de 2028, inicialmente de forma limitada devido a restrições técnicas e económicas, mas gradualmente ultrapassa essas barreiras e expande-se em escala significativa ao longo das décadas seguintes.

Estes modelos energéticos são fundamentais para tornar o setor mais competitivo e resiliente, pois fornece às indústrias informações estruturadas e

fundamentadas sobre onde investir, tanto em tecnologias como em vetores energéticos, com vista a tornar os seus processos e produtos mais sustentáveis.

De forma global, o Roteiro permite agrupar as medidas preconizadas para a Descarbonização do Setor em medidas de curto prazo e medidas de médio-longo prazo.

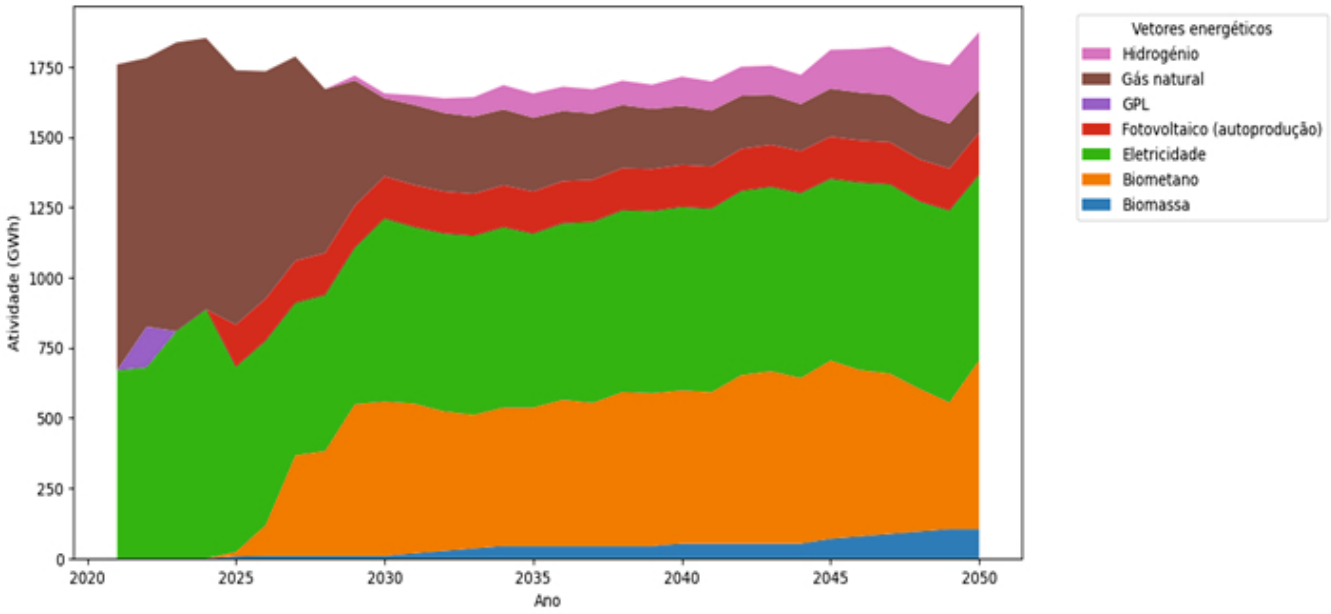


Gráfico 52 - Evolução do consumo de energia final (GWh) no setor, entre 2021 e 2050.

Medidas de Curto prazo – ações imediatas e operacionais

Recursos

- Capacitar os colaboradores sobre economia circular e sustentabilidade
- Implementar sistemas de gestão de recursos (energia, água e materiais), com metas de redução
- Monitorizar e discriminar os consumos por tipo de recurso, para otimização
- Adotar práticas de design ecológico e promover a reciclagem no fim do ciclo de vida
- Promover programas de recuperação, reutilização e reciclagem
- Recolher dados de consumo e envolver equipas na gestão sustentável

Substâncias químicas

- Substituir substâncias tóxicas por alternativas mais seguras

Gestão de resíduos

- Criar sistemas de gestão de resíduos com registo detalhado e foco na valorização
- Caracterizar a composição dos resíduos com apoio de fornecedores e análises
- Monitorizar continuamente os resíduos e aplicar estratégias de redução e reaproveitamento

Parcerias

- Acompanhar tendências e identificar oportunidades de parcerias externas
- Criar processos internos para parcerias sustentáveis e partilha de recursos

- Participar ativamente em projetos com centros tecnológicos, universidades e centros de inovação

Inovação e modelos de negócio

- Expandir estratégias circulares existentes para outros os produtos e serviços
- Investir em tecnologia e inovação para produção sustentável
- Estabelecer e acompanhar KPIs circulares com foco em melhoria contínua

Estratégias circulares

- Adotar políticas de compras sustentáveis
- Monitorizar e reparar equipamentos, evitando perdas e prolongando a vida útil
- Gerir stocks eficientemente para reduzir desperdício e emissões associadas

Medidas de Médio e Longo prazo – Estratégia, transformação e cultura

Gestão e estratégia para a circularidade

- Analisar benefícios da sustentabilidade e realizar diagnósticos ambientais.
- Definir Roadmap estratégico e implementar Política de uso sustentável dos recursos
- Tornar pública a Política de Sustentabilidade para reforçar o compromisso institucional
- Estabelecer e monitorizar indicadores e metas, com revisão periódica e estrutura formalizada

Gestão de impactos, riscos e oportunidades

- Priorizar áreas críticas com *benchmarking* de melhores práticas
- Desenvolver e testar metodologia de gestão de riscos e oportunidades (ex: projetos-piloto)
- Adotar sistemas abrangentes com ferramentas avançadas de avaliação
- Manter monitorização contínua com foco na melhoria crescente

Divulgação e transparência

- Alocar recursos para definir e divulgar KPIs e metas (ex: Science-Based Targets)
- Comunicar resultados: resíduos evitados, recursos preservados, emissões reduzidas, entre outros
- Evidenciar iniciativas com impactos quantificáveis
- Envolver stakeholders em todo o processo de divulgação de metas

Transição para modelos de negócio circulares

- Otimizar o fabrico e a distribuição, priorizando materiais sustentáveis e logística eficiente
- Implementar logística reversa e embalagens reutilizáveis
- Promover formação contínua e parcerias para capacitação em circularidade
- Investir em ecodesign e tecnologias limpas, com foco em durabilidade e modularidade
- Identificar processos críticos e áreas prioritárias para implementação
- Reduzir emissões e otimizar transporte com rotas eficientes e reaproveitamento de embalagens
- Inovação e modelos de negócio
- Observar tendências e adaptar produtos e serviços para maior circularidade
- Realizar benchmarking no setor e criar planos estratégicos para modelos circulares
- Fomentar cultura interna de inovação circular com envolvimento dos colaboradores

Estratégias circulares

- Identificar e aplicar estratégias circulares com foco em impacto e retorno.
- Reutilizar água, tratando-a conforme normas ambientais.
- Valorizar resíduos como subprodutos e reduzir impactos.
- Monitorizar e reduzir emissões de GEE, reforçando o compromisso sustentável.

7.

APLICAÇÃO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA IMPLEMENTAÇÃO DE ROTEIROS

A Inteligência Artificial (IA) tem vindo a conquistar um espaço dominante na vida das pessoas, das organizações e das economias. Também no que respeita à descarbonização, espera-se que a inteligência artificial seja um *player* com notoriedade crescente.

Na realidade, pode assumir um papel estratégico no que respeita à previsão e gestão de eficiência (recursos, energia, entre outros), permitindo delinear melhor as estratégias quer preventivas quer proativas, na monitorização e no apoio à tomada de decisão.

Por outro lado, a concretização das metas do Acordo de Paris que promovem o *Net Zero* exige transformações estruturais profundas, onde a IA pode assumir um papel estratégico. A sua capacidade de processamento massivo de dados, aprendizagem automatizada e previsão, constitui uma ferramenta estratégica para acelerar e monitorizar os progressos rumo a um futuro sustentável, apresentando soluções inovadoras para a descarbonização, a eficiência energética e a transição justa para uma economia de baixo carbono.

Os benefícios da aplicação da IA são indiscutíveis em aplicações como a eficiência energética.

A produção e consumo de energia representam uma fatia significativa das emissões globais de gases com efeito de estufa. A IA pode ser aplicada em sistemas energéticos inteligentes para otimizar o uso de fontes renováveis, como a solar e a eólica, que são intermitentes por natureza. Através de algoritmos preditivos, é possível antecipar padrões de produção e de procura, ajustando automaticamente a distribuição de energia na rede. Além disso, a IA pode melhorar a eficiência energética em edifícios e indústrias, controlando em tempo real o uso de energia e identificando desperdícios.

A aplicação de IA permite ainda modelar processos

complexos, identificar ineficiências e propor ajustes que reduzam o consumo energético e as emissões. Sistemas de manutenção preditiva baseados em IA também ajudam a prolongar a vida útil de equipamentos e reduzir falhas, contribuindo para uma produção mais limpa e eficiente. Além disso, a IA facilita o design de novos materiais com menor pegada de carbono.

O SMM é intensivo em energia e matéria-prima, estando entre os maiores emissores da indústria transformadora. A IA pode desempenhar um papel crucial na transição deste setor considerando os seguintes processos:

- **Otimização de processos térmicos e eletroquímicos:** a fundição, a laminação, a soldadura e o tratamento térmico são processos altamente energéticos. A IA pode ser usada para controlar em tempo real parâmetros como temperatura, pressão e tempo de operação, ajustando-os dinamicamente para minimizar o consumo energético e as perdas.
- **Gestão inteligente de matérias-primas e resíduos:** algoritmos de IA podem prever padrões de procura e ajustar as encomendas e o armazenamento de materiais, reduzindo desperdícios. Na reciclagem de metais, a IA permite melhorar a separação, triagem e reutilização de materiais, promovendo práticas de economia circular.
- **Inspeção e controlo de qualidade:** visão computacional baseada em IA pode ser aplicada à inspeção automática de superfícies metálicas, soldaduras e peças usinadas, detetando defeitos com elevada precisão e reduzindo o retrabalho e o desperdício.
- **Manutenção preditiva e redução de paragens:** em equipamentos como fornos, prensas ou máquinas CNC, a IA pode monitorizar continuamente o desempenho, prever falhas e recomendar intervenções antes de ocorrerem avarias críticas, aumentando a eficiência global dos ativos.
- **Diagnóstico e mapeamento de emissões:** *machine learning* para analisar grandes volumes de dados operacionais e identificar fontes de emissões com alta precisão, e modelos preditivos para estimar emissões futuras com base em padrões históricos.
- **Simulação e design sustentáveis:** a IA pode apoiar a conceção de componentes metálicos mais leves e resistentes, com menor impacto ambiental ao longo do ciclo de vida, recorrendo a simulações avançadas e algoritmos de otimização multiobjetivo.
- **Definição de estratégias otimizadas:** simular cenários e avaliar impactos de diferentes estratégias, e priorizar ações com melhor custo-benefício ambiental.
- **Apoio à tomada de decisão:** recolha de dados em tempo real permite *dashboards* fiáveis e inteligentes bem como uma análise preditiva, orientando os líderes nas suas tomadas de decisão estratégica.

A IA pode ainda ser uma aliada na monitorização de dados para reporte, no apoio ao planeamento de políticas públicas, identificando sinergias entre setores, antecipando riscos e promovendo uma alocação mais eficiente de recursos.

Este setor pode tornar-se um exemplo de modernização industrial verde quando adota tecnologias digitais como a IA de forma estratégica e responsável, contribuindo ativamente para a aceleração da transição energética, melhoria da competitividade da economia, acesso a novas formas de financiamento, entre outros.

Obviamente as empresas do METAL PORTUGAL, e a AIMMAP enquanto representante do setor, assumem o desafio da IA com responsabilidade, e estão conscientes que o recurso à IA depende da qualidade dos dados, da existência de mão-de-obra especializada, tendo simultaneamente consciência que se trata de uma tecnologia que ainda envolve custos elevados e que exige um grande sentido de ética empresarial.


CO2



8.

PLATAFORMA DIGITAL DE APOIO

Tendo em consideração todo o conteúdo criado e proposto neste roteiro de descarbonização do setor metalúrgico e metalomecânico, foi desenvolvida uma plataforma digital, para partilha de informação e boas práticas.

Esta plataforma digital, contém duas ferramentas inovadoras e interativas, muito importantes para o setor e para as empresas do setor, permitindo realizar simulações, autodiagnósticos e cálculos, por forma a orientar e incentivar a indústria na adoção de tecnologias ajustadas à sua realidade e aos seus processos, promovendo a eficiência energética e a descarbonização.

Estas duas ferramentas de apoio às empresas são essenciais para facilitar o cálculo da pegada de carbono da empresa e o cálculo do roteiro da empresa, são complementadas com várias medidas horizontais, e com o objetivo de apoiar as empresas do setor metalomecânico português na sua transição para a neutralidade carbónica. Encontram-se disponíveis em **https://carbonfreemetalportugal.pt/calcular-pegada-de-carbono/.**



8.1 Cálculo da Pegada de carbono da empresa



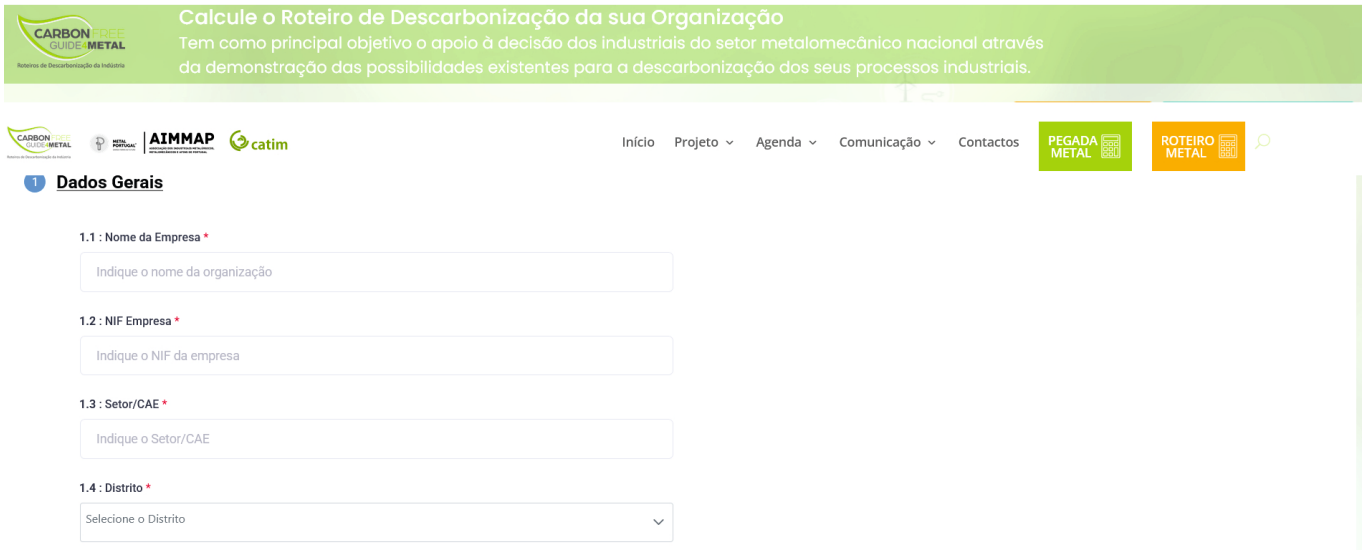
A **ferramenta "Pegada Metal"**, disponibilizada online, foi desenvolvida com o intuito de permitir às empresas do setor metalúrgico e metalomecânico contabilizar e monitorizar as suas emissões GEE, abrangendo os âmbitos 1 e 2 ao abrigo do *Greenhouse Gas Protocol Corporate Standard*:

- âmbito 1: Emissões diretas provenientes de fontes que são propriedade ou controladas pela empresa (estacionárias, móveis, de processo e fugitivas)
- âmbito 2: Emissões indiretas de GEE provenientes da geração de eletricidade adquirida e consumida pela empresa.

Esta ferramenta apresenta um conjunto de oportunidades e benefícios para as empresas do METAL PORTUGAL:

- Gratuidade e acessibilidade: a ferramenta é disponibilizada gratuitamente, sendo assim de livre acesso a todas as empresas do setor, constituindo assim um incentivo para todas as empresas do setor a ela recorrerem;
- Facilidade de uso: desenvolvida com base num interface intuitivo, permite que todas as empresas do setor, independentemente do nível de maturidade no que se refere a ESG, possam calcular as suas emissões de forma simples e rápida;
- Rigor e conformidade: baseada nas diretrizes do Greenhouse Gas Protocol, garante que os cálculos estão alinhados com padrões internacionalmente validados e reconhecidos;

8.2. Cálculo do roteiro de descarbonização da empresa



A **ferramenta "Roteiro Metal"** constitui uma mais-valia e um instrumento verdadeiramente diferenciador, permitindo definir estratégias de descarbonização específicas para cada empresa com vista à redução das emissões de gases com efeito de estufa, ajudando as empresas a traçar um caminho claro e eficaz para atingir suas metas de descarbonização.

Os resultados gerados pela ferramenta "Roteiro Metal" são apresentados em 6 módulos independentes: análise relacionada com a iluminação, análise dos sistemas de compressão de ar (recuperação de calor), análise dos processos industriais elétricos, análise dos processos industriais térmicos, análise do potencial da instalação de painéis fotovoltaicos e análise de economia circular.

No final, e após o cálculo do roteiro, é apresentado um relatório final, que tem como missão ajudar as empresas do setor na sua caminhada de descarbonização, apoiando-as com instrumentos e sugestões de suporte à tomada de decisão. Contudo, para a garantia da aplicabilidade dos resultados obtidos à decisão de investimento final, em situações específicas, poderá ser necessária a realização de estudos caso a caso, com base em dados mais completos, para uma análise aprofundada e integrada.

Benefícios da ferramenta:

- Gratuidade e acessibilidade: a ferramenta de livre acesso para as empresas do METAL PORTUGAL e gratuita, incentivando todas as empresas do setor a utilizarem-na
- Facilidade de uso: desenvolvida com base num interface intuitivo, permite que todas as empresas do setor em qualquer nível da maturidade ESG possam simular o seu roteiro de descarbonização de forma simples e rápida;
- Relatório detalhado: gera um relatório com um roteiro de descarbonização personalizado, adaptado à realidade da empresa.



ANEXOS

ANEXO I - INQUÉRITO

Secção 1

Nome da Empresa
Introduza a sua resposta

Interlocutor da Empresa
Introduza a sua resposta

E-mail do interlocutor
Introduza a sua resposta

Empresa – n.º de turnos:
□ 1
□ 2
□ 3
□ 4

Localização da empresa – Distrito
Selecione a sua resposta

CAE principal da empresa
Selecione a sua resposta

Número de colaboradores (média do ano)
□ ≤50
□ 51-100
□ 101-200
□ 201-249
□ ≥250

Secção 2 Fontes de energia e processo industrial

Classifique a representatividade das fontes de energia utilizadas no processo industrial da organização (excluindo frota), em que 1 corresponde ao menor consumo e 4 corresponde ao maior consumo.
No caso de a fonte de energia não ser utilizada, selecione "não aplicável".

	não aplicável	1	2	3	4
Eletricidade	□	□	□	□	□
Gás natural	□	□	□	□	□
GPL	□	□	□	□	□
Gasolina	□	□	□	□	□
Gasóleo	□	□	□	□	□
Biomassa	□	□	□	□	□
Hidrogénio	□	□	□	□	□

Se aplicável, indique outras fontes de energia utilizadas pela organização não mencionadas na lista anterior.
Introduza a sua resposta

A organização é consumidora intensiva de energia (>500 tep/ano)?
(tep=tonelada equivalente de petróleo)

□ Sim
□ Não
□ Desconheço

Indique quais os processos com maior potencial de melhoria energética na sua empresa

(selecione pelo menos 3 processos)

- ☐ Galvanização
- ☐ Linhas de tratamento de superfície
- ☐ Fundição
- ☐ Laminação
- ☐ Extrusão
- ☐ Trefilagem
- ☐ Soldadura
- ☐ Tratamentos térmicos
- ☐ Pintura/Lacagem
- ☐ Montagem
- ☐ Tratamentos térmicos
- ☐ Produção de ar comprimido
- ☐ Lixagem/Polimento
- ☐ Maquinagem
- ☐ Não tenho conhecimento dos processos na minha organização

Caso se aplique, indique outro(s) processos(s) com potencial de melhoria energética e que não estejam listados na questão anterior.

Introduza a sua resposta

Existem painéis fotovoltaicos nas instalações?

- ☐ Sim
- ☐ Não

Qual a capacidade instalada dos painéis fotovoltaicos em kVA (kilovoltampere)?
(Informação disponível no certificado de exploração, DGEG, UPAC)

Introduza a sua resposta

Secção 3 Eficiência energética

Indique quais as medidas de eficiência energética implementadas na empresa (selecione as aplicáveis)

- ☐ Isolamento térmico
- ☐ Recuperação de calor
- ☐ Otimização de motores
- ☐ Iluminação LED
- ☐ Iluminação eficiente (ex. sensor de movimento)
- ☐ Monitorização e controlo
- ☐ Sistemas de ventilação
- ☐ Manutenção preventiva
- ☐ Sistemas de gestão de energia (ISO 50001)
- ☐ Nenhuma das anteriores

Caso se aplique, indique outras medidas de eficiência energética implementadas e que não constem na lista anterior.

Introduza a sua resposta

A empresa possui um Plano de Descarbonização, com objetivos e metas definidos?

- ☐ Sim
- ☐ Não

A empresa dispõe de sistemas de monitorização ou de gestão energética?

- ☐ Sim
- ☐ Não

A empresa possui frota própria?

☐ Sim

☐ Não

Caracterização da frota:

	1 a 5 veículos	6 a 10 veículos	11 a 20 veículos	21 a 30 veículos	> 30 veículos
Gasóleo	☐	☐	☐	☐	☐
Gasolina	☐	☐	☐	☐	☐
Elétrico	☐	☐	☐	☐	☐
GPL	☐	☐	☐	☐	☐
Híbrido	☐	☐	☐	☐	☐

Qual a percentagem de produção direcionada para o mercado Nacional?

☐ Até 20%

☐ Até 50%

☐ Até 75%

☐ Toda a produção é destinada ao mercado Nacional

☐ Toda a produção é destinada a exportação

Aceitaria receber uma visita técnica para avaliação energética dos processos da sua organização?

☐ Sim

☐ Não

ANÁLISE DO INQUÉRITO

O inquérito foi enviado a um total de 500 empresas pertencentes aos CAE 25 e 282, com o objetivo de recolher dados específicos sobre as suas atividades. Deste total, foram obtidas 122 respostas válidas, o que representa uma taxa de resposta de 25%.

Com o intuito de reforçar a representatividade dos resultados e ampliar a cobertura do estudo, foram realizadas visitas presenciais a 12 empresas incluídas no universo da amostra. Estas visitas permitiram complementar os dados recolhidos por via do inquérito e estimular a participação de determinados subsetores. Estas ações contribuíram para um aumento da representatividade em alguns CAE, nomeadamente:

- CAE 25110: de 5,7% para 12,3%;
- CAE 25120: de 0% para 4,9%;
- CAE 25620: de 8,2% para 10,7%;
- CAE 28250: de 1,6% para 4,1%.

A Tabela 50 apresenta a comparação do número de respostas das organizações do CAE 25 antes e depois das visitas:

Tabela 50:
N.º de respostas para organizações do CAE 25, antes e após as visitas

CAE 25	Dados anteriores às visitas		Dados posteriores às visitas	
	N° de respostas	%	N° de respostas	%
25110	7	5,7	15	12,3
25120	**0**	**0,0**	**6**	**4,9**
25610	8	6,6	7	5,7
25620	10	8,2	13	10,7
25710	4	3,3	4	3,3
25734	5	4,1	6	4,9
25920	7	5,7	7	5,7
25991	5	4,1	5	4,1
25992	16	13,1	18	14,8

A Tabela 51 apresenta a mesma comparação para os CAE 282:

Tabela 51:
N.º de respostas para organizações do CAE 282, antes e após as visitas

CAE 282	Dados anteriores às visitas		Dados posteriores às visitas	
	N° de respostas	%	N° de respostas	%
28222	0	0,0	0	0,0
28250	2	1,6	5	4,1
28293	0	0,0	0	0,0

O Gráfico 52 apresenta a distribuição do CAE principal das empresas respondentes.

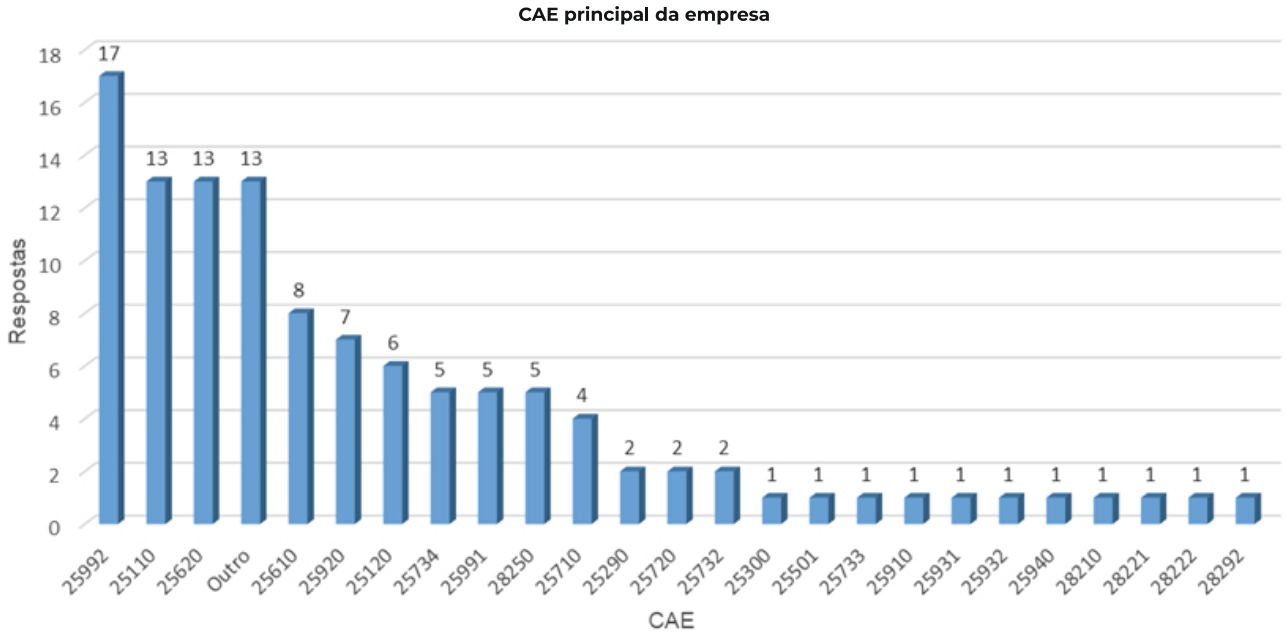


Gráfico 52 - CAE principal da empresa

Análise dos resultados ao inquérito

Localização e Mercados

A maioria das empresas que participaram no inquérito está localizada nos distritos do Grande Porto, Aveiro e Braga, representando cerca de 80% da amostra, conforme representado na Figura 22.

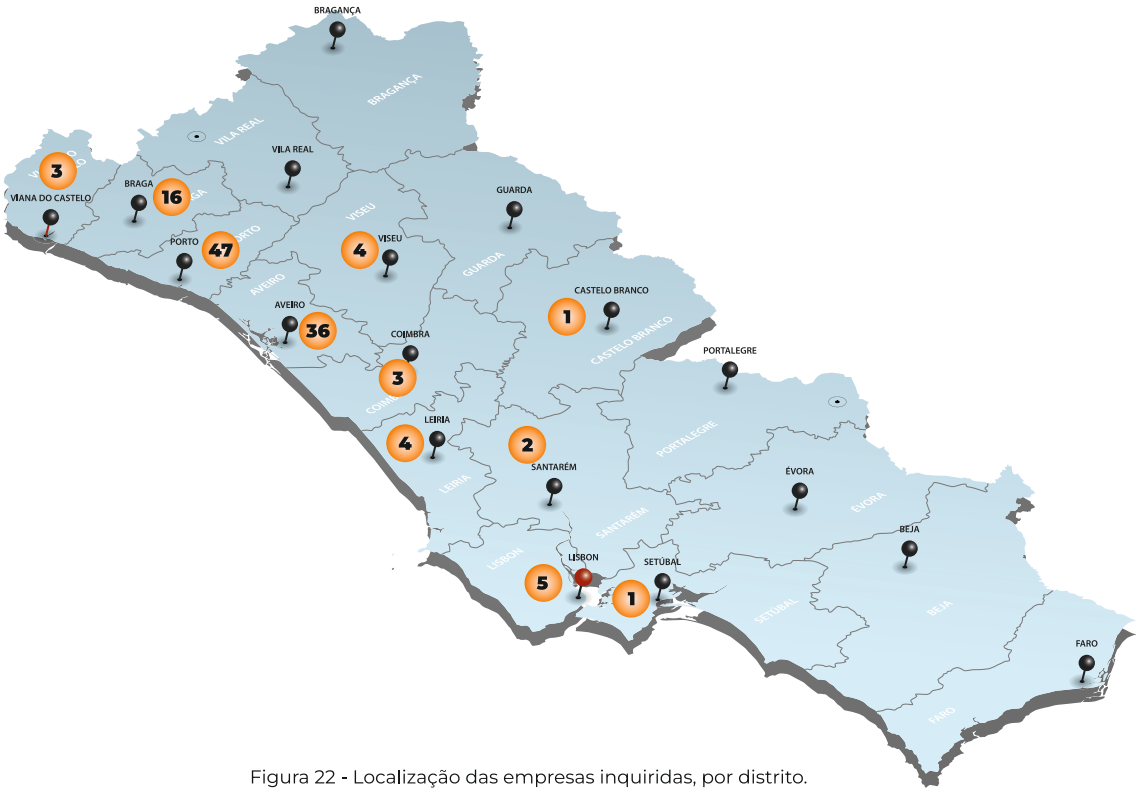


Figura 22 - Localização das empresas inquiridas, por distrito.

Em relação aos mercados, verifica-se uma forte orientação exportadora: apenas 14% das empresas operam exclusivamente no mercado nacional. Em contraste, apenas 3% indicaram destinar 100% da sua produção à exportação (Gráfico 53).

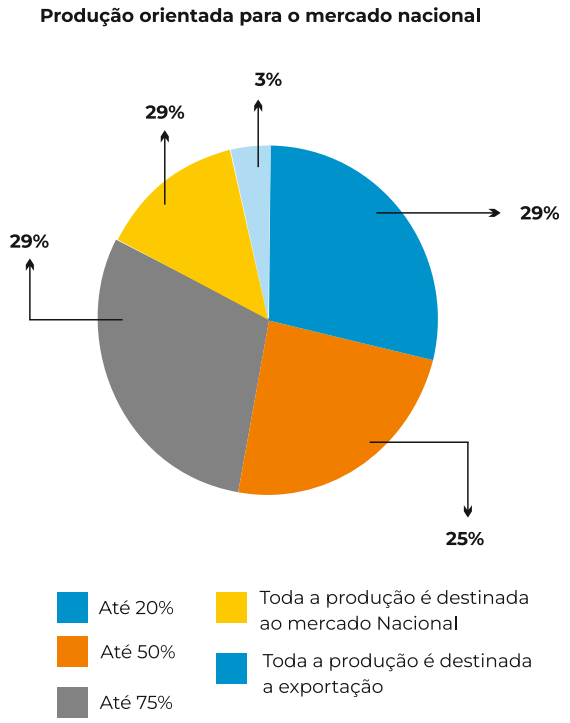


Gráfico 53 - Produção destinada ao mercado nacional.

Organização do Trabalho

A estrutura de turnos nas empresas revela uma predominância da laboração em turno único (53%), sendo reduzida a percentagem de empresas com três turnos (7%), conforme ilustrado no Gráfico 54..

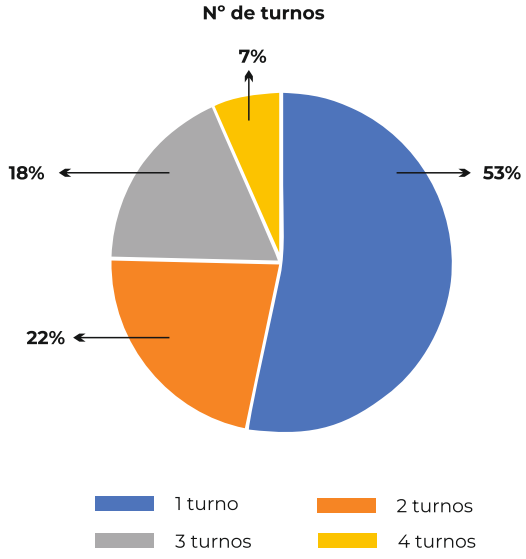


Gráfico 54 - Número de turnos

Dimensão Empresarial

Relativamente à dimensão das empresas (Gráfico 55):

- 42% são micro ou pequenas empresas (menos de 50 colaboradores),
- 50% são médias empresas (entre 50 e 250 colaboradores),
- 8% são grandes empresas (mais de 250 colaboradores).

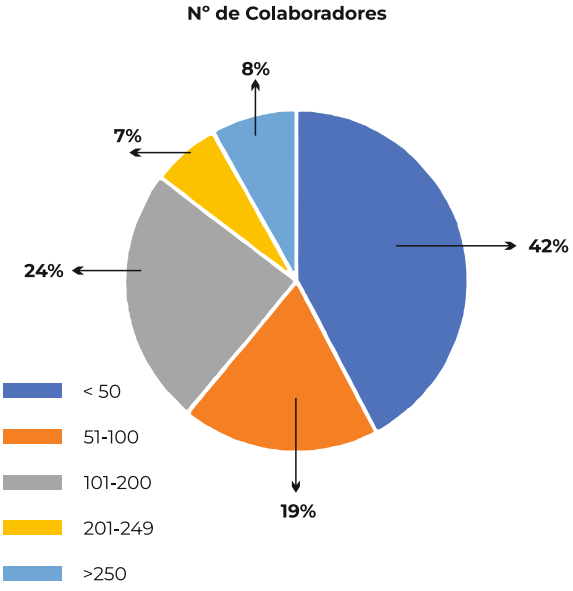


Gráfico 55 - Número de colaboradores

Fontes e Consumo de Energia

A eletricidade é a principal fonte de energia utilizada, seguindo-se o gás natural, o GPL, o gasóleo e a gasolina. O consumo de biomassa foi referido por apenas uma empresa (gráfico 56).

Relativamente ao enquadramento relativo a consumo intensivo de energia, os dados representados no gráfico 57 indicam que:

- 24% das empresas classificam-se como consumidoras intensivas de energia;
- 19% desconhecem o respetivo enquadramento legal associado a esta classificação.

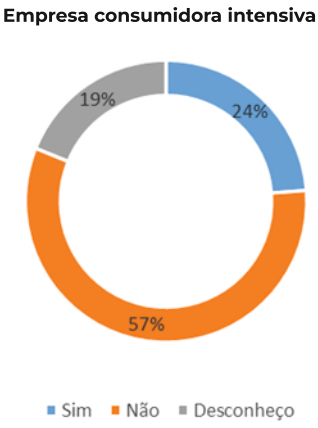


Gráfico 57 - Empresa consumidora intensiva de energia

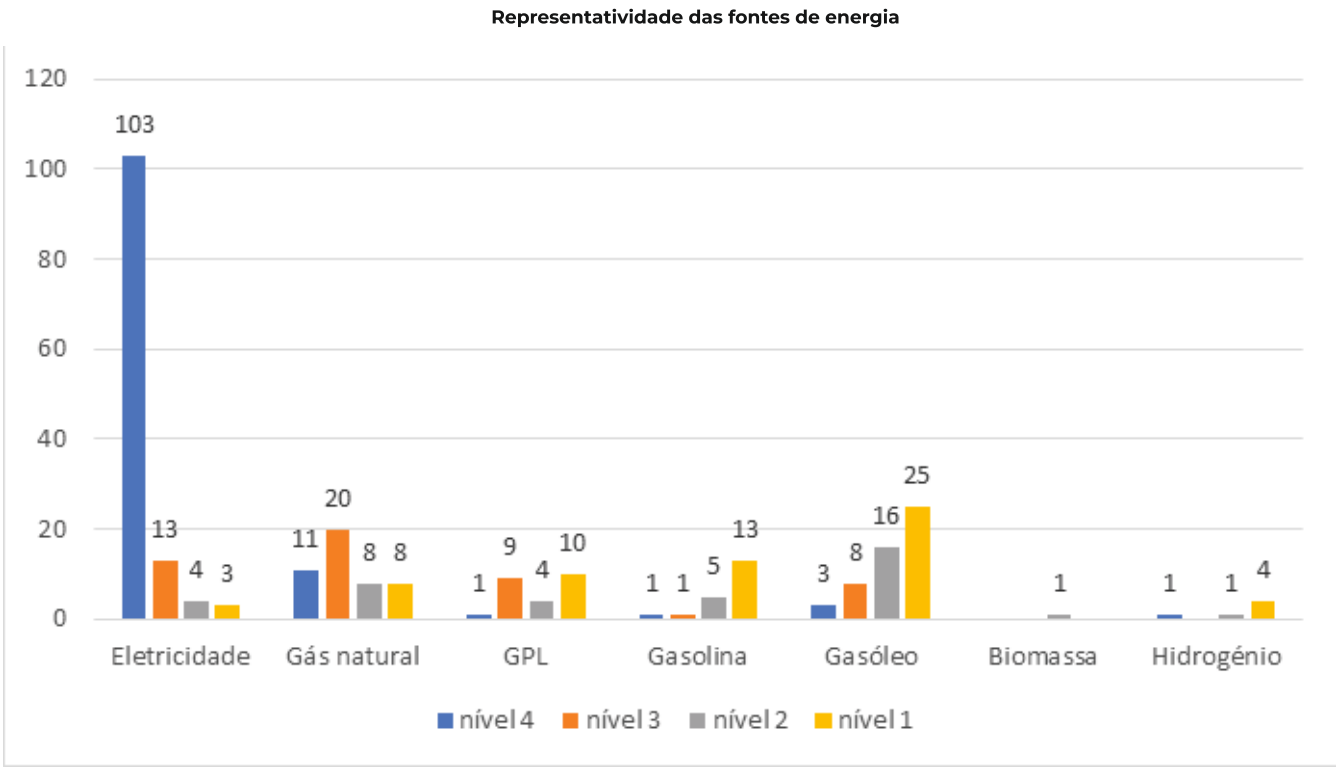


Gráfico 56 - Representatividade das fontes de energia.

Processos com Potencial de Melhoria Energética

Os processos produtivos identificados com maior potencial de melhoria energética foram:

- Produção de ar comprimido
- Maquinagem
- Soldadura
- Pintura/Lacagem
- Lixagem/Polimento
- Linhas de tratamento de superfície
- Montagem
- Fundição
- Tratamentos térmicos

Estes dados estão representados no Gráfico 58.

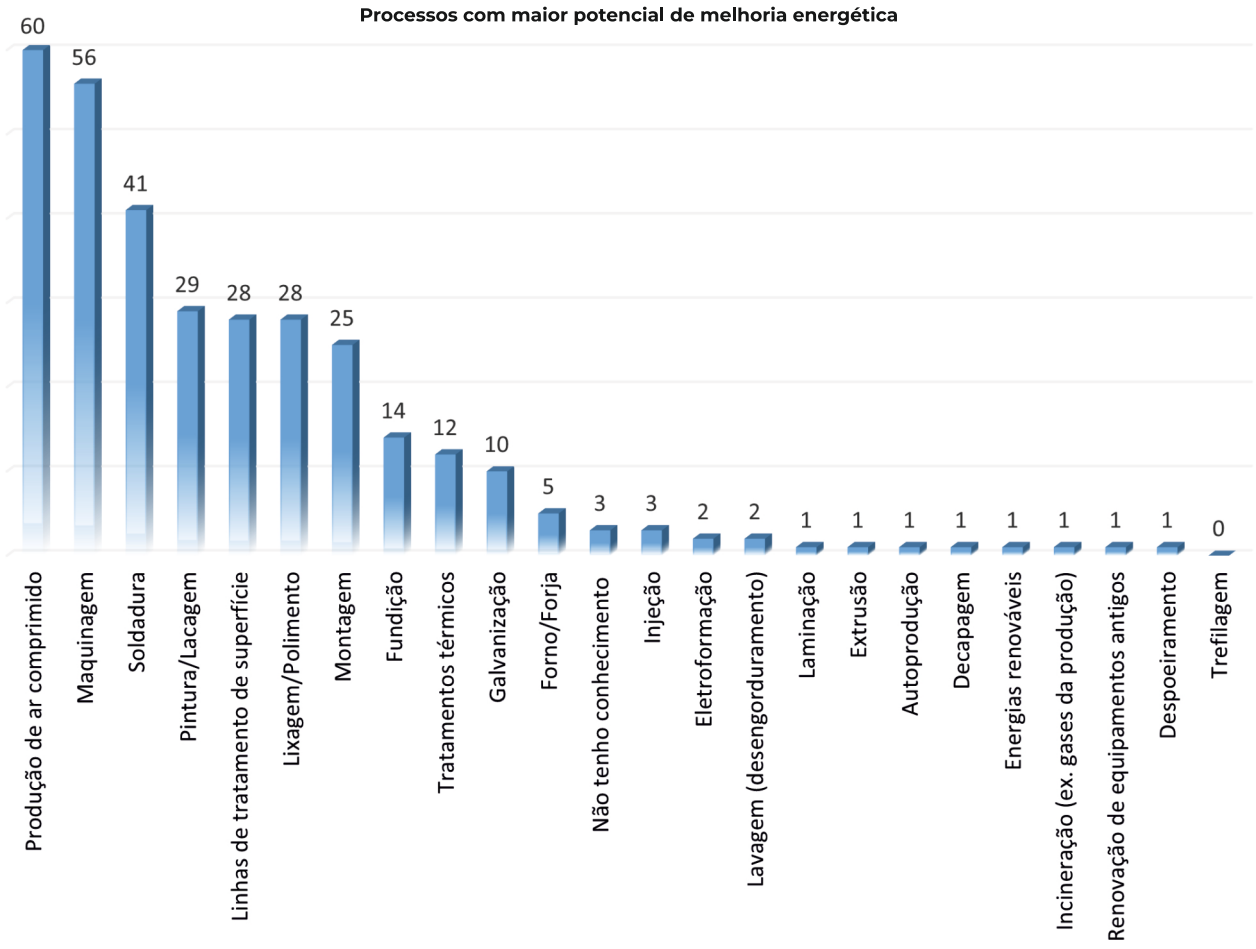


Gráfico 58 - Processos com maior potencial de melhoria energética

Energia Fotovoltaica e Autoconsumo

Cerca de 57% das empresas inquiridas já possuem unidades de produção para autoconsumo (UPAC), conforme evidenciado no Gráfico 59:

- Todas as UPAC têm potência inferior a 1000 kVA;
- 68% das UPAC apresentam potência instalada inferior a 300 kVA (gráfico 60).



Gráfico 59 - Existência de painéis fotovoltaicos

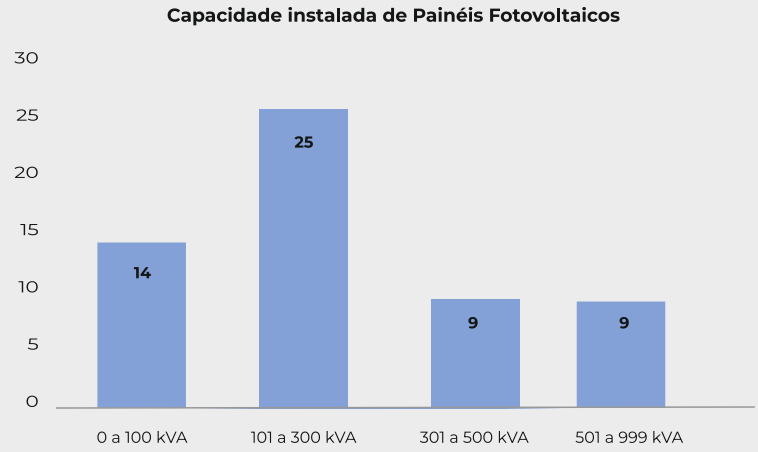


Gráfico 60 - Capacidade instalada de painéis fotovoltaicos

Medidas de Eficiência Energética

Ao nível das medidas de eficiência energética implementadas, gráfico 61, constata-se que:

- 90% adotaram iluminação com LED;
- 50% realizam manutenção preventiva;
- 35% efetuam monitorização dos consumos de energia;
- 34% apresentam medidas de iluminação eficiente, como sensores de presença;
- 32% investiram em sistemas de isolamento térmico.

Por outro lado, a adoção de energias renováveis e de sistemas de recuperação de calor ainda é limitada.

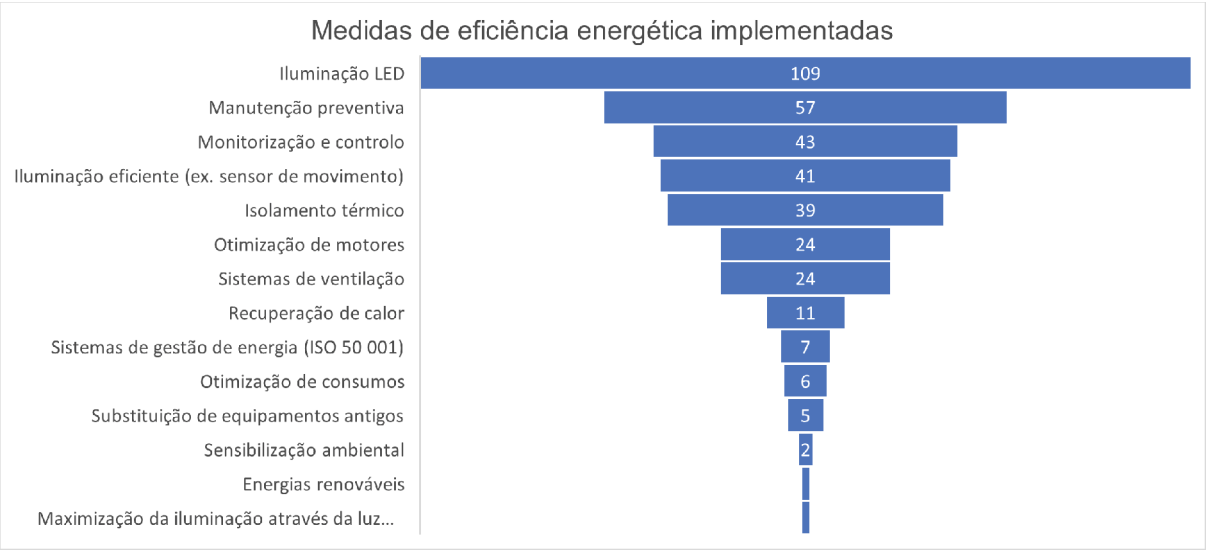


Gráfico 61 – Existência de um plano de descarbonização, ou sistema de monitorização ou gestão energética.

Apenas 17% das empresas afirmam ter planos específicos de descarbonização, enquanto 45% já dispõem de sistemas de monitorização ou senso-rização de consumos, conforme ilustrado no Gráfico 62.

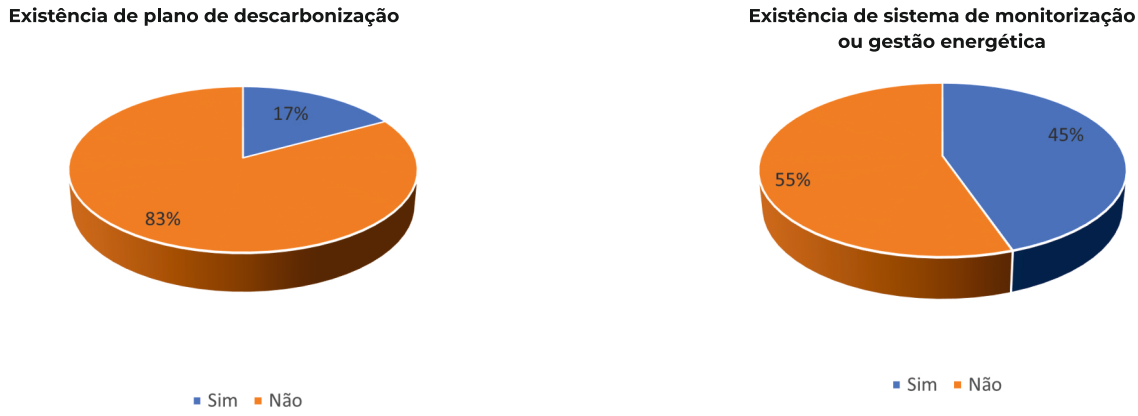


Gráfico 62 - Medidas de eficiência energética implementadas.

Frota e Transportes

Ao nível dos transportes, 89% das empresas possuem frota própria, dados representados no gráfico 63 e no gráfico 64:

- Frotas com 1 a 5 veículos são compostas principalmente por veículos a gasóleo (57%), elétricos (36%) e híbridos (32%);
- Frotas com 6 a 10 veículos seguem o mesmo padrão: gasóleo (65%), elétricos (18%) e híbridos (12,5%).

As frotas de maior dimensão utilizam predominantemente veículos a gasóleo.



Gráfico 63 - Existência de frota própria

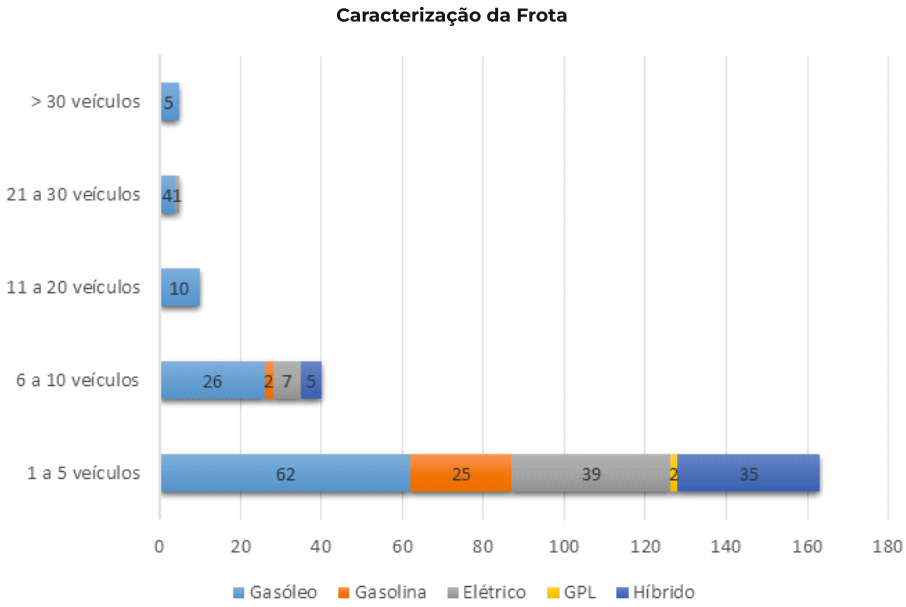


Gráfico 64 - Caracterização da frota

ANEXO II - NOMENCLATURA USADA NO MODELO OSEMOSYS

Tecnologia	Descrição
BM_Imp	Biometano (tecnologia para supply)
ELE_Imp	Eletricidade (tecnologia para supply)
PV_UPAC	Fotovoltaico para autoconsumo de eletricidade (tecnologia para supply)
H2_Imp	Hidrogénio (tecnologia para supply)
LPG_Imp	Gás de petróleo liquefeito (tecnologia para supply)
NG_Imp	Gás natural (tecnologia para supply)
WD_Imp	Biomassa (tecnologia para supply)
Captura_CO2	Tecnologia para captura de carbono
BC_BaixaT	Bomba de calor (baixa temperatura T<120°C)
BC_MediaT	Bomba de calor (média temperatura 120°C<T<400°C)
BC_AltaT	Bomba de calor (alta temperatura T>400°C)
Colet_Solar_PP	Coletor solar do tipo placa plana (baixa temperatura T<120°C)
Colet_Solar_TV	Coletor solar do tipo tubos vácuo (baixa temperatura T<120°C)
Concent_Solar	Concentrador solar (média temperatura 120°C<T<400°C)
Ar_Comp_A	Ar comprimido (tecnologia atual)
Ilum_A_Ele	Iluminação atual
Ilum_F_Ele	Iluminação futura com melhorias no sistema de iluminação
Maq_A_Ele	Maquinagem (tecnologia atual) com eletricidade
Maq_A_Ele_VFD	Maquinagem (tecnologia atual com variador de velocidade) com eletricidade
Conf_A_Ele	Conformação (tecnologia atual) com eletricidade
Conf_A_G	Conformação (tecnologia atual) com gás natural ou biometano
Conf_RC	Conformação (tecnologia atual) com gás natural e calor (recuperação de calor)
Conf_A_Ele_VFD	Conformação (tecnologia atual com variador de velocidade) com eletricidade
Conf_A_G_QAE	Conformação (tecnologia atual com queimador de alta eficiência) com gás natural
Conf_A_G_IT	Conformação (tecnologia atual com isolamento térmico) com gás natural ou biometano
Conf_F_FHib	Conformação (tecnologia futura) com fornos híbridos
Conf_F_H2	Conformação (tecnologia futura) com troca de vetor para hidrogénio
Conf_F_WD	Conformação (tecnologia futura) com troca de vetor para biomassa
Corte_A_Ele	Corte (tecnologia atual) com eletricidade
Corte_A_G	Corte (tecnologia atual) com gás natural ou biometano
Corte_A_LPG	Corte (tecnologia atual) com GPL
Corte_A_Ele_VFD	Corte (tecnologia atual com variador de velocidade) com eletricidade
TT_A_Ele	Tratamentos térmicos (tecnologia atual) com eletricidade

Tecnologia	Descrição
TT_A_G	Tratamentos térmicos (tecnologia atual) com gás natural ou biometano
TT_A_LPG	Tratamentos térmicos (tecnologia atual) com LPG
TT_RC	Tratamentos térmicos (tecnologia atual) com recuperação de calor
TT_A_Ele_VFD	Tratamentos térmicos (tecnologia atual com variador de velocidade) com eletricidade
TT_A_G_QAE	Tratamentos térmicos (tecnologia atual com queimador de alta eficiência) com gás natural ou biometano
TT_A_LPG_QAE	Tratamentos térmicos (tecnologia atual com queimador de alta eficiência) com LPG
TT_A_G_IT	Tratamentos térmicos (tecnologia atual com isolamento térmico) com gás natural ou biometano
TT_A_LPG_IT	Tratamentos térmicos (tecnologia atual com isolamento térmico) com GPL
TT_F_Fhib	Tratamentos térmicos (tecnologia futura) com fornos híbridos
TT_F_H2	Tratamentos térmicos (tecnologia futura) com troca de vetor para hidrogénio
TT_F_WD	Tratamentos térmicos (tecnologia futura) com troca de vetor para biomassa
TS_A_Ele	Tratamentos de superfície (tecnologia atual) com eletricidade
TS_A_G	Tratamentos de superfície (tecnologia atual) com gás natural ou biometano
TS_A_LPG	Tratamentos de superfície (tecnologia atual) com GPL
TS_RC	Tratamentos de superfície (tecnologia atual) com recuperação de calor
TS_A_Ele_VFD	Tratamentos de superfície (tecnologia atual com variador de velocidade) com eletricidade
TS_A_G_QAE	Tratamentos de superfície (tecnologia atual com queimador de alta eficiência) com gás natural
TS_A_LPG_QAE	Tratamentos de superfície (tecnologia atual com queimador de alta eficiência) com GPL
TS_A_G_IT	Tratamentos de superfície (tecnologia atual com isolamento térmico) com gás natural ou biometano
TS_A_LPG_IT	Tratamentos de superfície (tecnologia atual com isolamento térmico) com GPL
TS_F_Fhib	Tratamentos de superfície (tecnologia futura) com fornos híbridos
TS_F_H2	Tratamentos de superfície (tecnologia futura) com troca de vetor para hidrogénio
TS_F_WD	Tratamentos de superfície (tecnologia futura) com troca de vetor para biomassa
Sold_A_Ele	Soldadura (tecnologia atual) com eletricidade
Sold_A_Ele_VFD	Variador de velocidade soldadura
Calor -TT	Calor para equipamentos de tratamento térmico
Calor -TS	Calor para equipamentos de tratamento superfície



carbonfreemetalportugal.pt

CARBON FREE GUIDE4METAL
Roteiros de Descarbonização da Indústria

METAL PORTUGAL

AIMMAP
ASSOCIAÇÃO DOS INDUSTRIAIS METALÚRGICOS, METALOMECÂNICOS E AFINS DE PORTUGAL

catim
centro de apoio tecnológico à indústria metalomecânica

PRR
Plano de Recuperação e Resiliência

REPÚBLICA PORTUGUESA

Financiado pela União Europeia
NextGenerationEU