



FundiRoaD

Roteiro de Descarbonização

do Setor de Fundição
em Portugal



PRR
Plano de Recuperação
e Resiliência



REPÚBLICA
PORTUGUESA



Financiado pela
União Europeia
NextGenerationEU

Ficha técnica

Título

Roteiro de Descarbonização

Promotor

Associação Portuguesa de Fundição



Autoria

CCENERGIA – Auditoria e Consultoria Energética S.A.



3Drivers – Engenharia, Inovação e Ambiente S.A.



Índice

1.	Sumário Executivo	5
2.	Enquadramento	6
2.1	FundiRoad	9
2.2	Alterações Climáticas e Pegada Carbónica	10
2.3	Enquadramento Regulatório	11
2.4	Roteiros Internacionais de Descarbonização	14
2.5	Oportunidades e Barreiras para a Descarbonização	15
3.	O Setor de Fundição em Portugal	18
3.1	Caracterização Socioeconómica	19
3.2	Processos Industriais e Tecnologias	20
3.3	Consumo de Energia e Emissões	24
3.4	Diagnóstico do Setor	25
3.4.1	Análise de Maturidades	25
3.4.2	Avaliações Energéticas	28
4.	Vetores de Descarbonização	34
4.1	Eficiência Energética	35
4.2	Vetores Energéticos	38
4.2.1	Eletrificação	38
4.2.2	Combustíveis Renováveis	39
4.3	Economia Circular	41
4.4	Compensação e Captura de CO ₂	43
4.5	Digitalização de Processos	44
5.	Trajétórias de Descarbonização	46
5.1	Cenários de Referência	47
5.1.1	Cenário BAU	48
5.1.2	Cenário RNC2050	50
5.2	Eixos e Medidas de Descarbonização	53
5.3	Avaliação do Potencial das Medidas de Descarbonização	56
5.4	Cenários de Descarbonização	59
5.4.1	Definição de Cenários	59
5.4.2	Trajétórias Custo-eficazes de Redução de Emissões de GEE	63
6.	Considerações Finais	65

Índice de Figuras

Figura 1	Evolução da temperatura na superfície terrestre (adaptado de IPCC,2023)	10
Figura 2	Contabilização da Pegada de Carbono	11
Figura 3	Produção anual de fundidos, ferrosos e não ferrosos, 2006-2023 (Adaptado de CAEF, 2023)	19
Figura 4	Etapas principais do processo de fundição para metais ferrosos e não ferrosos (Adaptado de (Leoni, et al, 2021))	20
Figura 5	Distribuição dos vetores energéticos do CAE 245, entre 2014 e 2023	24
Figura 6	Emissões de GEE do CAE 245 (2023)	25
Figura 7	Valores médios das maturidades	26
Figura 8	Valores médios das maturidades	26
Figura 9	Maturidade Energética	27
Figura 10	Maturidade Organizacional	27
Figura 11	Maturidade em Sustentabilidade	27
Figura 12	Maturidade Digital	27
Figura 13	Consumo de energia primária e emissões de CO ₂ das instalações avaliadas	28
Figura 14	Desagregação de consumos energéticos pelos principais setores	29
Figura 15	Desagregação de consumos do processo produtivo	29
Figura 16	Emissões de GEE por fonte de energia, em 2023 (diagnóstico setorial)	30
Figura 17	Potencial de economias por setor de consumo	31
Figura 18	Evolução da produção, consumo de energia e emissões do setor de fundição em Portugal projetados de acordo com o cenário BAU até 2050	49
Figura 19	Evolução da produção, consumo de energia e emissões do setor de fundição em Portugal projetados de acordo com o cenário RNC2050	51
Figura 20	Medidas de descarbonização consideradas em cada um dos cenários modelados	60
Figura 21	Vetores energéticos impactados pelas medidas de descarbonização consideradas nos cenários	60
Figura 22	Evolução do consumo de energia no setor de fundição em Portugal para os cenários BAU, RNC2050 e para os três cenários de descarbonização modelados, até 2050	63
Figura 23	Evolução das emissões no setor de fundição em Portugal para os cenários BAU, RNC2050 e para os três cenários de descarbonização modelados, até 2050	64

Índice de Tabelas

Tabela 1	Tipo de forno utilizado dependendo do tipo de metal, adaptado de (Comissão Europeia, 2024)	21
Tabela 2	Fases do processo produtivo para diferentes tipos de fundição	22
Tabela 3	Resultados da avaliação de maturidade - prioridades de atuação	27
Tabela 4	Consumo específico de energia do setor de fundição por tipo de metal	29
Tabela 5	Consumo energético dos diferentes tipo de fornos utilizados	30
Tabela 6	Emissões de CO ₂ por metal produzido (diagnóstico setorial)	31
Tabela 7	Identificação das principais medidas de eficiência energética que podem ser aplicadas na etapa da fusão, adaptado ¹⁹	35
Tabela 8	Pressupostos assumidos para a modelação do cenário BAU	48
Tabela 9	Pressupostos assumidos para a modelação do cenário RNC2050	50
Tabela 10	Eixos estratégicos e medidas de descarbonização que sustentam a construção dos cenários de descarbonização do setor de fundição em Portugal até 2050	53
Tabela 11	Escala de avaliação aplicada a cada critério, com os respetivos descritivos, utilizada na análise da viabilidade de implementação das medidas de descarbonização no setor nacional de fundição	57
Tabela 12	Avaliação da viabilidade de implementação das medidas de descarbonização no setor de fundição em Portugal, com base nos critérios TRL, Custo-eficiência, Impacte esperado e Viabilidade técnica	58
Tabela 13	Medidas de descarbonização consideradas no Cenário Eficácia, ano de implementação e vetores energéticos impactados	61
Tabela 14	Medidas de descarbonização consideradas no Cenário H ₂ , ano de implementação e vetores energéticos impactados	62
Tabela 15	Medidas de descarbonização consideradas no Cenário Captura CO ₂ , ano de implementação e vetores energéticos impactados	63

Siglas e Acrónimos

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
BAU	<i>Business-as-usual</i>
BREF-SF	<i>Best Available Techniques Reference Documents: Smitheries and Foundries Industry</i>
APF	Associação Portuguesa da Fundição
CAEF	<i>The European Foundry Association</i>
CCS/CCUS	Captura e armazenamento de carbono
CAE	Código de Atividade Económica
CCUS	<i>Carbon capture, utilisation and storage</i>
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
ESG	<i>Environmental, Social and Governance</i>
FAE	Forno de Arco Elétrico
FE	Fator de emissão
FER	Fontes de energia renovável
FI	Forno de Indução
GEE	Gases com Efeito de Estufa
IA	Inteligência Artificial
INE	Instituto Nacional de Estatística
KPI	<i>Key Performance Indicators</i>
MTD	Melhores Técnicas Disponíveis
NIR	<i>National Inventory Report</i>
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PME	Pequenas e Médias Empresas
PNEC	Plano Nacional Energia e Clima 2030
PPA	<i>Power Purchase Agreement</i>
PRR	Plano de Recuperação e Resiliência
RNC2050	Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050
UE	União Europeia
VAB	Valor Acrescentado Bruto
VN	Volume de Negócios

1.

Sumário Executivo



O Roteiro de Descarbonização do Setor de Fundição em Portugal tem como propósito apoiar a transição do setor rumo à neutralidade carbónica até 2050, contribuindo para os objetivos nacionais definidos no PNEC 2030 e na Estratégia de Longo Prazo para a Neutralidade Carbónica (RNC 2050).

A indústria da fundição, Grupo CAE 245 - Fundição de metais ferrosos e metais não ferrosos, apresenta-se como um setor energético e materialmente intensivo, mas também com um elevado potencial de inovação e eficiência. O Roteiro identifica oportunidades concretas para a redução de emissões de gases com efeito de estufa, baseadas na eficiência dos processos, na modernização tecnológica e na adoção progressiva de fontes de energia mais limpas.

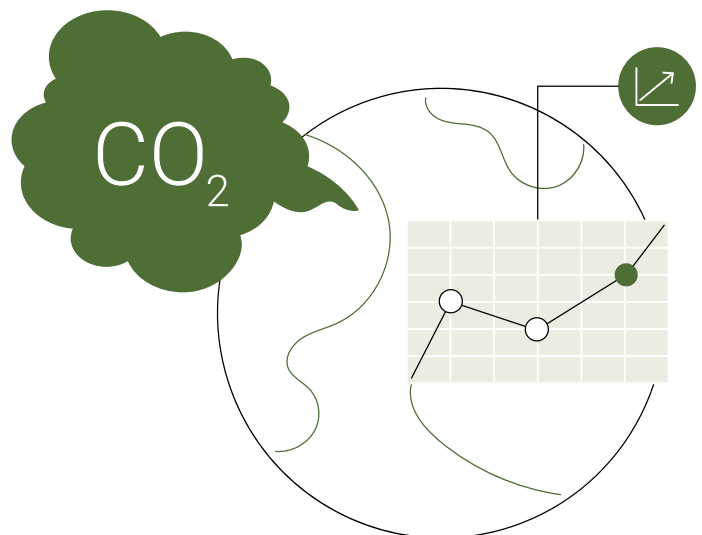
O documento estrutura-se em diferentes eixos de atuação, cobrindo de forma integrada as dimensões técnica, económica, regulatória e ambiental, com base nas especificidades do setor nacional. Estes eixos incluem:

- Eficiência energética, como primeiro passo na redução de consumos e emissões através da otimização dos fornos, das utilidades e dos sistemas de controlo.
- Substituição gradual dos vetores energéticos, promovendo a eletrificação dos processos e a integração de combustíveis renováveis (biometano, biocombustíveis e hidrogénio verde) onde a eletrificação não seja tecnicamente viável.
- Economia circular, centrada no aumento da incorporação de sucata e na valorização de subprodutos como escórias e areias de moldação.
- Compensação e captura de carbono, enquanto complemento futuro às medidas diretas de redução.
- Digitalização de processos, como fator transversal para monitorizar e otimizar consumos, melhorar a rastreabilidade e apoiar a tomada de decisão.

O Roteiro apresenta ainda uma avaliação detalhada das tecnologias e maturidades disponíveis, propondo um conjunto de medidas exequíveis no curto e médio prazo. São também analisadas as principais barreiras tecnológicas e económicas, nomeadamente o custo da energia elétrica, as limitações de infraestrutura, o investimento necessário em equipamentos e a disponibilidade de combustíveis alternativos.

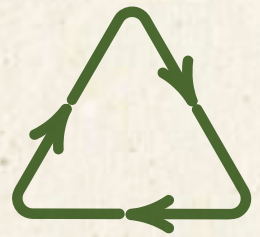
A abordagem adotada combina rigor técnico e pragmatismo industrial, evidenciando o potencial do setor para contribuir para a descarbonização da economia portuguesa, salvaguardando simultaneamente a sua competitividade, emprego e sustentabilidade a longo prazo.

A descarbonização não é apenas um imperativo ambiental, mas uma alavanca de competitividade e inovação. O Roteiro propõe um modelo de transição justa e industrialmente viável, que transforma a fundição nacional num setor resiliente, eficiente e exportador de produtos de baixo carbono, baseado em dados, inovação e cooperação público-privada.



2.

Enquadramento



Para fazer face aos desafios gerados pelas alterações climáticas e à necessidade urgente de acelerar a redução das emissões de carbono, a União Europeia (UE) comprometeu-se a atingir a neutralidade carbónica em 2050. O estabelecimento deste objetivo deu origem à publicação do Pacto Ecológico Europeu (*European Green Deal*) em 2019, um pacote de iniciativas que engloba todos os setores de atividade e traça metas de redução de gases com efeito de estufa (GEE) de 50 a 55% até 2030. Paralelamente, também no âmbito nacional foram lançadas estratégias para acelerar a redução das emissões, alinhadas com os objetivos europeus e materializadas em dois principais documentos estratégicos: o Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030) e o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC 2050).

O RNC 2050 estabelece o plano a longo prazo para Portugal atingir a neutralidade carbónica até 2050, prevendo um caminho para a indústria que envolverá a eletrificação, a adoção de fontes de energia renovável (FER) e a eficiência energética. Prevê ainda que a promoção da economia circular e o uso mais eficiente dos recursos nas cadeias de produção permitirá reduzir as emissões globais das cadeias de valor. Já o PNEC 2030 define as metas de Portugal a curto prazo (2030) no âmbito da descarbonização, eficiência energética e adoção de energias renováveis, prevendo a redução das emissões de GEE (55% até 2030, em relação a 2005), e o aumento da eficiência energética na indústria. Destaca-se ainda o contributo definido no grau de incorporação de energias renováveis no consumo de energia (51% até 2030) e na eficiência energética (fixando um limite para o consumo primário).

O setor de fundição a nível europeu representa em termos agregados cerca de 14 Mt/ano de peças fundidas, um valor de produção de cerca de €41 mil milhões e cerca de 260 mil empregos diretos, sendo responsável por cerca de 12% da produção mundial de fundidos¹. A Alemanha, Itália, França, Espanha e Polónia figuram entre os maiores produtores europeus, com evolução

recente condicionada por custos energéticos, procura automóvel e transições tecnológicas. Estes números colocam a Europa entre as principais regiões produtoras, com cadeias de valor tecnicamente avançadas e caracterizadas por uma forte presença de PME, assumindo um papel relevante para o cumprimento dos objetivos climáticos da Europa.

Os metais são essenciais em setores estratégicos na transição para uma Europa neutra em carbono, nomeadamente para a produção de baterias, energias renováveis (solar e eólica) e mobilidade limpa. Esta transição só pode ser atingida se existirem quantidades suficientes de metais não ferrosos. Estima-se que, em 2050, a procura por metais para turbinas eólicas irá crescer em 300%, em 200% para painéis solares e em 1000% para baterias². Nesse sentido, a Comissão Europeia tem por objetivo prioritário desenvolver a cadeia de valor de matérias-primas dos metais, de forma a satisfazer a procura crescente por tecnologias de baixo carbono. Isto implica manter e expandir as quotas de mercado em todas as fases da cadeia de valor: extração, processamento e reciclagem.

A agenda de descarbonização do setor identifica a necessidade de acelerar mudanças tecnológicas assentes em políticas industriais e de financiamento que viabilizem esta transição sem perda de capacidade produtiva nos domínios da eletrificação da fusão, maior incorporação de sucata e eficiência energética, sobretudo nas linhas de alumínio e ferro/aço. Ao mesmo tempo, políticas europeias como a EU ETS e CBAM requerem investimentos em eficiência, renováveis e, a prazo, em soluções de captura/uso de CO₂ para emissões residuais. Em complemento às metas legais, o ecossistema setorial tem vindo a apoiar o caminho para "*net-zero foundries*", sublinhando prioridades como o acesso a eletricidade renovável competitiva, o reforço de redes, o apoio a investimentos (fornos eficientes/indução), a recuperação de calor, a digitalização e capacitação de PME (*Cast Metals Federation*).

1. EFF – European Foundry Association (2025). Disponível em <https://eff-eu.org/statistics/>

2. World Bank Group (2017). *The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future* Washington, DC: World Bank Publications. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/ar/207371500386458722/pdf/117581-WP-P159838-PUBLIC-ClimateSmartMiningJuly.pdf>

A adaptação do setor às alterações climáticas torna-se ainda mais relevante quando se prevê um aumento significativo da produção de ferro, aço e metais não ferrosos, devido ao contínuo crescimento nos países em desenvolvimento e à sua incorporação em indústrias em expansão, especialmente a das energias renováveis e a da defesa. Além disso, com a crescente preocupação com as alterações climáticas e os inúmeros planos estratégicos e regulamentos publicados nas últimas décadas, é de prever que o futuro seja pautado por exigências cada vez mais rigorosas em matéria de energia e sustentabilidade ambiental. Assim, será necessário cumprir novos critérios nas unidades produtivas, o

que poderá requerer investimentos significativos no desenvolvimento de novas tecnologias, mas também na infraestrutura energética.

Perante este enquadramento, a indústria da fundição tem de se preparar para um futuro exigente, necessitando de se adaptar a novos requisitos, garantindo uma produção sustentável e a competitividade a longo prazo num cenário global cada vez mais focado na sustentabilidade. É neste contexto que o Roteiro para a Descarbonização no Setor de fundição surge como uma necessidade premente para que o setor se possa adaptar e fazer planos consistentes a curto e longo prazo.



2.1 FundiRoad

O FundiRoad – Roteiro para a Descarbonização do Setor de Fundição em Portugal, visa promover a transição do setor de fundição para uma economia neutra em carbono. Este projeto, financiado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), contribui diretamente para os objetivos nacionais, alavancando a transição energética e a descarbonização do setor em Portugal. O Projeto foi coordenado pela Associação Portuguesa da Fundição (APF) e tem como principal objetivo desenvolver um roteiro estratégico para o setor que planifique a descarbonização até 2050, através do uso eficiente dos recursos (materiais, energia e água), de novas tecnologias e de práticas de economia circular.

De acordo com a Classificação Portuguesa das Atividades Económicas (CAE Rev. 3), o setor de fundição está integrado na **Secção C – Indústrias Transformadoras**, na **Divisão 24 – Indústrias Metalúrgicas de Base**, com o **Grupo CAE 245: Fundição de metais ferrosos e metais não ferrosos**, que integra as seguintes subclasses que se encontram no âmbito deste roteiro:

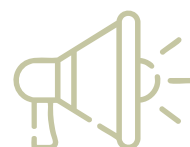
- CAE 24510: Fundição de ferro fundido
- CAE24520: Fundição de aço
- CAE 24530: Fundição de metais leves
- CAE 24540: Fundição de outros metais não ferrosos

Merece especial realce o papel estruturante da fundição no tecido industrial nacional, enquanto atividade essencial à produção de componentes metálicos que servem de base a múltiplas cadeias de valor – desde a indústria automóvel e de transportes até à construção, energia e equipamentos industriais. Pela sua natureza intensiva em energia e matérias-primas, o setor assume-se como estratégico no contexto da transição energética e da descarbonização, representando simultaneamente um desafio e uma oportunidade para reforçar a competitividade e a sustentabilidade da indústria portuguesa.

Entre os principais objetivos do projeto FundiRoad, materializados neste roteiro de descarbonização e nos *workshops* desenvolvidos destacam-se:



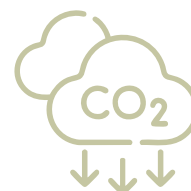
Diagnóstico detalhado do setor de fundição em Portugal, incluindo a sua situação atual, potencial de descarbonização e principais desafios e oportunidades



Aumento da consciencialização e capacitação das empresas e stakeholders sobre a importância e os caminhos para a descarbonização do setor



Ferramentas e recursos de informação para apoiar as empresas na sua jornada de descarbonização



Roteiro de Descarbonização específico para o setor, com projeções de emissões de GEE até 2050 e propostas de trajetórias custo-eficazes para atingir a neutralidade carbónica

2.2 Alterações Climáticas e Pegada Carbónica

As alterações climáticas representam um dos maiores desafios globais do século XXI. O aumento da concentração de gases com efeito de estufa na atmosfera, em particular dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), tem conduzido a um aquecimento médio global de cerca de 1,1 °C acima dos níveis pré-industriais³. Este aquecimento está associado ao aumento da frequência e intensidade de fenómenos extremos, como

ondas de calor, secas, cheias e tempestades, com impactos socioeconómicos e ambientais significativos.

Para enfrentar estas adversidades, e para cumprir com os objetivos definidos no acordo de Paris, urge a presença de esforços coletivos que reduzam as emissões dos GEE.

A evolução da temperatura média global

Variação com respeito às temperaturas de 1850, em graus

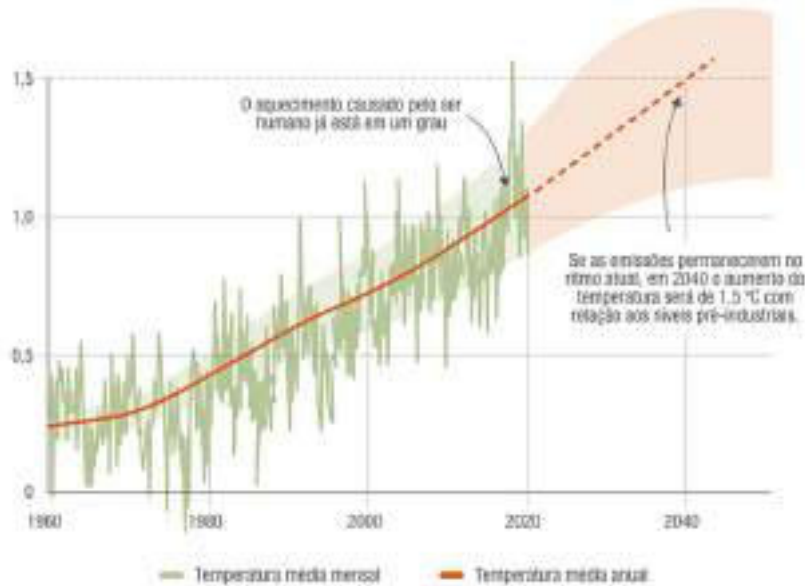


Figura 1 – Evolução da temperatura na superfície terrestre (adaptado de IPCC,2023)

A indústria, pela sua dependência de processos intensivos em energia e matérias-primas, tem sido historicamente um dos setores com maior pegada carbónica. A medição e gestão da pegada de carbono constituem ferramentas centrais para avaliar o impacto climático da indústria da fundição. Este setor, pela sua natureza intensiva em energia e recursos, apresenta emissões diretas e indiretas significativas, relacionadas com a fusão de metais, o uso de fornos, consumos elétricos e térmicos, assim como emissões associadas à produção de matérias-primas e ao transporte de materiais.

A pegada de carbono corresponde ao total de emissões de gases com efeito de estufa (GEE) expressas em CO₂ equivalente, permitindo quantificar a contribuição do setor para o aquecimento global. A sua determinação segue normas internacionalmente reconhecidas, destacando-se o *GHG Protocol*, que define três âmbitos de emissões (1, 2 e 3), que são definidos para a contabilização dos GEE.

3. IPCC (2023). "Relatório de Síntese do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (AR6) – Contributo dos Grupos de Trabalho I, II e III". Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC), Genebra, Suíça.

ÂMBITO 1

Emissões Diretas

Emissões de GEE de origem controladas ou detidas pela empresa como a queima de combustíveis em caldeiras, fornos, veículos

ÂMBITO 2

Emissões Indiretas

Relacionadas com a compra de eletricidade, vapor, calor, frio e resultam do uso de energia pela empresa

ÂMBITO 3

Emissões Indiretas

não incluídas no Âmbito 2 que ocorrem na cadeia de valor

A montante

Compra de bens e serviços
Bens de investimento
Transporte e distribuição
Atividades relacionadas com combustíveis e energia
Resíduos gerados nas operações
Viagens de negócios
Deslocações dos colaboradores
Instalações alugadas

A jusante

Transporte e distribuição
Transformação de produtos vendidos
Uso de produtos vendidos
Produtos em fim de vida
Instalações alugadas
Investimentos

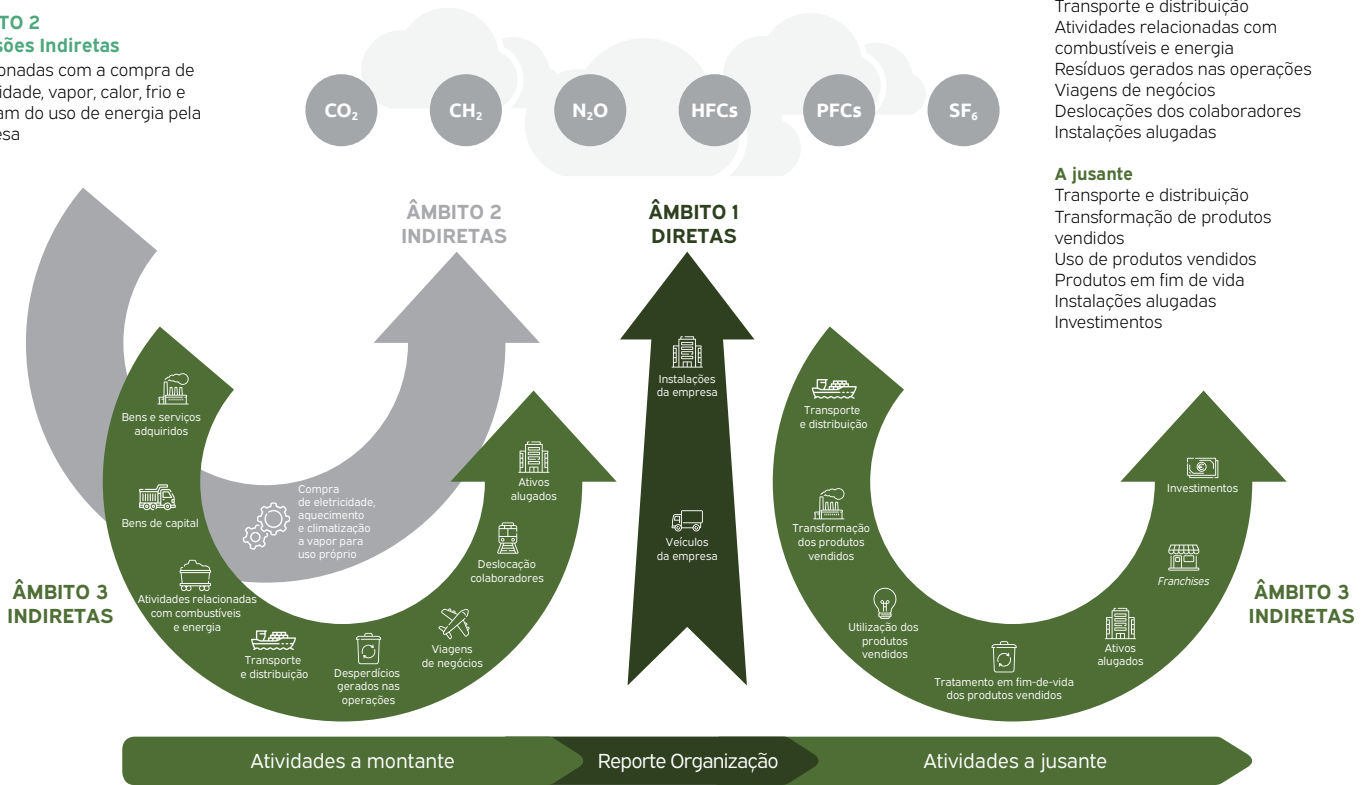


Figura 2 – Contabilização da Pegada de Carbono

Com vista à descarborização, as empresas do setor devem efetuar a contabilização da pegada de carbono⁴ e definir metas de redução de emissões, implementando um plano de ação de medidas de descarborização para mitigar as principais fontes de emissão. Identificam-se para o setor de fundição pilares-chave de descarborização que são explorados neste roteiro, nomeadamente a **Eficiência Energética, os Combustíveis Renováveis, a Eletrificação, a Economia Circular, Tecnologias de Remoção de CO₂ e a Digitalização de Processos.**

2.3 Enquadramento Regulatório

A transição para a neutralidade carbónica na indústria, em particular no setor de fundição, deve levar em consideração o ecossistema regulatório europeu e nacional que pressiona a indústria de fundição para uma redução contínua das emissões, mas também abre oportunidades de inovação, financiamento e liderança sustentável. Neste ecossistema destacam-se os seguintes instrumentos que devem ser integrados numa estratégia de descarborização.

4. Ver ferramenta de cálculo de pegada de carbono (âmbito 1 e 2) disponível em: <https://fundiroad.pt/pegada-de-carbono/>

1. Nova Diretiva Europeia da Eficiência Energética (EED)

Reforça a obrigatoriedade de auditorias energéticas regulares e a implementação de Sistemas de Gestão de Energia (ISO 50001) para grandes consumidores de energia. Identifica a necessidade de monitorização detalhada de consumos e a implementação de medidas de eficiência que contribuam para as metas nacionais do PNEC 2030.

2. Relatórios de Sustentabilidade – VSME / CSRD

A *Corporate Sustainability Reporting Directive* (CSRD) impõe a obrigatoriedade de reporte de informação de sustentabilidade (incluindo emissões de GEE, consumo energético e medidas de descarbonização). Em Portugal, ferramentas como a VSME (*Voluntary Sustainability Reporting Standard for SMEs*) suportam empresas no alinhamento com a CSRD, fornecendo indicadores harmonizados. Para fundições, este reporte constitui um exercício de transparência e comparabilidade internacional, essencial para mercados que valorizam produtos de baixo carbono.

3. Estatuto de Consumidor Eletrointensivo

As empresas qualificadas como Consumidores Eletrointensivos (regulado em Portugal desde 2022 e reforçado em 2025) beneficiam de apoios específicos à competitividade, como tarifas de acesso reduzidas, acesso prioritário a contratos de energia renovável (PPAs⁵) e mecanismos de compensação por custos indiretos de CO₂. A fundição, fortemente dependente da eletricidade (particularmente em fornos de indução), poderá encontrar neste estatuto uma alavanca para reduzir custos energéticos e acelerar a transição para fontes renováveis.

4. Auditorias Energéticas Regulamentares

As auditorias energéticas obrigatórias (no âmbito do Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia -SGCIE ou Dec.-Lei 68-A/2015) continuam a ser uma exigência para grandes consumidores. Para as fundições, representam uma oportunidade de identificar oportunidades de eficiência energética, otimizar utilidades (sistemas de ar comprimido, sistemas de ventilação, sistemas térmicos ou outros) e planear investimentos estruturantes. Estas auditorias são também a base de acesso a incentivos financeiros nacionais e europeus.

5. Comércio Europeu de Licenças de Emissão (CELE – EU ETS)

O Sistema Europeu de Comércio de Licenças de Emissão (EU ETS) aplica-se às indústrias intensivas em energia, incluindo segmentos da fundição. O reforço previsto para a Fase IV (2021-2030) implica uma redução progressiva da atribuição gratuita de licenças, aumentando os custos de emissões. Este mecanismo funciona como incentivo económico para investimentos de descarbonização, como eletrificação da fusão, maior incorporação de sucata e tecnologias de captura de carbono.

5. PPA – Power Purchase Agreement

6. Sistemas de Gestão de Energia – ISO 50001

A norma ISO 50001 fornece a estrutura de gestão para implementar, monitorizar e melhorar continuamente o desempenho energético. Para a indústria da fundição, representa não apenas o cumprimento regulatório (EED, auditorias), mas também uma vantagem competitiva, ao reduzir custos, aumentar a eficiência operacional e dar credibilidade aos relatórios de sustentabilidade. A certificação ISO 50001 é reconhecida como boa prática internacional e pode simplificar o acesso a apoios e incentivos.

7. Diretiva das Emissões Industriais (IED – *Industrial Emissions Directive*) e BREFs

A IED (2010/75/EU) estabelece requisitos ambientais aplicáveis às indústrias intensivas em energia, incluindo fundição de metais ferrosos e não ferrosos. O cumprimento é assegurado através das BAT (*Best Available Techniques*) descritas nos documentos de referência BREF setoriais que definem limites de emissões para poluentes atmosféricos, bem como medidas de eficiência energética e de uso racional de matérias-primas que contribuem para a redução da pegada carbónica.

8. Regulamento Europeu CBAM (*Carbon Border Adjustment Mechanism*)

O Mecanismo de Ajustamento Carbónico nas Fronteiras (CBAM) é um instrumento europeu que introduz, a partir de 2026, taxas sobre as importações de produtos com elevada intensidade carbónica (incluindo ferro, aço e alumínio). O CBAM atua como proteção contra concorrência de países com padrões ambientais menos exigentes, mas também como incentivo à redução da intensidade carbónica interna, garantindo competitividade em mercados globais. Implica a necessidade de sistemas robustos de monitorização e reporte de emissões de acordo com metodologias europeias harmonizadas.

9. Regulamento REACH e Economia Circular

O Regulamento REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*) impõe restrições no uso de substâncias químicas e promove a substituição de materiais com elevada pegada ambiental. Para a fundição, este mecanismo incentiva a utilização de ligas mais sustentáveis, à valorização de sucata metálica e à melhoria do ciclo de vida dos produtos. A Estratégia Europeia para a Economia Circular introduz metas para maior incorporação de materiais reciclados, favorecendo a fundição de sucata de ferro, aço e alumínio como vetor essencial de descarbonização.

10. Regulamento EU Taxonomy e Financiamento Sustentável

A Taxonomia da União Europeia estabelece critérios para definir quais atividades económicas podem ser consideradas sustentáveis para fins de investimento. A fundição que adote tecnologias BAT, eletrificação e circularidade poderá ser classificada como atividade alinhada, facilitando o acesso a financiamento verde, fundos europeus e linhas de crédito específicas. Este enquadramento reforça a ligação entre descarbonização e competitividade financeira.

A descarbonização industrial não é apenas uma obrigação ambiental, mas também uma oportunidade de competitividade, ainda que os desafios sejam estruturais e complexos. A antecipação da regulação climática, o acesso a financiamento verde e a valorização reputacional junto de clientes e mercados internacionais tornam a transição energética e carbónica um pilar essencial para a sustentabilidade da indústria portuguesa de fundição.

2.4 Roteiros Internacionais de Descarbonização

A análise de Roteiros internacionais de descarbonização fornece uma referência essencial para o posicionamento estratégico do setor de fundição em Portugal. Entre os casos mais relevantes destacam-se os roteiros do Reino Unido⁶ (2023) e Alemanha⁷ (2022), ambos desenvolvidos em estreita articulação entre indústria, governo e entidades de investigação. Estes documentos apresentam abordagens complementares e oferecem lições aplicáveis ao contexto nacional.

2.4.1 Roteiro do Reino Unido – UK Foundry Sector Net Zero Roadmap

O Roteiro britânico estabelece uma trajetória clara para a neutralidade carbónica até 2050, com metas intermédias específicas para 2030 e 2040. Baseia-se numa estrutura de cinco eixos estratégicos:

1. Eficiência energética e digitalização imediata, com redução de 15–20% no consumo até 2030 através da modernização de fornos, otimização de utilidades e sistemas de controlo inteligente.
2. Eletrificação gradual dos processos térmicos, prevendo que mais de 60% da capacidade de fusão utilize tecnologias elétricas de alta eficiência em 2040.
3. Substituição de combustíveis fósseis, com programas-piloto de hidrogénio verde e biometano aplicados a fornos de chama direta e pré-aquecimento.
4. Economia circular e gestão de materiais, através do aumento da taxa de sucata metálica e reciclagem de areias de moldação, reduzindo emissões de Âmbito 3.
5. Capacitação e financiamento, com foco em formação técnica, partilha de conhecimento e criação de mecanismos de apoio à inovação e modernização tecnológica.

6. 'UK Foundry Sector Net Zero Roadmap'

7. 'BDG Roadmap zur Treibhausgasneutralität'

O plano britânico salienta que a previsibilidade regulatória e o apoio público estável são condições essenciais para o investimento. Através de parcerias entre empresas, universidades e centros tecnológicos, o Reino Unido criou um modelo colaborativo de transição industrial que conjuga ganhos de eficiência, digitalização e inovação tecnológica.

2.4.2 Roteiro da Alemanha – BDG Roadmap zur Treibhausgasneutralität

O roteiro alemão propõe uma abordagem sistémica à neutralidade carbónica até 2045, apoiada em três fases de implementação:

1 Fase de otimização (2025–2030)

Foco na eficiência energética e na eletrificação parcial dos processos de fusão e moldação, integrando sistemas de monitorização digital e recuperação de calor.

2 Fase de transformação (2030–2040)

Aumento significativo da utilização de eletricidade renovável e de hidrogénio verde, combinada com o reforço das redes elétricas e o armazenamento térmico.

3 Fase de neutralidade (2040–2045)

Integração de tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) e generalização da economia circular para matérias-primas e consumíveis.

2.5 Oportunidades e Barreiras para a Descarbonização

O Roteiro alemão destaca ainda a necessidade de um quadro de políticas industriais consistente, que assegure preços competitivos de energia elétrica, investimentos em infraestruturas e incentivos à inovação. Valoriza também a criação de clusters regionais de fundição sustentável, articulando as PME com universidades e fornecedores tecnológicos, e a promoção de investimentos partilhados em hidrogénio e energias renováveis.

A análise destes roteiros evidencia um conjunto de princípios convergentes e lições relevantes que podem orientar a estratégia portuguesa:

- **Descarbonização faseada e previsível, suportada por metas intermédias e políticas públicas estáveis.**
- **Eletrificação dos processos térmicos e introdução progressiva de hidrogénio verde como principal via tecnológica de médio prazo.**
- **Digitalização e gestão energética integrada como medidas de baixo custo e alto impacto.**
- **Economia circular através da valorização de sucata e reciclagem de areias para reduzir emissões de ciclo de vida.**
- **Colaboração entre indústria, governo e sistema científico e tecnológico como fator crítico de sucesso.**

De acordo com o atual padrão de consumo e com o crescimento contínuo nos países em desenvolvimento, é esperado que a procura global de aço e de metais não ferrosos aumente até 2050⁸. Também a crescente procura por tecnologias de baixo carbono (e.g., baterias, energias renováveis, mobilidade limpa) para apoiar a transição climática global faz aumentar a procura por metais ferrosos e não ferrosos uma vez que estas tecnologias consomem uma maior quantidade de metais em comparação com as tecnologias convencionais. Apenas na UE, as previsões de crescimento na indústria do aço apontam para um consumo de 200 Mt em 2050⁹.

A indústria europeia da fundição é uma das mais avançadas do mundo e atualmente, a Europa lidera o caminho a nível do desempenho ambiental e climático. Segundo a Eurofer¹⁰ a indústria do aço conseguirá atingir reduções de 80-95% (face aos níveis de 1990) nas emissões de CO₂ em 2050, se houver um investimento em novas trajetórias tecnológicas. Algumas das tecnologias que poderão facilitar a neutralidade carbónica do setor passam por introduzir o hidrogénio enquanto combustível, aumentar a eficiência dos altos fornos e dos fornos básicos a oxigénio e substituir muitos desses por fornos de arco elétrico. Por outro lado, atingir a neutralidade carbónica pode trazer alguns desafios como o aumento dos custos de produção ou a perda de competitividade da Europa a nível global. Muitos dos competidores da Europa, como a China, não adotam normas ambientais e climáticas, o que acaba por criar uma desigualdade, que deve ser colmatada através de um quadro regulamentar adequado que consiga garantir a competitividade das empresas europeias. Ao mesmo tempo, existe uma dificuldade atual de fazer a transição necessária porque muitas das tecnologias que servirão para atingir a neutralidade carbónica não são ainda economicamente viáveis¹¹.

8. Diez, J., Tomé-Torquemada, S., Vicente, A., Reyes, J. & Orcajo, G. (2023). Decarbonization Pathways, Strategies, and Use Cases to Achieve Net-Zero CO₂ Emissions in the Steelmaking Industry. *Energies*, 16, 7360. <https://doi.org/10.3390/en16217360>

9. Elkerbout, M., Simonelli, F., Vu, H., Bryhn, J., Catuti, M., Del Giovane, C., & Muscio, A. (2021). *Green Steel For Europe- Impact Assessment Report*.

10. Eurofer – The European Steel Association (2019). *Low carbon road-map, Pathways to a CO₂-neutral european steel industry*.

11. Koolen, D. and Vidovic, D. (2022). *Greenhouse gas intensities of the EU steel industry and its trading partners (Report No. JRC129297)*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:10.2760/170198

O setor de fundição nacional enfrenta por isso um conjunto de desafios significativos – financeiros, laborais, competitivos e energéticos – que podem ser convertidos em oportunidades estratégicas para acelerar a transição energética, melhorar a eficiência e reforçar a posição da fundição portuguesa nos mercados internacionais.

Um dos constrangimentos mais apontados pelas empresas do setor é a dificuldade no acesso a crédito, limitando a capacidade de realizar investimentos em expansão e modernização tecnológica. Esta restrição pode traduzir-se numa desvantagem competitiva face a concorrentes melhor posicionados para adotar soluções inovadoras e descarbonizadas.

O setor de fundição nacional exporta cerca de 80% da produção, o que garante relevância internacional, mas também expõe as empresas à concorrência de países como Índia, Turquia e algumas economias da Europa Central, onde os custos da mão de obra, da energia e das matérias-primas são mais competitivos.

Apesar das ameaças, a reputação positiva da fundição portuguesa e a qualidade da sua mão de obra constituem uma vantagem competitiva importante, que pode ser reforçada através da aposta em inovação, eficiência e certificação ambiental.

A fundição é um setor intensivo em energia, altamente exposto à volatilidade dos preços energéticos. Com a crescente eletrificação dos processos na fundição, cresce também a dependência desta fonte energética e a vulnerabilidade às flutuações de preço do mercado energético. A indústria da fundição de metais é cinco vezes mais sensível aos elevados preços de eletricidade do que a indústria de fabrico¹².

Esta vulnerabilidade pode, contudo, transformar-se numa oportunidade se forem adotadas as Melhores Técnicas Disponíveis (MTD) e outras práticas de eficiência energética, associadas à incorporação de fontes renováveis e endógenas. Tal estratégia pode reduzir a dependência externa e aumentar a resiliência das empresas.

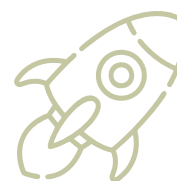
O enquadramento regulatório, em particular as obrigações do Licenciamento Ambiental e o cumprimento das MTD, impõem desafios, mas também oportunidades de competitividade. As MTD visam simultaneamente:



Reduzir o consumo de recursos
(água, energia e matérias-primas)



Minimizar a produção de resíduos e emissões



Promover a inovação em produtos e processos

12. Wyns, T. & Khandekar, G. (2019). Metals for a Climate Neutral Europe, A 2050 Blueprint. Disponível em <https://eurometaux.eu/media/2005/full-report-8-56-17.pdf>



A sua adoção é obrigatória em fundições com capacidade de fusão diária ≥ 20 toneladas, sejam de metais ferrosos ou não ferrosos. Estas práticas, ao aliarem proteção ambiental e eficiência, fortalecem a posição competitiva do setor a médio e longo prazo.

A valorização dos resíduos do processo de fundição surge como outra oportunidade relevante, ao permitir transformar desperdícios em matérias-primas secundárias com valor económico, reduzindo custos e impactos ambientais.

A redução de forma drástica das emissões de CO_2 da indústria de fundição, requer a articulação de vários elementos fundamentais que permitirão a transformação industrial, por exemplo o aumento da eficiência dos processos, o aumento da utilização de material reciclado, a introdução de práticas de economia circular ou a implementação de sistemas de captura e armazenamento de CO_2 , áreas de intervenção que se exploram de seguida neste roteiro.

Adicionalmente, importa considerar que a transição para a neutralidade carbónica poderá gerar tensões sociais, decorrentes da necessidade de requalificação profissional, da adaptação a novos processos produtivos e da perceção de risco associada à competitividade e ao emprego no setor. A adoção de soluções tecnológicas disruptivas poderá ser interpretada como um fator de incerteza pelas empresas e pelos trabalhadores, exigindo uma abordagem gradual, transparente e acompanhada de instrumentos de apoio à formação, comunicação setorial e mecanismos de apoio público que assegurem uma transição justa.

3.

O Setor de Fundição em Portugal



3.1 Caracterização Socioeconómica

O setor de fundição em Portugal é caracterizado por uma variedade de empresas, de micro a grandes empresas, dedicadas à fundição de metais ferrosos, não ferrosos e outros grupos de metais. Embora a fundição represente uma fração reduzida da Indústria Transformadora em termos de Valor Acrescentado Bruto (VAB) (0,5%) e empregos (0,4%), tem grande impacto nas cadeias de valor, nomeadamente fornecendo componentes críticos para os setores metalomecânico, de construção, energia e automóvel.

A APF, criada em 1964, agrupa a larga maioria de fundições em Portugal, representando cerca de 90% da produção de fundidos no país. Contabilizando apenas as empresas-membro da APF, cuja atividade principal é a fundição, podem contar-se cerca de 38 empresas a operar em Portugal¹³ das quais 74% são médias e grandes empresas¹⁴. Em 2023, o volume de negócios do grupo de empresas mencionado totalizou 651 milhões de euros¹⁵ e o setor empregava mais de 5 400 trabalhadores. A indústria da fundição é um importante fornecedor de todo o tecido industrial, desempenhando assim um papel fundamental no processo de desenvolvimento e modernização da indústria portuguesa.

A principal atividade da indústria da fundição é a transformação de metais e ligas metálicas (em estado líquido) em peças específicas, através da utilização de moldes. A principal divisão do setor é feita entre os metais ferrosos e não ferrosos, já que o primeiro grupo tem propriedades magnéticas e o segundo tem propriedades antimagnéticas e resistência à corrosão. A fundição de metais ferrosos inclui o ferro e o aço e as ligas metálicas ferrosas incluem aço, ferro cinzento, ferro nodular, e os ferros ou aços ligados. A fundição de metais não ferrosos inclui ligas de alumínio, cobre, zinco, chumbo, estanho, níquel, magnésio e titânio. A fundição é ainda dividida segundo o tipo de moldação utilizada, podendo esta ser permanente e não permanente. Tipicamente a fundição de metais ferrosos utiliza moldação não permanente (areia) e a de metais não ferrosos utiliza molde permanente (metálico).

Em 2023, a indústria da fundição em Portugal produziu cerca de 170 mil toneladas de fundidos, das quais 121Mt de metais ferrosos (71%) e 49Mt de metais não ferrosos (29%)¹⁶. De acordo com dados estatísticos da DGAE (Direção-Geral das Atividades Económicas) para 2023, o VAB do setor foi de 149 935 k€, empregando 3 190 pessoas para um Volume de Negócios (VN) de 505 478 k€. As exportações em 2023 representaram 324 091 k€ (Itália, França, Espanha e Alemanha absorveram 70% deste volume).

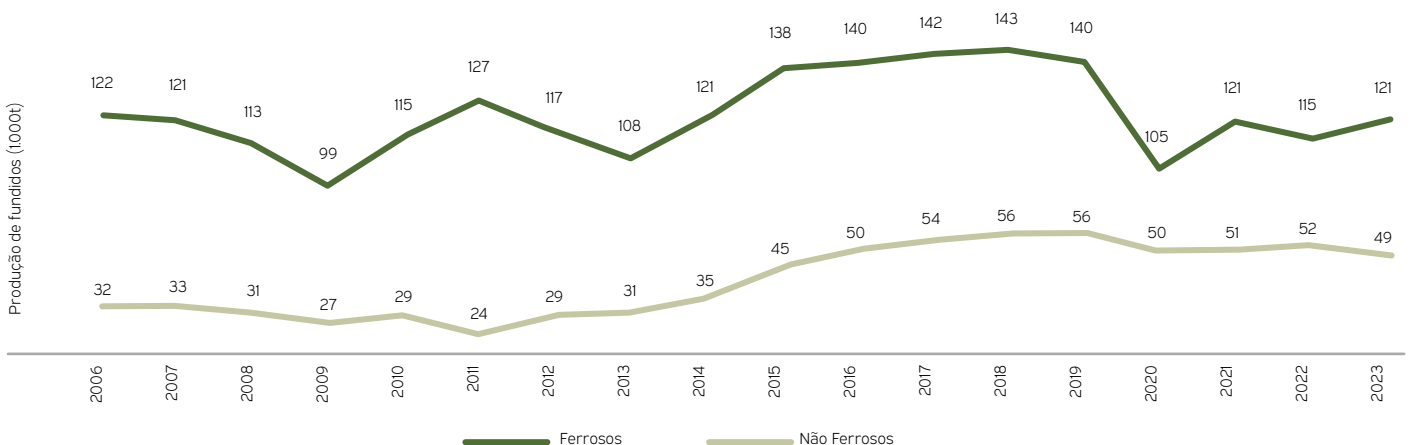


Figura 3 - Produção anual de fundidos, ferrosos e não ferrosos, 2006-2023 (Adaptado de CAEF, 2023)

13. Castro, A., Leitão, A. & Silva, F. (2018). Contributos para um plano estratégico para a indústria portuguesa de fundição. Disponível em <https://apf.com.pt/plano-estrategico/>

14. No entanto, de acordo com os dados estatísticos oficiais nacionais do Gabinete de Estratégia e Estudos, existiam em 2023 115 empresas registadas com o CAE 245 como CAE principal.

15. 356 milhões de euros de não ferrosos e 295 milhões de euros de ferrosos (APF, 2023)

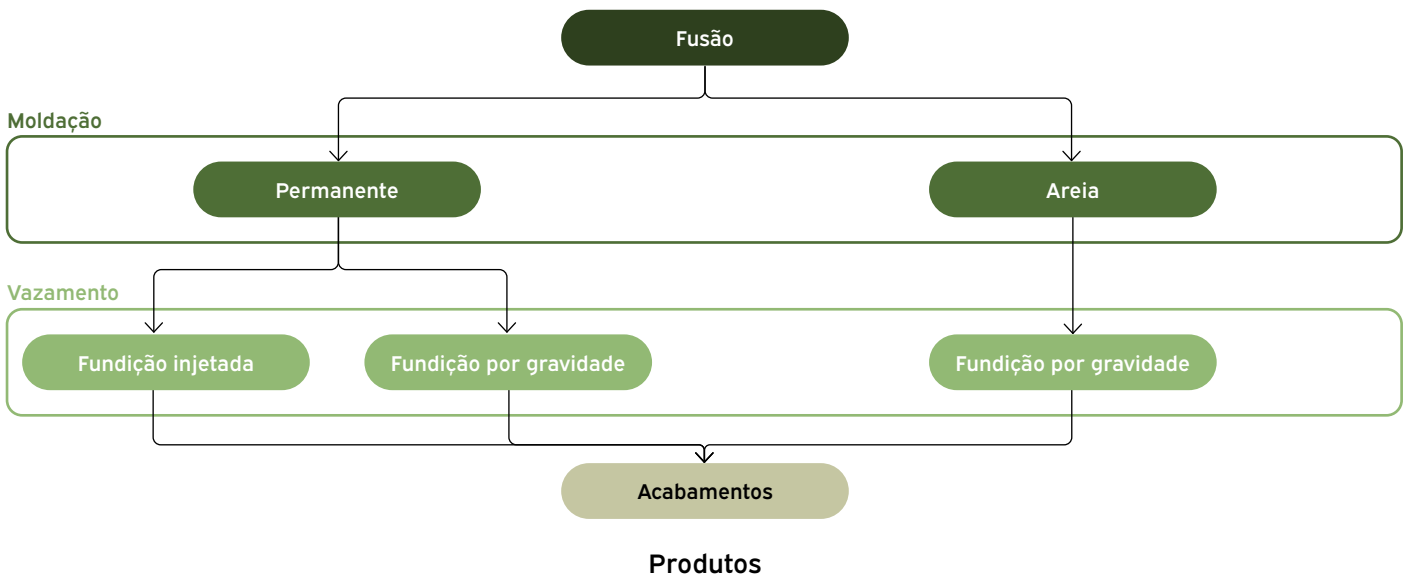
16. CAEF – The European Foundry Association – Commission for Economics & Statistics (2023). The European Foundry Industry 2023. Germany: CAEF.

3.2 Processos Industriais e Tecnologias

Mais de 70% dos fundidos produzidos em Portugal são fornecidos à indústria automóvel, sendo o restante fornecido a outras indústrias clientes como a construção civil (9%), construção de máquinas (6%), válvulas e saneamento básico (6%), entre outras. O setor exporta 85% da produção total (em peso) maioritariamente para o mercado europeu, com preponderância nos mercados de Espanha e França¹⁵. Portugal é ainda o país da Europa em que a quota nacional de produção de fundidos para o setor automóvel é maior, a par de Espanha, Alemanha e Turquia. No total, a fundição portuguesa representa menos de 2% da produção europeia¹⁷.

Em termos geográficos, em Portugal, as empresas do Setor de Metalurgia e Fundição encontram-se maioritariamente nas regiões do norte e centro¹⁹ com cerca de 70% das empresas, e na região de Lisboa (17%).

O processo de fundição pode variar dependendo do tipo de metal, ferroso ou não ferroso, no entanto, existe um conjunto de etapas que são comuns a todo o processo. Primeiramente, o metal é fundido com recurso a um forno que pode ser elétrico ou a combustível, na etapa que é designada por fusão e que apresenta maior consumo energético no processo produtivo. Por este motivo, é também nesta primeira fase que existe maior potencial de aumentar a eficiência do processo e deste modo diminuir o consumo energético e as respetivas emissões de GEE. Numa segunda fase ocorre a deposição do metal líquido em moldes, previamente preparados, na etapa de moldação. Os moldes podem ser feitos de areia (não permanentes) ou podem ser metálicos (permanentes). Os moldes de areia são moldes de utilização única, por oposição aos moldes metálicos que podem ser usados em múltiplas peças. Após a solidificação do metal dentro dos moldes, este é extraído do molde e sujeito a acabamentos, de onde resultam os produtos finais²⁰.



Metais Ferrosos

Peças para o setor automóvel, componentes de máquinas e equipamentos industriais, peças estruturais para a construção civil, válvulas e bombas industriais, engrenagens e eixos.

Metais não ferrosos

Componentes para a indústria automóvel e aeroespacial, peças para equipamentos elétricos e eletrónicos, componentes elétricos (cabos), peças para eletrodomésticos.

Figura 4 - Etapas principais do processo de fundição para metais ferrosos e não ferrosos (Adaptado de (Leoni, et al., 2021))

17. CAEF – The European Foundry Association – Commission for Economics & Statistics (2023). The European Foundry Industry 2023. Germany: CAEF.

18. No entanto, de acordo com os dados estatísticos oficiais nacionais do Gabinete de Estratégia e Estudos, existiam em 2023 115 empresas registadas com o CAE 245 como CAE principal.

19. Instituto Superior Técnico (2024). Portal de medidas de eficiência energética em sistemas industriais (MEESI). Disponível em <https://www.meesi.pt/>

20. Leoni L., Cantini, A., De Carlo, F., Salvio, M., Martini, C., Toro, C., & Martini, F. (2021). Energy-Saving Technology Opportunities and Investments of the Italian Foundry Industry. *Energies*, 14(24), 8470. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14248470>

Tipicamente o forno utilizado varia de acordo com o tipo de metal fundido. No caso do ferro, são utilizados fornos em cúpula e fornos de indução (FI). Apesar de os fornos rotativos serem utilizados noutros países europeus, em

Portugal não existem fornos desse tipo. No caso da fundição do aço é tipicamente utilizado o forno de indução. Relativamente aos metais não ferrosos, são essencialmente utilizados fornos de soleira e de indução.

Tipo de metal	Forno de Cúpula	Forno de Arco Elétrico	Forno de Indução	Forno de Soleira	Forno de Cadinho	Forno Rotativo
Ferro	x		x*			x
Aço		x	x*			
Alumínio				x	x	x
Cobre			x			
Zinco			x			

*Mais comum

Tabela 1 - Tipo de forno utilizado dependendo do tipo de metal, adaptado de (Comissão Europeia, 2024)

Seguidamente é descrito de forma sucinta o modo de operação de cada um dos fornos²¹:

- **Forno de Cúpula:** este tipo de forno é revestido com material refratário. A carga metálica é aquecida e fundida pela combustão dos combustíveis, que ocorre na parte inferior do forno, também chamada câmara de fusão. Nos fornos de cúpula de ar frio o ar ambiente, à pressão atmosférica, é injetado na câmara de fusão através de um anel com vários bicos de injeção, resultando num fluxo de ar uniformemente distribuído, os gases de combustão sobem a partir da câmara de fusão e aquecem a carga antes de serem libertados pela chaminé da cúpula. Nos fornos de cúpula a ar quente o ar pré-aquecido, com pressão elevada, é injetado na câmara de fusão através de um anel com vários bicos de injeção. Isto aumenta a eficiência em comparação com a cúpula de sopro frio;
- **Forno de Arco Elétrico:** este é um forno de fusão por lotes, o corpo é revestido por materiais refratários e uma câmara de fusão larga, permitindo que sejam fundidas cargas volumosas. A fusão ocorre através de um arco elétrico trifásico gerado entre três elétrodos de grafite posicionados acima da carga metálica;

- **Fornos de Indução:** estes fornos funcionam através de um campo magnético forte, que é gerado pela passagem de uma corrente elétrica numa bobina envolta no forno. A fusão ocorre devido ao campo magnético que induz uma corrente no metal, gerando assim calor que promove a fusão;
- **Forno de Soleira:** também conhecido como forno reverberatório, este é um forno estático com aquecimento direto, revestido com material refratário. A carga metálica é aquecida pela ação direta da chama e dos gases de combustão provenientes do processo de queima de combustíveis em queimadores, montados nas paredes ou no teto. Estes gases são soprados sobre o banho metálico e extraídos por sistemas de exaustão;
- **Forno Cadinho:** é um forno geralmente usado como forno de manutenção, consiste em cadinhos simples que são aquecidos externamente pelos gases resultantes da combustão de diferentes gases combustíveis, por eletricidade ou, para temperaturas mais baixas, por fluido térmico. O contacto direto com a chama é evitado para prevenir pontos quentes localizados na base do cadinho, garantindo assim um bom controlo da temperatura no banho metálico, e evitando a oxidação e vaporização do metal;

21. Comissão Europeia (2024). JRC. Final Draft of the Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Smitheries and Foundries Industry. Disponível em: <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/smitheries-and-foundries-industry>

- **Forno Rotativo:** este tipo de forno tem a configuração de um cilindro que gira em torno de um eixo quase horizontal, onde a carga metálica é aquecida através de um queimador localizado lateralmente. Para gerar o calor necessário, utiliza-se combustível ou gás natural, combinado com ar ou oxigénio puro.

Os processos de fundição mais recorrentes na indústria de fundição nacional são:

Fundição em areia verde ou areia química
(em molde não permanente)

Fundição em coquilha
(molde permanente)

Fundição por injeção

Fundição por cera perdida,
ou fundição de "precisão"

O *layout* produtivo está habitualmente dependente do tamanho e série das peças fundidas, bem como do tipo de metal processado e do tipo de operação utilizada.

Fases	Tipos de fundição			
	Areia	Injetada	Coquilha	"Precisão"
Preparação das cargas de fusão	X	X	X	X
Preparação das areias (de moldação)	X			
Fusão	-	-	-	-
Fusão elétrica por indução	X			X
Fusão elétrica por resistências em forno de cadinho		X	X	
Fusão a gás em forno de cadinho		X	X	
Fusão a gás em forno de soleira inclinada		X		
Fabrico de machos	X		X	
Moldação	X			X
Pré-aquecimento das moldações e remoção da cera				X
Vazamento	X		X	X
Injeção		X		
Desmoldação¹	X	X	X	X
Acabamento²	X	X	X	X

Notas:

1. Designada como "abate", na fundição em areia

2. Inclui granalhagem, corte de gijos e alimentadores, rebarbagem, lixamento, polimento ou outros

Tabela 2 - Fases do processo produtivo para diferentes tipos de fundição

Na etapa de vazamento procede-se ao enchimento das cavidades moldantes com o metal líquido. Este é um processo que pode ser realizado de forma manual ou de forma automática. Na desmoldação a peça é removida do molde ou moldação. A moldação e a macharia (fabrico de machos) constituem fontes relevantes de geração de resíduos.

Após o processo de fundição, raramente a peça se encontra no seu estado final e, dependendo do processo de fundição utilizado, o acabamento da peça produzida pode passar por diferentes etapas. A título de exemplo, e dependendo das especificações finais da peça, poderá ser necessário: a remoção de restos de areia da superfície da peça metálica e restos de machos que permanecem nas cavidades das peças metálicas, corte de gitos e alimentadores, granalhagem, rebarbagem, lixamento e polimento. Poderão ser também necessárias outras operações de soldadura para junção e/ou recuperação de imperfeições das peças, bem como outros processos de valor acrescentado como maquinagem e aplicação de revestimentos superficiais e tratamentos térmicos com a finalidade de melhorar as características da peça.

O tipo de fundição bem como a matéria-prima utilizada influenciam a eficiência energética do processo. Além das perdas de material e consumo de energia ao longo do processo de fundição (processo produtivo), existem outros processos (sistemas auxiliares), como o ar comprimido ou sistemas de ventilação, que apesar de não se relacionarem diretamente com a fundição do metal, apresentam consumos de energia significativos.

De acordo com a APF, os produtos finais da indústria da fundição de metais ferrosos distribuem-se por várias categorias, destacando-se a indústria automóvel como o principal destino da produção. Seguem-se os acessórios diversos, a construção e os bens domésticos, bem como a tubagem de drenagem e de pressão e outros produtos utilizados no setor da engenharia²².

Importa salientar que dos metais não ferrosos, os mais significativos são o alumínio, o cobre, o chumbo, o níquel, estanho e zinco. Destes, o alumínio é o principal metal obtido no setor dos não ferrosos e alimenta a indústria automóvel, a construção e as embalagens de comida e bebida. A maior utiliza-



ção de alumínio reciclado é na produção de ligas de fundição de alumínio-silício (aproximadamente 70%) para a indústria automóvel²³. Da mesma forma que o aço, o alumínio fundido é tipicamente transformado em lingotes que são depois submetidos a outros processamentos (fundição, laminagem e extrusão) e transformados em produtos finais.

O cobre é o segundo metal mais significativo no contexto da fundição, devido às suas excelentes propriedades de condução elétrica. Cerca de 60% da produção de cobre é utilizada em aplicações elétricas, sendo o restante aplicado em arquitetura, sistemas de distribuição de água, climatização e no setor das torneiras e componentes sanitários, onde o cobre e as suas ligas desempenham um papel fundamental. O chumbo é essencial para as baterias no setor automóvel e baterias de emergência, e proteção de radiação nos hospitais. O níquel é maioritariamente utilizado no aço inoxidável, na construção, transporte, engenharia mecânica e equipamentos elétricos e eletrónicos. O zinco é um elemento estratégico para a galvanização do aço, para a produção de bronze e para as coberturas de edifícios. Por fim, o estanho é aplicado na soldadura em placas de circuitos elétricos e revestimento anti corrosão em latas de bebidas, entre outros.

22. Associação Portuguesa de Fundição (2023). Números do setor. Disponível em: <https://apf.com.pt/numeros-do-setor/>

23. Instituto Superior Técnico (2024). Portal de medidas de eficiência energética em sistemas industriais (MEESI). Disponível em <https://www.meesi.pt/>

3.3 Consumo de Energia e Emissões

De acordo com a nomenclatura utilizada na Classificação Portuguesa das Atividades Económicas (Rev.3), para a divisão 24 - Indústrias metalúrgicas de base (com exceção do grupo 241 - Siderurgia e fabricação de ferro-ligas) existe um número considerável de empresas (PME e Não-PME) que apesar de não terem atividade principal no grupo CAE 245 – Fundição de metais ferrosos e não-ferrosos, integram o processo de fundição de metais no seu processo produtivo. Por essa razão, os consumos energéticos e emissões de GEE apresentados representam uma estimativa por baixo face à realidade do mercado.

A indústria da fundição é, de facto, um dos setores industriais mais intensivos no consumo de energia. De acordo com os dados da DGEG, o consumo de energia final do setor de fundição (CAE 245) atingiu, em 2023, cerca de 345 285 MWh.

Os dados disponíveis indicam que a energia elétrica é a forma de energia mais usada (62%), seguindo-se o gás natural (33%) e outros produtos do petróleo como o GPL, Gasolina, Gasóleo, Lubrificantes e Solventes (5%). Em termos de instalações consumidoras intensivas de energia, no âmbito do Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE) identificaram-se 23 instalações com consumos superiores a 500 tep, em que a fatura energética global média representa custos da ordem dos 900 k€/ano.

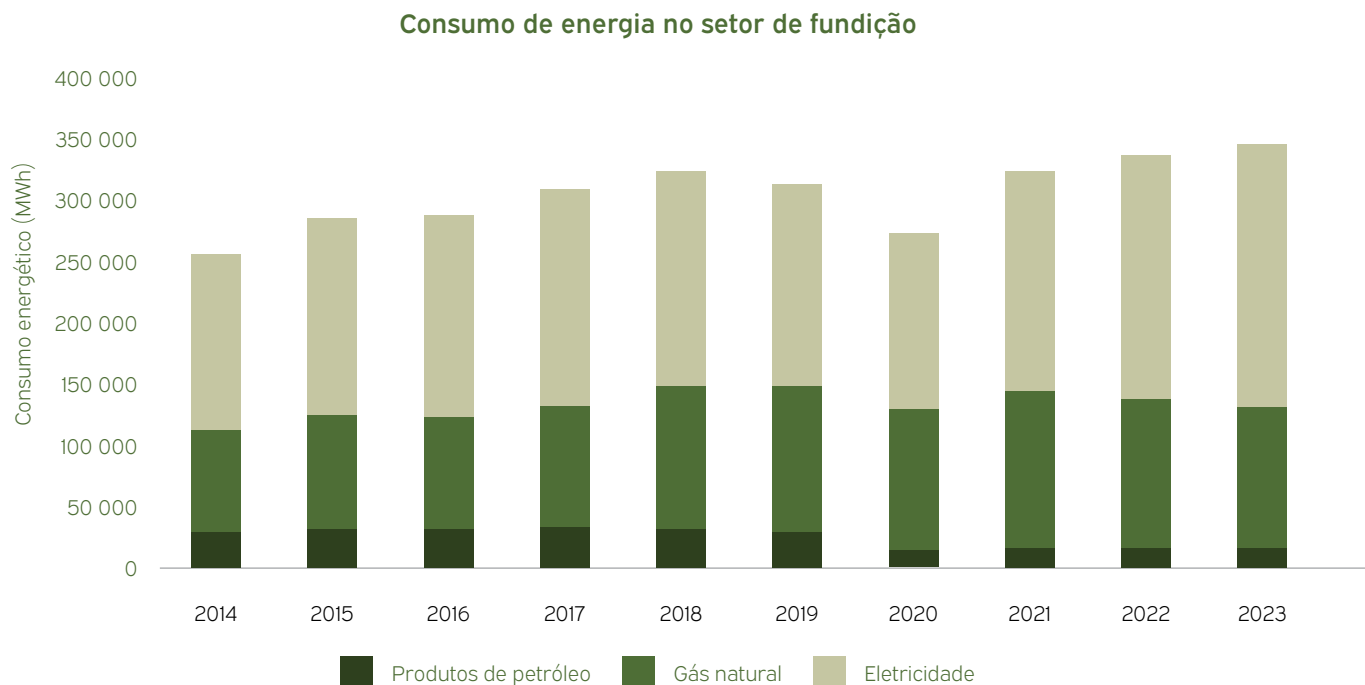


Figura 5 - Distribuição dos vetores energéticos do CAE 245, entre 2014 e 2023²⁴

24. Consumo energético na CAE 245 - Fundição de metais ferrosos e não ferrosos (Revisão 3), DGEG

A etapa da fusão constitui o principal *hotspot* energético no processo de fundição, representando a fase de maior consumo de energia. É ao nível dos fornos de fusão que se verifica a maior intensidade energética, quer através do consumo de energia elétrica, quer de gás natural, dependendo do tipo de forno utilizado e do metal em processamento.

Para cumprir com as metas estabelecidas em matéria de sustentabilidade, é fundamental identificar oportunidades que promovam o aumento da eficiência energética, sem comprometer a produção do setor de fundição.

Com base nos mais recentes dados de emissões de GEE disponibilizados pela APA – Agência Portuguesa do Ambiente, no *National Inventory Report (NIR)* de 2022, estima-se um valor global de emissões do setor na ordem de 61 443 tCO₂e em 2023, representadas na Figura 6. Desse valor, 55% corresponde ao consumo de energia elétrica, 38% ao consumo de gás natural e os restantes 8% ao consumo de produtos petrolíferos.

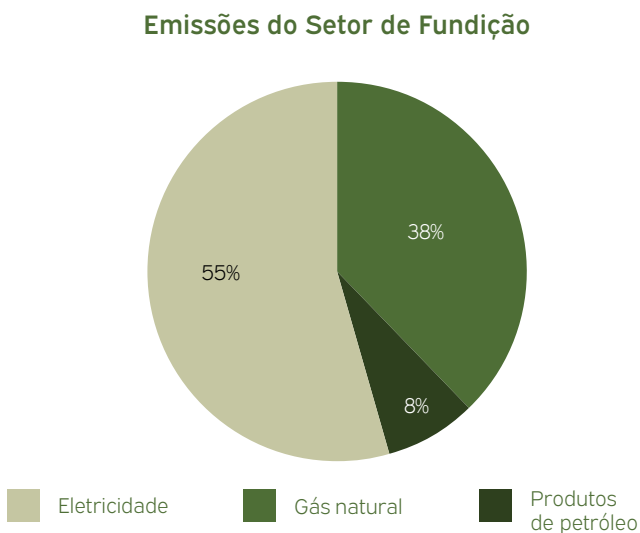


Figura 6 - Emissões de GEE do CAE 245 (2023)²⁵

25. Consumo energético na CAE 245 - Fundição de metais ferrosos e não ferrosos (Revisão 3), DGE

26. Comissão Europeia (2024). JRC. Final Draft of the Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Smitheries and Foundries Industry. Disponível em: <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/smitheries-and-foundries-industry>

3.4 Diagnóstico do Setor

No diagnóstico do setor de fundição são utilizadas diferentes abordagens complementares para a caracterização dos principais indicadores de desempenho, nomeadamente:

- Relatório *Best Available Techniques (BAT SF) Reference Document for the Smitheries and Foundries Industry (2024)*²⁶, elaborado pela Comissão Europeia e tendo por base dados recolhidos em 17 empresas de fundição europeias, entre 2016 e 2020;
- Dados das fundições portuguesas recolhidos através de diagnósticos desenvolvidos (11) no âmbito deste Roteiro, relativos aos consumos energéticos de 2023.
- Avaliações energéticas (5) a instalações do setor de fundição realizadas no âmbito do projeto.

3.4.1 Análise de Maturidades

Na caracterização da maturidade do setor foram avaliadas as componentes de: maturidade organizacional, maturidade em sustentabilidade, maturidade digital e maturidade energética.

Na avaliação da **maturidade organizacional** foram abordados os domínios da gestão de energia, incluindo: política e estratégia, estrutura organizacional, políticas de aquisição, monitorização de usos de energia, eficiência operacional, definição de metas, identificação de oportunidades, integração de renováveis, procedimentos operacionais e adoção de certificações e normas. Uma maturidade elevada está associada a empresas que possuam políticas energéticas claras, estabeleçam objetivos e planos de ação, monitorizem sistematicamente os consumos e promovam a melhoria contínua dos indicadores de desempenho energético.

Na avaliação da **maturidade em sustentabilidade**, foram abordadas áreas como: políticas e compromissos, organização e operações sustentáveis, colaboradores,

stakeholders, descarbonização, circularidade e iniciativas de inovação. A sustentabilidade empresarial traduz-se na capacidade de as empresas gerirem a sua atividade criando valor a longo prazo, enquanto geram benefícios sociais e ambientais para toda a cadeia de valor. Uma maturidade elevada implica integrar os aspetos ambientais e sociais nos processos de decisão, definir estratégias e planos de ação robustos para descarbonização e circularidade, e envolver colaboradores e stakeholders na criação de soluções inovadoras.

Na avaliação da **maturidade digital** foram abordadas as dimensões de: estratégia, organização e cultura; operações eficientes; e tecnologia, infraestrutura e analítica de dados. A transformação digital, em particular aplicada à gestão de energia, representa um passo fundamental para a modernização industrial e para o alinhamento com os conceitos da Indústria 4.0. Uma maturidade digital evoluída traduz-se na capacidade de recolher, centralizar e analisar dados em tempo real, permitindo decisões rápidas e fundamentadas para uma gestão eficiente dos ativos energéticos e operacionais.

Na avaliação da **maturidade na gestão de energia**, foram consideradas quatro dimensões principais: auditorias e estratégia energética, medição de energia, práticas de eficiência energética e gestão de energia. Esta análise permitiu compreender como as empresas estruturam as suas práticas, processos e tecnologias para promover o uso responsável e eficiente da energia. Uma maturidade mais elevada traduz-se na adoção de estratégias claras, sistemas de medição robustos e práticas de eficiência consolidadas, resultando na melhoria contínua do desempenho energético.

Numa avaliação global de resultados da amostra verificou-se que cerca de 50% da amostra tem um trajeto longo a percorrer para alcançar um nível de maturidade elevado nas temáticas avaliadas (valor médio inferior a 2 numa escala de 0 a 4).

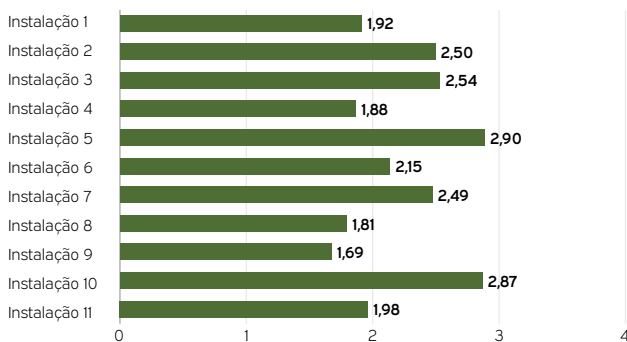


Figura 7 – Valores médios das maturidades por instalação

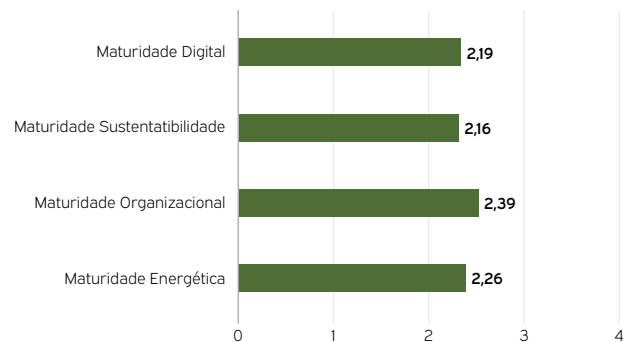


Figura 8 – Valores médios das maturidades analisadas

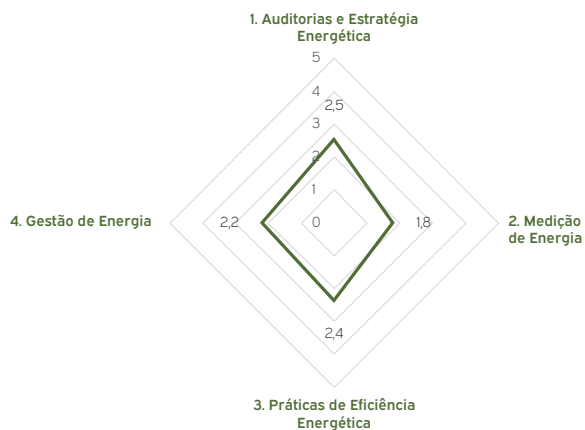


Figura 9 – Maturidade Energética



Figura 10 – Maturidade Organizacional

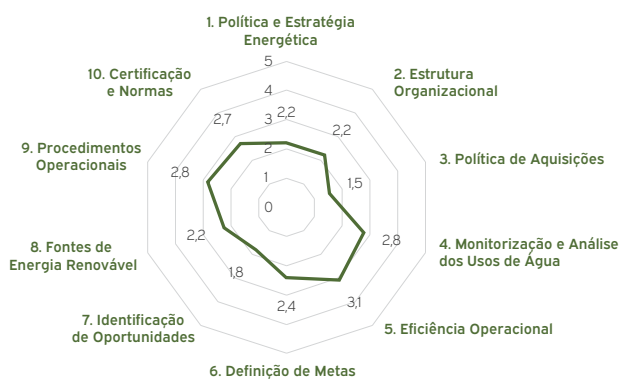


Figura 11 – Maturidade em Sustentabilidade

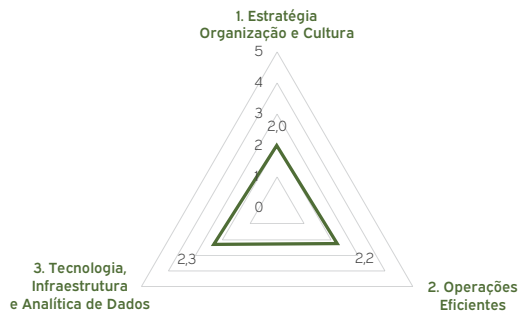


Figura 12 – Maturidade Digital

Maturidades	Prioridade de Atuação
Gestão de Energia	Medição de Energia e Gestão de Energia
Organizacional	Envolvimento de <i>Stakeholders</i> , Iniciativas e Inovação e Organização e Operações Sustentáveis
Sustentabilidade	Política de aquisições e Identificação de Oportunidades para a descarbonização
Digital	Estratégia, Organização e Cultura

Tabela 3 - Resultados da avaliação de maturidade - prioridades de atuação

3.4.2 Avaliações Energéticas

Numa análise detalhada ao setor de fundição foram realizadas avaliações energéticas a entidades do setor para caracterização do processo produtivo, desagregação de consumos de energia e identificação de oportunidades de eficiência energética e de descarbonização.

A amostra que integra instalações das subclasses CAE 24510, 24520 e 24540 é responsável por cerca de 30% dos consumos energéticos do grupo CAE 245 (29,7 ktep, segundo dados oficiais da DGEG).

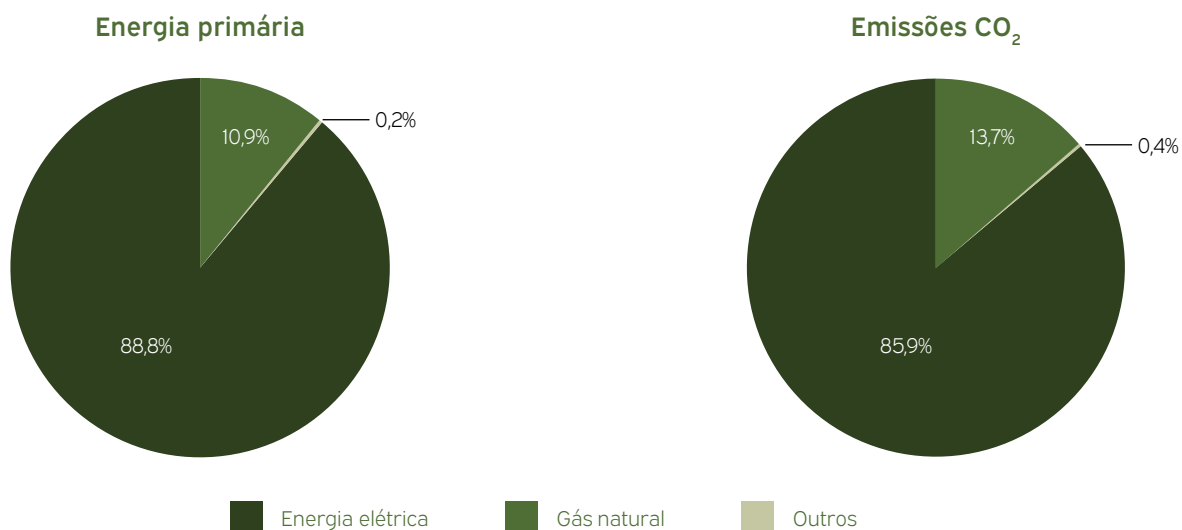


Figura 13 – Consumo de energia primária e emissões de CO₂ das instalações avaliadas



As fontes energéticas mais relevantes no setor de fundição são a eletricidade, gás natural, gasóleo e GPL, com preponderância da utilização da energia elétrica, representando mais de 60% do consumo energético total necessário para o processo de fundição (energia final). O restante percentual refere-se essencialmente a consumo de gás natural (mais de 30% em energia final) e outros produtos derivados do petróleo.

O processo produtivo e o ar comprimido juntos representam mais de 90% dos consumos globais de energia da amostra, pelo que a estratégia de descarbonização deverá concentrar esforços nestas áreas de consumo.

Desagregação de consumos

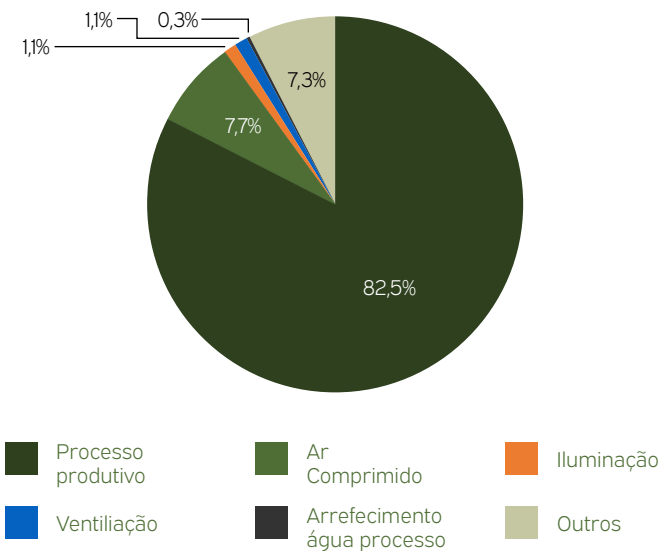


Figura 14 – Desagregação de consumos energéticos pelos principais setores

Desagregação do processo produtivo

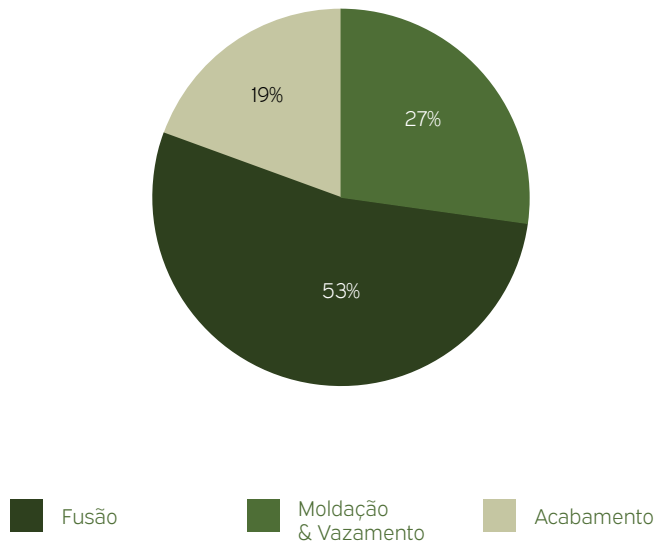


Figura 15 – Desagregação de consumos do processo produtivo

Para a amostra analisada o valor médio de consumo específico de energia é de 1,453 tep/t de produto, com valores mínimos e máximos de 0,400 e 3,345 tep/t, respetivamente. Em valor médio o processo produtivo industrial (não inclui o consumo dos sistemas auxiliares) apresenta um consumo específico de energia de 1,187tep/t.

Os dados de consumo de energia específico (por unidade produzida) são apresentados na Tabela 4. Estes dados referem-se ao processo de fundição como um todo, desde o processo de fusão, vazamento, moldação/desmoldação e tratamento final ou acabamentos, sendo por isso consumos globais do processo.

Tipo de metal	Consumo específico de energia (MWh/t metal líquido)	
	Best Available Techniques	Diagnóstico setorial
Ferro	2,5	2,1 - 2,4
Aço	5 - 8	4,4 - 4,9
Alumínio	4 - 10	6,4 - 10,3
Zinco	4 - 10	6,3 - 9,9

Tabela 4 - Consumo específico de energia do setor de fundição por tipo de metal

Na tabela seguinte apresentam-se os dados de consumo energético para diferentes tipos de fornos utilizados na etapa de fusão da indústria da fundição.

Tipo de forno	Tipo de metal	Consumo energético	
		kWh/kg de metal líquido	kWh/kg de metal à entrada
Forno de Arco Elétrico	Aço	0,345 ²⁷	-
Forno de Indução	Ferro	0,490-0,520 ¹⁶	0,520-0,800 ¹⁷
	Alumínio	0,540-0,600 ²⁸	-
Forno de Cúpula	Ferro	0,825-0,900 ¹⁶	0,810-1,100 ¹⁷
Forno a Gás	Alumínio	1,383 ¹⁶	-

Tabela 5 - Consumo energético dos diferentes tipo de fornos utilizados

O processo da fusão, apresenta consumos energéticos que variam entre 30% e 70% do total de energia necessária para todo o processo da fundição^{29, 30}. Esta variação depende do tipo de forno e do tipo de metal fundido, sendo que os valores apresentados correspondem a estimativas globais do processo. Os dados recolhidos no diagnóstico ao setor indicam que a etapa da fusão representa entre 40% e 60% do consumo energético total³¹, situando-se assim dentro dos valores normalmente observados.

Emissões de GEE (tCO₂e) por fonte de energia

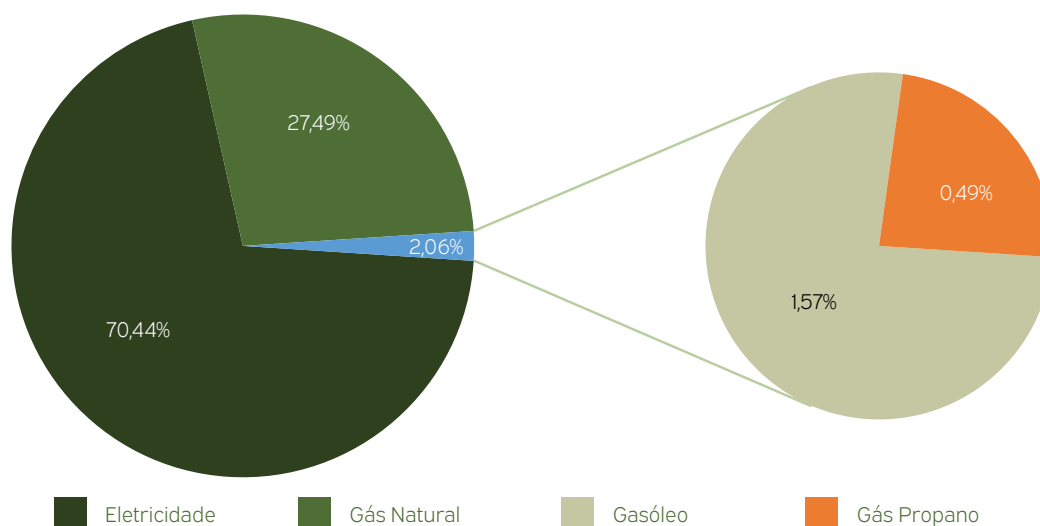


Figura 16 - Emissões de GEE por fonte de energia, em 2023 (diagnóstico setorial)

27. Leoni L., Cantini, A., De Carlo, F., Salvio, M., Martini, C., Toro, C., & Martini, F. (2021). Energy-Saving Technology Opportunities and Investments of the Italian Foundry Industry. *Energies*, 14(24), 8470. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14248470>

28. Comissão Europeia (2024). JRC. Final Draft of the Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Smitheries and Foundries Industry. Disponível em: <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/smitheries-and-foundries-industry>

29. Salonitis, K., Zeng, B., Mehrabi, H. A., & Jolly, M. (2016). *The challenges for energy efficient casting processes*. Elsevier, 24-29.

30. Leoni L., Cantini, A., De Carlo, F., Salvio, M., Martini, C., Toro, C., & Martini, F. (2021). Energy-Saving Technology Opportunities and Investments of the Italian Foundry Industry. *Energies*, 14(24), 8470. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14248470>

31. Os valores observados nas fundições em estudo foram de 40%, 53%, 54%, 56% e 60%.

Do diagnóstico setorial estima-se que o universo das empresas seja responsável pela emissão de cerca de 19 mil tCO₂e em 2023 (cerca de 30% das emissões globais do CAE 245), resultante da produção de cerca de 45 kton de metais ferrosos e não ferrosos. O consumo de energia elétrica foi responsável por cerca de 71% do total de emissões e o gás natural foi responsável por 27% do total de emissões.

Tipo de metal	kg CO ₂ e/kg metal produzido
Aço	0,23 – 0,28
Alumínio	0,05 – 1,42
Ferro	0,02 – 0,06
Zinco	0,74 – 1,11

Tabela 6 - Emissões de CO₂ por metal produzido (diagnóstico setorial)

A análise destes dados permite verificar que os metais não ferrosos são aqueles que têm maior fator de emissão, o que era expectável, uma vez que também são os metais que requerem maior necessidade energética para a sua fundição. Por outro lado, os metais ferrosos apresentam valores menos elevados, sendo que o ferro por apresentar necessidades energéticas inferiores, também é o metal com menores emissões de GEE. Refira-se que na avaliação energética de empresas do setor o consumo específico de energia de empresas de metais ferrosos foi de 0,455 tep/t, enquanto para metais não ferrosos foi de 2,450 tep/t.

Da avaliação energética efetuada identificaram-se oportunidades de redução do consumo de energia de implementação imediata, com impacto na redução do consumo de energia estimada em 8%.

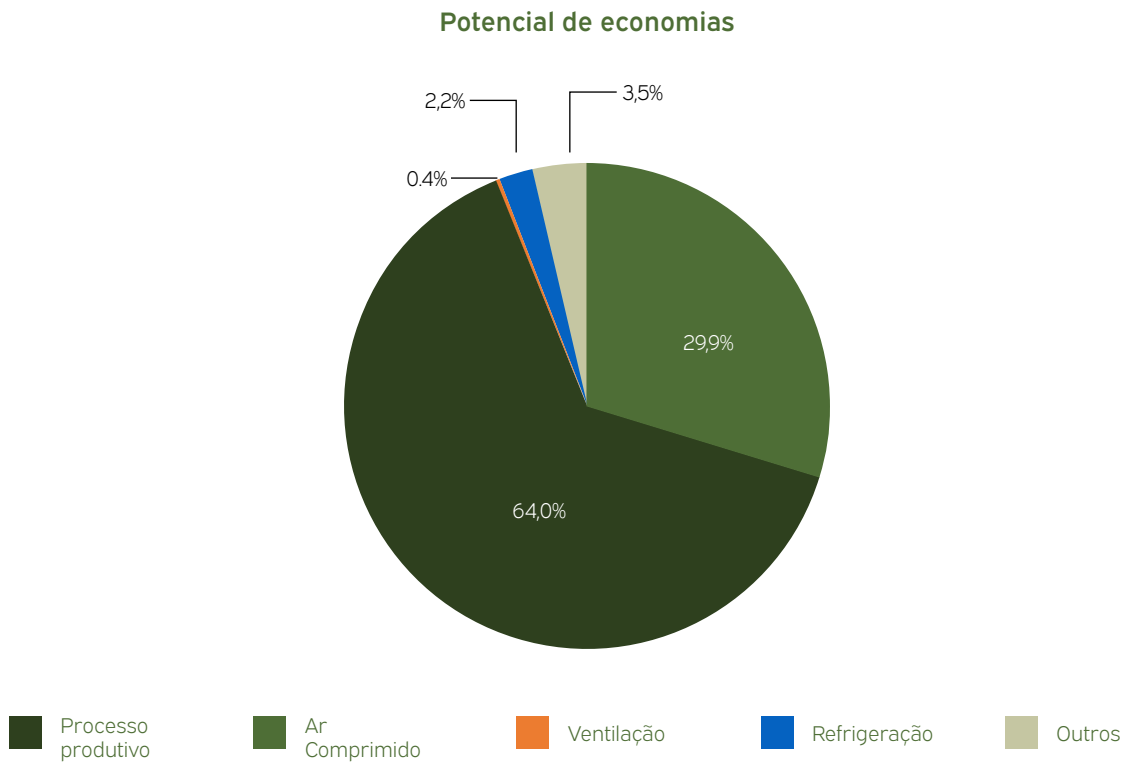


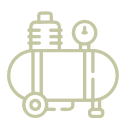
Figura 17 – Potencial de economias por setor de consumo

Entre as medidas identificadas destacam-se:



Processo produtivo

- Pré-aquecimento da matéria-prima e retornos
- Melhoria do processo de aquecimento de colheres de vazamento
- Isolamento de equipamentos e tubagens
- Recuperação de calor para pré-aquecimento do ar de combustão ou outras aplicações
- Substituição dos queimadores existentes por queimador de alta eficiência
- Ajuste dos queimadores existentes
- Otimização do sistema de recuperação de areias
- Otimização de sistemas de força motriz (motores eficientes e variação eletrónica de velocidade)
- Substituição de equipamentos de processo ineficientes
- Substituição dos fornos a gás natural por alternativa elétrica
- Gestão otimizada dos sistemas em função de variáveis relevantes (humidade, temperatura entre outros)
- Eletrificação de estufas (substituição do gás natural)



Ar comprimido

- Melhoria da gestão e controlo de centrais
- Substituição de compressores
- Redução da temperatura de centrais
- Correção de fugas de ar comprimido
- Melhoria do processo de secagem do ar comprimido
- Recuperação térmica em compressores
- Otimização da rede de ar comprimido (passagem de rede radial a rede em anel)
- Levantamento da rede de ar comprimido (produção, distribuição, consumidores)
- Seccionamento de linhas
- Compressores dedicados (ou *blowers*) em sistemas de moldação



Água refrigerada para processo

- Substituição de torres de arrefecimento
- Otimização do processo de gestão das torres de arrefecimento
- Substituição de motores e bombas por equipamentos mais eficientes
- Separação de circuitos de arrefecimento em função das necessidades do processo



Sistemas de ventilação

- Substituição de motores e ventiladores por equipamentos mais eficientes
- Controlo eficiente dos sistemas por variação eletrónica de velocidade



Outros sistemas

- Instalação ou expansão de sistemas de produção fotovoltaica para autoconsumo
- Otimização do sistema de aquecimento de águas sanitárias (bomba de calor)
- Otimização de sistemas de monitorização de consumos e digitalização de sistemas
- Compensação de energia reativa
- Gestão de frota

O setor caracteriza-se por uma elevada heterogeneidade ao nível do processo produtivo (fusão, moldação e acabamentos) que condicionam o desempenho energético. Identificam-se como principais estratégias de descarbonização de implementação imediata a redução do consumo energético pela maior eficiência no desempenho dos equipamentos e sistemas, o aumento da penetração de energias renováveis para autoconsumo e a eletrificação gradual dos sistemas, visando a redução dos combustíveis gasosos.

As empresas do setor de fundição irão ser impactadas fortemente pela regulação referente a práticas de sustentabilidade, independentemente do seu tamanho, por integram na sua grande maioria cadeias de valor de produtos (com destaque para o setor da construção e automóvel) que se encontram comprometidas com elevados padrões e de exigência ao nível dos critérios ESG (*Environmental, Social and Governance*).

4.

Vetores de Descarbonização



4.1 Eficiência Energética

A eficiência energética é o ponto de partida da descarbonização do Setor de Fundição. Antes da substituição de combustíveis ou da eletrificação, a otimização do consumo energético permite reduções imediatas de 10–25% nas emissões e nos custos operacionais. As ações de eficiência abrangem todo o ciclo produtivo, desde a preparação das cargas até ao acabamento e às utilidades. Entre as principais ações destacam-se:



1. Fornos e Processos de Fusão

A tabela seguinte identifica algumas medidas de eficiência que podem contribuir de forma significativa para reduzir os elevados consumos energéticos que ocorrem especificamente na etapa da fusão³².

Medida de Eficiência	Vantagens
Pré-aquecimento do metal de entrada	Remove humidade e matéria orgânica, previne o acontecimento de explosões no forno, aumenta a capacidade de fusão do forno, diminui a necessidade de energia neste processo;
Reduzir a frequência de metal de entrada	Reduz a quantidade de metal perdido e a radiação perdida entre os carregamentos;
Utilização de matéria-prima de boa qualidade	Apesar dos custos iniciais poderem aumentar, a longo prazo, reduz as perdas de metal devido à oxidação. Não só nesta etapa do processo, mas também nas etapas subsequentes.
Fornecer formação especializada ao operador dos fornos.	Estudos indicam que a boa utilização dos fornos por parte dos operadores pode conduzir a uma redução do consumo energético em 10%.

Tabela 7 - Identificação das principais medidas de eficiência energética que podem ser aplicadas na etapa da fusão, adaptado¹⁹

Existem ainda outros fatores que podem resultar no elevado consumo energético verificados neste tipo de indústria, tais como:

- Perdas de calor: este fenómeno pode verificar-se durante a fusão e vazamento do metal líquido nos moldes, mas também devido ao fraco isolamento dos equipamentos utilizados e à ineficiência na recuperação e reutilização do calor gerado;
- Gestão e manutenção ineficiente dos equipamentos: provocado pela utilização de tecnologias obsoletas com falta de manutenção preventiva e baixa eficiência dos equipamentos;
- Melhoria do rendimento térmico dos fornos por otimização da geometria, refratários de alto desempenho e isolamento eficiente.
- Recuperação de calor residual nos gases de escape para pré-aquecimento de cargas, moldes ou ar de combustão (economizadores e permutadores de calor).
- Otimização da taxa de enchimento e gestão de cargas – fusões mais curtas e equilibradas reduzem perdas térmicas e emissões específicas.
- Monitorização contínua do fator de carga e rendimento energético dos fornos (kWh/t fundidos).
- Conversão para fornos de alta eficiência ou híbridos, compatíveis com eletrificação progressiva.

32. Zeng, B. (2013). Validation of Energy Saving Novel Single Shot Melting Process for Foundry Industry.



2. Sistemas de Ar Comprimido

- Eliminação de fugas e sobredimensionamentos, com programas regulares de deteção ultrassónica e manutenção preventiva.
- Controlo por variação eletrónica de velocidade (VSD) e gestão inteligente da pressão de rede.
- Recuperação de calor dos compressores para aquecimento de água de processo ou climatização.
- Seccionamento e automação da distribuição para evitar consumos em vazio.
- Substituição de compressores antigos por modelos com motores de alto rendimento IE4-IE5.



3. Ventilação, Extração e Climatização Industrial

- Instalação de ventiladores e exaustores com velocidade variável, ajustados à necessidade real do processo.
- Redimensionamento de condutas e sistemas de extração, reduzindo perdas de carga.
- Recuperação de calor do ar extraído para pré-aquecimento de ar ambiente ou de combustão.
- Controlo automático da ventilação em função da temperatura e qualidade do ar (CO₂, partículas, COV).



4. Bombas, Circuitos de Água e Refrigeração

- Otimização hidráulica de circuitos (válvulas, permutadores, bombas de caudal variável).
- Instalação de bombas de calor industriais para substituição de caldeiras a gás e aproveitamento de calor de processo.
- Monitorização de temperatura e caudal para evitar sobre consumos energéticos.



5. Tratamentos Térmicos e Acabamentos

- Modernização de fornos de recozimento e manutenção com isolamento reforçado e controlo digital de temperatura.
- Recuperação de calor e reaproveitamento do ar quente de exaustão.
- Automatização do ciclo térmico, reduzindo tempos mortos e sobreaquecimentos.
- Incorporação de fornos elétricos de resistência ou indução de elevada eficiência (sinergia com eletrificação).



6. Sistemas de Gestão e Monitorização Energética

- Implementação de Sistemas de Gestão de Energia (SGE) segundo a norma ISO 50001, com objetivos e KPIs por processo.
- Medição por centro de custo/consumo (fornos, ar comprimido, ventilação, outros relevantes).
- Plataformas digitais (EMS/SCADA) com *dashboards* de consumo em tempo real e alarmes de desvios.
- Análise periódica de desempenho energético e planos de ação com base em auditorias regulares.
- Planeamento energético anual, com metas de intensidade energética (kWh/t e GJ/t) e revisão periódica de progresso.



7. Logística Interna e Operações

- Otimização de fluxos de transporte interno e movimentação de cargas (minimização de distâncias e tempo de forno aberto).
- Uso eficiente de empilhadores elétricos e equipamentos de movimentação com carregamento inteligente.
- Planeamento térmico e operacional, reduzindo tempos de espera entre fusão e vazamento.
- Capacitação de operadores – formação em condução eficiente de fornos e equipamentos auxiliares.

As práticas de eficiência energética na fundição apresentam elevada maturidade e aplicabilidade, devendo ser adotadas no curto-prazo, apresentando geralmente retorno económico atrativo. A principal limitação reside na integração otimizada entre diferentes processos, no custo inicial dos investimentos (CAPEX) e na necessidade de sistemas de monitorização digital avançados para garantir ganhos sustentados.



4.2 Vetores Energéticos

4.2.1 Eletrificação

A eletrificação dos processos térmicos constitui um dos pilares centrais da descarbonização da fundição, ao permitir a eliminação progressiva das emissões diretas de combustão e a integração de energia proveniente de fontes renováveis no processo produtivo. A eletrificação deve ser entendida como um processo gradual e integrado, que combina tecnologia, gestão energética e infraestrutura. Entre as principais medidas de eletrificação destacam-se:

1. Fusão e Reaquecimento de Metal

- Substituição de fornos a gás natural por fornos elétricos de indução ou resistência.
- Conversão de fornos de cadinho e soleira para modelos híbridos (elétrico + gás/H₂), possibilitando transição faseada.
- Modernização dos sistemas elétricos de controlo e dos circuitos de refrigeração, integrando sensores térmicos e controlo digital para otimização do ciclo de fusão.

2. Pré-aquecimento de Moldes, Colheres e Cargas

- Conversão de queimadores a gás para resistências elétricas ou sistemas de indução.
- Aplicação de aquecimento por placas cerâmicas ou resistivas em moldes e machos, permitindo uniformidade térmica e eliminação de gases de combustão.
- Pré-aquecimento elétrico de cargas metálicas e sucata, reduzindo o consumo energético do forno principal e otimizando a fusão subsequente.

3. Tratamento Térmico e Acabamento

- Substituição de fornos de recozimento e têmpera a gás por fornos elétricos (resistência ou indução).
- Integração de armazenamento térmico elétrico para compensar picos de carga e melhorar a estabilidade da rede interna.
- Bombas de calor industriais (até 100°C) para substituição de caldeiras (água quente de processo).

4. Integração de Energia Renovável e Gestão Elétrica

- Autoconsumo fotovoltaico e contratos de PPA renováveis para garantir fornecimento de eletricidade de baixo carbono.
- Armazenamento de energia (baterias) e gestão inteligente da procura (*Demand Response*), melhorando a flexibilidade e a resiliência energética.

Os principais desafios tecnológicos residem na capacidade da rede local de energia, nos custos da eletricidade, na integração de fontes renováveis *on-site* e no elevado investimento em novos equipamentos de fusão. A eletrificação progressiva dos processos afigura-se como uma das medidas mais eficientes para promover a descarbonização do setor no curto e médio prazo, permitindo reduções até 80% das emissões diretas associadas à fusão e um aumento significativo do rendimento energético global.

Para garantir a sua viabilidade técnica e económica, torna-se essencial o reforço das subestações e postos de transformação, assegurando a capacidade elétrica necessária à nova carga e a qualidade de energia — incluindo o controlo de harmónicos, o fator de potência e a segurança das instalações. Adicionalmente, devem ser realizados estudos de planeamento da rede interna e análises de cenários de carga e tarifários dinâmicos, de forma a avaliar a viabilidade económica da eletrificação parcial ou total e otimizar o perfil de consumo elétrico em função da disponibilidade de energia renovável.

A captura de metas intermédias setoriais com indicadores de desempenho (MWh/t, capacidade de fusão elétrica instalada, % de fornos elétricos ou intensidade carbónica por tonelada de fundido, % energia via PPA/autoconsumo, OEE de fornos) permitirá avaliar o progresso real do setor nacional nos objetivos de descarbonização.

4.2.2 Combustíveis Renováveis

Enquanto a eletrificação não é tecnicamente ou economicamente viável em todos os processos – sobretudo nos fornos de chama direta e em determinadas operações de pré-aquecimento –, a substituição parcial dos combustíveis fósseis por alternativas renováveis representa uma etapa crucial na descarbonização do Setor de Fundição.

Este vetor constitui um dos eixos estratégicos de médio prazo identificados nos roteiros do Reino Unido e da Alemanha, que preveem uma transição faseada do gás natural para hidrogénio verde, biometano e combustíveis sintéticos.

Hidrogénio Verde (H₂)

O hidrogénio verde, produzido por eletrólise da água com eletricidade renovável, é uma das soluções com maior potencial de descarbonização para fornos de alta temperatura. As suas principais aplicações e desafios incluem:

- Substituição progressiva do gás natural em fornos de chama direta, pré-aquecimento e tratamento térmico.
- Ensaio piloto com misturas GN/H₂ (*blends*) até 20%, permitindo a redução gradual de emissões em sistemas existentes sem substituição imediata de equipamentos.
- Utilização de 100% H₂ em fornos dedicados a médio prazo (TRL 6–8), mediante adaptação de queimadores, refratários e sistemas de controlo de combustão (o hidrogénio é considerado uma solução prioritária após 2035, com fase piloto e de demonstração entre 2025–2030).

Desafios principais: custo elevado do hidrogénio verde, limitação de disponibilidade, densidade energética inferior e necessidade de adaptação das infraestruturas.



Biometano

O biometano constitui uma alternativa imediata e compatível com as infraestruturas de gás natural existentes.

- Permite reduções diretas de emissões até 80% face ao gás natural fóssil.
- Aplicável em fornos de cadinho, sistemas de aquecimento de ar e utilidades térmicas.
- Possibilita uma substituição parcial ou total sem alterações estruturais significativas nos equipamentos.
- Representa uma solução de curto e médio prazo, enquanto se desenvolve a cadeia de valor do hidrogénio³³.

Combustíveis Sintéticos e Líquidos Renováveis (*e-fuels*)

Os *e-fuels* e outros biocombustíveis líquidos renováveis (como biodiesel ou óleos sintéticos derivados de resíduos) são opções de longo prazo para aplicações de chama direta e processos de difícil eletrificação.

- Elevada compatibilidade com sistemas térmicos existentes após ajustes menores.
- Podem ser aplicados em fornos de ligas ferrosas e não ferrosas com requisitos específicos de temperatura.

Desafios: custos de produção ainda elevados e disponibilidade limitada no mercado europeu.

São particularmente relevantes em cenários de neutralidade carbónica 2040–2050, complementando o hidrogénio e o biometano.

Os combustíveis renováveis representam uma alternativa promissora para a descarbonização do setor de fundição. A utilização de biometano e alguns biocombustíveis líquidos em processos térmicos já é tecnicamente possível, mas ainda com aplicação limitada. Como desafios tecnológicos identificam-se o custo e disponibilidade dos combustíveis verdes, a adaptação dos fornos e queimadores para combustão de hidrogénio ou *blends* atendendo aos diferentes poderes caloríficos dos combustíveis. A necessidade de investimento em infraestrutura de armazenamento e distribuição de gases renováveis e a integração com redes locais de energia e planeamento elétrico para suportar processos híbridos constituem barreiras significativas deste tipo de solução, prevendo-se a sua viabilidade técnico-económica no médio-prazo.

Estes vetores energéticos representam um complemento fundamental à eletrificação, assegurando reduções adicionais de 10–20 % nas emissões diretas e reforçando a resiliência energética e tecnológica do setor de fundição nacional. A este nível o setor deverá desenvolver um *roadmap* tecnológico específico para o setor de fundição, articulado com a estratégia Nacional para o Hidrogénio (EN-H2), com a criação de projetos-piloto regionais com partilha de infraestrutura.

Note-se que, embora a energia nuclear não integre o mix nacional, é considerada em vários estados-membros como vetor de eletricidade de baixa intensidade carbónica, podendo influenciar indiretamente o perfil de emissões da eletricidade disponível no mercado europeu.

33. Estudos da Cast Metals Federation, identificam o biometano/biogás como o primeiro vetor de transição energética no setor de fundição, especialmente em instalações de pequena e média dimensão.

4.3 Economia Circular

A economia circular é particularmente relevante para o setor de fundição, dado o papel central da sucata metálica como matéria-prima e a possibilidade de valorização de subprodutos industriais.

As estratégias circulares contribuem diretamente para a redução das emissões de gases com efeito de estufa associadas à produção de metais primários, enquanto fortalecem a autonomia material e a resiliência económica das empresas.

Entre as principais áreas de atuação destacam-se:

Aumento da incorporação e qualidade da sucata

- Maximização da utilização de metais reciclados (ferrosos e não ferrosos), reduzindo o consumo energético e as emissões de processo associadas à produção de metal primário.
- Melhoria da qualidade e rastreabilidade da sucata, assegurando baixa contaminação química e estabilidade de composição.
- Integração de tecnologias de separação, triagem e análise química automatizadas, promovendo maior eficiência na fusão e qualidade do produto final.

Valorização de subprodutos e resíduos

- Reaproveitamento de escórias, areias de moldagem e poeiras metálicas em aplicações de construção civil, pavimentação e cimento, reduzindo a deposição em aterro.
- Desenvolvimento de soluções de valorização de subprodutos como matérias-primas secundárias, com base em parcerias entre fundições, universidades e centros tecnológicos.

Recuperação e regeneração de areias de moldação

- Regeneração térmica e mecânica das areias, permitindo a sua reutilização em múltiplos ciclos produtivos.
- Redução da necessidade de extração de areia virgem, com consequente diminuição do impacto ambiental e dos custos logísticos.
- Implementação de sistemas de controlo de finos e impurezas, garantindo a qualidade e compatibilidade das areias regeneradas com diferentes ligas metálicas.

Design para reciclagem e ecoeficiência de produto

- Desenvolvimento de ligas e componentes que facilitem o reaproveitamento no fim de vida.
- Colaboração com clientes dos setores automóvel e da construção para promover especificações de produto que incorporem maior percentagem de material reciclado.
- Avaliação de ciclo de vida (LCA) e análise de reciclabilidade como ferramentas de apoio ao desenvolvimento de produto.

Gestão eficiente de resíduos e consumíveis

- Separação, recolha e retorno de sucata interna para reintrodução imediata no ciclo de fusão.
- Gestão otimizada de consumíveis críticos (ligas, refratários, lubrificantes, machos e resinas), com foco em durabilidade e menor geração de resíduos perigosos.
- Implementação de planos de gestão de resíduos setoriais, integrados com os indicadores de desempenho ambiental definidos pelo BREF-SF.

A incorporação de sucata metálica e a valorização de subprodutos são práticas consolidadas no setor, com taxas crescentes de utilização, especialmente nas fundições de ligas ferrosas e de alumínio. Reforça-se a importância de uma colaboração estreita entre a indústria, fornecedores e recicladores, de modo a estruturar cadeias de valor circulares, promover plataformas de partilha de materiais secundários e incentivar o comércio de sucata de alta qualidade. A este nível urge a necessidade de caracterizar indicadores quantitativos de circularidade (% de sucata incorporada, toneladas de areias regeneradas/ano) e mecanismos de certificação de matérias-primas secundárias.

As tecnologias de separação e classificação de sucata encontram-se atualmente bem desenvolvidas e amplamente aplicadas no setor, permitindo elevados níveis de recuperação e eficiência material. Contudo, persistem desafios técnicos e logísticos que condicionam o pleno

aproveitamento do potencial circular da fundição. Entre os principais obstáculos destacam-se as contaminações e a variabilidade da composição química da sucata, que influenciam a qualidade das ligas produzidas; a falta de infraestruturas regionais dedicadas à regeneração e valorização de resíduos, em particular no caso das areias de moldação; e a ausência de incentivos económicos e normativos que estimulem de forma consistente a utilização de matérias-primas secundárias.

Apesar destas limitações, as medidas de incorporação de sucata e valorização de subprodutos são tecnicamente maduras, de fácil aplicação e viáveis no curto e médio prazo, representando uma via eficaz para reduzir emissões, custos de matérias-primas e dependência de recursos primários.



4.4 Compensação e Captura de CO₂

Mesmo com a eletrificação e a eficiência energética máximas, uma fração das emissões de gases com efeito de estufa permanecerá inevitável, sobretudo as emissões de processo, emissões indiretas do transporte e as associadas à produção de refratários e consumíveis. Neste contexto, as tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), bem como os mecanismos de compensação de emissões, assumem um papel complementar no caminho para a neutralidade carbónica da fundição. Entre as principais opções destacam-se:

Captura e Utilização de Carbono (CCU/CCUS)

- Captura de CO₂ nos gases de combustão, com posterior armazenamento geológico (CCS) ou valorização em produtos químicos, minerais e materiais de construção (CCU).
- Desenvolvimento de tecnologias de captura aplicadas a fornos e chaminés industriais de menor escala, com potencial de integração gradual em sistemas de fundição.
- Utilização do CO₂ capturado em processos internos, nomeadamente na carbonatação de escórias e subprodutos, convertendo resíduos em materiais de valor acrescentado.

Materiais de Adsorção e Membranas

- Investigação em materiais de adsorção sólidos e líquidos (ex.: aminas regeneráveis, zeólitos) para separação seletiva de CO₂ em gases de exaustão a baixa pressão.
- Aplicações futuras em pequenas instalações industriais, adequadas a fundições de pequena e média dimensão.
- Oportunidade de sinergia com processos de ventilação e depuração de ar existentes.

Projetos de Compensação e Sumidouros de Carbono

- *Biochar* e sumidouros artificiais (como solos enriquecidos ou tecnologias de mineralização) constituem mecanismos de compensação de emissões residuais.
- Projetos de compensação certificados, em linha com os padrões internacionais, podem incluir:
 - Florestação e reflorestação nacionais,
 - Projetos de carbono azul (restauração de ecossistemas marinhos),
 - Gestão sustentável de resíduos orgânicos e agrícolas.

A tecnologia de captura de CO₂ no setor de fundição é promissora a longo prazo, encontrando-se atualmente em fase de desenvolvimento tecnológico ou piloto em setores como o cimento e siderurgia. Identificam-se como desafios tecnológicos o elevado custo de implementação, a integração em processos de menor dimensão e em processos intermitentes típicos da fundição, ou a ausência de infraestrutura de transporte e armazenamento de CO₂.

As medidas de captura, utilização e compensação de CO₂ não substituem as ações prioritárias de eficiência energética, eletrificação e economia circular, mas funcionam como complemento indispensável para atingir emissões líquidas nulas até 2050.

A sua viabilidade técnica e económica dependerá do avanço das tecnologias de CCUS, do enquadramento regulatório europeu e da cooperação intersetorial, devendo o Setor de Fundição posicionar-se desde já para testar soluções piloto e integrar projetos colaborativos em clusters industriais regionais.

4.5 Digitalização de Processos

A digitalização de processos constitui um vetor transversal que apoia todos os restantes eixos de descarbonização – eficiência energética, economia circular, eletrificação e combustíveis renováveis. A transformação digital é reconhecida como uma condição crítica para aumentar a eficiência operacional, melhorar a rastreabilidade dos fluxos de energia e materiais e reduzir as emissões associadas ao processo produtivo.

Na indústria da fundição, caracterizada pelo elevado consumo energético, pela complexidade dos processos térmicos de fusão e moldação e pela necessidade

de monitorização rigorosa da qualidade e do desempenho ambiental, as soluções digitais permitem otimizar a operação, reduzir desperdícios e apoiar a tomada de decisão em tempo real.

Além disso, a digitalização viabiliza a integração de modelos de negócio circulares, facilitando o aumento da utilização de sucata metálica, a valorização de subprodutos e a transparência das cadeias de valor, em linha com os objetivos de neutralidade carbónica e economia sustentável. As principais áreas de atuação são:



Monitorização e Controlo Inteligente de Energia

- Implementação de sistemas SCADA, IoT industriais e sensores inteligentes, integrados com plataformas de gestão energética ISO 50001.
- Monitorização em tempo real de fornos, utilidades e circuitos de ar comprimido, permitindo detetar ineficiências energéticas e anomalias operacionais.
- Utilização de *dashboards* e alarmes automáticos para monitorizar desvios de consumo e garantir o cumprimento de metas energéticas e ambientais.
- Integração com sistemas de reporte de carbono, assegurando conformidade regulatória, rastreabilidade e transparência de emissões.



Automação e Otimização de Processos

- Controlo digital de fornos, ventilação e sistemas térmicos, ajustando automaticamente parâmetros de funcionamento (temperatura, caudal, tempo de fusão) para maximizar a eficiência.
- Modelos preditivos de fusão e arrefecimento, baseados em inteligência artificial e *machine learning*, que permitem reduzir o tempo de forno aberto e minimizar perdas térmicas.
- Desenvolvimento de gémeos digitais (*digital twins*) dos processos de fusão e moldação, para simular cenários de eficiência energética e estratégias de descarbonização, antes da sua implementação real.
- Planeamento de produção otimizado com base em dados energéticos e de desempenho, permitindo alocar recursos de forma eficiente e reduzir paragens não programadas.



Análise de Dados e Inteligência Artificial

- Utilização de algoritmos de IA e análise avançada de dados para o diagnóstico de perdas energéticas, previsão de falhas e otimização de desempenho.
- Aplicação de ferramentas de manutenção preditiva, reduzindo o risco de falhas críticas e aumentando a disponibilidade dos equipamentos.
- Consolidação de plataformas digitais integradas que centralizam dados energéticos, ambientais e produtivos, criando uma base robusta para auditorias e certificações de carbono.



Formação e Cultura Digital

- Capacitação de operadores, técnicos e gestores energéticos para a utilização de ferramentas digitais, leitura de dados e interpretação de indicadores energéticos.
- Promoção de uma cultura de inovação e melhoria contínua, com envolvimento dos colaboradores na identificação de oportunidades de eficiência.
- Utilização de ferramentas de apoio à decisão e simuladores de operação para melhorar o desempenho e a segurança dos processos.

A digitalização contribui diretamente para melhorar o controlo operacional, reduzir perdas e aumentar a competitividade do setor, sendo amplamente reconhecida como um acelerador da transição energética e da descarbonização industrial. A digitalização é essencial para atingir metas intermédias até 2030 e assegurar a integração inteligente entre energia, materiais e dados.

A digitalização apresenta já elevada maturidade tecnológica e custos de implementação cada vez mais acessíveis, constituindo um pilar aplicável no curto e médio prazo, funcionando também como acelerador dos restantes eixos de descarbonização. O setor deverá adotar uma estratégia nacional de maturidade digital setorial, com a definição de metas na adoção de sistemas na transformação digital (% de instalações).



5.

Trajetórias de Descarbonização



Com base nos vetores de descarbonização previamente identificados para o setor de fundição, foram desenvolvidos cenários de descarbonização até 2050. A análise destes cenários foi realizada em comparação com os cenários de referência, que estimam a evolução de emissões de GEE nos casos em que o setor tem um nível de ambição muito reduzido. Os cenários de descarbonização diferem também entre si em função do nível de ambição do setor, que se traduz no número de medidas contempladas em cada cenário e, conseqüentemente num impacto crescente na redução de GEE no setor. Importa salientar que os cenários são cumulativos, isto é, quanto maior o número de vetores integrados, maior será o potencial de redução das emissões de GEE.

A construção dos cenários de referência baseia-se nos dados oficiais de emissões de Âmbito 1 e 2 do setor de fundição, apresentados anteriormente. Neste exercício, não foram consideradas as emissões de Âmbito 3 por não ter sido possível obter a informação necessária para proceder ao cálculo e porque comporta maior complexidade metodológica. Isto constitui uma limitação ao trabalho desenvolvido, uma vez que a modelação não pode contemplar a totalidade das atividades associadas ao setor.

5.1 Cenários de Referência

No âmbito da modelação dos cenários de descarbonização para o setor, foram considerados dois cenários de referência. Tipicamente, os cenários de referência servem como base para a comparação de todos os cenários e consideram que os padrões do presente se mantêm inalterados no futuro, sendo normalmente apelidados de “business-as-usual” (BAU)³⁴. Por conseguinte, o *business-as-usual* pressupõe apenas as políticas e medidas atualmente em vigor com impacte nas emissões de GEE, não considerando políticas de descarbonização adicionais. O cenário de referência RNC2050 pressupõe que o setor cumpre as metas nacionais em matéria de descarbonização até 2050.

a) **Cenário *Business-as-usual* (BAU)**: em que o setor mantém os perfis atuais, não convergindo com as metas nacionais em matéria de descarbonização, sendo apenas afetado por fatores exógenos, como é exemplo a diminuição da intensidade carbónica da rede elétrica;

b) **Cenário RNC2050**: em que o setor converge com os objetivos de neutralidade carbónica estabelecidos nas políticas de descarbonização nacionais, alterando o seu perfil tecnológico, energético e de emissões de forma a cumprir as metas.

Para caracterizar cada um destes cenários de referência foram definidas variáveis para os vários perfis do setor de fundição:

Perfil económico - Avalia a evolução da economia portuguesa e o impacto na fundição, considerando o PIB e o VAB do setor e produção de fundidos. Mantém-se igual nos dois cenários de referência.

Perfil energético e de emissões - Analisa o consumo energético médio anual, a repartição por vetores energéticos e o perfil da rede elétrica. As emissões de GEE resultam destes consumos, com base nos fatores de emissão do *National Inventory Report* (NIR)³⁵.

Perfil tecnológico - Relaciona-se com o uso de tecnologias no setor. No primeiro cenário mantém-se estável (apenas manutenção), enquanto no segundo há alterações tecnológicas que aumentam a eficiência energética.

Perfil de políticas públicas - Inclui apenas as medidas nacionais e setoriais em vigor até 2024. No primeiro cenário o setor beneficia apenas indiretamente destas políticas, enquanto no segundo, vai ao encontro das metas estabelecidas.

As variáveis descritas anteriormente são modeladas no cálculo dos cenários de referência para o setor em períodos de cinco anos: 2025, 2030, 2035, 2040, 2045 e 2050, sendo o ano de referência 2023, cujos valores se assumem para 2025.

34. PLANAPP. (2025). Glossário - Cenário de Referência. Obtido de Referência. <https://planapp.gov.pt/glossario/cenario-referencia-glossario-prospetiva>

35. APA. (2024). National Inventory Report.

Metas e Previsões do RNC2050

Na parametrização dos cenários de referência utilizou-se como base a cenarização macroeconómica constante no PNEC 2030 e no RNC2050³⁶. Os parâmetros utilizados na modelação são:

- Taxa de variação média anual do PIB;
- Intensidade Carbónica da eletricidade produzida em Portugal (cenário pelotão);
- Evolução do consumo de energia final na indústria em Portugal (cenário pelotão);
- Intensidade energética da Indústria.

No cenário BAU foi admitido um aumento linear do consumo de energia final, seguindo a tendência do aumento da produção de fundidos. No cenário RNC2050, na ausência de metas específicas para o setor de fundição, a projeção de diminuição da intensidade energética da indústria foi aplicada à indústria de fundição, permitindo estimar as metas de consumo energético total do setor até 2050.

5.1.1 Cenário BAU

O cenário BAU constitui o primeiro cenário de referência definido para a modelação da trajetória do setor de fundição em Portugal até 2050. Este cenário assume a manutenção das tecnologias atuais, sem a implementação de medidas específicas de descarbonização no setor. Pressupõe que o setor de fundição não irá promover esforços no sentido da redução das suas emissões de GEE, nem registará avanços significativos na adoção de tecnologias mais eficientes ou menos intensivas em carbono. Contudo, o setor beneficiará indiretamente da descarbonização progressiva da rede elétrica nacional - um progresso externo ao seu controlo - refletindo-se numa redução das emissões associadas ao consumo de eletricidade.

Este cenário permite compreender as consequências da inação no processo de descarbonização, servindo como linha de base para comparar os cenários de descarbonização para o setor de fundição em Portugal.

A Tabela 8 apresenta os pressupostos considerados na modelação do cenário BAU para os quatro parâmetros mais relevantes na análise.

Parâmetro	Pressupostos
Produção	Assume-se que o valor da produção em 2025 se mantém inalterado face ao ano base de 2023. A partir desse ano, considera-se que a produção de fundidos (ferrosos e não ferrosos) cresce anualmente a uma taxa equivalente à do PIB.
Energia	Assume-se que o consumo de energia em 2025 se mantém inalterado face ao valor do ano base de 2023. A partir de 2025, considera-se que o consumo energético cresce anualmente a uma taxa equivalente à do PIB.
Emissões	Assume-se o perfil energético atual, que evolui à taxa de crescimento do PIB. <ul style="list-style-type: none"> ● Eletricidade: as emissões reduzem-se adicionalmente devido à descarbonização da rede elétrica nacional (RNC2050); ● Restantes vetores energéticos: crescem em linha com o PIB, sem reduções específicas.
VAB	Assume-se que o VAB em 2025 se mantém igual ao valor registado em 2023. A partir desse ano, considera-se que o VAB cresce anualmente a uma taxa equivalente à do PIB.

Tabela 8 - Pressupostos assumidos para a modelação do cenário BAU

36. República Portuguesa. (2019). Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050. Obtido de https://unfccc.int/sites/default/files/resource/RNC2050_PT-22-09-2019.pdf

Os gráficos apresentados na Figura 18 apresentam a projeção de evolução dos parâmetros ao longo do período em análise. É possível observar a trajetória prevista para a produção de fundidos, o consumo energético e as emissões de GEE do setor de fundição em Portugal entre 2025 e 2050.

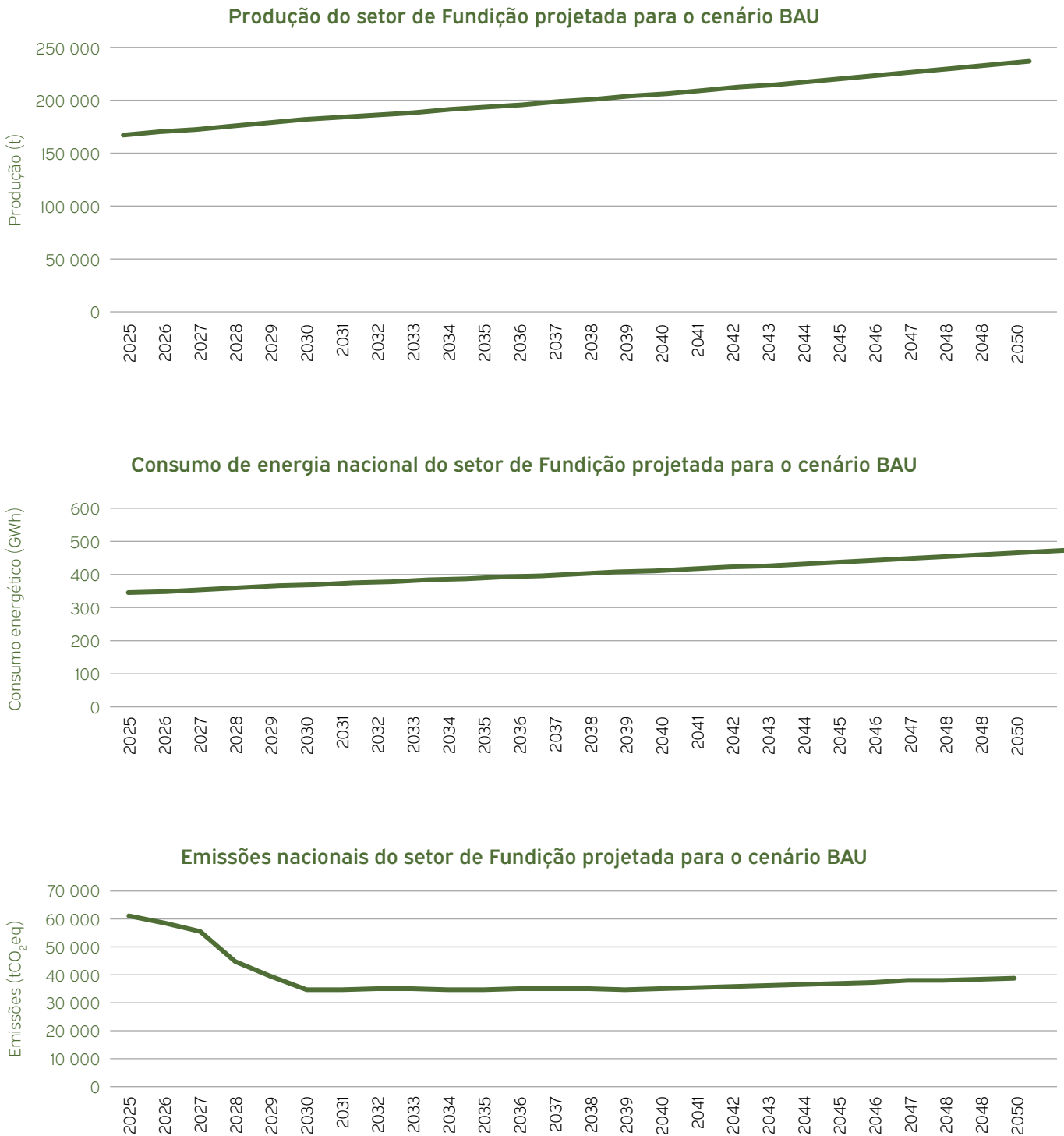


Figura 18 – Evolução da produção, consumo de energia e emissões do setor de fundição em Portugal projetados de acordo com o cenário BAU até 2050

Destaca-se o gráfico relativo às emissões de GEE, que evidencia uma redução estimada em cerca de 20 mil toneladas de CO₂eq. Esta diminuição está associada à progressiva descarbonização da rede elétrica nacional, que prevê uma crescente incorporação de fontes de energia renovável. Como resultado, as emissões associadas ao consumo de eletricidade pela indústria da fundição tendem a decrescer ao longo do tempo.

5.1.2 Cenário RNC2050

O cenário RNC2050 constitui o segundo cenário de referência definido no âmbito deste projeto, em que se observa um alinhamento do setor de fundição com os compromissos assumidos a nível nacional no âmbito

to da neutralidade carbónica. Este cenário pressupõe que o setor adotará progressivamente um conjunto de medidas tecnológicas que permitam atingir as metas estabelecidas no RNC2050 para a indústria, reduzindo a intensidade energética e carbónica. Face à inexistência de metas específicas para o setor, e à inadequação das metas definidas para a indústria do ferro e do aço ao contexto da fundição, optou-se por adotar as metas globais da indústria, procedendo posteriormente a uma interpretação crítica dos resultados da modelação. Sempre que necessário, estas metas foram adaptadas para assegurar a sua adequação ao contexto específico do setor de fundição em Portugal.

A Tabela 9 apresenta os pressupostos considerados para o cenário RNC2050.

Parâmetro	Pressupostos
Produção	Assume-se que o valor da produção em 2025 se mantém inalterado face ao ano base de 2023. A partir desse ano, considera-se que a produção de fundidos (ferrosos e não ferrosos) cresce anualmente a uma taxa equivalente à do PIB.
Energia	Assume-se que o consumo de energia em 2025 se mantém inalterado face ao valor do ano base de 2023. A partir desse ano, cresce anualmente a uma taxa equivalente à do PIB mas são aplicadas as metas de redução da intensidade energética do RNC2050.
Emissões	Assume-se a representatividade de cada vetor energético projetada no RNC2050 para o consumo final de energia na indústria.
VAB	Assume-se que o VAB em 2025 se mantém igual ao valor registado em 2023, após esse período cresce a uma taxa equivalente à do PIB.

Tabela 9 - Pressupostos assumidos para a modelação do cenário RNC2050

A trajetória modelada para cada um dos parâmetros analisados - produção de fundidos, consumo de energia, emissões de CO₂eq - encontra-se representada nos gráficos da Figura 19.

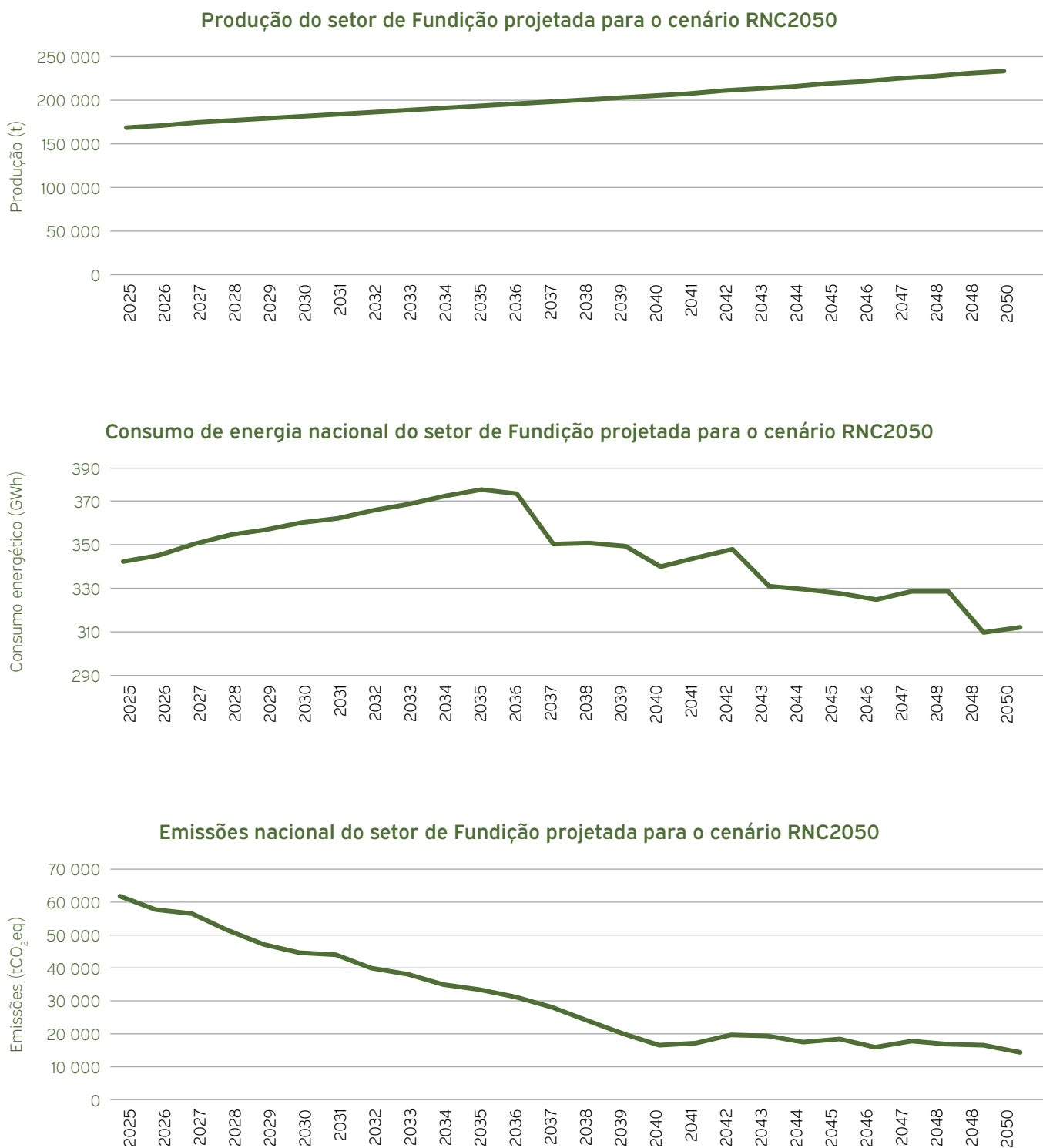
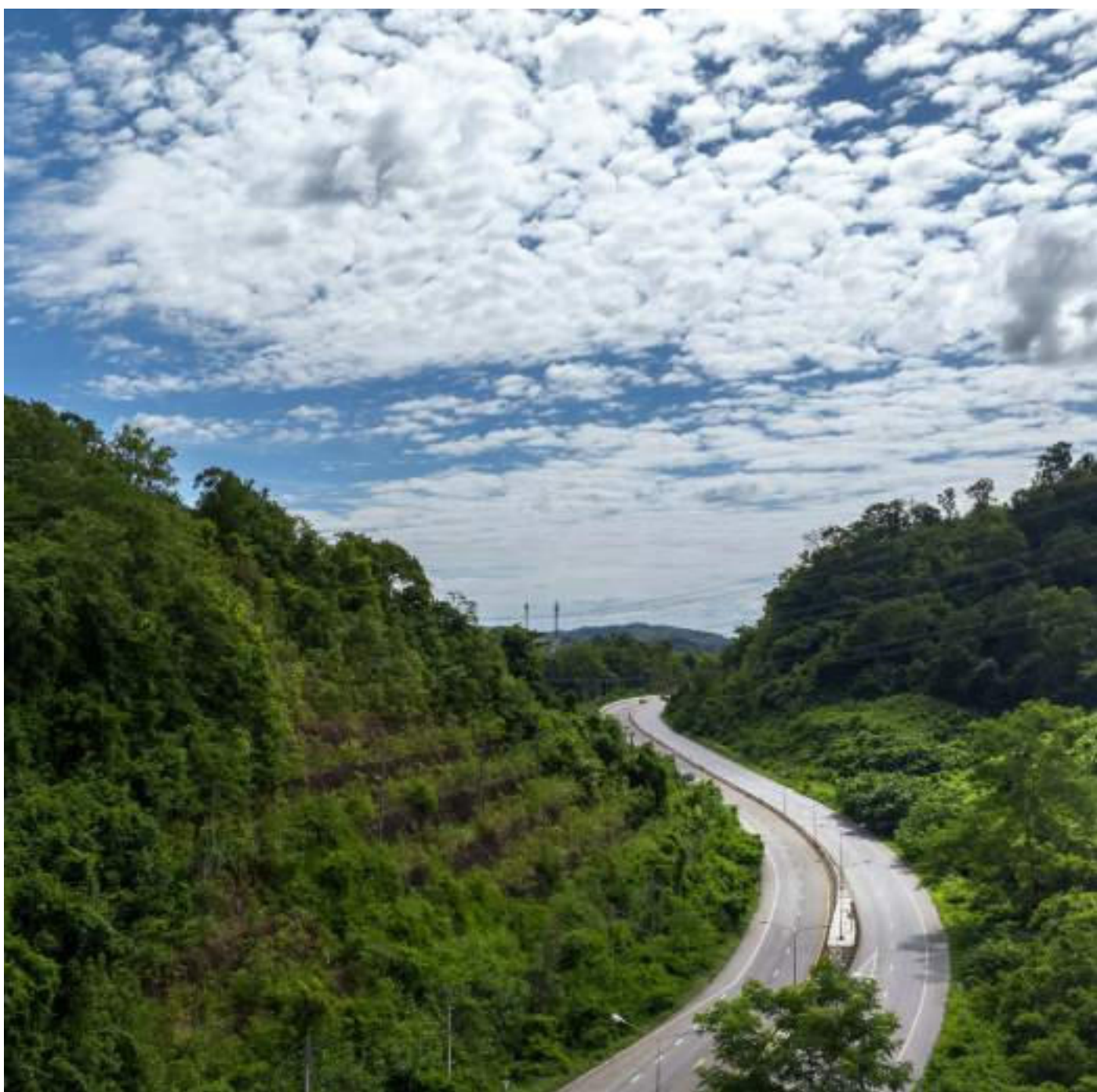


Figura 19 – Evolução da produção, consumo de energia e emissões do setor de fundição em Portugal projetados de acordo com o cenário RNC2050

Verifica-se uma redução no consumo de energia ao longo do período analisado, em linha com os objetivos definidos no RNC2050 no que respeita à diminuição da intensidade energética da indústria. Esta tendência reflete um setor em transição, mais eficiente e resiliente, adotando medidas de eficiência energética e de modernização tecnológica. Entre essas medidas poderão destacar-se a substituição gradual de equipamentos obsoletos por soluções mais eficientes, a digitalização

e automação dos processos produtivos, a melhoria da gestão energética e a integração de fontes de energia com menor intensidade carbónica, tais como eletricidade proveniente de fontes renováveis.

No que respeita às emissões também se observa uma trajetória de redução progressiva. Contudo, esta permanece distante do objetivo da neutralidade carbónica até 2050.



5.2 Eixos e Medidas de Descarbonização

Atingir a neutralidade carbónica no setor de fundição exige uma abordagem integrada e planeada, que combine as diversas estratégias e tecnologias disponíveis atualmente, ainda que com graus de maturidade diferentes. A incerteza associada à futura maturidade de algumas das tecnologias, bem como aos seus custos de investimento e operação podem vir a expandir ou limitar a sua futura aplicação no setor.

Com base nos vetores de descarbonização já apresentados, foram identificadas as respetivas medidas para descarbonizar o setor de fundição em três eixos estratégicos, que são apresentadas na Tabela 10, e que constituem a base para a modelação dos cenários de descarbonização.

Eixo	Medida
Eficiência energética	Implementação de medidas para a eficiência energética (melhoria da eficiência dos fornos, recuperação de calor, digitalização)
Vetores energéticos	Eletrificação dos processos industriais
	Autoconsumo a partir de fontes de energia renovável
	Integração do hidrogénio como combustível alternativo
	Eletrificação da frota
Compensação e captura de carbono	Integração de soluções de captura e armazenamento de carbono (CCS/CCUS)
	Compensação de emissões

Tabela 10 - Eixos estratégicos e medidas de descarbonização que sustentam a construção dos cenários de descarbonização do setor de fundição em Portugal até 2050

A **eficiência energética** assume-se como um eixo central de descarbonização do setor, contribuindo para reduzir ineficiências no processo produtivo. A digitalização dos processos pode ter uma contribuição muito significativa na eficiência energética, aumentando o seu potencial de redução do consumo energético através de um controlo rigoroso do processo produtivo em tempo real. No eixo **vetores energéticos** atua-se ao nível da substituição de fontes energéticas de origem fóssil, com o objetivo de diminuir a utilização de gás natural e produtos petrolíferos, que constitui um dos consumos mais significativos no setor de fundição. A **compensação e captura de carbono** surge como uma solução

complementar, na situação em que eletrificar ou substituir os vetores energéticos por FER não é suficiente para neutralizar as emissões ou não é viável técnica e economicamente.

Importa ainda salientar que as medidas de economia circular (eg. incorporação de matérias-primas recicladas) não foram analisadas neste contexto por se encontrarem fora do âmbito de análise (redução das emissões de Âmbito 3³⁷ do setor de fundição). No entanto, é importante destacar que a energia incorporada nas matérias-primas representa uma fonte relevante de emissões associadas à atividade do setor.

37. As emissões de âmbito 3 constituem emissões indiretas que ocorrem ao longo da cadeia de valor, de acordo com a classificação estabelecida pelo Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol Standard, 2020).

Eixo I: Eficiência Energética

Implementação de medidas de eficiência energética

A eficiência energética é o pilar-chave da descarbonização do setor, com soluções maduras e de rápida aplicação, nomeadamente, a melhoria no processo de fusão (melhorias nos fornos de cuba, cadinho, revérbero e indução), a recuperação de calor (pré-aquecimento da carga e do ar de combustão, reaproveitamento de gases quentes) e a digitalização dos processos (monitorização em tempo real, sistemas de gestão de energia, controlo avançado e manutenção preventiva).

As visitas técnicas elaboradas no âmbito deste roteiro evidenciam que várias fundições nacionais já implementaram diversas MTD alinhadas com o novo BREF-SF, com ganhos mensuráveis em consumo específico e estabilidade operacional. Persistem, contudo, oportunidades relevantes, desde a redução de perdas térmicas por isolamento e vedação, otimização de ciclos de arranque/paragem e do uso de materiais. Em qualquer dos casos, a eficiência energética é simultaneamente a via mais imediata e custo-efetiva para reduzir emissões de Âmbito 1 e 2 e um pré-requisito para etapas subsequentes da transição, pelo que deve ser tratada como medida prioritária no roteiro de descarbonização do setor.

Eixo II: Vetores energéticos

Eletrificação dos processos industriais

A eletrificação dos processos industriais³⁸ constitui uma medida relevante para a descarbonização do setor de fundição, ao permitir reduzir a dependência de combustíveis fósseis, nomeadamente o gás natural utilizado nos fornos. Esta medida apresenta um elevado potencial de redução de emissões, mas implica também custos de investimento significativos, dado que envolve a substituição de equipamentos anteriormente alimentados por combustíveis fósseis por equipamentos elétricos. Por essa razão, a eletrificação não se configura, em muitos casos, como uma solução de curto prazo, sendo mais viável numa perspetiva de médio a longo prazo, à medida que os equipamentos são renovados e a infraestrutura é modernizada.

Autoconsumo com fontes de energia renovável

A utilização de energia renovável produzida localmente nas instalações das fundições constitui uma medida de descarbonização, ao permitir suprir parte das necessidades energéticas do processo produtivo com eletricidade de origem renovável. Esta abordagem contribui diretamente para a redução das emissões associadas ao consumo de eletricidade, uma vez que evita a dependência da eletricidade fornecida pela rede, cujo *mix* energético nacional não é totalmente descarbonizado. O autoconsumo minimiza ainda a exposição à volatilidade dos preços da eletricidade. Além do autoconsumo, as Comunidades de Energia Renovável (CER) também são uma possibilidade estratégica que permite o consumo partilhado de energia com indústrias e empresas vizinhas.

38. Pressupondo que a eletricidade utilizada é proveniente de FER.



Eixo III: Captura e armazenamento de carbono

Integração do hidrogénio como combustível alternativo

A integração do hidrogénio como combustível alternativo constitui uma medida para a descarbonização do setor de fundição, que visa a substituição parcial ou total do gás natural utilizado nos fornos industriais. Esta solução apresenta potencial significativo para a redução das emissões de GEE, sobretudo se o hidrogénio fornecido for hidrogénio verde. No entanto, a sua aplicação em larga escala enfrenta atualmente limitações técnicas e económicas. A substituição do gás natural por hidrogénio requer investimentos elevados, associados às infraestruturas para o armazenamento e distribuição deste combustível alternativo.

Eletrificação da frota

A eletrificação da frota constitui uma medida relevante no contexto da descarbonização do setor de fundição, uma vez que, à escala nacional, o consumo de produtos petrolíferos neste setor está sobretudo associado à frota de transporte, e, de forma residual, ao funcionamento de geradores de emergência. A substituição progressiva de veículos a combustão por veículos elétricos representa, assim, uma oportunidade de redução das emissões associadas às operações de logística do setor.

Esta medida encontra-se alinhada com o quadro regulatório europeu, nomeadamente com os novos regulamentos de emissões para veículos ligeiros e pesados e com a Comunicação da Comissão Europeia de 2025 sobre a descarbonização das frotas corporativas. De acordo com este enquadramento, a partir de 2035, apenas carros e carrinhas com emissões zero poderão ser registados na União Europeia, e, no caso dos veículos pesados, as metas definidas apontam para uma redução de 90% das emissões de CO₂ a partir de 2040.

Integração de soluções de captura e armazenamento de carbono

A captura e armazenamento de carbono (CCS/CCUS) constitui a tecnologia que permite capturar as emissões de CO₂ diretamente no processo de combustão (gases de exaustão). Apesar de esta tecnologia não requerer alteração dos processos e fornos, necessita de espaço nas unidades fabris e tem um consumo energético associado à captura.

Atualmente não é uma opção tecnológica disponível de forma imediata, porque enfrenta limitações tecnológicas, custos elevados e constrangimentos operacionais (e.g. ausência de infraestrutura de transporte e armazenamento de CO₂ em Portugal). No entanto, apresenta um elevado potencial de redução de emissões, podendo atingir taxas de captura entre 90% e 99%. Os custos de captura variam de forma significativa consoante o processo industrial, a pureza dos gases e a concentração de CO₂ nos efluentes enquanto os custos de transporte e armazenamento dependem sobretudo da distância aos locais de deposição e da existência de infraestruturas adequadas.

Compensação de emissões

A compensação de emissões de GEE deve ser encarada como um complemento da mitigação de emissões, apenas em casos que não é viável reduzir ou remover as emissões de GEE remanescentes. Tipicamente envolve que a entidade emissora adote uma ou ambas das seguintes ações:

- a. Pagar para que outras empresas do setor emitam menos GEE evitando o uso de tecnologias poluentes, e/ou
- b. Pagar para que seja promovida a remoção de CO₂ da atmosfera (sequestro de carbono), via CCUS ou via sumidouros como florestas e matos.

Este intercâmbio pode ocorrer dentro do mesmo país ou em mercados de carbono internacionais.

Esta pode vir a ser uma solução para se atingir a neutralidade carbónica no setor de fundição, para neutralizar a fração de emissões que não conseguem ser evitadas. Em Portugal, em janeiro de 2024 foi criado o Mercado Voluntário de Carbono (MVC) nacional que irá facilitar o investimento em projetos de mitigação em território nacional por "indivíduos, instituições públicas, organizações privadas ou empresas que pretendam compensar emissões de GEE de uma determinada atividade, serviço ou evento"³⁹.

Contudo, as emissões compensadas não podem ser subtraídas às do setor. Devem ser reportadas de forma individualizada, indicando: (a) o âmbito da compensação e/ou neutralização, (b) o volume de emissões de GEE que são compensadas e (c) quais os créditos de carbono que foram utilizados, incluindo o esquema de *standard* e o tipo de projeto adotados.

5.3 Avaliação do Potencial das Medidas de Descarbonização

O desenvolvimento de trajetórias custo-eficientes pressupõe uma análise da adequabilidade e viabilidade de implementação das medidas de descarbonização no contexto nacional, com base num conjunto de critérios definidos. Os critérios de avaliação considerados foram os seguintes:

- **Nível de Maturidade Tecnológica** (TRL - *Technology Readiness Level*): Reflete o grau de desenvolvimento e prontidão da tecnologia, numa escala de 1 a 9. Quanto mais elevado o TRL, maior a probabilidade de sucesso na sua implementação no setor de fundição em Portugal;
- **Custo-eficiência**: Avalia a relação entre os custos totais de investimento e operação e os benefícios esperados a nível da redução de emissões. Este critério permite identificar as soluções com melhor retorno ambiental e económico;
- **Impacte Esperado na Redução de Emissões**: Estima o potencial de mitigação de emissões GEE decorrente da adoção da medida, sendo um critério central para a sua priorização no contexto da transição climática do setor;
- **Viabilidade Técnica**: Avalia se a medida é exequível do ponto de vista técnico no contexto das fundições em Portugal, considerando fatores como a infraestrutura existente, a compatibilidade com os sistemas em operação e a complexidade de integração da tecnologia.

Cada medida foi avaliada segundo a escala pré-definida para cada critério, conforme descrito na Tabela 11. Adicionalmente, foi adotado um sistema de codificação por cores, com o objetivo de facilitar a interpretação dos resultados e permitir uma comparação visual rápida entre as diferentes medidas de descarbonização analisadas.

39. <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc24/comunicacao/comunicado?i=governo-operacionaliza-mercado-voluntario-de-carbono-e-incentiva-o-surgimento-de-projetos->

Critério	Escala	Descritivo
TRL	1-3	Tecnologias em estágio inicial - pouca prontidão para aplicação prática.
	4-6	Tecnologias em fase piloto ou de demonstração em ambiente relevante, com viabilidade técnica parcialmente comprovada.
	7-9	Tecnologias maduras, já implementadas em escala industrial - prontas para aplicação imediata no setor.
Custo-eficiência	Baixo	Custos elevados face aos benefícios.
	Médio	Custos e benefícios equilibrados, implementação viável com retorno a médio prazo.
	Alto	Baixo custo e/ou benefícios significativos.
Impacte esperado na redução de emissões	Baixo	Redução de emissões limitada, com impacte pouco relevante para a descarbonização do setor.
	Médio	Redução de emissões considerável, contribuindo de forma relevante para metas setoriais.
	Alto	Redução de emissões muito significativa, com potencial para transformar o desempenho ambiental do setor.
Viabilidade técnica	Baixa	Barreiras técnicas elevadas e incompatibilidades com infraestrutura existente.
	Média	Algumas limitações técnicas ou necessidade de adaptações - compatibilidade parcial com sistemas atuais.
	Alta	Elevada viabilidade técnica e soluções compatíveis com a infraestrutura atual.

Tabela 11 - Escala de avaliação aplicada a cada critério, com os respetivos descritivos, utilizada na análise da viabilidade de implementação das medidas de descarbonização no setor nacional de fundição

Os resultados desta análise, consolidados na Tabela 12, oferecem uma visão abrangente sobre a viabilidade da adoção das medidas de descarbonização no contexto do setor de fundição em Portugal.

Medidas	TRL	Custo-eficiência	Impacte esperado	Viabilidade técnica
Implementação de medidas para a eficiência energética	7-9	Alto	Médio	Alta
Eletrificação dos processos industriais	4-6	Médio	Alto	Média
Autoconsumo com fontes de energia renovável	7-9	Médio	Médio	Alta
Integração do hidrogénio como combustível alternativo	4-6	Baixo	Médio	Média
Eletrificação da frota	7-9	Médio	Baixo	Alta
Integração de soluções de captura e armazenamento de carbono	1-3	Baixo	Alto	Baixa

Tabela 12 - Avaliação da viabilidade de implementação das medidas de descarbonização no setor de fundição em Portugal, com base nos critérios TRL, Custo-eficiência, Impacte esperado e Viabilidade técnica

A **eletrificação dos processos industriais** é uma das soluções mais críticas para uma efetiva descarbonização do setor de fundição. Apresenta um potencial elevado de redução de emissões de GEE pela sua capacidade de eliminar de forma integral a utilização de gás natural e pela descarbonização da rede elétrica nacional. Apesar de apresentar uma maturidade média atualmente, os seus custos de investimento iniciais são muito significativos. A eletrificação é especialmente importante no setor dos metais não ferrosos, onde permitiria descarbonizar a atividade produtiva. Contudo, exigiria custos de investimento muito elevados para fazer a substituição integral dos fornos a gás. É expectável que estes equipamentos e tecnologias aumentem a sua maturidade nos próximos anos, generalizando-se a sua utilização nas várias indústrias nacionais, e consequentemente diminuindo de forma significativa os seus custos de investimento.

A integração parcial de **hidrogénio** na rede nacional de gás natural está contemplada na Estratégia Nacional para o Hidrogénio (EN-H2)⁴⁰, lançada em 2020, com metas estabelecidas para 2030 de 10 a 15% de injeção de hi-

drogénio verde na rede. Os custos de investimento não serão suportados pelas empresas, que só pagarão pela sua utilização. Atualmente os custos do hidrogénio verde rondam os 55 €/GJ⁴¹ mas a perspetiva é a de que continuem a descer à medida que aumentem as unidades de produção. Atualmente, o custo do gás natural situa-se entre os 17 e os 26 €/GJ⁴², pelo que se perspetiva um custo operacional significativo (>30%) com a injeção parcial de hidrogénio na rede nacional de gás natural.

Pressupõe-se que venha a existir algum desafio no crescimento do hidrogénio injetado na rede, caso a eletrificação dos fornos e outras tecnologias industriais avancem de forma significativa, colocando em risco a utilização do hidrogénio e eliminando completamente a utilização de gás natural. No entanto, prevê-se que as duas tecnologias coexistam e se desenvolvam na década entre 2030 e 2040, onde se tornarão mais claros os benefícios e as limitações das duas tecnologias e a sua contribuição rumo à neutralidade carbónica. Ainda assim, é de sublinhar a crescente incerteza face ao desenvolvimento e implementação das tecnologias de hidrogénio em Portugal.

40. <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc22/comunicacao/documento?i=plano-nacional-do-hidrogenio>

41. Hydrogen Europe. (2024). Clean Hydrogen Production Pathways, Report 2024.

42. Electricity and natural gas prices

Já a **captura de carbono**, através das tecnologias de captura e armazenamento de CO₂, não se configura atualmente como uma solução devido ao seu custo e a desafios técnicos e estruturais. Hoje os custos das tecnologias de captura são uma função do volume, concentração e pressão do fluxo efluente de CO₂, da tecnologia utilizada e situam-se entre os 25-120 €/tCO₂.⁴³ A estes, ainda será necessário somar custos de transporte e armazenamento, que podem ascender a mais de 70 €/tCO₂.⁴¹ Existem vários projetos em desenvolvimento ao longo da cadeia de valor e intensa investigação e desenvolvimento (I&D) nas diversas vertentes tecnológicas. O foco do desenvolvimento tem sido em indústrias críticas, como o cimento, o processamento de gás natural ou a produção de aço/ferro, em projetos muito promissores. É uma tecnologia que requer um avanço significativo de I&D, ao longo de vários anos, até se tornar disseminada e atingir custos mais comportáveis para as empresas de pequena escala. A compensação de emissões pode vir a ter um papel importante, ao ser utilizada como complemento à eletrificação de processos, hidrogénio e captura de carbono, que constituem tecnologias de impacto mais elevado, mas de maior incerteza, permitindo atuar como solução temporária.

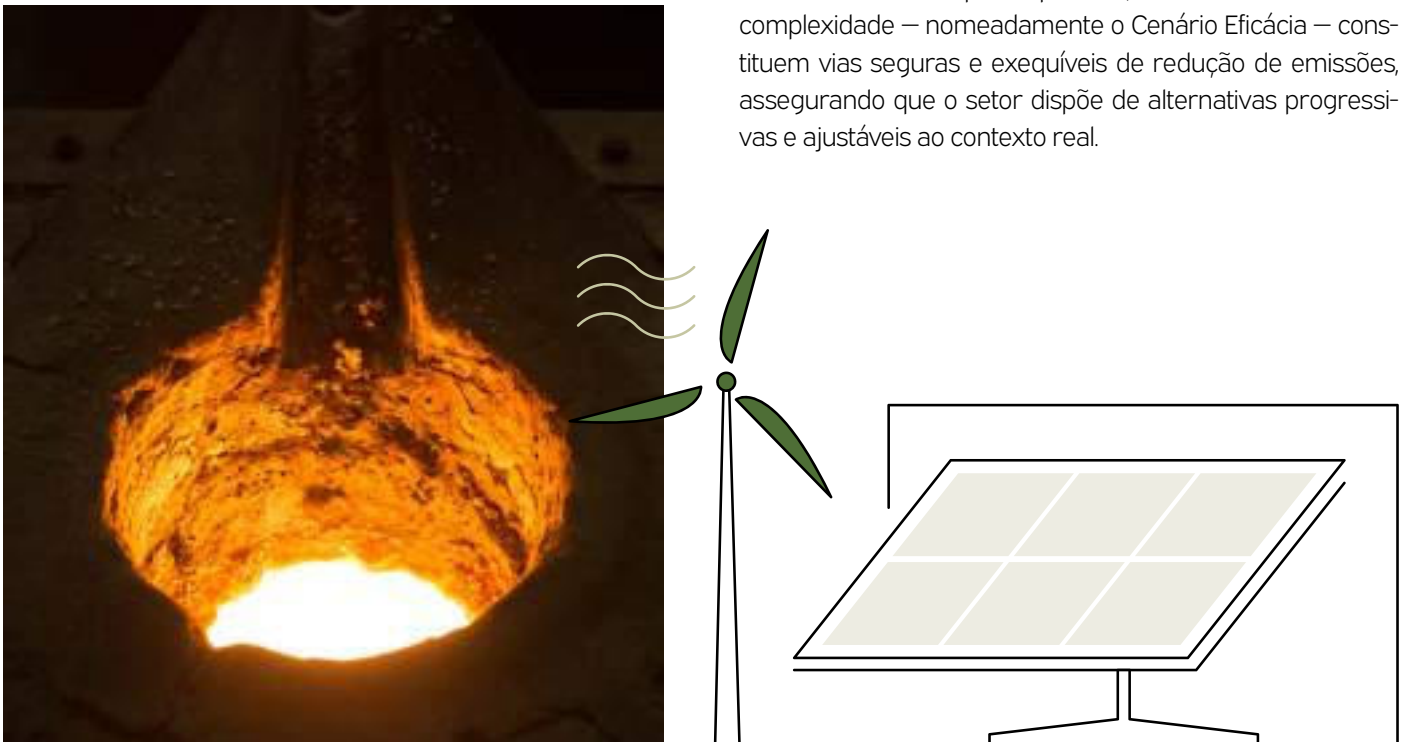
5.4 Cenários de Descarbonização

5.4.1 Definição de Cenários

Foram definidos três cenários incrementais de descarbonização, que se configuram como níveis progressivos de ambição tecnológica e operacional:

- **Cenário Eficácia:** Inclui as medidas mais imediatas, tecnologicamente maduras e custo-eficientes, já disponíveis para implementação no curto prazo;
- **Cenário H₂:** Integra todas as medidas do Cenário Eficácia, acrescidas da introdução do hidrogénio como vetor energético em substituição parcial do gás natural;
- **Cenário Captura CO₂:** Acrescenta, às medidas dos cenários anteriores, a tecnologia de CCS/CCUS, considerada a mais ambiciosa e com menor grau de maturidade e viabilidade no contexto nacional atual.

Os cenários apresentados devem ser entendidos como opções alternativas para o setor, funcionando como diferentes planos de contingência face à evolução tecnológica, económica e regulatória. Caso determinadas tecnologias não se revelem viáveis no prazo previsto, os cenários de menor complexidade – nomeadamente o Cenário Eficácia – constituem vias seguras e exequíveis de redução de emissões, assegurando que o setor dispõe de alternativas progressivas e ajustáveis ao contexto real.



43. JRC (2024). Carbon capture, utilisation and storage in the European Union, Status report on technology development, trends, value chains & markets. Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC134999>

A Figura 20 apresenta as medidas de descarbonização consideradas em cada um dos cenários definidos.



Figura 20 - Medidas de descarbonização consideradas em cada um dos cenários modelados

Importa reforçar que estes cenários não devem ser interpretados como opções comparativas, mas sim como trajetórias progressivas, que posicionam o setor de acordo com diferentes níveis de ambição tecnológica e de investimento.

Para o desenvolvimento dos cenários foram identificados os vetores energéticos impactados por cada medida

(Figura 21). Em cada um dos cenários, o consumo total de energia no setor é calculado pela soma do consumo de cada um dos cinco vetores energéticos identificados, e as emissões de GEE calculadas com base nos fatores de emissão (FE) específicos por vetor, permitindo uma avaliação detalhada do impacto de cada medida ao longo do tempo.



Figura 21 - Vetores energéticos impactados pelas medidas de descarbonização consideradas nos cenários

Cenário Eficácia

O Cenário Eficácia assume que o setor promove esforços para a redução das emissões de GEE através da implementação de um conjunto de medidas de descarbonização, com foco naquelas que estão mais prontamente disponíveis e que são mais custo-eficientes. A Tabela 13 sintetiza as medidas consideradas, o respetivo ano de

implementação no setor de fundição, e os vetores energéticos impactados por cada uma. Adicionalmente, identifica-se se a implementação de cada medida conduz a um aumento ou a uma redução no consumo dos vetores energéticos associados - informação que será relevante para a modelação energética e de emissões.

Medida	Início de implementação (ano)	Impacte nos vetores energéticos
Implementação de medidas para a eficiência energética (melhoria da eficiência dos fornos, recuperação de calor, digitalização)	2027	Eletricidade ▼ Gás natural ▼
Eletrificação dos processos industriais	2040	Eletricidade ▲ Gás natural ▼
Autoconsumo com fontes de energia renovável	2027	Eletricidade ▼ Autoconsumo ▲
Eletrificação da frota	2030	Eletricidade ▲ Petróleo ▼

Tabela 13 - Medidas de descarbonização consideradas no Cenário Eficácia, ano de implementação e vetores energéticos impactados

Considerando os pressupostos definidos para o Cenário Eficácia, estima-se que o setor de fundição consiga reduzir as suas emissões em cerca de 47 342 toneladas de CO₂eq até 2050, o que corresponde a uma redução aproximada de 77,0 % face aos níveis de 2025.

Adicionalmente, assume-se que o setor beneficiará da progressiva descarbonização da rede elétrica nacional - um fator exógeno ao seu controlo - o que contribuirá para a redução das emissões associadas ao consumo de eletricidade, complementando as reduções obtidas pelas medidas implementadas.

Cenário H₂

O Cenário H₂ é construído como um desenvolvimento incremental do Cenário Eficácia, integrando todas as medidas anteriormente consideradas, com o acréscimo de uma nova medida de descarbonização: a substituição parcial de combustíveis fósseis por hidrogénio. Desta forma, o Cenário H₂ não é comparável ao Cenário Eficácia em termos de alternativas mutuamente exclusivas, mas representa um aumento do grau de ambição do setor rumo à neutralidade carbónica. A nova medida introduzida não é tão imediata ou custo-eficiente como as anteriores, uma vez que depende do progresso tecnológico, da disponibilidade de infraestruturas e da viabilidade económica da produção e fornecimento de hidrogénio.

A Tabela 14 apresenta uma síntese das medidas integradas no Cenário H₂, os respetivos anos de início de implementação no setor de fundição, os vetores energéticos afetados por cada medida, bem como a natureza do seu impacto (aumento ou redução do consumo de cada vetor).

Medida	Início de implementação (ano)	Impacte nos vetores energéticos
Medidas do Cenário Eficácia	Mantêm-se os anos de início de implementação das medidas do Cenário Eficácia, assim como os respetivos impactes nos vetores energéticos (consultar Tabela 13).	
Integração do hidrogénio como combustível alternativo	2041	Hidrogénio ▲ Gás natural ▼

Tabela 14 - Medidas de descarbonização consideradas no Cenário H₂, ano de implementação e vetores energéticos impactados

Importa referir que, para além dos vetores energéticos gás natural e hidrogénio, a medida de integração do hidrogénio como combustível alternativo poderá também implicar um aumento do consumo de energia elétrica. Este aumento poderá estar associado a necessidades operacionais adicionais, como por exemplo a pressurização do hidrogénio, o controlo de temperatura dos fornos ou o pré-aquecimento do hidrogénio antes da sua utilização. No entanto, para efeitos de simplificação do modelo, estas variações adicionais no consumo de eletricidade não são consideradas na modelação deste cenário, sendo o impacto energético da medida analisado exclusivamente com base nos vetores gás natural (redução) e hidrogénio (aumento).

No total, estima-se que o Cenário H₂ permita uma redução acumulada de cerca de 49 035 toneladas de CO₂eq até 2050, o que corresponde a uma diminuição de aproximadamente 79,8% face aos níveis de emissões registados em 2025.

Adicionalmente, e à semelhança do assumido no Cenário Eficácia, o setor beneficia da progressiva descarbonização da rede elétrica nacional, um fator externo ao seu controlo direto, mas que contribui para a redução das emissões associadas ao consumo de eletricidade ao longo do tempo.

Cenário Captura CO₂

O Cenário Captura CO₂ resulta de uma progressão incremental face ao Cenário H₂, integrando todas as medidas já contempladas nesse cenário e acrescentando a captura e armazenamento de carbono de forma a neutralizar as restantes emissões. Esta medida representa o grau máximo de ambição tecnológica do setor no caminho para a neutralidade carbónica, ainda que atualmente se trate de uma solução com baixa maturidade e limitada implementação no contexto nacional. A sua inclusão visa explorar o potencial de longo prazo associado a tecnologias disruptivas com elevada capacidade de mitigação.

A Tabela 15 sintetiza as medidas contempladas no Cenário Captura CO₂, o respetivo ano de início de implementação no setor de fundição, os vetores energéticos impactados e o efeito estimado sobre o consumo ou redução dos mesmos.

Medida	Início de implementação (ano)	Impacte nos vetores energéticos
Medidas do Cenário H ₂	Mantêm-se os anos de início de implementação das medidas do Cenário H ₂ , assim como os respetivos impactes nos vetores energéticos (consultar Tabela 13)	
Integração de soluções de captura e armazenamento de carbono	2045	Eletricidade ▲

Tabela 15 - Medidas de descarbonização consideradas no Cenário Captura CO₂, ano de implementação e vetores energéticos impactados

Estima-se que o Cenário Captura CO₂ permita uma redução acumulada de cerca de 60 466 toneladas de CO₂eq até 2050, o que representa uma diminuição aproximada de 98,4% face aos níveis de emissões registados em 2025. Tal como nos cenários anteriores, o Cenário Captura CO₂ também beneficia da descarbonização da rede elétrica nacional prevista ao longo do período de análise.

5.4.2 Trajetórias Custo-eficazes de Redução de Emissões de GEE

A Figura 22 e a Figura 23 apresentam as trajetórias de descarbonização que foram modeladas, face aos cenários de referência (BAU e RNC2050), para o consumo de energia e para as emissões, respetivamente.

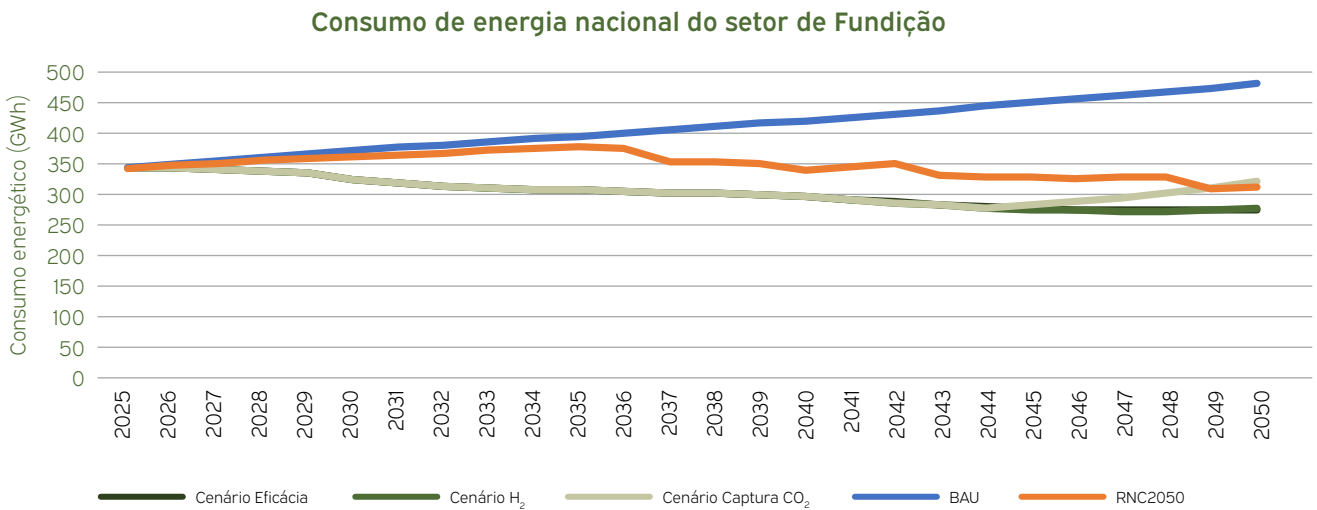


Figura 22 - Evolução do consumo de energia no setor de fundição em Portugal para os cenários BAU, RNC2050 e para os três cenários de descarbonização modelados, até 2050

Emissões nacionais do setor de Fundição

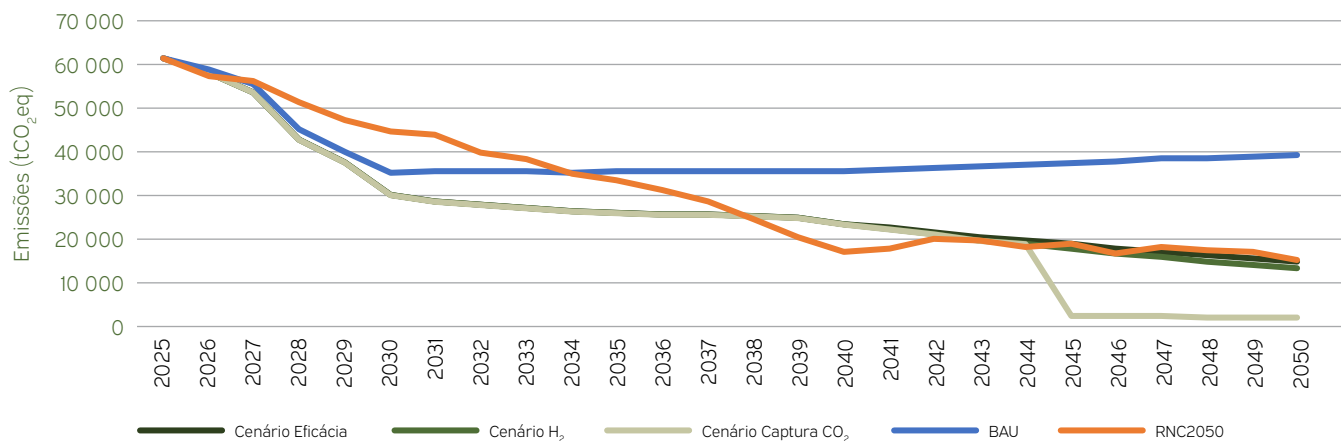


Figura 23 - Evolução das emissões no setor de fundição em Portugal para os cenários BAU, RNC2050 e para os três cenários de descarbonização modelados, até 2050

Os três cenários de descarbonização apresentam desempenhos superiores em termos de consumo energético e emissões de GEE, quando comparados com o cenário BAU. Este último reflete a evolução do setor sem medidas de mitigação, sendo apenas influenciado pela redução progressiva da intensidade carbónica da rede elétrica que só por si permite atingir uma diminuição das emissões do setor superior a 35%. Os cenários de descarbonização, que incorporam medidas específicas para a mitigação de emissões, apresentam uma trajetória mais significativa em direção à neutralidade carbónica, quer ao nível do consumo de energia quer ao nível de emissões do setor de fundição.

Relativamente ao cenário RNC2050, observa-se que os três cenários de descarbonização desenvolvidos se posicionam, quer em termos de consumo de energia, quer de emissões, abaixo da trajetória definida pelo RNC2050. Este resultado indica que os cenários de descarbonização modelados refletem um nível de ambição superior ao preconizado nas metas nacionais, evidenciando que as medidas identificadas e os seus respetivos potenciais permitem não só atingir, mas também superar os objetivos nacionais de descarbonização para o setor.

A análise do potencial de redução de emissões, evidencia que, em 2050, face a 2025, o intervalo obtido varia entre 77,0% no Cenário Eficácia e 98,4% no Cenário Captura CO₂. O Cenário Eficácia apresenta um maior impacto imediato entre 2025 e 2030, fruto das medidas de eficiência energética aplicada. Após esse período mantém uma trajetória de decréscimo estável, próxima ao cenário RNC2050, atingindo cerca de 14 100 tCO₂eq de emissões em 2050.

Apesar de atingirem valores de emissões mais baixos, as opções H₂ e CCS/CCUS podem não ser economicamente viáveis no horizonte analisado, dada a necessidade de CAPEX elevado e de infraestruturas dedicadas (fornecimento/armazenamento de H₂; captura, transporte e armazenamento de CO₂). Em contraste, com as medidas de eficiência energética, eletrificação e autoconsumo, é possível alcançar em 2050, uma redução de cerca de 47 342 tCO₂eq, com maior maturidade tecnológica, menor risco de implementação e *paybacks* tipicamente mais curtos. Face ao investimento significativo necessário na tecnologia de captura e armazenamento, uma alternativa possível para mitigar o remanescente de emissões (14 100 tCO₂eq) no Cenário Eficácia, pode ser a compensação ou aquisição de créditos de carbono, privilegiando, sempre que possível, projetos nacionais.

6. Considerações Finais



O setor de Fundição português encontra-se num momento decisivo para a sua transformação estrutural. A transição para a neutralidade carbónica é simultaneamente um desafio tecnológico e uma oportunidade de reposicionamento competitivo. O Roteiro de Descarbonização permite identificar as principais alavancas de mudança — eficiência energética, eletrificação, uso de combustíveis alternativos, economia circular e digitalização — e traduzir essas alavancas em trajetórias concretas até 2050.

As medidas propostas representam mais do que uma resposta às exigências regulamentares: são um investimento estratégico na modernização industrial, na estabilidade de custos energéticos e na criação de valor ambiental. A sua implementação progressiva exigirá coordenação setorial, políticas públicas consistentes e acesso a financiamento competitivo.

O Roteiro não define um caminho único, mas um conjunto de alternativas que funcionam como planos complementares, mitigando o risco tecnológico e garantindo flexibilidade ao setor.

A aplicação do Roteiro depende da capacidade do setor em traçar um plano de execução e adotar uma abordagem colaborativa. É essencial a constituição de uma plataforma setorial de descarbonização que promova a partilha de boas práticas, a normalização de indicadores e o acompanhamento da evolução tecnológica e regulatória. Esta plataforma deve funcionar como interface entre empresas, universidades, centros tecnológicos e autoridades públicas, potenciando sinergias e acelerando a adoção de soluções inovadoras.

Neste contexto, a Associação Portuguesa de Fundição poderá desempenhar um papel central na operacionalização, disseminação e acompanhamento do Roteiro, promovendo a articulação entre os diferentes agentes do setor e garantindo a continuidade das ações de descarbonização. Através da sua estrutura representativa, a APF poderá também facilitar o acesso das empresas a informação, formação e mecanismos de financiamento, reforçando a capacidade coletiva do setor para atingir as metas propostas

Esta plataforma nacional para a fundição sustentável poderá ambicionar a normalização de KPI do setor, a gestão da carteira de projetos e candidaturas, a publicação de métricas anuais e o apoio à criação de PPAs e clusters de infraestruturas essenciais (rede elétrica, hidrogénio e CCUS).

No curto prazo, as prioridades devem incidir na digitalização dos processos, no reforço da medição e monitorização de consumos, na substituição de equipamentos ineficientes, eletrificação de equipamentos e no desenvolvimento de projetos-piloto no hidrogénio. No médio e longo prazo, será crucial consolidar a integração das energias renováveis, o armazenamento e a captura e utilização de carbono (CCU/CCUS).

Como desenvolvimento futuro, será igualmente importante avaliar a pegada carbónica de Âmbito 3, complementando o trabalho já desenvolvido sobre as emissões diretas (Âmbito 1) e indiretas (Âmbito 2). Este esforço exigirá que o setor inicie a recolha sistemática de dados relativos a consumos, matérias-primas, transportes e fluxos de materiais, de modo a permitir monitorizar o progresso das medidas de descarbonização de forma objetiva e contínua.

O sucesso da descarbonização na fundição portuguesa será determinado pela capacidade de planeamento estratégico, pela inovação e pela mobilização de competências. O Roteiro define o caminho; cabe ao setor, em articulação com as políticas públicas, transformar esta visão em realidade. A transição energética é, acima de tudo, uma oportunidade para tornar a fundição nacional mais eficiente, competitiva e sustentável.



FundiRoad

Roteiro de Descarbonização

do Setor de Fundição em Portugal